

## ОРИГИНАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

УДК 581.13

## УГЛЕКИСЛОТНЫЙ ГАЗООБМЕН ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В УРБАНИЗИРОВАННЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

А.К. Юзбеков<sup>1, \*</sup>, У. Цзусюнь<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кафедра общей экологии, биологический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12;

<sup>2</sup>Биологический факультет, Университет МГУ–ППИ в Шэньчжэне, 518172, КНР, пров. Гуандун, г. Шэньчжэнь, р-н Лунган, ул. Жуи, д. 299

\*e-mail: uak2003@mail.ru

В условиях увеличения содержания углекислого газа в атмосфере изучение всех составляющих углеродного баланса в биосфере является актуальным. В статье представлены результаты исследований углекислотного газообмена хвой ели европейской (*Picea abies* L.) и псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* L.) в урбанизированной среде (на примере Москвы). Установлено, что осеннее потепление в 2018 г. способствовало продлению периода поглощения углекислого газа хвойными деревьями. Путем анализа влияния факторов внешней среды на фотосинтетическую активность хвой выявлено, что интенсивность фотосинтеза определялась только уровнем освещенности. Повышение температуры атмосферного воздуха в полуденные часы не влияло на интенсивность фотосинтеза, что, вероятно, связано с адаптацией растений к низким температурам воздуха в ночные и утренние часы. На основе регрессионного анализа определено, что зависимость ассимиляции CO<sub>2</sub> от освещенности имела вид логарифмической кривой (коэффициент достоверности аппроксимации R<sup>2</sup> равен 0,8). Выявлена видовая специфичность реакции фотосинтеза хвойных деревьев на экологические условия в осенний период: наибольшей устойчивостью к факторам внешней среды обладала ель европейская, фотосинтетическая активность которой была в 1,4 раза выше по сравнению с псевдотсугой Мензиса. Согласно расчетам, величина ассимиляции CO<sub>2</sub> у ели европейской и псевдотсуги Мензиса превышала уровень светового дыхания соответственно в 3,6 и 2,7 раза, что свидетельствует о положительном углекислотном газообмене и существенной роли хвойных деревьев в регулировании углеродного баланса урбанизированной экосистемы.

**Ключевые слова:** фотосинтез, дыхание, хвойные деревья, урбанизированная среда, температура воздуха, освещенность, углекислотный газообмен

В последние десятилетия динамика экологических показателей свидетельствует об ухудшении экологической ситуации в городах, что, в немалой степени, обусловлено увеличением техногенного воздействия на окружающую среду. В этих условиях одним из факторов оптимизации городской среды является использование древесных насаждений.

Согласно результатам исследования [1], для городов умеренного пояса наиболее значимыми по числу предоставляемых услуг определены территории с древесной растительностью. Парки и городские насаждения являются важной частью городского ландшафта. Существуют четыре основные функции парковых деревьев, которые

имеют существенные последствия для качества окружающей среды и здоровья человека: влияние на температуру воздуха в парках и вблизи них; влияние на концентрацию загрязняющих воздух веществ; защита от ультрафиолетового излучения и изменение климата.

Зеленые насаждения изменяют микроклимат в городской среде. Парки обычно имеют более низкую температуру воздуха, чем прилегающие районы [2]. Измерения показали, что разница может составлять около 7 °С. Во время жары, которая губительна для сотен людей, парковые зоны предоставляют горожанам комфортные условия для отдыха.

В условиях города деревья в парках умень-

шают загрязнение воздуха путем удаления вредных веществ, поступающих в атмосферу от промышленных предприятий и транспорта. Исследования во многих городах США и Европы показали, что в среднем один гектар городских древесных насаждений улавливает 10 кг загрязнений в год [3].

Одной из функций городских насаждений является уменьшение количества ультрафиолетового излучения (листья деревьев поглощают около 95% излучения). Оценка влияния деревьев на интенсивность УФ-излучения в различных зонах землепользования в Сеуле, проведенная на основе математической модели, показала, что коэффициент УФ-защиты для пешеходов в солнечный полдень имеет наибольшее значение для парков, под пологом деревьев [4].

Особая роль парковых деревьев заключается в их влиянии на изменение климата. В настоящее время, в условиях увеличения содержания углекислого газа в атмосфере, большое значение имеет изучение всех составляющих углеродного баланса в биосфере. Влияние парковых деревьев на уровень  $\text{CO}_2$  в атмосфере связано с двумя особенностями: поглощение в процессе фотосинтеза углекислого газа, выбрасываемого в атмосферу городов промышленными производствами и автотранспортом, и запасание его в фитомассе; выделение углекислого газа в результате разложения растительности [5, 6]. По данным авторов [7], только в городских лесах центральной части Пекина в виде фитомассы запасается около 0,2 млн. т двуокиси углерода. Поэтому весьма важно при подборе древесных растений в насаждениях городов учитывать их участие в углеродном балансе атмосферы. Однако в научной литературе эти вопросы отражены недостаточно полно. Вследствие этого исследование углекислотного газообмена древесных растений в условиях городской среды является актуальным, поскольку результаты позволяют оценить их вклад в углеродный баланс атмосферы в зависимости от видоспецифической реакции фотосинтетической активности на факторы внешней среды.

Цель исследований – оценка углекислотного газообмена хвои ели европейской (*Picea abies* L.) и псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* L.) в урбанизированной среде (на примере Москвы).

### Материалы и методы

Исследования фотосинтетической и дыхательной активности древесных растений проводили в г. Москве на территории Ботанического сада Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Эксперименты выполняли на примере двух

видов хвойных деревьев – ели европейской (*Picea abies* L.) и псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* L.).

$\text{CO}_2$ -газообмен регистрировали с 3 по 26 октября 2018 г., в полуденные часы, в наиболее благоприятных для процесса фотосинтеза условиях освещения и температуры. Измерения проводили в трех повторностях, с интервалом 10 мин. Длительность экспозиции на каждом побеге при измерении, как фотосинтеза, так и дыхания, составляла 90 с.

Интенсивность нетто-фотосинтеза и светового дыхания (выделение  $\text{CO}_2$  на свету в результате фото- и темнового дыхания) определяли газометрическим методом (метод закрытых камер), с помощью специально сконструированного на биологическом факультете МГУ комплекта оборудования [8].

Для расчета изменения массы  $\text{CO}_2$  в камере использовали формулу, основанную на уравнении Менделеева – Клайперона:

$$D\text{CO}_2 = (44 \cdot 10^{-6} \cdot DM \cdot P \cdot V) / (8,314 \cdot T),$$

где  $D\text{CO}_2$  – изменение массы  $\text{CO}_2$  в камере, г  $\text{CO}_2$ ; 44 – молярная масса  $\text{CO}_2$ , г  $\text{CO}_2 \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $10^{-6}$  – пересчетный коэффициент из ppm в объемные доли, ppm<sup>-1</sup>; DM – изменение концентрации  $\text{CO}_2$  в камере, ppm; P – атмосферное давление, Па; V – объем камеры, м<sup>3</sup>; 8,314 – универсальная газовая постоянная, Па · м<sup>3</sup> · °К<sup>-1</sup> · моль<sup>-1</sup>; T – температура воздуха, °К.

Интенсивность фотосинтеза и световое дыхание хвои определяли в мг  $\text{CO}_2$ /г сухой массы · ч, поскольку расчет на сухую массу позволяет сравнивать величины ассимиляции и эмиссии  $\text{CO}_2$ , характеризующие эффективность воспроизводства и разложения растениями органического вещества. Сухую массу хвои определяли путем высушивания в термостате при 105 °С в течение 8 ч. Масса считалась постоянной, если расхождение в массе образцов двух последовательных взвешиваний не превышало 0,1%.

Для выявления зависимости составляющих углекислотного газообмена от факторов внешней среды при каждом измерении определяли температуру атмосферного воздуха и освещенность вблизи камеры, в которой находились интактные побеги модельных деревьев, на высоте 1,5–2 м. Для измерения температуры использовали электронный термометр Hanna HI98509 Chektemp 1 (Hanna Instruments, Германия), освещенности – цифровой люксметр Mastech MS6610 (Precision Mastech Enterprises Company, Гонконг).

Статистическую обработку данных проводили с использованием методов регрессионного и корреляционного анализа.

### Результаты и обсуждение

Погодные условия в октябре 2018 г. способствовали продолжительности фотосинтетической активности хвойных деревьев в Ботаническом саду МГУ. Данные о продлении вегетационного периода хвойных деревьев осенью, в связи с потеплением климата, получены и другими авторами [9].

Октябрь был теплым месяцем: среднемесячная температура воздуха составила  $+7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , максимальная — ( $+19,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), Особенно теплой была вторая декада месяца (средняя температура воздуха равнялась  $+11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Отрицательные значения температуры воздуха зарегистрированы с 29 по 31 октября. Количество осадков — 49 мм. Средняя температура воздуха в полуденные часы составила  $+11,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  при оптимальной относительной влажности воздуха 66%.

В осенний период вегетации фотосинтетическая активность хвойных растений снижается. По мнению некоторых авторов [10], уменьшение фотосинтетической активности осенью связано с разрушающим воздействием температуры на фотосинтетический аппарат растений (охлаждение хвои приводит к значительному сокращению общего содержания хлорофилла). Исследования, проведенные в Массачусетсе (США), показали, что минимальная температура воздуха ниже  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение предыдущих 24 ч оказывала негативное влияние на полуденную ассимиляцию  $\text{CO}_2$  у тсуги канадской [11].

В нашем исследовании отрицательные температуры воздуха в период проведения экспериментов отсутствовали. Кратковременное понижение температура воздуха до  $+0,3$  и  $+0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  отмечено в ночные часы 9 и 26 октября, при этом средняя минимальная температура в октябре составила  $+5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в наиболее теплую вторую декаду — ( $+7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Результаты показали, что повышенная температура воздуха в октябре продлила период поглощения углекислого газа хвойными деревьями. Согласно расчетам, значения интенсивности фотосинтеза ели европейской изменялись в интервале от 0,08 до 3,06  $\text{мг CO}_2/\text{г сухой массы} \cdot \text{ч}$  (соответственно 3 и 22 октября) при среднем значении, равном 1,60  $\text{мг CO}_2/\text{г сухой массы} \cdot \text{ч}$  (рис. 1А). Минимальное и максимальное значения ассимиляции  $\text{CO}_2$  у псевдотсуги Мензиса составили 0,48 и 2,52  $\text{мг CO}_2/\text{г сухой массы} \cdot \text{ч}$  (3 и 9 октября); среднее

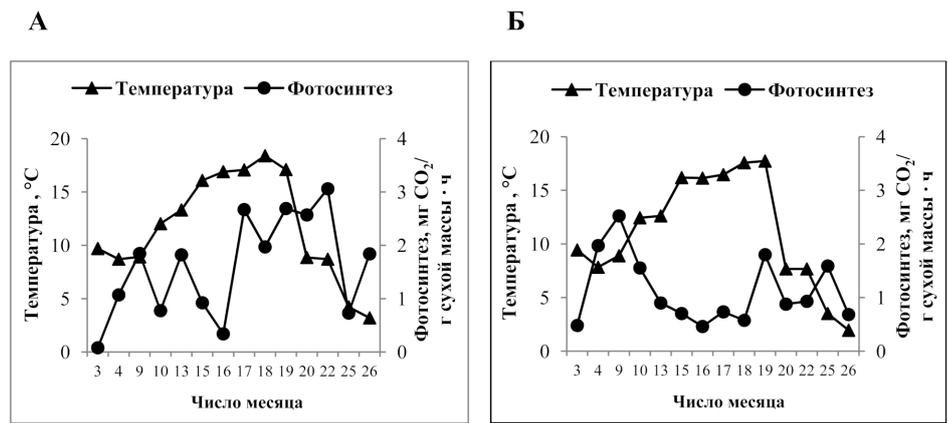


Рис. 1. Динамика интенсивности фотосинтеза у хвойных деревьев (А — ель европейская, Б — псевдотсуга Мензиса) и температуры воздуха в октябре 2018 г.

значение равнялось 1,13  $\text{мг CO}_2/\text{г сухой массы} \cdot \text{ч}$  (рис. 1Б). Таким образом, фотосинтетическая активность ели европейской в 1,4 раза превышала аналогичный показатель псевдотсуги Мензиса, что свидетельствует о видовой специфичности поглощения  $\text{CO}_2$  хвойными деревьями в осенний период в условиях города.

Температура атмосферного воздуха является одним из основных экологических факторов, определяющих процесс фотосинтеза древесных растений. Известно, что общая зависимость фотосинтеза от температуры выражается одновершинной кривой; при изменении температуры в интервале от минимального до оптимального значения между показателями существует прямая зависимость. Однако для хвойных деревьев, участвующих в нашем эксперименте, такая связь не установлена: графику повышения температуры воздуха в полуденные часы во второй декаде октября соответствовала зигзагообразная хаотичная кривая изменения интенсивности фотосинтеза (рис. 1). Вероятно, это можно объяснить адаптацией растений к низким температурам воздуха в ночные и утренние часы, препятствующей увеличению фотосинтетической активности хвои при дневном прогреве воздуха, а также влиянием на процесс фотосинтеза других факторов.

Исследования, проведенные в Норвегии [12], также показали отсутствие связи между повышенной температурой воздуха и фотосинтезом в осенний период: ассимиляция  $\text{CO}_2$  у ели обыкновенной оставалась постоянной при увеличении на  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  средней еженедельной температуры воздуха (если она была больше  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Свет является фактором, который определяет жизнедеятельность растений, в том числе скорость поглощения  $\text{CO}_2$  при фотосинтезе. Согласно результатам, полученным при измерении интенсивности фотосинтеза ели европейской, освещенность находилась в интервале от 0,9 до

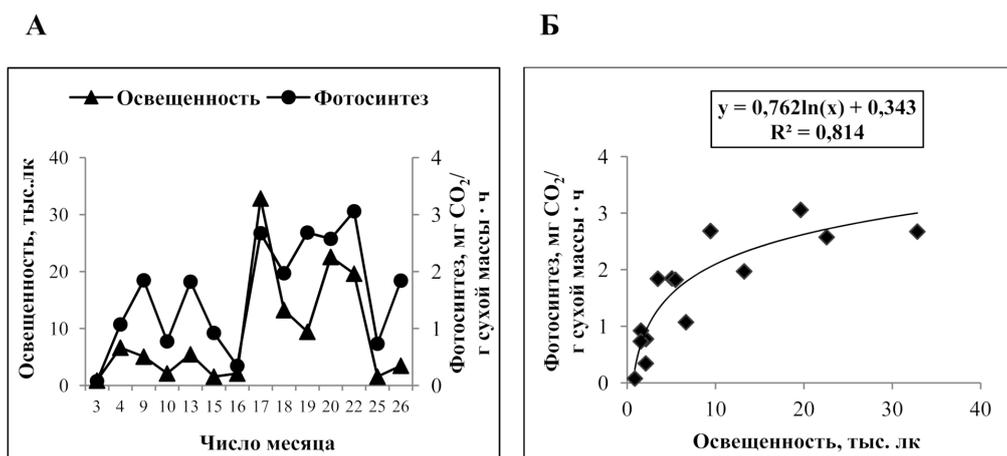


Рис. 2. Зависимость интенсивности фотосинтеза хвои ели европейской от освещенности в октябре 2018 г.: А – динамика интенсивности фотосинтеза и освещенности; Б – уравнение связи интенсивности фотосинтеза и освещенности

32,8 тыс. лк (3 и 17 октября) (рис. 2А). Этим значениям соответствовали минимум и один из максимумов фотосинтетической активности. Методом регрессионного анализа связи ассимиляции  $\text{CO}_2$  и освещенности выявили логарифмическую зависимость между показателями (рис. 2Б). Коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2$ , равный 0,814, показывает высокую степень соответствия трендовой модели исходным данным.

Динамика интенсивности фотосинтеза хвои псевдотсуги Мензиса и освещенности представлена на рис. 3А. Максимальное значение фото-

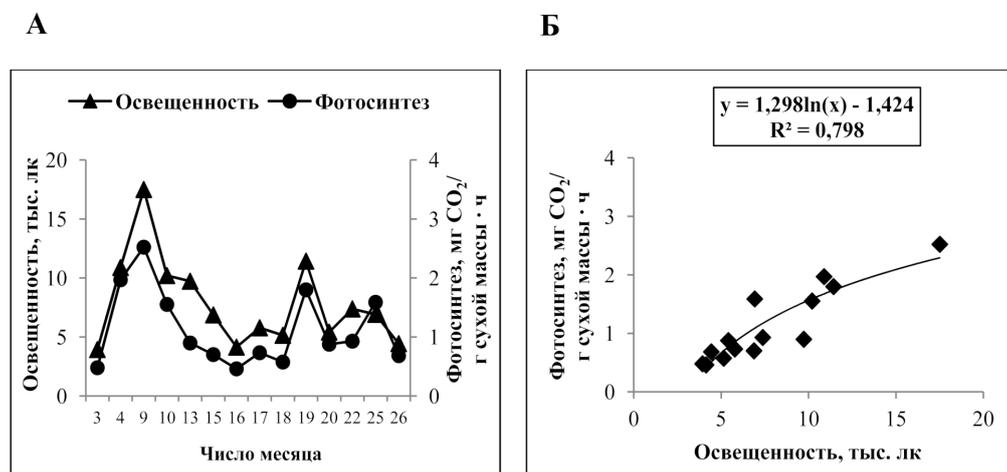


Рис. 3. Зависимость интенсивности фотосинтеза хвои псевдотсуги Мензиса от освещенности в октябре 2018 г.: А – динамика интенсивности фотосинтеза и освещенности; Б – уравнение связи интенсивности фотосинтеза и освещенности

синтеза наблюдалось 9 октября при освещенности, равной 17,5 тыс. лк, минимальное – 3 октября, при освещенности в 3,9 тыс. лк. При этом зависимость интенсивности фотосинтеза псевдотсуги Мензиса от освещенности определялась логарифмической кривой; коэффициент

достоверности аппроксимации  $R^2$  равен 0,798 (рис. 3Б).

Зависимость интенсивности фотосинтеза от содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере для исследуемых хвойных деревьев выявлена не была.

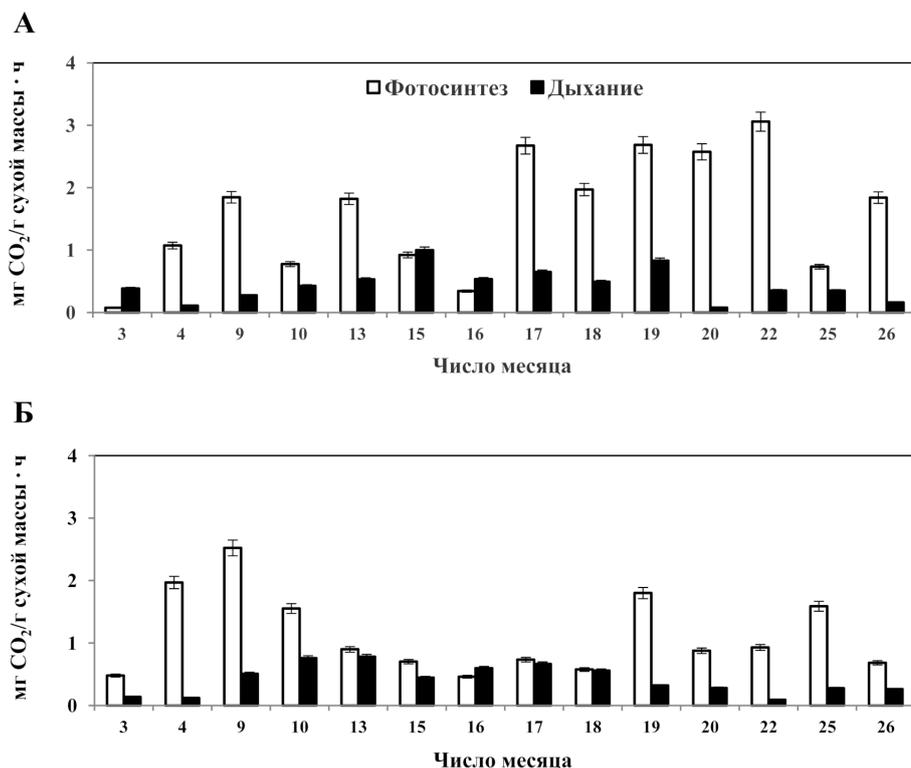
Резюмируя вышеизложенное, следует отметить, что, в осенний период в условиях городской среды полуденная интенсивность  $\text{CO}_2$ -ассимиляции у хвойных деревьев определялась, в основном, уровнем освещенности.

В связи с этим, существенные различия в интенсивности фотосинтеза хвои исследуемых деревьев, наблюдаемые во второй половине октября, вероятно, обусловлены более высокими значениями освещенности при проведении измерений ассимиляции  $\text{CO}_2$  у ели европейской.

Параллельно с изменением интенсивности фотосинтеза повышался или понижался уровень дыхания. Согласно расчетам, минимальное и максимальное значения светового дыхания у ели европейской составили 0,08 и 1,0 мг  $\text{CO}_2$ /г сухой массы · ч (20 и 15 октября) (рис. 4А); у псевдотсуги Мензиса –

0,09 и 0,78 мг  $\text{CO}_2$ /г сухой массы · ч (22 и 13 октября) (рис. 4Б). В результате регрессионного анализа связи светового дыхания и температуры атмосферного воздуха установили, что между показателями существует прямая линейная связь (коэффициент детерминации  $R^2$  для ели европейской и псевдотсуги Мензиса составил соответственно 0,552 и 0,335).

Одной из основных задач при изучении углекислотного газообмена хвойных деревьев являлось получение количественной характеристики взаимосвязи между фотосинтезом и дыханием, позволяющей оценить роль растений в углеродном балансе урбанизированной экосистемы.



**Рис. 4.** Динамика интенсивности фотосинтеза и светового дыхания у хвойных деревьев (А – ель европейская; Б – псевдотсуга Мензиса) в октябре 2018 г.

Как следует из рис. 4, полуденные величины интенсивности фотосинтеза и светового дыхания в течение периода наблюдений находились в прямой зависимости; исключение составили 15 и 16 октября – для ели европейской и 16 октября – для псевдотсуги Мензиса, когда световое дыхание было больше ассимиляции CO<sub>2</sub>. Вероятно, это связано с тем, что метеорологические условия в эти дни характеризовались низким уровнем освещенности, который обусловил низкие значения фотосинтеза, и достаточно высокой температурой воздуха (около 17 °С) – благоприятным фактором для светового дыхания.

В октябре среднее значение светового дыхания ели европейской и псевдотсуги Мензиса составило 0,44 и 0,42 мг CO<sub>2</sub>/г сухой массы · ч. Следовательно, интенсивность фотосинтеза превышала уровень дыхания соответственно в 3,6 и 2,7 раза, что свидетельствует о положительном

углекислотном газообмене хвойных деревьев в урбанизированной среде.

Таким образом, проведенное исследование показало, что теплые погодные условия в октябре 2018 г. способствовали продлению периода поглощения углекислого газа хвойными деревьями, произрастающими на территории Ботанического сада МГУ. Выявлена видовая специфичность реакции фотосинтетического аппарата хвойных пород на экологические условия в осенний период: интенсивность CO<sub>2</sub>-ассимиляции у ели европейской, равная 1,60 мг CO<sub>2</sub>/г сухой массы · ч, была в 1,4 раза выше по сравнению с этим показателем для псевдотсуги Мензиса. Повышение температуры атмосферного воздуха в полуденные часы не влияло на интенсивность фотосинтеза хвои, что, вероятно, связано с адаптацией растений к низким температурам

воздуха, характерным для осеннего периода, и переходом к состоянию покоя. Интенсивность фотосинтеза хвои определялась только уровнем освещенности, при этом зависимость между показателями имела вид логарифмической кривой. Световое дыхание хвои находилось в прямой линейной зависимости от температуры атмосферного воздуха. Положительный углекислотный газообмен хвои ели европейской и псевдотсуги Мензиса, интенсивность CO<sub>2</sub>-ассимиляции у которых превышала уровень дыхания соответственно в 3,6 и 2,7 раза, свидетельствует о существенной роли исследуемых пород деревьев в оптимизации городской среды.

Исследования выполнены без использования животных и без привлечения людей в качестве испытуемых. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Endreny T., Santagata R., Perna A., De Stefano C., Rallo R.F., Ulgiati S. Implementing and managing urban forests: A much needed conservation strategy to increase ecosystem services and urban wellbeing // *Ecol. Model.* 2017. Vol. 360. P. 328–335.
2. Hamada S., Ohta T. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas // *Urban For. Urban Green.* 2010. Vol.9. N 1. P. 15–24.
3. Baro F., Chaparro L., Gomez-Baggethun E., Langemeyer J., Nowak D.J., Terradas J. Contribution

of ecosystem services to air quality and climate change mitigation policies: the case of urban forests in Barcelona, Spain // *Ambio*. 2014. Vol. 43. N 4. P. 466–479.

4. *Na H.R., Heisler G.M., Nowak D.J., Grant R.H.* Modeling of urban trees' effects on reducing human exposure to UV radiation in Seoul, Korea // *Urban For. Urban Green*. 2014. Vol. 13. N 4. P. 785–792.

5. *Long S.P., Ainsworth E.A., Rogers A., Ort D.R.* Rising atmospheric carbon dioxide: plants FACE the future // *Annu. Rev. Plant Biol.* 2004. Vol. 55. P. 591–628.

6. *Nowak D.J., Stevens J.C., Sisinni S.M., Luley C.J.* Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide // *J. Arboric.* 2002. Vol. 28. N 3. P. 113–122.

7. *Yang J., McBride J., Zhou J., Sun Z.* The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction // *Urban For. Urban Green*. 2005. Vol. 3. N 2. P. 65–78.

8. *Yuzbekov A.K., Zamolodchikov D.G.,*

*Ivashchenko A.I.* Spruce fir photosynthesis in the forest ecosystems of the Log Tayezhnyi test area // *Moscow Univ. Biol. Sci. Bull.* 2014. Vol. 69. N 4. P. 169–172.

9. *Chang C.Y., Fréchet E., Unda F., Mansfield S.D., Ensminger I.* Elevated temperature and CO<sub>2</sub> stimulate late-season photosynthesis but impair cold hardening in Pine // *Plant Physiol.* 2016. Vol. 172. N 2. P. 802–818.

10. *Lundmark T., Bergh J., Strand M., Koppel A.* Seasonal variation of maximum photochemical efficiency in boreal Norway spruce stands // *Trees*. 1998. Vol. 13. N 2. P. 63–67.

11. *Hadley J.L.* Effect of daily minimum temperature on photosynthesis in Eastern hemlock (*Tsuga canadensis* L.) in autumn and winter // *Arct. Antarct. Alp. Res.* 2000. Vol. 32. N 4. P. 368–374.

12. *Stinziano J.R., Hüner N.P.A., Way D.A.* Warming delays autumn declines in photosynthetic capacity in a boreal conifer, Norway spruce (*Picea abies*) // *Tree Physiol.* 2015. Vol. 35. N 12. P. 1303–1313.

Поступила в редакцию 27.07.2019 г.

После доработки 10.09.2019 г.

Принята в печать 17.09.2019 г.

## RESEARCH ARTICLE

### CARBON DIOXIDE EXCHANGE OF ARBOREAL PLANTS IN URBAN ECOSYSTEMS

A.K.Yuzbekov<sup>1,\*</sup>, W. Zuxun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Department of General Ecology, Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University, Leninskiyegory 1–12, Moscow, 119234, Russia;*

<sup>2</sup>*Faculty of Biology, Shenzhen MSU-BIT University, Ruyi Rd. 299, Longgang district, Shenzhen, Guangdong province, 518172, PRC*

\*e-mail: uak2003@mail.ru

Research on all factors that contribute to the carbon balance in the biosphere is of paramount importance, owing to the current increase in air carbon dioxide content. This work presents data on the carbon dioxide exchange of the needles of the common spruce (*Picea abies* L.) and the douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* L.) in an urban environment as exemplified by Moscow. It was established that a warm spell in autumn contributed to the prolongation of the period of carbon dioxide uptake by coniferous trees. Our analysis of the impact of environmental factors on needle photosynthetic activity revealed that photosynthesis intensity only depends on the illumination level. The midday increase in air temperature failed to affect photosynthesis intensity, probably because the plants were adapted to low night and morning air temperatures. According to the regression analysis data obtained, the dependence of CO<sub>2</sub> assimilation on illumination represented a logarithmic curve; the approximation validity coefficient (R<sup>2</sup>) being 0.8. The impact of environmental conditions on conifer photosynthesis in autumn proved to be species-specific. The

common spruce exhibited the maximum resistance to environmental factors, and its photosynthetic activity was 1,4 fold higher than that of the douglas-fir. Calculations revealed that the CO<sub>2</sub> assimilation level in the common spruce and the douglas-fir exceeded the light respiration level 3,6- and 2,7-fold, respectively, which points to a positive carbon dioxide exchange “balance sheet” and highlights the important role of coniferous trees in regulating the carbon balance of an urban ecosystem.

**Keywords:** *photosynthesis, respiration, coniferous trees, urban environment, air temperature, illumination, carbon dioxide exchange*

#### **Сведения об авторах**

*Юзбеков Ахмед Кадималиевич* – докт. биол. наук, проф. кафедры общей экологии биологического факультета МГУ. Тел.: 8-495-939-52-54; e-mail: [uak2003@mail.ru](mailto:uak2003@mail.ru)

*Цзусюнь У* – магистр биологического факультета Университета МГУ-ППИ в Шэньчжэне. Тел.: +86-13581585864; e-mail: [wuzx009@163.com](mailto:wuzx009@163.com)