

Научная статья

УДК 581.5

DOI: 10.32516/2303-9922.2024.49.8

## Структурные и функциональные особенности ассимиляционного аппарата некоторых однолетних декоративных растений в условиях урбанизированной среды

Елена Витальевна Сарбаева

Марийский государственный университет, Йошкар-Ола, Россия, [sarbaevaev@mail.ru](mailto:sarbaevaev@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7274-0938>

**Аннотация.** В статье рассмотрено изменение ряда показателей ассимиляционного аппарата декоративных однолетних растений *Salvia splendens* Sellow ex Schult и *Petunia × hybrida* hort. ex E. Vilm, произрастающих в различных функциональных зонах г. Йошкар-Олы (рекреационной, селитебной, промышленной). Изучены такие показатели, как толщина верхнего и нижнего эпидермиса, высота столбчатой и губчатой паренхимы, подсчитано число устьиц на нижнем эпидермисе, исследованы показатели водного обмена — интенсивность транспирации и содержание общей воды в тканях. Установлено, что два сходных по экологическим требованиям к среде обитания вида по-разному реагируют на воздействие урбанизированной среды. У *P. hybrida* в районах с большей антропогенной нагрузкой снижалась толщина верхнего эпидермиса, толщина нижнего — практически не изменялась; при этом существенно уменьшалась высота столбчатой паренхимы, возрастало число устьиц и весьма значительно понизилось содержание общей воды. У *S. splendens* в антропогенно трансформированной среде более выражены изменения толщины нижнего эпидермиса, существенно уменьшилась интенсивность транспирации, но более стабильными были показатели оводненности тканей.

**Ключевые слова:** городская среда, декоративные однолетние растения, фитоиндикация, мезоструктура листа, оводненность тканей.

**Для цитирования:** Сарбаева Е. В. Структурные и функциональные особенности ассимиляционного аппарата некоторых однолетних декоративных растений в условиях урбанизированной среды // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. 2024. № 1 (49). С. 168—179. URL: [http://vestospu.ru/archive/2024/articles/49/8\\_49\\_2024.pdf](http://vestospu.ru/archive/2024/articles/49/8_49_2024.pdf). DOI: 10.32516/2303-9922.2024.49.8.

Original article

## Structural and functional changes in the assimilation apparatus of annual ornamental plants in urbanized environment

Elena V. Sarbaeva

Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia, [sarbaevaev@mail.ru](mailto:sarbaevaev@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7274-0938>

**Abstract.** The article examines changes in a number of indicators of the assimilation apparatus of ornamental annual plants *Salvia splendens* Sellow ex Schult and *Petunia × hybrida* hort. ex E. Vilm growing in various functional zones of Yoshkar-Ola (recreational, residential, industrial). Such indicators as the thickness of upper and lower epidermis, the height of the columnar and spongy parenchyma were studied, the number of stomata on the lower epidermis was calculated, and indicators of water metabolism were studied — the intensity of transpiration and the content of total water in tissues. It has been established that two species with similar ecological requirements for the habitat react differently to the influence of an urbanized environment. *P. hybrida* showed the thinning of upper epidermis in areas with greater anthropogenic load, while the thickness of lower epidermis remained virtually unchanged. At the same time, the height of the columnar parenchyma significantly decreased, the number

© Сарбаева Е. В., 2024

of stomata increased, and the content of total water decreased significantly. *S. splendens* demonstrated significant changes in thickness of lower epidermis in an anthropogenically transformed environment, the intensity of transpiration decreased significantly, but the indicators of tissue hydration were more stable.

**Keywords:** urban environment, ornamental annual plants, phytoindication, leaf mesostructure, tissue water content.

**For citation:** Sarbaeva E. V. Structural and functional changes in the assimilation apparatus of annual ornamental plants in urbanized environment. *Vestnik of Orenburg State Pedagogical University. Electronic Scientific Journal*, 2024, no. 1 (49), pp. 168—179. DOI: <https://doi.org/10.32516/2303-9922.2024.49.8>.

## Введение

Декоративные растения выращивают в городах для украшения и благоустройства территорий, улучшения эстетического и визуального качества среды. Они используются в ландшафтном дизайне на разных по функциональным особенностям территориях, значительно улучшая качество жизни. Несмотря на то что декоративные растения являются важными элементами зеленой инфраструктуры городов [1, с. 36—37], мы знаем о них относительно мало и зачастую недооцениваем их вклад в качество жизни. Так, при анализе растительных компонентов городских территорий данную категорию растений считают отличной от остальных, забывая, что они также являются частью урбоэкосистемы. В последние годы в связи с обострением экологических проблем и ростом глобальных вызовов декоративные растения рассматриваются не только из-за их эстетических функций, способности улучшать окружающую среду и качество нашей жизни, но и как эффективный инструмент для восстановления деградированных ландшафтов, борьбы с эрозией, снижения потребления энергии и воды, а также улучшения эстетического качества внутренней и наружной среды урбанизированных территорий.

Как показано в работе группы итальянских исследователей [29, р. 1258—1259], декоративные растения обеспечивают важные экосистемные услуги, включая производство кислорода и связывание углерода (хотя и существенно ниже, чем древесные виды), уменьшение загрязнения воздуха, некоторое снижение шума и увеличение биоразнообразия, однако более выражена у них эстетическая функция. В городах все больший интерес вызывают исследования по планированию распространения разных видов декоративных растений, которые могут обеспечить желаемое качество среды нашего обитания, ведь выгоды от экосистемных услуг зависят от особенностей урбанизированных территорий и того, как зеленые зоны распределены в них.

Представление об «экосистемных услугах» впервые подробно рассмотрено в коллективной монографии “Nature’s Services” [27], а история подходов к их оценке — в работах [25; 26]. Основы типизации экосистемных функций, благ и услуг предложены в статье [28], где выделены 4 группы функций и соответствующие им услуги: регулирующие, продукционные, информационные и местообитания. В прототипе национального доклада «Экосистемные услуги России» приведена классификация услуг наземных экосистем России, декоративные растения отнесены к категории «продукционные», услугами которых в первую очередь является «недревесная продукция леса и других наземных экосистем» [22, с. 13]. В настоящее время накоплен обширный опыт оценки экосистемных услуг лесных насаждений [10], однако в последние годы ряд исследователей оценивают и роль декоративных растений в улучшении экологических характеристик городов, подчеркивая их вклад в категорию культурных экосистемных услуг [29; 32].

При формировании зеленой инфраструктуры городов рекомендуется учитывать эффективность выполнения декоративными растениями экосистемных функций и их вклад в повышение качества жизни горожан [23, с. 24]. При этом важно учитывать самые разнообразные показатели, среди которых морфологические особенности насаждений, не-

обходимость в тех или иных экосистемных функциях насаждений в регионе (защита от шума, ветра, пыли, снегозадержание, регуляция влажности воздуха, инсоляции, выделение кислорода и т.п.), участие в гидрологических процессах, формирование почвенных условий, обеспечение устойчивости территории к рекреационным нагрузкам, использование в фиторемедиации [1, с. 42; 30, р. 1].

Повышенный интерес к экологическим проблемам и качеству окружающей природной среды, наблюдающийся в последние десятилетия, обуславливает актуальность диагностики состояния урбоэкосистем, в том числе по показателям биотических признаков и свойств. Отечественными и зарубежными авторами накоплен значительный объем фактического материала по изучению антропогенного воздействия на различные аспекты жизнедеятельности растений, чему посвящены многочисленные работы; ряд научных школ проводят комплексные исследования, позволяющие судить о воздействии факторов урбанизированной среды на функционирование растительного организма. Наиболее полно это отражено в работах О. А. Неверовой [13], В. С. Николаевского [14; 15], Л. М. Кавеленовой [8; 9], О. Л. Воскресенской [5; 21], И. Л. Бухариной [2; 3] и их соавторов. Так, в городской среде у растений в ответ на загрязнение воздуха отмечены нарушения феноритмов, ускорение процессов старения, пожелтения листьев, появление на них некрозов, снижение линейного роста побегов, количества и размеров ассимиляционных органов растений, их ксерофитизация, сокращение сроков жизни, изменение хода физиолого-биохимических процессов. При этом по состоянию растительного организма можно прямо либо косвенно судить о качестве среды, а также о происходящих в ней естественных и антропогенных изменениях, т.е. определять свойства урбоэкосистемы, ее отдельных компонентов с применением фитоиндикации. Базовые принципы фитоиндикации, признаки-индикаторы состояния растений, в том числе и декоративных, изложены в работах В. С. Николаевского [14; 15], У. Дж. Менинга, У. А. Федера [11], Р. Шурберта [20] и ряда других исследователей. Индикаторными признаками при этом служат разнообразные свойства растений, их морфологические признаки, химический состав, функциональные особенности, фенологическое развитие.

Урбоэкосистема является одной из самых уязвимых экосистем, что обусловлено значительными антропогенными воздействиями, при этом в условиях городских агломераций декоративные растения испытывают возрастающий с каждым годом техногенный и антропогенный прессинг, приводящий к потере декоративности [7, с. 42]. Однако именно этот факт предоставляет возможность использовать декоративные растения урбоценозов в качестве фитоиндикаторов, оценивать влияние экологических факторов на способность растений к предоставлению экологических услуг. Целью данной работы стало изучение структурных и функциональных особенностей ассимиляционного аппарата *Salvia splendens* и *Petunia × hybrida*, произрастающих в различных районах г. Йошкар-Олы.

#### **Материалы и методы**

Исследования проводили в разных функциональных зонах г. Йошкар-Олы: селитебной (ул. Осипенко), рекреационной (Центральный парк культуры и отдыха) и промышленной (ул. Строителей). В данных районах ведется систематический мониторинг качества воздушной среды, многочисленны исследования почвенных факторов [21, с. 87—104]. По данным ежегодных докладов ГУП РМЭ «Территориальный центр “Маргеомониторинг”», Республика Марий Эл относится к субъектам Российской Федерации, где не зарегистрирован высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха. Этому способствуют рельеф местности и климатические условия региона, благоприятные для рассеивания примесей, в г. Йошкар-Оле также нет районов с сильным антропогенным загрязнением. Более 70% загрязнителей воздуха поступает от передвижных источников

загрязнения, при этом промышленная зона (южная и центральная части города, где расположены основные предприятия города и наблюдается высокая концентрация автотранспорта) характеризуется несколько повышенным уровнем загрязнения атмосферы [16, с. 41]. Концентрации загрязняющих атмосферу веществ в Йошкар-Оле не превышают ПДК (для человека), однако растения более чувствительны, особенно к содержанию оксидов серы и азота. Таким образом, рекреационная и селитебная зоны города характеризуются низким уровнем загрязнения атмосферного воздуха, а в промышленной зоне периодически фиксируются более высокие, чем в других районах города, концентрации оксидов серы, азота и углерода, а также периодические превышения ПДК по пыли. При этом следует отметить, что в селитебной зоне вблизи исследуемой территории расположен участок автодороги, приводящий к значительному запылению растений.

Нами были изучены наиболее распространенные в различных районах г. Йошкар-Олы виды декоративных однолетних растений, относящиеся к одной экологической группе (мезофиты): *Salvia splendens* Sellow ex Schult. (сальвия сверкающая, сорт Костер), *Petunia × hybrida* hort. ex E. Vilm. (петуния гибридная, сорт Ультра). Вегетационный период, по данным ГБУ РМЭ «Маргеомониторинг», в 2020 г. соответствовал агроклиматической норме, лето было не жарким и достаточно влажным [16]. Молодые генеративные растения (в фазе бутонизации) рассадным способом были высажены в грунт в заранее подготовленный почвенный субстрат, оцененный на фитотоксичность (по ГОСТ Р ИСО 22030-2009). Условия произрастания были предварительно изучены нами в рамках муниципального контракта с Администрацией г. Йошкар-Олы по теме «Биологический мониторинг состояния почвенного покрова на территории города Йошкар-Олы», на основании чего выбраны максимально сходные по условиям районы исследований (по уровню инсоляции, микрорельефу, влажности, механическому и химическому составу почв). Высаженные растения достигли в течение двух месяцев средневозрастного генеративного состояния и использовались для дальнейших исследований: у 10 экземпляров каждого вида отбирались листовые пластинки в сухую солнечную погоду на высоте 15 см от уровня почвы на открытых участках, с южной стороны. Изучение мезоструктуры листа проводилось по А. Т. Мокроносову и Р. А. Борзенковой [12], коэффициент палисадности вычислялся как отношение толщины палисадной ткани к губчатой. Интенсивность транспирации измерялась весовым методом, содержание общей воды — рефрактометрическим [4, с. 27—31]. Статистический анализ данных проводился с использованием программ Statistica 10 и Microsoft Excel 2016.

### Результаты и обсуждение

Из всех органов растений листья являются самыми чувствительными к действию многих факторов, в том числе антропогенных [24]. Это обусловлено в первую очередь тем, что большинство важных физиологических процессов осуществляется в ассимиляционных тканях, служащих своеобразным «центром» variability организма. Поэтому исследование различных параметров листовой пластинки весьма информативно. Результаты наших исследований ассимиляционного аппарата у декоративных растений, представленные в таблице 1, показали, что на изучаемых признаках отразились как межвидовые различия, так и воздействие факторов среды в разных районах произрастания. Так, у растений селитебной и промышленной зон города отмечена небольшая тенденция к уменьшению толщины верхнего эпидермиса — с 29,1 до 26,5 мкм у *P. hybrida* и с 21,1 до 16,5 мкм у *S. splendens*. Толщина нижнего эпидермиса у *P. hybrida* варьировала в пределах 27—29 мкм, статистически значимых различий у растений разных районов исследования не выявлено ( $p > 0,05$ ). В то же время у *S. splendens* этот показатель был весьма изменчивым и достоверно отличался у растений промышленной зоны. В листьях

растений, исследованных в Центральном парке культуры и отдыха г. Йошкар-Олы (рекреационная зона), данный показатель составлял 10,1 мкм, у особей в селитебной зоне толщина нижнего эпидермиса листа возрастала до 16,1 мкм, а в промышленной была в 2,3 раза больше, чем в рекреационной. Таким образом, у *S. splendens* наблюдалось статистически значимое увеличение толщины нижнего эпидермиса в ответ на увеличение антропогенной нагрузки.

Таблица 1

Мезоструктурные характеристики листа *Petunia × hybrida* и *Salvia splendens* в различных условиях произрастания

Местообитание	Вид	Толщина верхнего эпидермиса, мкм	Толщина нижнего эпидермиса, мкм	Высота столбчатой паренхимы, мкм	Высота губчатой паренхимы, мкм	Нст/Нгуб	Число устьиц, шт./мм <sup>2</sup>
Рекреационная зона	<i>Petunia × hybrida</i>	29,1±1,1	27,0±2,3	91,2±10,5	231,7±14,4	0,39	38,0±4,5
	<i>Salvia splendens</i>	21,1±4,3	10,1±1,0	95,9±3,8	118,3±7,2	0,81	76,0±7,0
Селитебная зона	<i>Petunia × hybrida</i>	28,5±2,4	29,0±2,5	47,9±4,3	184,0±11,1	0,24	62,0±7,9
	<i>Salvia splendens</i>	19,5±3,0	16,1±3,1	82,0±13,7	69,0±11,9	0,76	81,0±14,6
Промышленная зона	<i>Petunia × hybrida</i>	26,5±3,4	27,0±2,3	56,0±8,6	235,0±11,9	0,26	106,0±9,8
	<i>Salvia splendens</i>	16,5±2,8	23,0±3,1	81,0±11,2	106,0±12,1	0,84	92,0±8,9

Оценивая изменение высоты клеток паренхимы листьев у *P. hybrida* и *S. splendens* (рис. 1), можно отметить, что у обоих видов отмечено снижение высоты столбчатой паренхимы в ответ на действие антропогенных факторов: у *S. splendens* признак варьировал в пределах 81—95,9 мкм (статистически значимо отличались только растения из рекреационной зоны), а у *P. hybrida* данный признак изменялся более существенно — с 91,2 мкм у растений в рекреационной зоне до 47,9 и 56 мкм в селитебной и промышленной зонах соответственно (табл. 1).

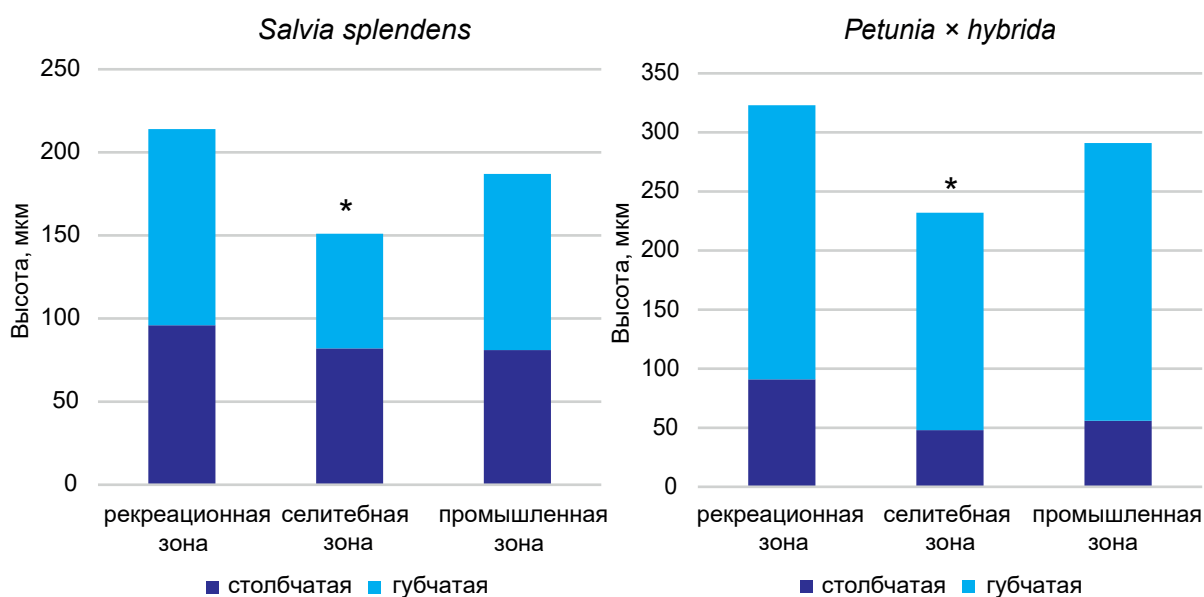


Рис. 1. Изменение высоты клеток паренхимы у особей *P. hybrida* и *S. splendens* в разных районах исследования (статистическая значимость различий: \*  $p < 0,05$ )

Высота губчатой паренхимы листьев у обоих исследуемых видов статистически значимо отличалась у растений селитебной зоны (была минимальной — 69 мкм у *S. splendens* и 184 мкм у *P. hybrida*). Как в рекреационной, так и в промышленной зонах этот показатель был достаточно высоким — 232—235 мкм у *P. hybrida* и 106—118 у *S. splendens* (табл. 1). При этом оба вида не имели достоверных различий по высоте губчатой паренхимы в рекреационной и промышленной зонах, однако по фактору «вид» различия были статистически значимы ( $p = 0,0016$ ). Уменьшение высоты клеток паренхимы можно рассматривать в качестве адаптивной реакции, направленной на снижение вентилируемости тканей листовой пластинки под воздействием загрязняющих веществ. Так как именно в селитебной зоне отмечается существенное запыление растений, то и снижение исследуемых показателей может быть вызвано именно данным фактором.

Величина коэффициента палисадности обычно трактуется как индекс интенсивности газообмена в листьях и является важным показателем чувствительности к изменению факторов среды. У *P. hybrida* во всех исследованных местообитаниях (табл. 1) данный коэффициент был очень низким (0,24—0,39), а у *S. splendens*, напротив, отличался достаточно высокими значениями (до 0,84). У растений, произраставших в промышленной и селитебной зонах, этот показатель был ниже по сравнению с растениями рекреационной зоны города. Рядом авторов [17—18] уменьшение коэффициента палисадности рассматривается как признак снижения устойчивости растений под воздействием антропогенных факторов.

В урбанизированной среде наиболее информативными являются функциональные признаки растений, которые чувствительно реагируют на изменения в среде обитания, а также оказывают влияние на экосистемные функции растений, к ним обычно относят структурные и физиологические показатели, при этом рядом ученых [33] было установлено, что один из самых информативных признаков — число устьиц на нижнем эпидермисе. В листьях *P. hybrida* из рекреационной зоны города их среднее количество составляло 38, в селитебной — 62, а в промышленной возросло до 106 штук на 1 мм<sup>2</sup>. Аналогичная тенденция установлена у *S. splendens*: число устьиц увеличилось с 76 до 92 шт./мм<sup>2</sup>. Изменение в количестве устьиц более выражено у *P. hybrida* — показатель изменился почти в 2,8 раза, в то время как у *S. splendens* — всего в 1,2 раза. У *S. splendens* устьица имеются преимущественно на нижней стороне листа, устьичные аппараты диацитные, как у всех представителей семейства губоцветных [6, с. 137]. Они представлены околустьичными и замыкающими клетками; устьичная щель располагается между замыкающими клетками, содержащими хлоропласты и способными к фотосинтезу, что приводит к повышению концентрации сахаров в вакуолях и усилению поступления воды в клетки. По-видимому, данный механизм и участвует в адаптации растений к изменению факторов окружающей среды.

Известно, что устьица уменьшаются в размерах на листьях с загрязненных участков и при этом увеличивается плотность их расположения [31]; можно предположить, что *P. hybrida* за счет существенного увеличения числа устьиц на единицу площади поверхности в промышленном районе города повысила способность переносить высокие уровни загрязнения и тем самым адаптировалась к изменяющимся условиям среды. Такое «сгущение» устьиц на единице площади листа является следствием мелкоклеточности эпидермиса, при этом изменения структурных и физиологических характеристик устьиц позволяют улучшить дыхательные потребности растений и повысить устойчивость к стрессовым факторам.

Воздействие токсичных газов на растительность вызывает серьезные изменения анатомического строения листьев растений и увеличение их ксерофитизации. В городах

и промышленных центрах исследователи фиксируют у растений более мелкие листья; установлено, что у них меньше толщина верхнего эпидермиса, кутикулы, толщина и число слоев палисадной ткани, больше устьиц на поверхности листа, а также под влиянием загрязняющих веществ уменьшается апертура устьиц в течение дня [13, с. 11]. Все это, бесспорно, отражается и на физиологических процессах, протекающих в ассимиляционных тканях растений. Самые чувствительные из них — те, что связаны с водообменом.

Водообмен растений позволяет им выполнять важнейшие экосистемные функции, в том числе связанные с регуляцией микроклимата, но оводненность тканей растений подвержена изменениям как на протяжении вегетационного периода, так и в зависимости от условий местообитания. В связи с этим изучение содержания воды в листьях дает представление не только об их роли в урбоэкосистеме, но и позволяет выявить их приспособления к условиям произрастания. Анализ данных по содержанию общей воды в листьях исследуемых нами растений показал (рис. 2, А), что оводненность тканей листа *P. hybrida* составляла от 35,39 до 82,03%, более стабильными были показатели у *S. splendens* — от 63,57 до 75,15%. Статистически значимым снижением количества общей воды в тканях характеризовались лишь особи *P. hybrida* в промышленной зоне г. Йошкар-Олы, по остальным значениям достоверных изменений не обнаружено, по-видимому, из-за высокой вариабельности исследуемого признака ( $CV = 39\%$ ). Как известно, в процессе загрязнения атмосферного воздуха происходит изменение количества воды в тканях, которая расходуется в процессе транспирации [19], — под воздействием поллютантов листовая пластинка растений обезвоживается и происходит снижение оводненности листьев в сильно загрязненных условиях, таким образом, в наших исследованиях лишь у особей *P. hybrida* обнаружена восприимчивость к изменению факторов урбосреды.

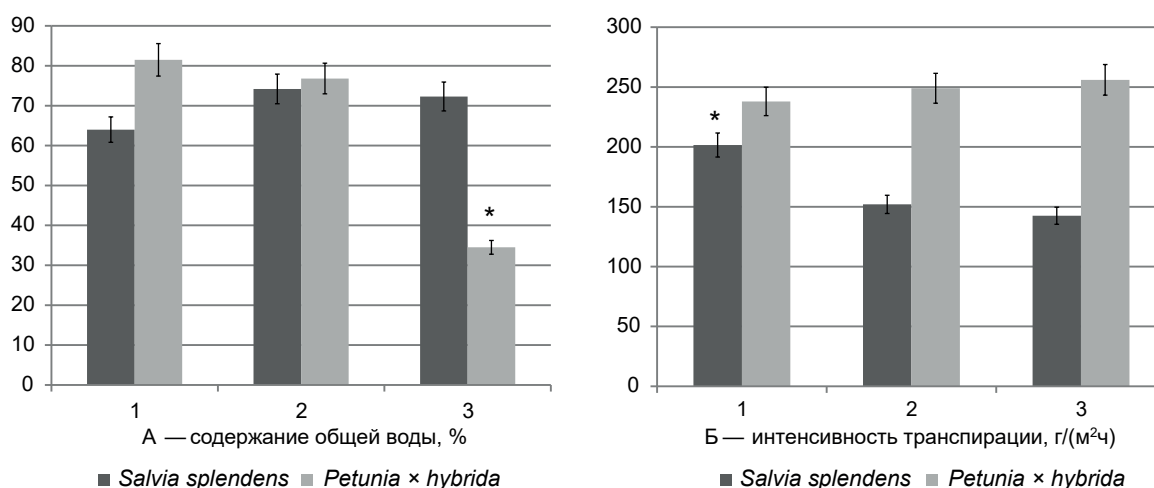


Рис. 2. Особенности водного режима *P. hybrida* и *S. splendens* в разных районах исследования (1 — рекреационная, 2 — селитебная, 3 — промышленная зоны) (статистическая значимость различий: \*  $p < 0,05$ )

С содержанием воды в тканях растений тесно связана интенсивность транспирации (рис. 2, Б), данный процесс участвует в поддержании оводненности растений на уровне, необходимом для их нормального развития. У *S. splendens* максимальная интенсивность транспирации (201,6 ед.) была у особей, произрастающих в рекреационной зоне города; по мере увеличения загрязнения окружающей среды происходило уменьшение интенсивности транспирации (примерно на 59 ед.). У *P. hybrida* наблюдалась противоположная картина — по мере увеличения загрязнения отмечалась тенденция повышения интенсив-

ности транспирации (на 18 ед.). Статистически значимыми при этом были различия в интенсивности транспирации только у особей из рекреационной зоны города.

Известно, что влияние внешних факторов на транспирацию определяется степенью нарушения функций и структуры клеток растений [2]. Токсичные газообразные вещества, поступающие в ассимиляционные ткани, вызывают первоначально снижение интенсивности транспирации, несколько позже усиливают ее, что ведет к нарушению оводненности тканей листа. Возможно, повышение интенсивности транспирации у *P. hybrida* является следствием угнетения метаболических процессов у растений, произраставших в промышленной зоне города.

#### **Заключение**

Влияние факторов урбанизированной среды на однолетние декоративные растения даже в пределах одной экологической группы (мезофиты) и при одинаковых условиях произрастания весьма неоднозначно. У *P. hybrida* выявлены следующие изменения в структуре ассимиляционного аппарата под воздействием факторов урбанизированной среды: толщина верхнего эпидермиса снижалась у растений, произраставших в промышленной зоне города почти на 9%, в то же время толщина нижнего эпидермиса практически не изменялась; однако снизилась высота столбчатой паренхимы в 1,6—1,9 раза в районах с более интенсивным антропогенным воздействием. У *S. splendens* более выражены изменения толщины нижнего эпидермиса — отмечено увеличение данного показателя у растений промышленной зоны города практически в 2,3 раза, при этом толщина столбчатой паренхимы изменялась не так существенно, как у *P. hybrida*, — всего на 15%. Оба вида в ответ на увеличение антропогенной нагрузки отреагировали увеличением количества устьиц на единицу площади. Так, у *P. hybrida*, произраставшей в промзоне, число устьиц возросло в 2,8 раза, а у *S. splendens* — только в 1,4 раза. Изменились и показатели водного обмена. Например, у *P. hybrida* содержание общей воды снизилось у растений из промышленной зоны в 2,4 раза, а у *S. splendens* — на 14%. Однако у особей *S. splendens* в данном районе исследований существенно снизилась транспирация — в 3,4 раза, при этом для *P. hybrida* были характерны более стабильные значения.

Таким образом, исследованные виды однолетних декоративных растений характеризовались разными механизмами приспособления к изменяющимся факторам среды. Растения промышленной зоны г. Йошкар-Олы, подвергавшиеся воздействию выбросов автотранспорта и предприятий, не имели внешних признаков повреждения, но в процессе выполнения экосистемных функций по-разному реализовывали свой адаптационный потенциал. У *S. splendens* увеличение толщины нижнего эпидермиса, относительная стабильность толщины столбчатой и губчатой паренхимы и незначительное изменение количества устьиц свидетельствуют об отсутствии появления ксероморфных признаков, характерных для растений, находящихся в неблагоприятных условиях жизнедеятельности, что, по-видимому, обусловлено отсутствием в условиях г. Йошкар-Олы значительного загрязнения окружающей среды. У *P. hybrida* более выражена ксероморфная структура тканей особей, произраставших в промышленном районе города: статистически значимое повышение числа устьиц ( $p < 0,00001$ ) и уменьшение размеров столбчатой паренхимы обеспечивают меньшее содержание общей воды в листовых пластинках и более слабую поражаемость экстремальными факторами. Различные механизмы адаптации растений одной жизненной формы к факторам урбанизированной среды позволяют растениям успешно приспосабливаться к изменениям условий произрастания и максимально эффективно выполнять экосистемные функции в составе зеленой инфраструктуры городов.



Список источников

1. Аткина Л. И. Зеленая инфраструктура г. Екатеринбурга как часть водно-зеленого городского каркаса // *Ландшафтная архитектура: традиции и перспективы*. Екатеринбург, 2022. С. 36—43.
2. Бухарина И. Л., Двоглазова А. А. Биоэкологические особенности травянистых и древесных растений в городских насаждениях. Ижевск : Удмуртский университет, 2010. 184 с.
3. Бухарина И. Л., Журавлева А. Н., Большова О. Г. Городские насаждения: экологический аспект. Ижевск : Удмуртский университет, 2012. 206 с.
4. Воскресенская О. Л., Грошева Н. П., Скочилова Е. А. Физиология растений : учеб. пособие / Мар. гос. ун-т. Йошкар-Ола, 2008. 148 с.
5. Воскресенская О. Л., Сарбаева Е. В., Старикова Е. А. Изменение активности антиоксидантных ферментов у интродуцированных хвойных растений в условиях городской среды // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2015. № 2 (30). С. 56—59.
6. Вогинов А. И., Адзиев С. М. Особенности эпидермы растений семейства Губоцветных в целях диагностики лекарственного сырья // *Известия Российской военно-медицинской академии*. 2018. Т. 37, № 1 S1-1. С. 135—138.
7. Догадина М. А., Алексашкина О. В. Анализ состояния и фитонцидной активности декоративных культур в урбозекосистемах (на примере г. Орел) // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019. № 1. С. 41—47.
8. Кавеленова Л. М. Проблемы организации системы фитомониторинга городской среды в условиях лесостепи. Самара : Универс групп, 2006. 223 с.
9. Кавеленова Л. М., Петрова А. Б., Трубников А. М., Янков Н. В., Савицкая К. А., Кравцева А. П., Антипенко М. И., Кузнецов А. А. К возможностям количественной оценки функциональной активности листовой поверхности различных растений // *Самарский научный вестник*. 2016. № 4 (17). С. 18—23.
10. Касимов Д. В., Касимов В. Д. Некоторые подходы к оценке экосистемных функций (услуг) лесных насаждений в практике природопользования. М. : Мир науки, 2015. 91 с.
11. Менинг У. Дж., Федер У. А. Биомониторинг загрязнения атмосферы с помощью растений. Л. : Гидрометеоиздат, 1985. 143 с.
12. Мокроносов А. Т., Борзенкова Р. А. Методика количественной оценки структуры и функциональной активности фотосинтезирующих тканей и органов // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1978. Т. 61, № 3. С. 119—131.
13. Неверова О. А., Еремеева Н. И. Опыт использования биоиндикаторов в оценке загрязнения окружающей среды: аналитический обзор / Гос. публ. науч.-тех. б-ка Сиб. отд-ния Рос. акад. наук, Ин-т экологии человека. Новосибирск, 2006. 88 с.
14. Николаевский В. С. Биологические основы газоустойчивости растений. Новосибирск : Наука, 1979. 278 с.
15. Николаевский В. С., Якубов Х. Г. Экологический мониторинг зеленых насаждений в крупном городе. Методы исследований : практ. пособие. М. : Изд-во МГУЛ, 2008. 67 с.
16. Проведение мониторинга состояния атмосферного воздуха на территории городского округа «Город Йошкар-Ола». Информационный отчет / Государственное унитарное предприятие Республики Марий Эл «Территориальный центр «Маргеомониторинг»». Йошкар-Ола, 2020. 42 с.
17. Сидорович Е., Яковлев А., Шобанова И., Булавко Г. Использование методов фитоиндикации для оценки состояния растительности в условиях загрязнения окружающей среды // *Сохранение разнообразия растений*. Кишинев, 2010. С. 625—630.
18. Уразгильдин Р. В., Кулагин А. Ю. Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Часть 1. Влияние на макро- и микроморфологию ассимиляционного аппарата // *Биосфера*. 2021. Т. 13, № 3. С. 86—100. DOI: 10.24855/biosfera.v13i3.578.
19. Уразгильдин Р. В., Кулагин А. Ю. Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Часть 2. Влияние на физиологические функции // *Биосфера*. 2021. Т. 13, № 3. С. 101—119. DOI: 10.24855/biosfera.v13i3.579.
20. Шуберт Р. Возможности применения растительных мониторов в биолого-технической системе контроля окружающей среды // *Разработка и внедрение на комплексных фоновых станциях методов биологического мониторинга*. Рига : Зинатне, 1983. С. 89—98.
21. Экология города Йошкар-Ола. Йошкар-Ола : Марийский гос. ун-т, 2007. 300 с.
22. Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Т. 1. Услуги наземных экосистем / ред.-сост. Е. Н. Букварева, Д. Г. Замолотчиков. М. : Изд-во Центра охраны дикой природы, 2016. 148 с.
23. Юрак В. В., Игнатьева М. Н. Теоретико-методологические основы оценки природных ресурсов и экосистемных услуг в экономике природопользования / Урал. гос. горный ун-т. Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2022. 160 с.

24. Christodoulakis N. S., Koutsogeorgopoulou L. Air pollution effects on the leaf structure of two injury resistant species: *Eucalyptus camaldulensis* and *Olea europaea* L. // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 1991. Vol. 47, N 3. P. 433—439. DOI: 10.1007/BF01702207.
25. Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S. Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeen S., O'Neill R. V. O., Paruelo J., Raskin R. G., Sutton P., Van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital // Nature. 1997. Vol. 387. P. 253—260.
26. Costanza R., Wilson M., Troy A., Voinov A., Liu S., D'Agostino J. The Value of New Jersey's Ecosystem Services and Natural Capital. New Jersey Department of Environmental Protection, 2006. 179 p.
27. Daily G. C. (ed.). Nature's Services. Societal Dependence on Natural Ecosystems. Island Press, 1997. 415 p.
28. De Groot R. S., Wilson M. A., Boumans R. M. J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services // Ecological Economics. 2002. Vol. 41. P. 393—408.
29. Francini A., Romano D., Toscano S., Ferrante A. The Contribution of Ornamental Plants to Urban Ecosystem Services // Earth. 2022. N 3 (4). P. 1258—1274. DOI: 10.3390/earth3040071.
30. Gomes M. P., Pereira E. G., Qiu B.-S., Juneau P. Editorial: Coping With Pollution — the Effects of Environmental Contaminants on Plant Growth and Physiology // Frontiers in Plant Science. 2021. Vol. 12. Art. 740802. DOI: 10.3389/fpls.2021.740802.
31. Gostin I. N. Air Pollution Effects on the Leaf Structure of some Fabaceae Species // Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca. 2009. Vol. 37, N 2. P. 57—63. DOI: 10.15835/nbha3723078.
32. Gulay C. C., Sinem E., Kazim A. Evaluation of the relationship between ornamental plants — based ecosystem services and human wellbeing: A case study from Lefke Region of North Cyprus // Ecological Indicators. 2019. Vol. 102. P. 278—288.
33. Guo Z., Gao Y., Yuan X., Yuan M., Huang L., Wang S., Liu C., Duan C. Effects of Heavy Metals on Stomata in Plants: A Review // International Journal of Molecular Sciences. 2023. Vol. 24, N 11. Art. 9302. DOI: 10.3390/ijms24119302.

## References

1. Atkina L. I. Zelenaya infrastruktura g. Ekaterinburga kak chast' vodno-zelenogo gorodskogo karkasa [Green infrastructure of Yekaterinburg as part of a water-green urban framework]. *Landshafinaya arkhitektura: traditsii i perspektivy* [Landscape architecture: traditions and prospects]. Yekaterinburg, 2022, pp. 36—43. (In Russian)
2. Bukharina I. L., Dvoeglazova A. A. *Bioekologicheskie osobennosti travyanistykh i drevesnykh rastenii v gorodskikh nasazhdeniyakh* [Bioecological features of herbaceous and woody plants in urban plantings]. Izhevsk, Udmurtskii universitet Publ., 2010. 184 p. (In Russian)
3. Bukharina I. L., Zhuravleva A. N., Bolyshova O. G. *Gorodskie nasazhdeniya: ekologicheskii aspekt* [Urban plantings: environmental aspect]. Izhevsk, Udmurtskii universitet Publ., 2012. 206 p. (In Russian)
4. Voskresenskaya O. L., Grosheva N. P., Skochilova E. A. *Fiziologiya rastenii: ucheb. posobie* [Physiology of plants. Textbook]. Yoshkar-Ola, 2008. 148 p. (In Russian)
5. Voskresenskaya O. L., Sarbaeva E. V., Starikova E. A. Izmenenie aktivnosti antioksidantnykh fermentov u introdutsirovannykh khvoinykh rastenii v usloviyakh gorodskoi sredy [Changes in the activity of antioxidant enzymes in introduced conifers in the urban environment]. *Vestnik Ul'yanovskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii — Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*, 2015, no. 2 (30), pp. 56—59. (In Russian)
6. Votinov A. I., Adziev S. M. Osobennosti epidermy rastenii semeistva Gubotsvetnykh v tselyakh diagnostiki lekarstvennogo syr'ya [Features of the labiateous plants epidermis for the purposes of medicinal materials diagnostics]. *Izvestiya Rossiiskoi voenno-meditsinskoi akademii — Russian Military Medical Academy Reports*, 2018, vol. 37, no. 1 S1-1, pp. 135—138. (In Russian)
7. Dogadina M. A., Aleksashkina O. V. Analiz sostoyaniya i fitontsidnoi aktivnosti dekorativnykh kul'tur v urboekosistemakh (na primere g. Orel) [Analysis of the state and phytoncidal activity of ornamental crops in urban ecosystems (using the example of the city of Orel)]. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*, 2019, no. 1, pp. 41—47. (In Russian)
8. Kavelenova L. M. *Problemy organizatsii sistemy fitomonitoringa gorodskoi sredy v usloviyakh lesostepi* [Problems of organizing a phytomonitoring system for the urban environment in forest-steppe conditions]. Samara, Univers grupp Publ., 2006. 223 p. (In Russian)
9. Kavelenova L. M., Petrova A. B., Trubnikov A. M., Yankov N. V., Savitskaya K. A., Kravtseva A. P., Antipenko M. I., Kuznetsov A. A. K vozmozhnostyam kolichestvennoi otsenki funktsional'noi aktivnosti listovoi poverkhnosti razlichnykh rastenii [Concerning the prospects of quantitative valuing of leaf surface functional

- activity for different plants]. *Samarskii nauchnyi vestnik — Samara Journal of Science*, 2016, no. 4 (17), pp. 18—23. (In Russian)
10. Kasimov D. V., Kasimov V. D. *Nekotorye podkhody k otsenke ekosistemnykh funktsii (uslug) lesnykh nasazhdenii v praktike prirodopol'zovaniya* [Some approaches to assessing ecosystem functions (services) of forest plantations in environmental management practice]. Moscow, Mir nauki Publ., 2015. 91 p. (In Russian)
11. Mening U. Dzh., Feder U. A. *Biomonitoring zagryazneniya atmosfery s pomoshch'yu rastenii* [Biomonitoring of air pollution using plants]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 143 p. (In Russian)
12. Mokronosov A. T., Borzenkova R. A. Metodika kolichestvennoi otsenki struktury i funktsional'noi aktivnosti fotosinteziruyushchikh tkanei i organov [Methodology for quantitative assessment of the structure and functional activity of photosynthetic tissues and organs]. *Trudy po prikladnoi botanike, genetike i selektsii* [Proceedings on applied botany, genetics and selection]. 1978, vol. 61, no. 3, pp. 119—131. (In Russian)
13. Neverova O. A., Eremeeva N. I. *Opyt ispol'zovaniya bioindikatorov v otsenke zagryazneniya okruzhayushchei sredy: analiticheskii obzor* [Experience of using bioindicators in assessing environmental pollution: analytical review]. Novosibirsk, 2006. 88 p. (In Russian)
14. Nikolaevskii B. C. *Biologicheskie osnovy gazoustoichivosti rastenii* [Biological basis of gas resistance of plants]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979. 278 p. (In Russian)
15. Nikolaevskii V. S., Yakubov Kh. G. *Ekologicheskii monitoring zelenykh nasazhdenii v krupnom gorode. Metody issledovaniy: prakt. posobie* [Environmental monitoring of green spaces in a large city. Research methods. Practical guide]. Moscow, MGUL Publ., 2008. 67 p. (In Russian)
16. *Provedenie monitoringa sostoyaniya atmosfernogo vozdukha na territorii gorodskogo okruga "Gorod Ioshkar-Ola". Informatsionnyi otchet* [Monitoring the state of atmospheric air in the urban district "City of Yoshkar-Ola". Information report]. Yoshkar-Ola, 2020. 42 p. (In Russian)
17. Sidorovich E., Yakovlev A., Shobanova I., Bulavko G. *Ispol'zovanie metodov fitoindikatsii dlya otsenki sostoyaniya rastitel'nosti v usloviyakh zagryazneniya okruzhayushchei sredy* [Using phytoindication methods to assess the state of vegetation under conditions of environmental pollution]. *Sokhranenie raznoobraziya rastenii* [Conservation of plant diversity]. Kishinev, 2010, pp. 625—630. (In Russian)
18. Urazgil'din R. V., Kulagin A. Yu. *Tekhnogenez i strukturno-funktsional'nye reaktsii drevesnykh vidov: povrezhdeniya, adaptatsii, strategii. Chast' 1. Vliyanie na makro- i mikromorfologiyu assimilyatsionnogo apparata* [Structural and functional responses of arboreal plants to anthropogenic factors: Damages, adaptations and strategies. Part I. Impact on macro- and micromorphology of the assimilation apparatus]. *Biosfera — Biosphere*, 2021, vol. 13, no. 3, pp. 86—100. DOI: 10.24855/biosfera.v13i3.578. (In Russian)
19. Urazgil'din R. V., Kulagin A. Yu. *Tekhnogenez i strukturno-funktsional'nye reaktsii drevesnykh vidov: povrezhdeniya, adaptatsii, strategii. Chast' 2. Vliyanie na fiziologicheskie funktsii* [Structural and functional responses of arboreal plants to anthropogenic factors: Damages, adaptations and strategies. Part II. Impact on physiological functions]. *Biosfera — Biosphere*, 2021, vol. 13, no. 3, pp. 101—119. DOI: 10.24855/biosfera.v13i3.579. (In Russian)
20. Shubert R. *Vozmozhnosti primeneniya rastitel'nykh monitorov v biologo-tekhnicheskoi sisteme kontrolya okruzhayushchei sredy* [Possibilities of using plant monitors in a biological and technical environmental control system]. *Razrabotka i vnedrenie na kompleksnykh fonovykh stantsiyakh metodov biologicheskogo monitoringa* [Development and implementation of biological monitoring methods at complex background stations]. Riga, Zinatne Publ., 1983, pp. 89—98. (In Russian)
21. *Ekologiya goroda Ioshkar-Ola* [Ecology of the city of Yoshkar-Ola]. Yoshkar-Ola, Mariiskii gos. un-t Publ., 2007. 300 p. (In Russian)
22. *Ekosistemnye uslugi Rossii: Prototip natsional'nogo doklada. T. 1. Uslugi nazemnykh ekosistem* [Ecosystem services of Russia: Prototype of a national report. Vol. 1. Terrestrial ecosystem services]. Moscow, Tsentr okhrany dikoi prirody Publ., 2016. 148 p. (In Russian)
23. Yurak V. V., Ignat'eva M. N. *Teoretiko-metodologicheskie osnovy otsenki prirodnykh resursov i ekosistemnykh uslug v ekonomike prirodopol'zovaniya* [Theoretical and methodological foundations for assessing natural resources and ecosystem services in environmental economics]. Yekaterinburg, UGGU Publ., 2022. 160 p. (In Russian)
24. Christodoulakis N. S., Koutsogeorgopoulou L. Air pollution effects on the leaf structure of two injury resistant species: *Eucalyptus camaldulensis* and *Olea europaea* L. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1991, vol. 47, no. 3, pp. 433—439. DOI: 10.1007/BF01702207.
25. Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S. Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeen S., O'Neill R. V. O., Paruelo J., Raskin R. G., Sutton P., Van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, vol. 387, pp. 253—260.
26. Costanza R., Wilson M., Troy A., Voinov A., Liu S., D'Agostino J. *The Value of New Jersey's Ecosystem Services and Natural Capital*. New Jersey Department of Environmental Protection, 2006. 179 p.

27. Daily G. C. (ed.). *Nature's Services. Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, 1997. 415 p.
28. De Groot R. S., Wilson M. A., Boumans R. M. J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 2002, vol. 41, pp. 393—408.
29. Francini A., Romano D., Toscano S., Ferrante A. The Contribution of Ornamental Plants to Urban Ecosystem Services. *Earth*, 2022, no. 3 (4), pp. 1258—1274. DOI: 10.3390/earth3040071.
30. Gomes M. P., Pereira E. G., Qiu B.-S., Juneau P. Editorial: Coping With Pollution — the Effects of Environmental Contaminants on Plant Growth and Physiology. *Frontiers in Plant Science*, 2021, vol. 12, art. 740802. DOI: 10.3389/fpls.2021.740802.
31. Gostin I. N. Air Pollution Effects on the Leaf Structure of some Fabaceae Species. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2009, vol. 37, no. 2, pp. 57—63. DOI: 10.15835/nbha3723078.
32. Gulay C. C., Sinem E., Kazim A. Evaluation of the relationship between ornamental plants — based ecosystem services and human wellbeing: A case study from Lefke Region of North Cyprus. *Ecological Indicators*, 2019, vol. 102, pp. 278—288.
33. Guo Z., Gao Y., Yuan X., Yuan M., Huang L., Wang S., Liu C., Duan C. Effects of Heavy Metals on Stomata in Plants: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, vol. 24, no. 11, art. 9302. DOI: 10.3390/ijms24119302.

#### Информация об авторе

*Е. В. Сарбаева* — кандидат биологических наук, доцент

#### Information about the author

*E. V. Sarbaeva* — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor

Статья поступила в редакцию 01.11.2023; одобрена после рецензирования 25.01.2024;  
принята к публикации 20.02.2024

The article was submitted 01.11.2023; approved after reviewing 25.01.2024;  
accepted for publication 20.02.2024