

ПАРАМЕТРЫ УГЛЕКИСЛОТНОГО И ВОДНОГО ОБМЕНА ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ КАК ИНСТРУМЕНТ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ УРБЭКОСИСТЕМ

Ю.В. Плугатарь, доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН,
С.П. Корсакова, доктор биологических наук, М.С. Ковалев

Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН,
298648, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52
E-mail: korsakova2002@mail.ru

Исследования проводили с целью изучения составляющих углеродного и водного обмена вечнозеленых декоративных древесных растений на Южном берегу Крыма. Определяли влияние абиотических факторов на изменчивость величин этих показателей у Nerium oleander L. и Arbutus andrachne L. в период активной вегетации. Сходство их воздействия указывает на аналогию механизмов адаптации систематически разных видов, произрастающих в одном климатическом регионе. Выявленные межвидовые отличия доминирующего влияния факторов среды на интенсивность поглощения углекислого газа Nerium oleander (среднесуточный дефицит насыщения водяного пара) и Arbutus andrachne (максимальная температура воздуха за сутки) обусловлены биологическими особенностями формирования фитомассы исследуемых видов. У Arbutus andrachne отмечены более низкие величины поглощения и выделения углекислоты, по сравнению с Nerium oleander, что, предположительно, связано с менее эффективной работой фотосинтетического аппарата. В условиях сильного водного дефицита количество поглощенного CO₂ листьями Nerium oleander снижается в 5...6 раз, Arbutus andrachne – в 9...10 раз. Положительный углекислотный газообмен Nerium oleander и Arbutus andrachne в жаркий засушливый летний период с превышением суточного поглощения CO₂ над его выделением при дыхании соответственно в 2,4 и 2,3 раза, свидетельствует о существенном потенциале видов в оптимизации урбэкоосистем южных регионов России. Разработанные нелинейные регрессионные модели могут быть использованы для прогнозной оценки способности поглощения диоксида углерода исследуемыми растениями при ожидаемых климатических изменениях.

PARAMETERS OF CARBON DIOXIDE AND WATER EXCHANGE OF WOODY PLANTS AS A TOOL FOR OPTIMIZING THE STRUCTURE OF GREEN SPACES IN URBAN ECOSYSTEMS

Plugatar Yu.V., Korsakova S.P., Kovalev M.S.

Nikita Botanical Gardens – National Scientific Center RAS,
298648, Respublika Krym, Yalta, Nikita, Nikitsky spusk, 52
E-mail: korsakova2002@mail.ru

The results of studies of the components of carbon and water exchange in evergreen ornamental woody plants on the Southern Coast of the Crimea are presented. The influence of abiotic factors on the variability of the components of the daily CO₂/H₂O exchange in Nerium oleander L. and Arbutus andrachne L. was studied during the active growing season. The similarity of the influence of abiotic factors on the value of the daily carbon dioxide and water exchange of plants is established, which indicates similar mechanisms of adaptation in systematically different species growing in the same climatic region. The revealed interspecific differences in the dominant influence of environmental factors on the intensity of carbon dioxide absorption of Nerium oleander (VPD) and Arbutus andrachne (T_{max}) are due to the biological features of the phytomass formation in the studied species during the period of intensive growth. Analysis of the seasonal dynamics of CO₂-gas exchange indicators showed lower values of carbon dioxide absorption and release in Arbutus andrachne compared to Nerium oleander, which is presumably associated with less efficient operation of the photosynthetic apparatus. Under conditions of severe water deficit, the amount of CO₂ absorbed by the leaves of Nerium oleander decreases by 5-6 times, Arbutus andrachne - by 9-10 times. The positive carbon dioxide gas exchange in Nerium oleander and Arbutus andrachne in the hot dry summer period with the excess of the daily CO₂ absorption over its release during respiration by 2.4 and 2.3 times, respectively, indicates a significant potential these species in optimizing the urban ecosystems in the southern regions of Russia. The developed nonlinear regression models can be used for predictive estimation of the ability of carbon dioxide absorption by the studied plants under the expected climate changes.

Ключевые слова: Nerium oleander, Arbutus andrachne, CO₂/H₂O-газообмен, факторы среды, множественный регрессионный анализ, прогноз поглощения диоксида углерода

Key words: Nerium oleander, Arbutus andrachne, CO₂/H₂O gas exchange, environmental factors, multiple regression analysis, carbon dioxide absorption forecast

В последние годы вследствие ухудшения экологической ситуации, обусловленной ростом техногенной нагрузки и изменениями климата, уделяется повышенное внимание изучению урбанизированных территорий. Ключевой фактор климатических изменений и глобального потепления – рост концентрации парниковых газов в атмосфере, поэтому особую актуальность приобретает исследование всех составляющих углеродного баланса в биосфере [1]. Доминирующий фактор снижения концентрации CO₂ в урбэкоосистемах – древесные растения. Именно поэтому важен подбор высокопродуктивных древесных видов для озеленения [2, 3]. Помимо поглощения CO₂

деревья выполняют средообразующую функцию путем регуляции микроклимата [4, 5], а также защитную функцию, уменьшая количество ультрафиолетового излучения и ограждая от веществ-загрязнителей атмосферы [1, 6].

Однако метаболический отклик на воздействие факторов внешней среды у отдельных видов растений зависит как от их интенсивности и направленности, так и от экофизиологических характеристик самих растений, проявляясь, прежде всего, в характере протекания углеродного и водного обмена [7]. Особый интерес при прогнозировании возможного отклика растений на изменения окружающей среды и климата

представляет межвидовая оценка их адаптивного потенциала [8, 9, 10].

Подбор и использование в ландшафтном дизайне и при закладке лесонасаждений видов растений, устойчивых к неблагоприятным воздействиям окружающей среды, будет положительно влиять на качество воздуха и изменение микроклимата.

Моделирование воздействий на растения лимитирующих средовых факторов мест произрастания позволяет решать актуальные научно-теоретические и практические задачи, связанные с оптимизацией современных искусственных экосистем, в том числе урбозкосистем.

Согласно сценариям изменения климата, в южных регионах России ожидается общее повышение температуры и длительные периоды засухи [11]. Приспособиться к новым условиям смогут только те виды, которые обладают достаточной экологической пластичностью. Это обуславливает важность изучения способности древесных растений поглощать углекислоту при различных условиях влагообеспеченности. Результаты таких исследований позволят оценить вклад растений каждого вида в углеродный баланс атмосферы в условиях прогрессирующей термоаридизации климата.

Цель нашего исследования – определение количественных показателей суточного поглощения диоксида углерода и закономерностей реакции процессов углеродного и водного обмена *Nerium oleander* L. и *Arbutus andrachne* L. на воздействие окружающей среды в период вегетации.

Методика. Исследования проводили на Южном берегу Крыма (ЮБК) на территории Никитского ботанического сада – Национального научного центра РАН (НБС) (44°31' с.ш., 34°15' в.д.).

Объектами исследований были саженцы (6...8 лет) олеандра обыкновенного (*Nerium oleander* L.) и земляничника мелкоплодного (*Arbutus andrachne* L.) – ценных и высокодекоративных видов древесных растений для создания садово-парковых композиций санаторно-курортных зон и набережных, характеризующихся высокой жаро- и засухоустойчивостью, а также толерантностью к условиям высокой инсоляции. Растений этих видов широко распространены в озеленении ландшафтов ЮБК, Черноморского побережья Кавказа, Средиземноморья [12].

Исследования выполняли в периоды активной вегетации растений с июня по октябрь 2015, 2016, 2018 и 2020 гг. Модельные экземпляры произрастали на экспериментальном участке НБС и в контролируемых условиях вегетационного опыта (в 10...15-литровых сосудах, наполненных почвой опытного участка). Почва экспериментального участка темно-коричневая, среднеглинистая, наименьшая влагоемкость (НВ) которой варьирует от 21,6 до 25,2 %, влажность завядания – от 9,9 до 11,1 % [13].

Интенсивность $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ газообмена определяли в трех повторностях на хорошо развитых интактных листьях верхней части побега с интервалом 20 мин (72 измерения за сутки). Синхронно с измерениями показателей газообмена регистрировали параметры окружающей среды. В работе использованы данные комплексных измерений газообмена и параметров среды для *N. oleander* – за 52 суток, для *A. andrachne* – за 92 суток. При проведении исследований использовали фитомонитор РМ-11z и монитор фотосинтеза РТМ-48А (Bio Instruments S.R.L., Молдова), специально созданный для продолжительного наблюдения

за углекислотным газообменом нескольких листьев одновременно [14]. Технология включает измерение трех основных процессов: видимого фотосинтеза, фотодыхания и темнового дыхания. Самозакрывающиеся листовые камеры практически не влияют на условия жизнедеятельности листа, что принципиально важно при длительных измерениях.

Для определения количества фотосинтетически активной радиации (ФАР), которое растение получает в течение светлого времени суток, использовали интеграл дневного освещения (DLI). DLI – это функция от интенсивности ФАР ($\text{мкмоль}/(\text{м}^2 \text{с})$) и времени – сутки ($\text{моль}/(\text{м}^2 \text{сут})$) [15].

Собранный массив данных анализировали в среде пакетов программ MS Excel 2010 и Statistica 10. Все расчеты проводили при заданном уровне значимости $p < 0,05$.

Вероятностно-статистическая модель множественной нелинейной регрессии была построена на платформе пакета Statistica 10 по исходной выборке, в которой в качестве независимых переменных рассматривали факторы окружающей среды. Для определения коэффициентов регрессии использовали пошаговый регрессионный анализ и процедуру «Нелинейное оценивание» модуля «Регрессия пользователя – производная функция потерь». Адекватность построенной модели оценивали по значениям статистик «Итоговые потери». Чем меньше их величины, тем адекватнее модель. В модель включены коэффициенты, для которых уровень значимости p -критерия Стьюдента не превышает 0,05.

Оценку точности аппроксимации и определение наиболее подходящей модели осуществляли на основе трех показателей эффективности: коэффициент детерминации (R^2), корень из среднеквадратичной ошибки (Root Mean Squared Error – RMSE) и сумма квадратов ошибок (error sum of squares, SSE). В качестве наиболее подходящих моделей были выбраны уравнения с самыми высокими величинами R^2 и наименьшими RMSE и SSE [12].

Метеоусловия в годы проведения исследований значительно различались по влагообеспеченности и температурному режиму. Особенно контрастными по условиям увлажнения в период вегетации оказались 2016, 2018 и 2020 гг. Период активной вегетации в 2016 г. был умеренно влажным (гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) за летние месяцы составил 0,94), в 2018 и 2020 гг. – очень засушливым (ГТК за аналогичный период не превышал 0,32). Отличительными особенностями вегетационного периода 2015 г. были дождливая погода в июне, жаркий, сухой август и по-летнему теплый сентябрь. Вегетационный период 2016 г. характеризовался очень жарким июнем, сильными ливнями в июле, сухим сентябрем и холодным влажным октябрем, 2018 г. – очень жарким суховейно-засушливым августом, влажным сентябрем и очень теплым октябрем. От предшествующих лет 2020 г. отличался очень теплой, продолжительной и засушливой осенью. В целом, теплообеспеченность территории ЮБК в годы исследований на фоне общего потепления климата была значительно выше средних многолетних показателей.

Результаты и обсуждение. Для прогноза интенсивности поглощения диоксида углерода древесными растениями при ожидаемых климатических изменениях необходимо оценить видоспецифичность реакции, а также чувствительность процессов CO_2 -газообмена к различным внешним факторам. Подобный

Табл. 1. Параметры окружающей среды и CO₂/H₂O газообмена листьев *Nerium oleander* и *Arbutus andrachne* во время измерений

Параметр*	<i>Nerium oleander</i>		<i>Arbutus andrachne</i>	
	минимум / максимум	среднее	минимум / максимум	среднее
E (мгH ₂ O/(см ² сут)	6,5 / 332,6	115,8±91,7	13,4 / 250,2	103,2±63,5
g _s (мм/с)	0,15 / 4,66	1,47±1,24	0,21 / 2,61	1,13±0,54
A (мгCO ₂ /см ² сут)	0,36 / 2,78	1,55±0,75	-0,09 / 2,09	1,09±0,55
R _{RTotal} (мгCO ₂ /см ² сут)	0,16 / 1,20	0,62±0,29	0,22 / 3,05	1,52±0,60
R _{RD} (мгCO ₂ /см ² сут)	0,10 / 1,05	0,47±0,27	0,13 / 1,13	0,42±0,19
R _{PR} (мгCO ₂ /см ² сут)	0,06 / 0,34	0,15±0,06	0,08 / 0,70	0,30±0,12
DLI (моль/м ² сут)	1,0 / 42,9	19,4±9,4	1,5 / 32,5	19,5±9,2
T (°C)	8,5 / 32,4	23,8±5,5	13,4 / 29,3	23,9±4,1
T _{MAX} (°C)	12,9 / 40,0	31,7±7,1	19,3 / 40,4	32,2±4,8
T _{MIN} (°C)	4,5 / 28,4	18,8±5,0	11,0 / 23,4	18,2±3,4
RH (%)	39 / 86	60±13	37 / 83	62±12
VPD (кПа)	0,3 / 3,0	1,4±0,7	0,3 / 2,8	1,3±0,6
SM (% HB)	10,8 / 87,3	46,3±17,9	12,0 / 100,9	70,8±22,4

* (здесь и в остальных таблицах) E – суточная транспирация; g_s – устьичная проводимость; A – суточное поглощение CO₂; R_{RTotal} – суточное выделение CO₂ при дыхании; R_{RD} – суточное выделение CO₂ при темновом дыхании; R_{PR} – суточное выделение CO₂ при фотодыхании; DLI – интеграл дневного освещения; T, T_{MAX}, T_{MIN} – средняя, максимальная и минимальная температура воздуха за сутки соответственно; RH – среднесуточная относительная влажность воздуха; VPD – среднесуточный дефицит насыщения водяного пара; SM – влажность почвы; ± – стандартное отклонение.

прогноз необходим для эффективного планирования и управления зелеными насаждениями с целью оптимизации землепользования на урбанизированных территориях. Полученные показатели могут быть использованы в качестве параметров в математических моделях углеродного баланса наземных экосистем [7].

Результаты анализа сезонной динамики показателей CO₂-газообмена *N. oleander* и *A. andrachne* свидетельствуют, что в жаркие засушливые летние месяцы растения сохраняют положительный углекислотный газообмен, при котором поглощение углекислого газа превышает уровень дыхания в 2,4 и 2,3 раза соответственно (табл. 1). В среднем за сезон активной вегетации и в отдельные месяцы (рис. 1) суточное количество поглощенного и выделенного диоксида углерода в расчете на 1 см² площади листьев у *N. oleander* на 30 % выше, чем у *A. andrachne*, что, предположительно, связано с более эффективной работой фотосинтетического аппарата.

Среднесезонные величины суточной транспирации и устьичной проводимости листьев *N. oleander* также были выше, чем у *A. andrachne*, в среднем на 10...20 %. Однако при оценке сезонной динамики аналогичная ситуация была отмечена только в июне и в августе. Очевидно, это обусловлено физиологическими особенностями водного обмена у изучаемых видов, выявленными ранее [13]. Для растений *N. oleander* характерен засухоустойчивый тип регуляции водного баланса путем закрытия устьиц, что повышает их конкурентоспособность в условиях почвенной засухи. Сохранение водного баланса в растении *A. andrachne* обусловлено поддержанием устьиц в открытом состоянии на первой стадии физиологического ответа на водный дефицит,

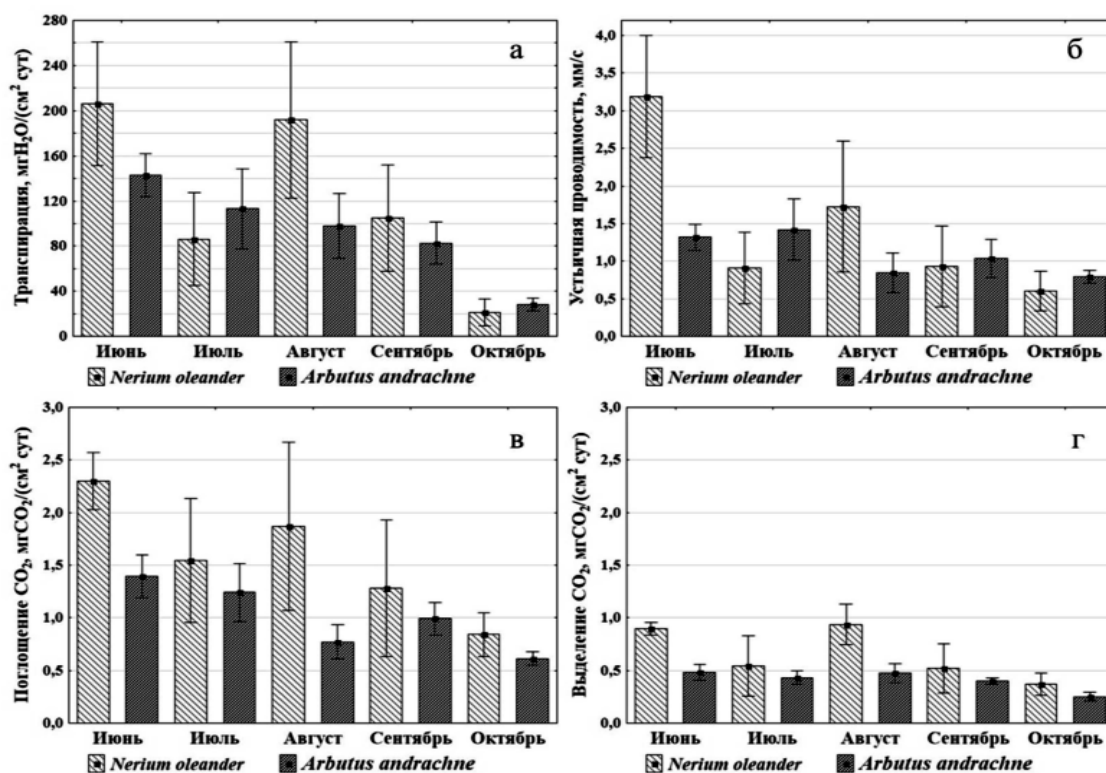


Рис. 1. Сезонная динамика показателей интенсивности газообмена листьев *Nerium oleander* и *Arbutus andrachne*: а – суточное испарение воды при транспирации, б – устьичная проводимость, в – суточное количество поглощенного диоксида углерода в процессе фотосинтеза, г – суточное количество выделенного диоксида углерода при дыхании.

что сохраняет высокий уровень транспирации, и их закрытия – на второй стадии вследствие недостаточной доставки воды из корней. Такая пластичность обеспечивает растениям *A. andrachne* высокую адаптационную способность к засухе.

Закрытие устьиц предохраняет растения *N. oleander* и *A. andrachne* от обезвоживания, но вместе с тем нарушает газообмен. При длительном гидротермическом стрессе сокращение потерь воды у растений реализуется в результате ускоренного старения и дефолиации, что в условиях культуры приводит к утрате декоративности [13].

Между процессами $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ газообмена (поглощением диоксида углерода, интенсивностью транспирации и устьичной проводимостью) выявлена довольно тесная взаимосвязь: коэффициенты парной корреляции у *N. oleander* находились пределах 0,84...0,86, у *A. andrachne* – 0,79...0,84.

При благоприятных условиях окружающей среды количество поглощенного CO_2 на единицу площади листовой поверхности *N. oleander* было несущественно выше, чем у *A. andrachne* (на 25 %). В условиях продолжительной жесткой засухи у *A. andrachne* отмечен отрицательный углеродный баланс между уровнем ассимиляции CO_2 в процессе фотосинтеза и его потерями при дыхании (см. табл. 1). Различия между величинами показателей фотосинтетической активности исследуемых видов в оптимальных и стрессовых условиях были статистически значимы с 95 %-ной вероятностью.

В ходе активной вегетации с июня по октябрь максимальное за годы исследований среднесуточное количество поглощенного CO_2 на единицу площади листьев у *N. oleander* и *A. andrachne* наблюдали в июне, а наибольшее выделение углекислого газа обратно в атмосферу при дыхании – в июне (в период интенсивного роста) и в августе (вследствие воздействия гидротермических стрессоров). Закономерным для исследованных видов было снижение ассимиляционной активности в октябре при затухании ростовых процессов (см. рис. 1).

Расчет доли суммарных дыхательных затрат от гроссфотосинтеза ($(\sum(R_{RD} + R_{PR}) / (A + R_{RD} + R_{PR}))$) и анализ сезонной динамики основных процессов углекислотного обмена листьев (поглощения и выделения CO_2) пока-

зал, что в жаркие летние месяцы растения анализируемых вечнозеленых видов тратят на дыхание достаточно много фотосинтилатов. Доля дыхательных затрат от гроссфотосинтеза в июне – августе у *N. oleander* в среднем составляла 35...51 %, у *A. andrachne* – 26...38 %. В оптимальных условиях среды обитания, по нашим данным, величина этого показателя находилась в пределах 19 % (*N. oleander*) и 14 % (*A. andrachne*) [13].

В условиях нарастающего дефицита почвенной влаги интенсивность поглощения CO_2 , транспирации и устьичной проводимости у подопытных растений начинала уменьшаться при влажности почвы выше 60...80 % НВ и ниже 30...35 % НВ (рис. 2). При величине этого показателя 10...30 % НВ, проявлялись видоспецифичные особенности регуляции водного баланса и реакции растений на засуху. В таких условиях доли темнового дыхания и фотодыхания у *N. oleander* и *A. andrachne* в процессе углекислотного газообмена возросли в 1,5...2,0 раза (рис. 2б). Повышение суммарного дыхания при водном дефиците очевидно связано с тем, что параллельно со снижением ростовых процессов происходит увеличение интенсивности дыхания поддержания за счет адаптационной составляющей на фоне снижения интенсивности дыхания роста и гроссфотосинтеза. В условиях воздействия сильного гидротермического стресса при влажности почвы на уровне мертвого запаса, поглощение углекислоты листьями *N. oleander* снижалось, в сравнении с контролем (отсутствие стрессоров), в 5...6 раз, *A. andrachne* – в 9...10 раз.

Анализ коэффициентов корреляции между составляющими $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ газообмена листьев вечнозеленых растений и параметрами внешней среды показал наличие как положительных, так и отрицательных статистически значимых ($p < 0,05$) зависимостей (табл. 2).

Выявлена сильная прямая зависимость показателей интенсивности транспирации и выделения CO_2 листьями *N. oleander* от таких характеристик факторов среды, как интеграл дневного освещения, температура воздуха и дефицит насыщения водяного пара и обратная – от относительной влажности воздуха. У *A. andrachne* аналогичная зависимость высоко значима только для интенсивности транспирации, а для выделения CO_2 проявляется слабее. Слабые коэффициенты парной корреляции величин устьичной проводимости и по-

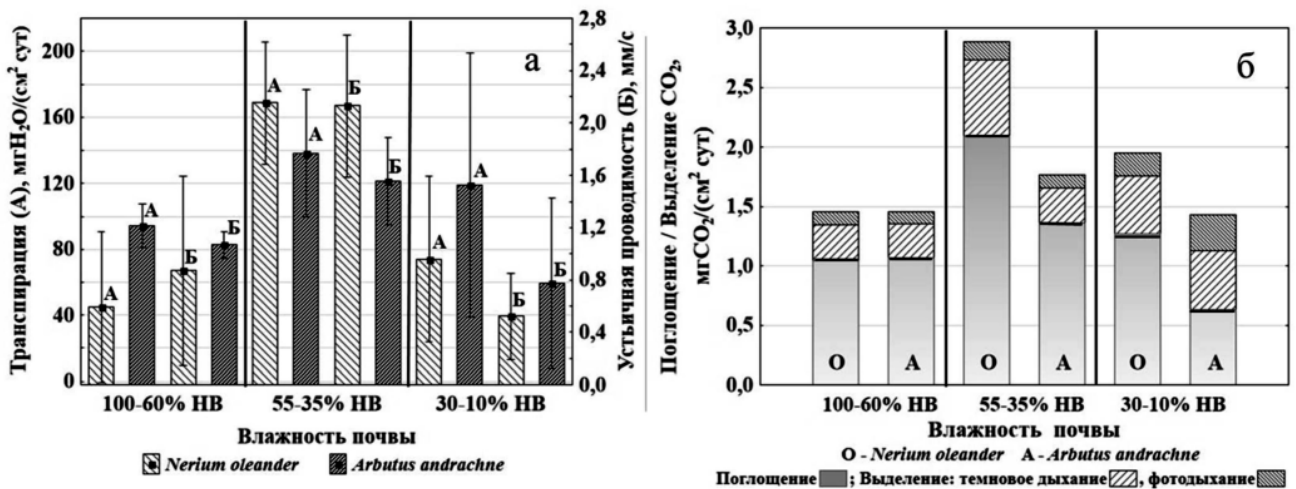


Рис. 2. Интенсивность газообмена листьев *Nerium oleander* и *Arbutus andrachne* при различных условиях водообеспеченности.

Табл. 2. Коэффициенты корреляции между показателями газообмена листьев *Nerium oleander* и *Arbutus andrachne* и факторами окружающей среды

Вид	Показатель газообмена	Факторы окружающей среды						
		DLI (моль/м ² сут)	T (°C)	T _{MAX} (°C)	T _{MIN} (°C)	RH (%)	VPD (кПа)	SM (% НВ)
<i>Nerium oleander</i>	E (мгH ₂ O/(см ² сут))	0,66	0,68	0,74	0,77	-0,56	0,78	-0,15*
	g _s (мм/с)	0,35	0,51	0,55	0,57	-0,21*	0,45	0,08*
	A (мгCO ₂ /см ² сут)	0,47	0,67	0,63	0,70	-0,41	0,59	-0,03*
	R _{RTotal} (мгCO ₂ /см ² сут)	0,72	0,88	0,89	0,92	-0,58	0,86	-0,36
	R _{RD} (мгCO ₂ /см ² сут)	0,76	0,83	0,85	0,87	-0,57	0,84	-0,26*
	R _{PR} (мгCO ₂ /см ² сут)	0,13*	0,50	0,48	0,51	-0,29*	0,39	-0,51
<i>Arbutus andrachne</i>	E (мгH ₂ O/(см ² сут))	0,78	0,55	0,61	0,39	-0,80	0,76	-0,23
	g _s (мм/с)	0,45	0,28	0,30	0,19*	-0,43	0,39	-0,15*
	A (мгCO ₂ /см ² сут)	0,57	0,33	0,35	0,22	-0,43	0,37	-0,06*
	R _{RTotal} (мгCO ₂ /см ² сут)	0,46	0,63	0,62	0,64	-0,40	0,56	-0,36
	R _{RD} (мгCO ₂ /см ² сут)	0,51	0,63	0,65	0,60	-0,46	0,59	-0,30
	R _{PR} (мгCO ₂ /см ² сут)	0,27	0,47	0,42	0,51	-0,23	0,38	-0,34

*коэффициенты корреляции между показателями газообмена и факторами среды не достоверны при уровне значимости p<0,05.

Табл. 3. Регрессионные модели воздействия условий окружающей среды на интенсивность поглощения углекислого газа листьями *Nerium oleander* и *Arbutus andrachne*

Вид	Уравнение регрессии	R ² *	RMSE	SSE	n
<i>Nerium oleander</i>	$A = 0,0734 \cdot SM - 0,0006 \cdot SM^2 - 0,2369 \cdot T + 0,0078 \cdot T^2 + 1,3303 \cdot VPD - 0,3813 \cdot VPD^2 - 0,0165 \cdot DLI$	0,87	0,303	2,594	52
<i>Arbutus andrachne</i>	$A = -5,1650 + 0,0758 \cdot SM - 0,0006 \cdot SM^2 + 0,4947 \cdot T - 0,0084 \cdot T^2 + 0,0383 \cdot DLI - 0,1021 \cdot T_{MAX}$	0,81	0,236	5,111	92

*R² – коэффициент детерминации; SSE – сумма квадратов ошибок; n – количество суточных измерений углекислотного газообмена для разработки и оценки модели.

глощения диоксида углерода листьями *N. oleander*; *A. andrachne* с характеристиками параметров среды (освещение, температура и влажность воздуха), а также водообеспеченности указывают на отсутствие линейной зависимости (некоррелированности переменных), но не на отсутствие связи как таковой.

На основе экспериментальных данных были рассчитаны уравнения зависимости суточного поглоще-

ния диоксида углерода (в расчете на 1 см² площади листьев) растениями *N. oleander* и *A. andrachne* от совокупности всех учтенных внешних факторов – солнечной радиации, температуры и влажности воздуха (дефицита насыщения водяного пара), влажности почвы.

Оценка качества моделей на основе трех базовых критериев (R², RMSE и SSE) показала, что они вполне

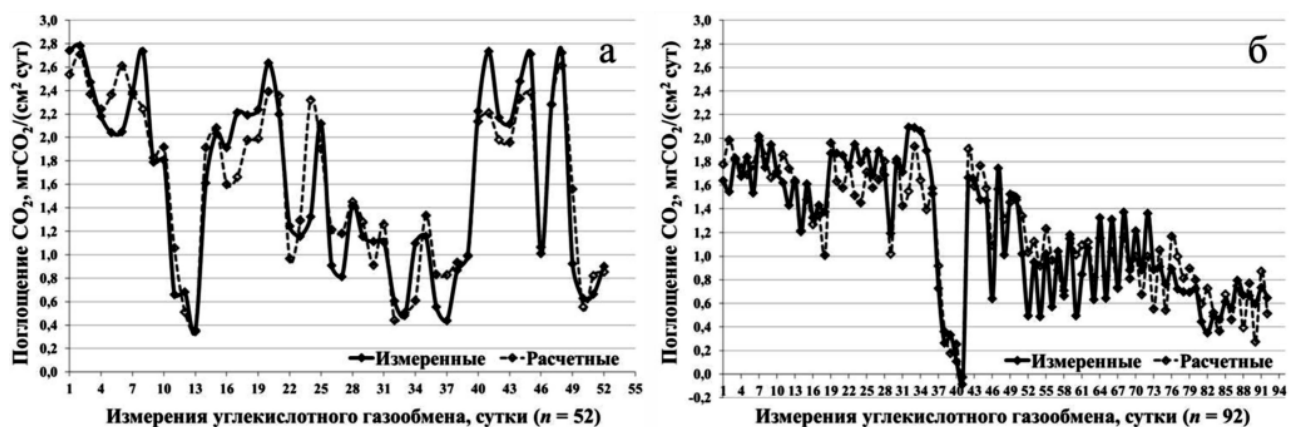


Рис. 3. Измеренные и рассчитанные величины суточного поглощения диоксида углерода (в расчете на 1 см² площади листьев) у растений *Nerium oleander* (а) и *Arbutus andrachne* (б) в разных условиях окружающей среды.

адекватны, *RMSE* прогноза при расчетах с их использованием варьируют в интервале 0,303 до 0,236 мгСО₂/см² сут. Доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая разработанными моделями, составляет 87 и 81 % (табл. 3).

Совмещенные графики величин, рассчитанных по прогнозным уравнениям, и экспериментальных данных о количестве диоксида углерода, поглощенного за сутки 1 см² листовой поверхности *N. oleander* и *A. andrachne* за все дни измерений, включающие разные условия окружающей среды (рис. 3), свидетельствуют о хорошей их сходимости.

Таким образом, результаты проведенных исследований подтвердили высокую чувствительность процессов углеродного и водного обмена *N. oleander* и *A. andrachne* к изменению условий внешней среды, что позволило построить прогнозные модели для количественной оценки их способности поглощать диоксид углерода. Положительный углекислотный газообмен *N. oleander* и *A. andrachne*, при котором поглощение углекислого газа превышает уровень дыхания в самые жаркие и засушливые летние месяцы в 2,4 и 2,3 раза соответственно, свидетельствует о высоком адаптивном потенциале этих видов и их важной роли в оптимизации урбоэкосистем южных регионов России.

Выявленные закономерности суточного поглощения диоксида углерода в зависимости от условий окружающей среды позволяют объективно оценить роль растений в углеродном балансе урбанизированной экосистемы для оптимизации структуры и состава зеленых насаждений. Накопление таких данных, характеризующих ответные реакции растений на разных уровнях организации, позволяет сформировать более полную картину адаптации видов к среде обитания, в том числе антропогенным факторам, прогнозировать их поведение в условиях климатических изменений.

Литература.

1. Юзбеков А.К., Цзусюнь У. Углекислотный газообмен древесных растений в урбанизированных экосистемах // Вестник Московского университета. Серия 16. Биология. 2019. Т. 74(4). С. 321–327.
2. Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment / J.A. Salmond, M. Tadaki, S. Vardoulakis, et al. // *Environmental Health*. 2016. Vol. 15. S36. URL: <https://ehjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12940-016-0103-6> (дата обращения: 20.01.2021). doi: 10.1186/s12940-016-0103-6
3. Stefano C., Rallo R.F., Ulgiati S. Implementing and managing urban forests: A much needed conservation strategy to increase ecosystem services and urban wellbeing // *Ecological Modelling*. 2017. Vol. 360. P. 328–335. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2017.07.016
4. Effects of Urban Green Space on Environmental Health, Equity and Resilience / M. Braubach, A. Egorov, P. Mudu, et al. // *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas Theory*

- and Practice of Urban Sustainability. 2017. P. 187–205. doi: 10.1007/978-3-319-56091-5_11
5. Urban green space cooling effect in cities / F. Aram, E.H. Garcia, E. Solgi, et al. // *Heliyon*. 2019. Vol. 5(4). e1339. URL: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(19\)30070-2](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(19)30070-2) (дата обращения: 20.02.2021) doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01339
6. Tor-ngern P., Leksungnoen N. Investigating carbon dioxide absorption by urban trees in a new park of Bangkok, Thailand // *BMC Ecology*. 2020. Vol. 20. URL: <https://bmcecol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12898-020-00289-4> (дата обращения: 12.02.2021). doi: 10.1186/s12898-020-00289-4.
7. Придача В.Б., Ольчев А.В., Сазонова Т.А., Тихова Г.П. Параметры СО₂/Н₂О-обмена древесных растений как инструмент мониторинга и оценки состояния природной среды // *Успехи современного естествознания*. 2019. № 11. С. 25–30.
8. Аклимация листьев луговых растений разных функциональных типов к экспериментальному потеплению климата / Л.А. Иванова, А.Г. Чанчикова, Д.А. Ронжина и др. // *Физиология растений*. 2016. Т. 63(6). С. 860–872. doi: 10.7868/S0015330316050067
9. Влияние температуры почвы и воздуха на рост и СО₂-газообмен саженцев березы повислой / В.К. Болондинский, Л.М. Виликайнен, В.Б. Придача и др. // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2020. № 3. С. 20–30. doi: 10.17076/eb1127
10. von Caemmerer S. Steady-state models of photosynthesis // *Plant Cell & Environment*. 2013. Vol. 36(9). P. 1617–1630. doi: 10.1111/pce.12098.
11. Efimov V. V., Volodin E. M., Anisimov A. E. Modeling of the Black Sea region climate changes in the XXI century // *Physical Oceanography*. 2015. Vol. 2. P. 3–13. doi: 10.22449/1573-160X-2015-2-3-13.
12. A research on models of the photosynthetic light response curves on the example of evergreen types of plants / S.P. Korsakova, Yu.V. Plugatar, O.A. Ilnitsky, et al. // *Agronomy Research*. 2019. Vol. 17(2). P. 518–39. doi: 10.15159/AR.19.065
13. Plugатарь Ю.В., Корсакова С.П., Ковалев М.С. Сравнительная оценка СО₂/Н₂О-газообмена вечнозеленых древесно-старшиковых растений в благоприятных и стрессовых условиях внешней среды // *Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада*. 2020. № 135. С. 9–23. doi: 10.36305/0513-1634-2020-135-9-23
14. Pashtetsky A., Plugatar Y.V., Ilnitsky O., Korsakova S. Using of phytomonitoring data for eco-physiological evaluation of the environmental factors limiting development of ornamental plants // *Acta Horticulture*. 2019. Vol. 1263. P. 199–206. doi: 10.17660/ActaHortic.2019.1263.25
15. The effect of daily light integral on bedding plant growth and flowering / J.E. Faust, V. Holcombe, N.C. Rajapakse, et al. // *American Society for Agriculture Research*. 2005. Vol. 40. No. 3. P. 645–649. doi: 10.21273/HORTSCI.40.3.645

Поступила в редакцию 31.03.2021

После доработки 03.05.2021

Принята к публикации 18.05.2021