

УДК 574.24

АНАТОМО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕЖКЛЕТНИКОВ УСТЬИЧНОГО АППАРАТА ЛИСТЬЕВ *PICEA ABIES* В УСЛОВИЯХ УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ

О. В. Поворова

старший преподаватель кафедры естествознания факультета математики и естествознания

Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова

В. А. Ливинская

доцент кафедры финансы и бухгалтер экономического факультета, кандидат физико-математических наук

Белорусско-Российский университет

И. И. Ткачев

студент кафедры естествознания факультета математики и естествознания

Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова

Показатели газообмена поперечного среза листа Picea abies (отношение суммы площадей межклетников устьичных аппаратов к площади листа на том же поперечном срезе; отношение суммы периметров межклетников устьичных аппаратов к периметру листа на том же поперечном срезе) ниже в районах городской среды произрастания растений с повышенным содержанием продуктов сгорания автотранспорта и со смешанным типом загрязнения (автотранспорт, промышленность) по сравнению с контрольным районом.

Ключевые слова: межклетники устьиц, поперечный срез листа, *Picea abies*.

Введение

Ухудшение состояния древесных растений в городской среде обитания происходит из-за множества разнообразных факторов: запыленности и загазованности атмосферы; загрязнения почв и грунтовых вод; нарушения естественного водного режима грунтовых вод; высокой плотности коммунальных сооружений, расположенных в корнеобитаемом слое; широкого распространения площадей с насыпным грунтом, полностью лишенным природных свойств почв; использования при озеленении города слабоустойчивых к загрязнению растений. Адаптивные изменения роста, морфогенеза и метаболизма древесных голосеменных растений к стрессу – специфический отклик растений на стрессовые воздействия [1]. Для основных метаболических процессов растений регулирующую функцию поступления/выведения газообразных веществ выполняет устьичный аппарат, в состав которого входят замыкающие клетки с соседними околоустьичными клетками, щель. Под щелью расположена крупная дыхательная полость (межклетник), окруженная клетками мезофилла листа. Щель может расширяться/сужаться, регулируя транспирацию и газообмен, реагируя на внешние условия и физиологические изменения в тканях листа. Из внешних факторов на устьичный аппарат больше всего влияют влаж-

ность воздуха, условия водоснабжения, свет, температура, а из внутренних – парциальное давление CO_2 в системе межклетников, состояние гидратации растения, ионный баланс, фитогормоны [2]. Основной источник загрязняющих веществ в городе – автотранспорт, поэтому вещества, содержащиеся в выбросах автотранспорта, попадают в листья при газообмене через открытые устьица, токсичные вещества накапливаются в межклетниках и через клеточные стенки проникают к клеткам мезофилла. Устьичный аппарат, регулируя поступление основного источника загрязнения городской среды – продуктов сгорания топлива автотранспорта, адаптирует растение к среде обитания, проявляя свойства газочувствительности и газоустойчивости, что может быть использовано в биомониторинге среды обитания растения.

Цель исследования – определить особенности межклетников устьичных аппаратов *Picea abies* в условиях урбанизированной среды обитания растений.

Материалы и методы исследований

Объект исследования – поперечный срез листа *Picea abies*, предмет исследования – периметр и площадь поперечного среза листа, периметр и площадь межклетника каждого устьица.

Выбирались места произрастания деревьев на удалении 20–40 м от автомобильных дорог с дополнительной нагрузкой, снижающей уровень доступной почвенной влаги для растения и характеризующей экосистему города, – вытапывание, асфальтное или плиточное покрытие вдоль мест произрастания голосеменных растений. В черте г. Могилева выбраны три района произрастания растений с повышенным содержанием продуктов сгорания топлива автомашин: Р1 – ул. Бялыницкого-Бирули 5, 7, 7а; Р2 – ул. Якубовского 55, 69, 69а; Р3 – центр города – ул. Первомайская, д.25, ул. Пионерская 23а. Четвертый район Р4 со смешанным типом загрязнения (автотранспорт, промышленность) – ОАО «Можелит» (ул. Челюскинцев). В качестве контроля (К) был выбран пригород Могилева, д. Затишье.

На каждом участке отбирали по десять листьев одинаковой длины на высоте 150–170 см от поверхности земли с трех взрослых деревьев Ели европейской в солнечные дни в 12 часов (20–22°C) с одинаковой влажностью воздуха (68–70 %) в три периода активного вегетативного сезона 2025 года: НВС – начало вегетативного сезона (последняя неделя мая, после цветения), СВС – середина вегетативного сезона (середина июля), КВС – конец активного вегетативного сезона (первая неделя сентября).

Для изучения особенностей межклетников устьиц на поперечном срезе иглового листа *Picea abies* использовали методы исследования – гистологический метод приготовления окрашенных препаратов поперечного среза листа, метод микроскопирования, метод фотосъемки, статистические методы анализа.

На предметном стекле делали тонкий поперечный срез листа лезвием, который препаративной иглой переносили в 1 каплю 1%-ного раствора флороглюцина. Через минуту добавляли 1,2 капли дымящей соляной кислоты и накрывали покровным стеклом, микроскопировали на «Биолам» (окуляр х7, объектив х8, при этом изначально было установлено соответствие между длиной в 1 миллиметр, и размерами, нанесенными на окуляр), фотографировали. Фотографии обрабатывали в программе ImageJ на персональном компьютере с операционной системой «Windows 10». Методика обработки фотографий срезов:

- В меню «File» во вкладке «Open» выбрать необходимую фотографию.
- Инструментом «Straight» выделяем отрезок на фотографии, длиной в миллиметр.
- В меню «Analyze» выбираем вкладку «Set Scale».
- В окне «Set Scale» выставаем известную дистанцию в 1 миллиметр и ставим галочку рядом с надписью «Global» для того, чтобы все последующие фотографии обрабатывались с теми же выставленными значениями.
- В меню «Set Measurements» выбираем параметры, которые необходимо измерить.
- С помощью инструмента «Polygon selections» выделяем часть среза, параметры которой нужны для работы.
- В меню «Analyze» в самом верху нажимаем вкладку «Measure», и необходимые параметры появляются в отдельном окне, которые переносим в сводную таблицу.

Проводили один поперечный срез по середине одного листа. В каждом районе исследования проанализировано 90 срезов (по 10 листьев с каждого дерева, три дерева, три периода наблюдения), в целом – 450 срезов. Проводились расчеты периметров и площадей каждого межклетника устьиц на одном поперечном срезе листа. Рассчитывали два показателя, характеризующих эффективность газообмена (X) на поперечном срезе хвоинки:

- Эффективная площадь газообмена (X1) как отношение суммы площадей межклетников устьиц к площади листа на том же поперечном срезе по формуле $X1 = \sum S_n / S$,

- Эффективная поверхность газообмена (X2) как отношение суммы периметров межклетников устьиц к периметру листа на том же поперечном срезе по формуле $X2 = \sum P_n / P$,

где P – периметр и S – площадь поперечного среза листа,

P_n – периметр и S_n – площадь каждого межклетника устьиц на поперечном срезе листа.

Результаты исследований

Согласно литературным данным, токсичные вещества накапливаются в межклетниках и через клеточные стенки проникают к клеткам мезофилла. В настоящем исследовании определено, что число устьиц снижено в районах с повышенной экологической нагрузкой в 1,2–1,3 раза в активные периоды вегетации по сравнению с контрольным районом. Определив, что число устьиц может быть биоиндикационным параметром [3], характеризующим газочувствительность голосеменных растений к химическим поллютантам в условиях промышленного города, были изучены параметры межклетников устьиц как газовоспринимающего аппарата растений (Таблица 1). Как видно из данных Таблицы 1, медиана значений периметров и площадей межклетников устьиц выше в контрольном районе в начальных периодах вегетации по сравнению с более поздними периодами наблюдения, а также со всеми изучаемыми районами урбанизированных территорий. Медиана периметра межклетников в начале активного вегетативного сезона выше в 1,21 и 1,23 раза по сравнению с периодами СВС и КВС у растений контрольного района; в других изучаемых районах определена схожая тенденция, однако с менее выраженной закономерностью. Таким образом, нами определено, что в районах произрастания с дополнительными поллютантами снижается число устьиц, периметр и площадь межклетников устьиц.

Для характеристики эффективности газообмена и транспирации растений нами рассчитаны показатели: общий периметр/общая площадь поперечного среза листа, суммарный периметр/суммарная площадь всех межклетников устьиц на данном срезе при помощи специальной компьютерной программы и рассчитали соотношение данных показателей. Растениям помогает сохраниться в условиях повышенного загрязнения выключение газовоспринимающего аппарата (устьиц). Результаты изучения эффективной поверхности поперечного среза листа для газообмена и транспирации растений в зависимости от экологических факторов среды жизни представлены на рисунке 1. На графике представлены ящики с усами (boxplots), где центральная линия в ящике соответствует медиане, границы ящика – первому (Q1) и третьему (Q3) квартилям (межквартильный размах, IQR). Усы простираются до самых крайних наблюдений, находящихся в пределах $1,5 \times \text{IQR}$ от соответствующего квартиля. Наблюдения за пределами этого диапазона считаются выбросами (в данном исследовании не отображены). Разноцветные боксплоты рассчитаны по результатам исходных данных и окрашены в соответствии с этапом проведения измерений в зависимости от периода активного вегетативного сезона растения. Как видно из данных рисунка, медиана значений эффективности газообмена по двум изучаемым показателям (X1 и X2) у деревьев контрольного района во все периоды активного вегетационного сезона выше в 1,4–1,6 раз по сравнению с деревьями урбанизированных территорий. Параметрический t-тест, t-тест с поправкой Бонферрони для множественных сравнений выявили, что рассчитанные показатели X1 и X2 растений, произрастающих в черте города во всех четырех изучаемых районах, статистически значимо отличаются от показателей растений контрольного района (в каждом районе P1, P2, P3, P4, в каждом из трех периодов активного вегетативного сезона НВС, СВС, КВС; $p < 0,001$).

Таким образом, показатели устьичных аппаратов (число устьиц, периметр и площадь межклетников) являются чувствительными к факторам городской среды обитания. Межклетник устьичного аппарата образован оболочками клеток мезофилла листа, поэтому чем больше периметр и площадь межклетника, тем больше содержится в нем газообразных веществ и тем больше их включится в обмен веществ растения. В качестве биоиндикатора газочувствительности Ели европейской определены показатели межклетников устьичных аппаратов, рассчитанные как отношение суммы площадей/периметров межклетников к площади/периметру листа на том же поперечном срезе, которые могут быть рекомендованы при озеленении урбанизированных территорий для выбора газоустойчивых видов и сортов растений, экологическом мониторинге их среды обитания.

Для озеленения городов с повышенной антропогенной нагрузкой рекомендуются только те виды растений, которые устойчивы к промышленным и автотранспортным поллютантам, легко переносят городские условия. По степени газоустойчивости *Picea abies* относится, по Н. Десслеру, к очень чувствительным видам древесных растений к факторам городской среды обитания [4]. Газоустойчивость различных сортов *Picea abies* варьирует от низких до высоких показателей. Так, например, сорта *Picea abies* «*Acrocona*» и «*Nidiformis*» определены как менее перспективные и перспективные, соответственно, для озеленения городских территорий [5]. Для успешного выращивания голосеменных растений рекомендуют использовать семена, адаптированные к местным условиям ландшафтной среды [6, 7], поэтому перспективным для г. Могилева представляется получение поса-

дочного материала из семян *Picea abies* тех растений, которые сейчас произрастают в черте города.

Заключение

Число устьиц, периметр и площадь межклетников устьиц на поперечном срезе листа *Picea abies* ниже у растений, произрастающих в урбанизированной среде. Эффективная площадь газообмена (отношение суммы площадей межклетников устьичных аппаратов к площади поперечного среза листа) и эффективная поверхность газообмена (отношение суммы периметров межклетников устьичных аппаратов к периметру поперечного среза листа) ниже 1,4–1,6 раз в районах городской среды обитания растений с повышенным содержанием продуктов сгорания топлива автомашин и со смешанным типом загрязнения (автотранспорт, промышленность) по сравнению с контрольным районом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Wang, L. Stomatal improvement for crop stress resistance / L. Wang, C. Chang // J Exp Bot. – 2024. – Vol. 75, № 7. – P. 1823–1833. – DOI: 10.1093/jxb/erad 477.
2. Hofmann, T. A. Impact of climate-driven changes in temperature on stomatal anatomy and physiology / T. A. Hofmann, W. Atkinson, M. Fan [et al.] // Philosophical Transactions. – 2025. – Vol. 380(1927). – P. 20240244. – DOI: 10.1098/rstb.2024.0244.
3. Поворова, О. В. Влияние качества урбанизированной среды г. Могилева на количественные характеристики устьиц Сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) / О. В. Поворова, В. А. Ливинская // Веснік МДУ імя А. А. Куляшова. Сер. В. Прыродазнаўчыя навукі. – 2019. – № 2 (54). – С. 79–89.
4. Самохвалов, К. В. Опыт разработки рекомендательного списка древесных растений для озеленения и реконструкции зеленых насаждений города Чебоксары на основе оценки качества городской среды / К. В. Самохвалов, Е. А. Синичкин // Самарский научный вестник. – 2020. – Т. 9, № 3. – С. 122–128.
5. Гнаткович, П. С. Перспективные виды и формы хвойных экзотов для озеленения населенных пунктов северных территорий Иркутской области / П. С. Гнаткович, Е. М. Рунова // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 6. – С. 13–21.
6. Тюкавина, О. Н. Практика повышения посевных качеств семян Сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и Ели европейской (*Picea abies* L.) / О. Н. Тюкавина, Н. А. Демина // Лесной вестник. – 2022. – Т. 26, № 6. – С. 75–91.
7. Воробьев, Р. А. Эффективность создания лесных культур Ели европейской в Нижегородской области / Р. А. Воробьев, Н. Н. Бессчетнова, В. П. Бессчетнов [и др.] // Вестник Нижегородского государственного агротехнологического университета. – 2023. – Т. 40, № 4. – С. 24–35.

Поступила в редакцию 16.12.2025 г.

Контакты: povorov@mail.ru (Поворова Оксана Викторовна), viktoriya.livinskaya@mail.ru (Ливинская Виктория Александровна), srazyivse@gmail.com (Ткачев Илья Игоревич)

Povarava A. V., Livinskaya V. A., Tkachou I. I. ANATOMO-MORPHOLOGICAL FEATURES OF THE INTERCELLULAR STRUCTURE OF THE *PICEA ABIES* LEAVES IN AN URBANIZED ENVIRONMENT

The gas exchange indicators of the cross-section of the leaf (the ratio of the sum of the areas of the intercellular spaces to the area of the leaf on the same cross-section; the ratio of the sum of the perimeters of the intercellular spaces to the perimeter of the

leaf on the same cross-section) are lower in the areas of urban habitat of plant growth with increased content of combustion products of motor vehicles and with mixed type of pollution (motor transport, industry) in comparison with the control area.

Keywords: intercellular spaces of stomata, cross-section of the leaf, *Picea abies*.

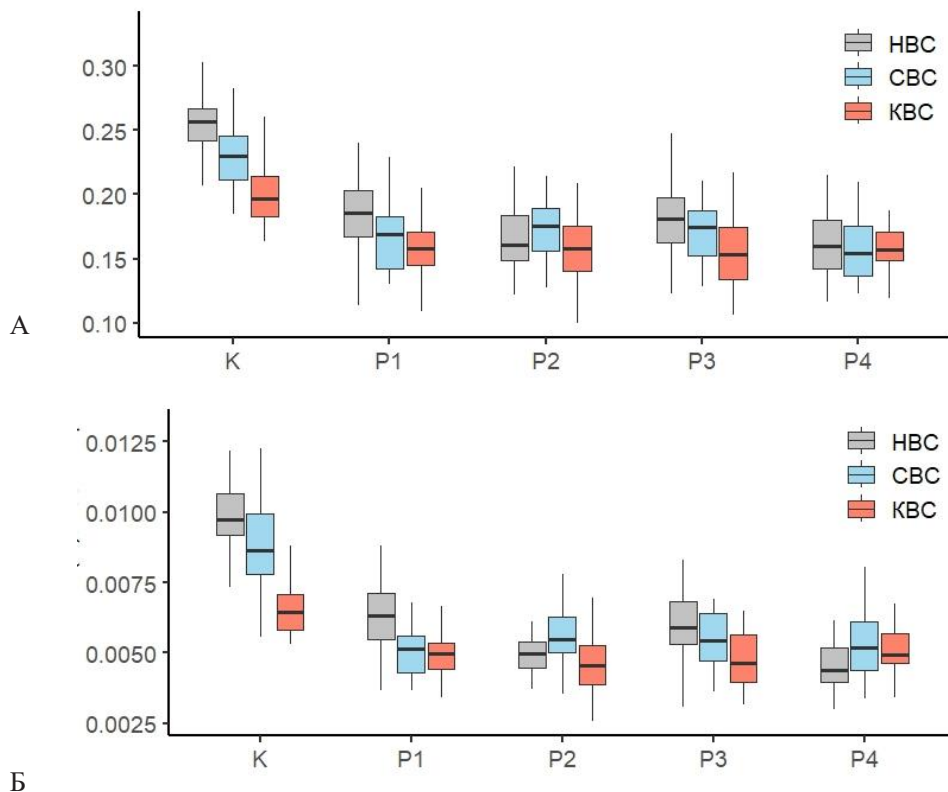


Рисунок 1 – Эффективная поверхность (А) и площадь (Б) газообмена поперечного среза листа *Picea abies* (ось X – районы исследования; ось Y – эффективность газообмена, единицы)

Таблица 1 – Описательная статистика изучаемых параметров устьичных аппаратов листьев *Picea abies*, $Me[Q1;Q3]$

	К	P1	P2	P3	P4
НВС					
Периметр межклетника устьиц, мм	0,074[0,068;0,081]	0,063[0,056;0,073]	0,062[0,056;0,069]	0,058[0,052;0,064]	0,059[0,054;0,064]
Периметр поперечного среза, мм	6[3;8]	5,5[3;8]	5[3;8]	5,5[3;8]	5[3;8]
Площадь межклетника устьиц, мм ²	0,0004[0,0003;0,0005]	0,0003[0,0002;0,00033]	0,0002[0,00019;0,0003]	0,0002[0,00017;0,0003]	0,0002[0,00019;0,0003]
Площадь поперечного среза, мм ²	2,038[1,997;2,11]	1,955[1,88;2,028]	2,072[2,022;2,107]	1,815[1,772;1,851]	2,093[2,053;2,137]
СВС					
Периметр межклетника устьиц, мм	0,061[0,056;0,067]	0,057[0,052;0,063]	0,057[0,053;0,064]	0,058[0,052;0,064]	0,054[0,049;0,06]
Периметр поперечного среза, мм	6[3;8]	5[3;8]	5[3;8]	5[3;8]	5,5[3;8]
Площадь межклетника устьиц, мм ²	0,0003[0,00021;0,00031]	0,0002[0,00019;0,00027]	0,0002[0,00019;0,00027]	0,0002[0,00018;0,00026]	0,0002[0,00016;0,00024]
Площадь поперечного среза, мм ²	1,798[1,77;1,825]	1,994[1,962;2,041]	1,969[1,934;2,025]	1,98[1,959;2,011]	1,847[1,744;1,931]

Продолжение таблицы 1

КВС						
Периметр межклетника устийц, мм	0,06[0,054;0,067]	0,055[0,051;0,06]	0,055[0,05;0,06]	0,055[0,051;0,059]	0,054[0,048;0,059]	
Периметр поперечного среза, мм	5[3;8]	5[3;8]	5[3;8]	6[3;8]	6[3;8]	
Площадь межклетника устийц, мм ²	0,0002[0,00019;0,00032]	0,0002[0,00018;0,00025]	0,0002[0,00017;0,00025]	0,0002[0,00017;0,00024]	0,0002[0,00016;0,00023]	
Площадь по- перечного среза, мм ²	2,099[1,996;2,149]	1,965[1,939;1,981]	2,032[2,001;2,097]	1,944[1,904;2,001]	2,05[1,937;2,082]	