

Научная статья

УДК 581.132

doi: 10.18522/1026-2237-2024-2-123-130

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТАРОВОЗРАСТНЫХ ЕЛЬНИКОВ НА УГЛЕРОДНЫЙ БАЛАНС ТАЕЖНЫХ ЛЕСОВ ВАЛДАЯ

Ахмед Кадималиевич Юзбеков^{1✉}, Антон Сергеевич Куманяев²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

¹uak2003@mail.ru✉

²anton.kumanyayev@mail.ru

Аннотация. Актуальность мониторинга параметров фотосинтеза и дыхания старовозрастных лесов Валдая связана с необходимостью определения в условиях глобального изменения климата всех составляющих углеродного баланса. Представлены результаты исследований сезонной динамики углекислотного газообмена и фотосинтетической продуктивности ели европейской (*Picea abies* L.) в полуденные часы в мае – октябре 2018–2020 гг. Установлено, что основными факторами, обуславливающими скорость ассимиляции CO₂ ели, являются температура воздуха и освещенность (фотосинтетически активная радиация). Среднее значение интенсивности фотосинтеза за год превышало уровень светового дыхания более чем в 2 раза. Выявлено существенное изменение величины фотосинтетической продуктивности ели в течение сезонов: максимальная наблюдалась в июне-июле, минимальная – в октябре. Межгодовое изменение продуктивности зависело от погодных условий и состояния древостоя на экспериментальном полигоне. Суммарное поглощение углекислого газа хвоей в 2018–2020 гг. составило 3,3; 2,13 и 1,15 т CO₂·га⁻¹·год⁻¹ соответственно. Средняя величина чистой первичной продукции (0,37 т С·га⁻¹·год⁻¹) и положительный углекислотный газообмен ели европейской свидетельствуют о существенном влиянии старовозрастных ельников на углеродный баланс лесных сообществ Валдая.

Ключевые слова: ель европейская, фотосинтез, дыхание, углекислый газ, температура, освещенность, продуктивность, углеродный баланс

Для цитирования: Юзбеков А.К., Куманяев А.С. Оценка влияния старовозрастных ельников на углеродный баланс таежных лесов Валдая // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 2. С. 123–130.

Благодарности: работа выполнена в рамках темы 3.3 «Развитие методов и технологий расчетного мониторинга антропогенных выбросов и абсорбции поглотителями парниковых газов и короткоживущих климатически активных веществ» (ЕГИСВ НИОКТР — АААА-А20-120021090098-8), а также при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

IMPACT OF OLD-AGED SPRUCE FORESTS ON THE CARBON BALANCE OF THE CONYFEROUS FOREST STAND OF THE VALDAY REGION

Ahmed K. Yuzbekov^{1✉}, Anton S. Kumanyayev²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Center for Ecology and Forest Productivity of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹uak2003@mail.ru✉

²anton.kumanyayev@mail.ru

© Юзбеков А.К., Куманяев А.С., 2024

Abstract. Monitoring the photosynthesis- and respiration-related characteristics of the old-aged forests of the Valday Region is of paramount importance since it is imperative that the role of all factors contributing to their carbon balance should be evaluated. This work presents data on seasonal dynamics of midday carbon-dioxide exchange and photosynthetic productivity of the Norway spruce (*Picea abies* L.) in May - October 2018-2020. It was established that the main factors determining the CO₂ assimilation rate of the spruce are the air temperature and illumination. The average annual photosynthesis intensity level was more than two times higher than the light-dependent respiration level. Significant interseasonal changes in spruce photosynthetic productivity were revealed: the maximum and minimum photosynthetic productivity was detected in June-July and October, respectively. The interannual changes were related to the weather conditions and to the state of the forest stand in the tested area. The total carbon dioxide uptake by spruce needles in 2018, 2019, and 2020 was 3.3, 2.13, and 1.15 ton of CO₂·ha⁻¹·year⁻¹. The average value of net primary production (0.37 ton of C·ha⁻¹·year⁻¹) and the positive carbon dioxide balance of the Norway spruce testify to a considerable influence of old-aged spruce forests on the carbon balance of the forest cenoses of the Valday Region.

Keywords: Norway spruce, photosynthesis, respiration, carbon dioxide, temperature, illumination, productivity, carbon balance

For citation: Yuzbekov A.K., Kumanyaev A.S. Impact of Old-Aged Spruce Forests on the Carbon Balance of the Coniferous Forest Stand of the Valday Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(2):123-130. (In Russ.).

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of topic 3.3 "Development of methods and technologies for computational monitoring of anthropogenic emissions and absorption by sinks of greenhouse gases and short-lived climate-active substances" (EGISU R&D - AAAA-A20-120021090098-8), as well as with the support of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Lomonosov Moscow State University "The future of the planet and global environmental changes."

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

В последние десятилетия в связи с повышением концентрации углекислого газа в атмосфере огромное значение имеют леса, благодаря их способности поглощать и депонировать углерод в течение длительного времени. Особая роль принадлежит лесам бореальной зоны, которые оказывают существенное воздействие на глобальный климат, влияя на радиационный баланс и углеродный цикл [1]. Бореальные леса занимают около 33 % площади лесов планеты [2] и содержат почти треть мирового растительного и почвенного углерода [3]. Около половины бореальных лесов мира – это старовозрастные леса, которые являются хранилищами большого количества запасенного углерода [4]. Углеродный баланс в них, как правило, положительный [5].

На территории национального парка «Валдайский» бореальные леса занимают 133 тыс. га (84 % всей площади). Преобладающими породами являются ель и сосна (54 %), береза (30 %). Суммарное поглощение углерода на покрытых лесами землях составляет 185,6 тыс. т С·год⁻¹. Около 13 % площади национального парка приходится на старовозрастные леса [6].

Цель предлагаемой статьи – оценить вклад фотосинтетического поглощения углерода старовозрастными ельниками в углеродный баланс таежных лесов Валдая.

Для её достижения нами были поставлены следующие задачи: исследование сезонной динамики углекислотного газообмена хвои ели европейской (*Picea abies* L.) в полуденные часы в течение 2018–2020 гг.; анализ сезонных и межгодовых изменений фотосинтетической продуктивности ели; оценка вклада поглощения углерода хвоей ели европейской в углеродный баланс таежных лесов Валдая.

Объекты и методы

Исследования выполняли на экспериментальном полигоне «Таёжный лог» Валдайского филиала Государственного гидрологического института. Полигон расположен на территории национального парка «Валдайский» Новгородской области (57°58' с.ш., 33°20' в.д.). По своему ботанико-географическому положению район полевых работ находится на границе зон южной тайги и хвойно-широколиственных лесов. Измерения проводили на постоянной пробной площади (ПП1) 0,1 га, заложенной в ельнике мелкотравно-зеленомошном. На ПП1 преобладает одновозрастной

древостой ели европейской возрастом 120 лет с небольшой примесью сосны (породный состав насаждения – 9Е1С, средняя высота ели – 31 м, средний диаметр стволов на высоте 1,3 м – 41 см, полнота – 0,4). Доминирующую позицию в подлеске занимает рябина, встречаются осина, ель и береза. В травяном покрове преобладают кислица обыкновенная и зеленчук желтый [7].

В исследовании использовали три модельных дерева ели европейской. Наблюдение за поглощением и выделением углекислого газа хвоей проводили на неотделенных интактных побегах, расположенных в нижней части кроны (уровень нижних ветвей елей – около 2 м от поверхности земли), с южной стороны деревьев. При изучении углекислотного газообмена хвои опирались на методические работы других авторов, согласно которым интактный охвоенный побег служит моделью фотосинтезирующей кроны и отражает физиологическое состояние дерева [8, 9]. Углекислотный газообмен хвои регистрировали с мая по октябрь 2018–2020 гг., в течение трех дней третьей декады каждого месяца, в полуденные часы (наиболее благоприятные для процесса фотосинтеза условия освещения и температуры), в трехкратной повторности, с интервалом 10 мин.

Интенсивность фотосинтеза и светового дыхания хвои (выделение CO_2 на свету в результате двух различных типов дыхания – фотодыхания и темнового) определяли газометрическим методом (метод закрытых камер). В полевых работах использовали портативный полевой анализатор, сконструированный на биологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова [10]. Измерения и обработка полевых материалов выполнялись согласно методике авторов [11]. Показатели интенсивности фотосинтеза и светового дыхания хвои рассчитывали в $\text{мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы $\cdot \text{ч}^{-1}$.

Дополнительно проводили наблюдение за факторами внешней среды – температурой воздуха и общей облачностью.

Фотосинтетически активную радиацию (ФАР) рассчитывали как функцию потенциальной суммарной солнечной радиации (при ясном небе) и облачности в соответствии с методическими рекомендациями [12].

Дневную фотосинтетическую продуктивность хвои определяли исходя из данных об изменении интенсивности фотосинтеза в полуденные часы. Величину абсолютно сухой массы хвои модельного дерева рассчитывали согласно аллометрическому уравнению [13]. Дневная фотосинтетическая продуктивность являлась основой для определения годовой продуктивности фотосинтеза.

Для оценки вклада поглощения углерода хвоей ели европейской в углеродный баланс таежных лесов Валдая использовали величину чистой первичной продукции, определяемую по данным фотосинтетической продуктивности и дыхания хвои [6].

Результаты и обсуждение

На основании проведенного анализа выявлены сезонные изменения величины ассимиляции CO_2 у ели европейской в полуденные часы в 2018–2020 гг. по отношению к температуре воздуха (рис. 1).

График изменения интенсивности фотосинтеза в 2018 г. имеет форму одновершинной кривой: максимальному значению температуры в июле (24,5 °С) соответствовал максимум интенсивности ассимиляции CO_2 (4,2 $\text{мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы $\cdot \text{ч}^{-1}$). В связи с теплыми погодными условиями измерения фотосинтеза ели продолжались до ноября: в октябре при температуре 1,9 °С зарегистрировано минимальное значение показателя (0,3 $\text{мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы $\cdot \text{ч}^{-1}$). Данные о продлении периода поглощения CO_2 хвойными деревьями осенью получены другими авторами [14].

Величина интенсивности фотосинтеза в мае, несмотря на достаточно высокую температуру воздуха (21,7 °С), меньше показателя в июне при температуре 16,2 °С, что можно объяснить неблагоприятными для процесса фотосинтеза погодными условиями в мае: в полуденные часы зарегистрирована относительная влажность воздуха 27–34 %. Известно, что в условиях низкой влажности воздуха чрезмерная потеря воды листом вызывает закрывание устьиц и, как следствие, снижается интенсивность фотосинтеза.

На графике, отражающем динамику интенсивности фотосинтеза в 2019 г., максимум отмечен в июле (3,7 $\text{мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы $\cdot \text{ч}^{-1}$), что соответствовало максимальной температуре воздуха в течение периода наблюдений (20,2 °С). В июне, в связи с холодной и дождливой погодой, при температуре воздуха 12,5 °С и относительной влажности 90 % (количество осадков

в дни наблюдений – до 28 мм в сут) наблюдалось снижение интенсивности фотосинтеза относительно показателя в мае до $1,8 \text{ мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы $\cdot \text{ч}^{-1}$.

Следует отметить, что в октябре при повышении температуры по сравнению с сентябрем на $4,0^\circ\text{C}$ интенсивность фотосинтеза продолжала снижаться ($0,7 \text{ мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы $\cdot \text{ч}^{-1}$). Наблюдаемое уменьшение фотосинтетической активности можно объяснить структурно-функциональными изменениями в хвое в условиях перехода растений к состоянию покоя [15].

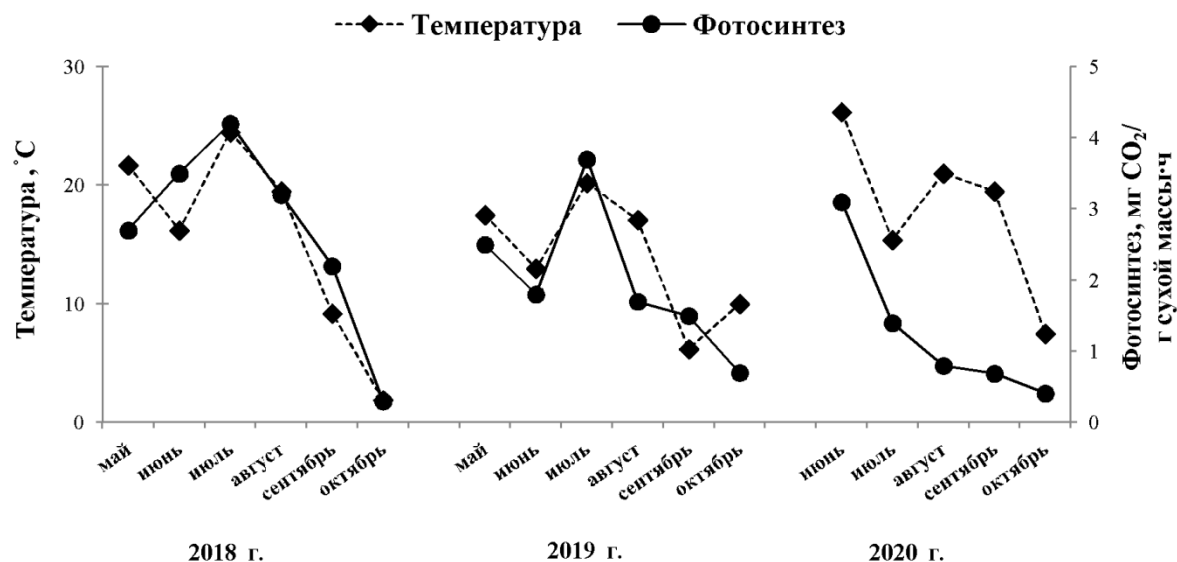


Рис. 1. Сезонная динамика интенсивности фотосинтеза ели и температуры воздуха
/ Fig. 1. Seasonal dynamics of photosynthesis rate in spruce and air temperature

Сезонный ход интенсивности фотосинтеза в 2020 г. представлен одновершинной кривой, плавно снижающейся от максимального значения показателя в июне ($3,1 \text{ мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы $\cdot \text{ч}^{-1}$) до минимального в октябре ($0,41 \text{ мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы $\cdot \text{ч}^{-1}$). В эти же месяцы зарегистрированы максимальная и минимальная температуры воздуха ($26,2$ и $7,5^\circ\text{C}$). Снижение интенсивности фотосинтеза в июле более чем в 2 раза по сравнению с показателем июня обусловлено низкой для полуденных часов температурой воздуха ($15,4^\circ\text{C}$) и продолжительными осадками в последнюю декаду месяца.

Анализ связи интенсивности фотосинтеза с факторами внешней среды, выполненный по средним значениям показателей за день, выявил, что в 2018–2020 гг. интенсивность фотосинтеза хвои находилась в линейной зависимости от температуры воздуха (коэффициент детерминации равен, соответственно, $R^2=0,768$ ($N=18$; $P<0,001$); $R^2=0,593$ ($N=18$; $P<0,001$); $R^2=0,482$ ($N=15$; $P<0,005$)). Линейный характер зависимости между показателями для еловых лесов Севера получен ранее другими авторами [16].

При анализе влияния интенсивности света на процесс фотосинтеза использовали значения ФАР. Изменения интенсивности фотосинтеза и ФАР в 2018–2020 гг. приведены на рис. 2.

В 2018 г. максимальное значение ФАР, равное $720 \text{ мкЭ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, отмечено в июле; снижение уровня освещенности в июне по сравнению с маем обусловлено увеличением облачности в последнюю декаду месяца до 10 баллов. В мае-июне не наблюдалась закономерность зависимости интенсивности фотосинтеза от ФАР, что обусловлено, как показано выше, влиянием на фотосинтез в мае низкой относительной влажности воздуха.

Для 2019 г. максимумы освещенности ($710 \text{ мкЭ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) и интенсивности фотосинтеза зарегистрированы в июле. Следует отметить, что уменьшение скорости фотосинтеза в июне по отношению к маю при равных значениях ФАР обусловлено доминирующим влиянием на процесс фотосинтеза температуры воздуха, которая снизилась на $5,0^\circ\text{C}$.

Исследование процесса фотосинтеза и освещенности в 2020 г. показало, что максимальному значению ФАР в июне при ясном небе ($930 \text{ мкЭ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) соответствовало максимальное значение интенсивности фотосинтеза. Снижение ФАР в июле по сравнению с июнем более чем в 1,5 раза связано как с уменьшением потенциальной суммарной солнечной радиации, так и с увеличением общей облачности до 10 баллов.

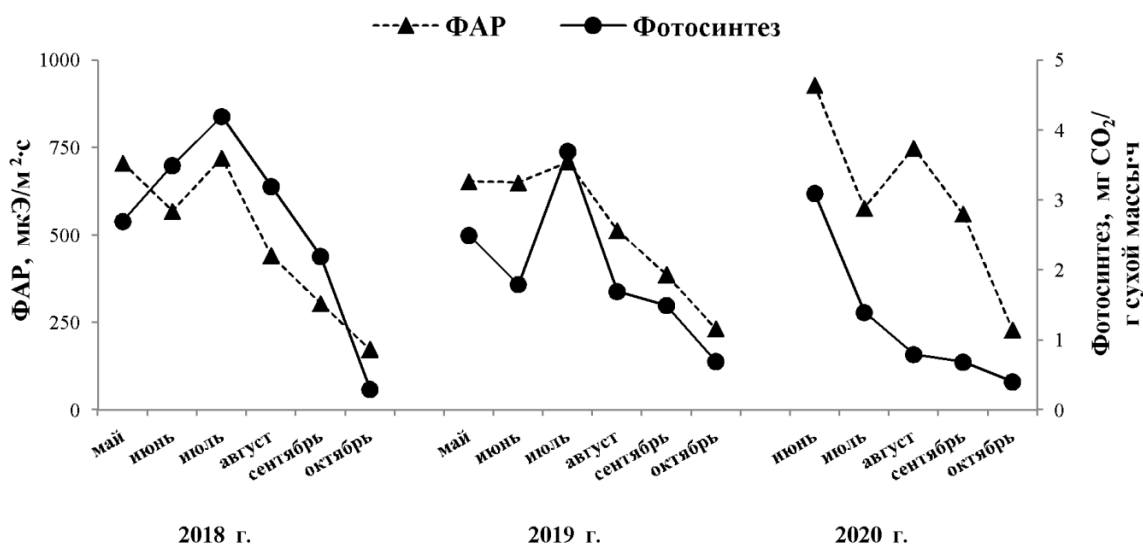


Рис. 2. Сезонная динамика интенсивности фотосинтеза ели и освещенности (ФАР)
/ Fig. 2. Seasonal dynamics of photosynthesis rate in spruce and illumination (PAR)

Минимальные для 2018–2020 гг. значения ФАР (в интервале $170\text{--}230\text{ мкЭ}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$) в соответствии с сезонным ходом потенциальной суммарной солнечной радиации и общей облачностью 9–10 баллов наблюдались в октябре. В этот же месяц зафиксированы минимальные значения интенсивности фотосинтеза.

Материалы исследований позволили установить, что в 2018 г. изменение интенсивности фотосинтеза хвои в зависимости от ФАР имело форму логарифмической кривой (коэффициент детерминации $R^2=0,736$ ($N=18$; $P<0,001$)), в 2019–2020 гг. между показателями существовала линейная зависимость ($R^2=0,729$ ($N=18$; $P<0,001$) и $R^2=0,604$ ($N=15$; $P<0,001$)).

Параллельно с исследованием интенсивности фотосинтеза хвои в полуденные часы регистрировали интенсивность светового дыхания. Полученные данные показали, что сезонный ход светового дыхания соответствовал изменению интенсивности фотосинтеза: максимальная и минимальная величины дыхания отмечены в 2018–2019 гг. – в июле и октябре, в 2020 г. – в июне и октябре (рис. 3).

Как показали расчеты, отношение средних за год значений интенсивности фотосинтеза и дыхания составило в 2018–2020 гг. 2,9; 2,4 и 2,6 соответственно, что указывает на положительный углекислотный газообмен хвои ели в полуденные часы. Аналогичные результаты получены и другими авторами [17].

Влияние фотосинтеза на процесс, обеспечивающий сток углерода в глобальном масштабе, осуществляется через продуктивность фотосинтеза – поглощение углерода в течение определенного периода времени. В работе была рассчитана фотосинтетическая продуктивность хвои ели: дневная, за месяц, годовая. При расчете дневной продуктивности ограничились ее значениями в полуденные часы (условия оптимального освещения и температуры). Абсолютно сухую массу хвои модельного дерева определяли в зависимости от его линейных размеров. Фотосинтетическую продуктивность за месяц рассчитывали на основе дневной продуктивности с учетом количества дней в каждом месяце, количества и категории состояния деревьев на площади 1 га. Годовую продуктивность фотосинтеза определяли как сумму продуктивности за все месяцы наблюдений.

Результаты расчета продуктивности фотосинтеза хвои представлены в таблице.

Анализ изменений фотосинтетической продуктивности хвои в 2018–2020 гг. показал значительное варьирование данного показателя. Максимально высокая продуктивность фотосинтеза наблюдалась в июле 2018–2019 гг. ($1,00$ и $0,67\text{ т CO}_2\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{мес.}^{-1}$) и июне 2020 г. ($0,55\text{ т CO}_2\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{мес.}^{-1}$). В октябре для каждого года отмечено снижение продуктивности до минимальных значений ($0,06\text{--}0,13\text{ т CO}_2\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{мес.}^{-1}$). Суммарное поглощение углекислого газа хвоей в 2018–2020 гг. составило 3,3; 2,13 и 1,15 $\text{т CO}_2\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ соответственно. Максимальное значение продуктивности фотосинтеза в 2018 г. достигалось за счет высоких показателей интен-

сивности процесса в полуденные часы в условиях оптимальной температуры воздуха и относительной влажности. Более низкие значения фотосинтетической продуктивности в 2019–2020 гг. были обусловлены неблагоприятными факторами среды (большое количество осадков, низкая влажность воздуха, 10-балльная облачность), которые привели к снижению показаний интенсивности фотосинтеза в течение периода наблюдений.

Как известно, валовая первичная продукция (GPP) определяется способностью фитоценозов поглощать CO_2 в процессе фотосинтеза, что количественно реализуется через фотосинтетическую продуктивность. Разность между GPP и R_a (дыхание автотрофов) называется чистой первичной продукцией (NPP) и характеризует количество органического вещества, которое пополняет запасы углерода в фитомассе древесных растений. NPP хвой ели европейской в полуденные часы была определена на основе годовых показателей фотосинтетической продуктивности и светового дыхания хвой. Величина NPP хвой ели в 2018 г. составила $0,59 \text{ т С} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, в 2019–2020 гг. снизилась в 1,7 и 3,1 раза. Согласно [6], средняя величина NPP лесной экосистемы на территории полигона «Таежный лог» равна $3,44 \text{ т С} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Доля средней величины NPP хвой ели по отношению к NPP ельника составила 10,8 %. Полученное соотношение, несмотря на его заниженную величину (NPP ели определена с учетом поглощения углерода только в полуденные часы), объективно отражает влияние старовозрастных еловых насаждений на годовой баланс углерода в таежных лесах Валдая.

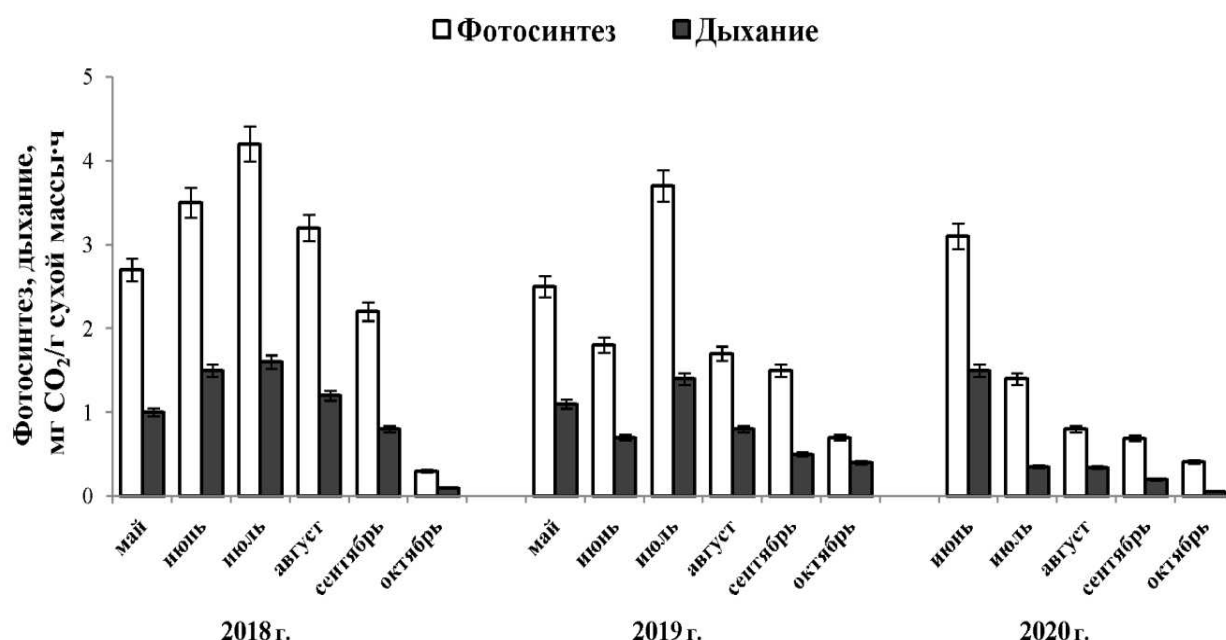


Рис. 3. Показатели фотосинтеза и дыхания хвой ели европейской (приведены средние величины и их относительные ошибки) / Fig. 3. Parameters of photosynthesis and respiration in Norway spruce needles (average values and their relative errors are given)

Потенциальная продуктивность фотосинтеза ели европейской / Potential photosynthesis productivity of Norway spruce

Год наблюдения	Продуктивность фотосинтеза, $\text{т CO}_2 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{мес.}^{-1}$					
	Месяц					
	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
2018	0,52	0,65	1,00	0,62	0,41	0,06
2019	0,45	0,31	0,67	0,31	0,26	0,13
2020		0,55	0,26	0,15	0,12	0,07