

ОЦЕНКА ВКЛАДА КОРНЕВОГО УГЛЕРОДНОГО ПИТАНИЯ В ФОРМИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ В МОДЕЛЬНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Ю. Х. Шогенов, З. И. Дударов, А. Х. Занилов

Реферат. Изучение механизмов трансформации диоксида углерода в агроэкосистемах с позиции представлений о поглощении CO_2 исключительно хлорофилл содержащими частями вегетирующих растений не позволяет объективно оценивать экосистемную роль каждого компонента. Для оценки вклада корневого углеродного питания в формирование биомассы растений был заложен модельный эксперимент с использованием авторской установки, позволяющая изолировать корневую и листовую части растения друг от друга и регистрировать значения CO_2 для расчета его баланса. В качестве экспериментального растения использовался саженец павловнии (*Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud., 1841) с известной начальной массой, вегетирующего в условиях 12-часового светового режима. Вклад корневого углеродного питания в формирование биомассы рассчитывался по разнице C-CO_2 в атмосфере листовой камеры и содержании элементарного углерода в растении в конце опыта. Содержание углерода в частях растений определялось на анализаторе углерода MultiEA 200CS при температуре 1100°C . В результате 30-ти суток наблюдений было установлено, что масса C-CO_2 , находившегося на всем протяжении эксперимента (6960 ppm) в атмосфере листовой камеры объемом $0,06 \text{ m}^3$ соответствовало 210 мг углерода. В то же время, содержание углерода в приращенной массе саженца (690 мг) в абсолютно сухой форме содержалось $274,9 \text{ мг}$ элементарного углерода, что свидетельствует о наличии иного альтернативного источника поступления углерода. По мнению авторов, $64,9 \text{ мг}$ элементарного углерода ($23,6\%$ от общей массы), принявшего участие в формировании приращенной биомассы экспериментального растения поступило через корневую систему. Полученные результаты позволяют дать объяснение случаям, когда лесные массивы могут формировать баланс, смещенный в сторону потока CO_2 . Представление о механизме корневого углеродного питания и его потенциале позволяет более точно создавать модели трансформации CO_2 в почвенно-растительных системах.

Ключевые слова: корневое углеродное питание растений, углекислый газ, баланс CO_2 .

Введение. Основная роль CO_2 в развитии растений сводится к накоплению растительной биомассы. При этом известно, что углекислый газ не только поглощается растениями, но и интенсивно выделяется, особенно в темное время суток [1]. Так, ночное дыхание растительного покрова оказывается столь значительным, что в некоторых случаях во избежание завышения средних значений они не берутся в расчет при проведении оценок сезонной изменчивости концентрации парниковых газов [2]. В свою очередь игнорирование вклада дыхания растений может привести к грубым ошибкам при расчете баланса углекислого газа в экосистеме. Как следствие, мы имеем неопределенность величины баланса CO_2 на территории России, доходящая до 50% [3] по причине неопределенности самих оценок потоков углерода [4]. В связи с этим имеются предложения по переходу от вычислений ежегодных выбросов в атмосферу к выяснению причинно-следственных связей, в частности в процессе почвенного газообмена [5].

Актуальность более детального исследования механизмов выделения CO_2 компонентами экосистем связана с необходимостью разработки точных методов расчета углеродного баланса, в том числе математико-статистических.

Важным условием для установления причин по которым лес может выступать в качестве источника диоксида углерода является дифференцированный учет дыхания растительной массы и почвы под ней. Считается,

что от 40 до 80% высвобожденного CO_2 в лесных экосистемах приходится на дыхание почвы [6]. Ограниченное количество данных о дифференцированном вкладе компонентов лесных экосистем в поток CO_2 не позволяет объективно оценить экосистемную роль каждого компонента и усложняет поиск решений по смещению углеродного баланса в сторону поглощения. По нашему мнению, недооцененным фактором, в значительной степени влияющим на углеродный баланс является корневое углеродное питание растений.

Целью работы является количественная оценка баланса CO_2 в системе «растение-атмосфера», сформированного изолированным саженцем павловнии в модельном эксперименте и привлечение внимания к «темным пятнам» в существующих методах расчета баланса CO_2 .

Условия, материалы и методы. Высокая динамичность процессов трансформации CO_2 между компонентами экосистем усложняет задачу прогнозируемого управления потоками CO_2 , а достоверная оценка направленности трансформации углерода представляет собой сложную методологическую задачу [7].

В настоящее время упрощенный метод перерасчета органического вещества почвы и биомассы растений в CO_2 -эквивалент является констатирующим и не позволяет прогнозировать баланс с высокой точностью, что требует более детальных исследований и наличия более информативных параметров.

С целью наблюдения за суточными

изменениями концентрации углекислого газа в изолированной экспериментальной камере, а также изучения особенностей трансформации CO_2 в контролируемых условиях авторами работы создано специализированное

устройство (рис. 1) [8], позволяющее расширить представление о процессе дыхания не только почв, но и растений как о важном экосистемном явлении, принимающем участие в формировании глобального баланса CO_2 .

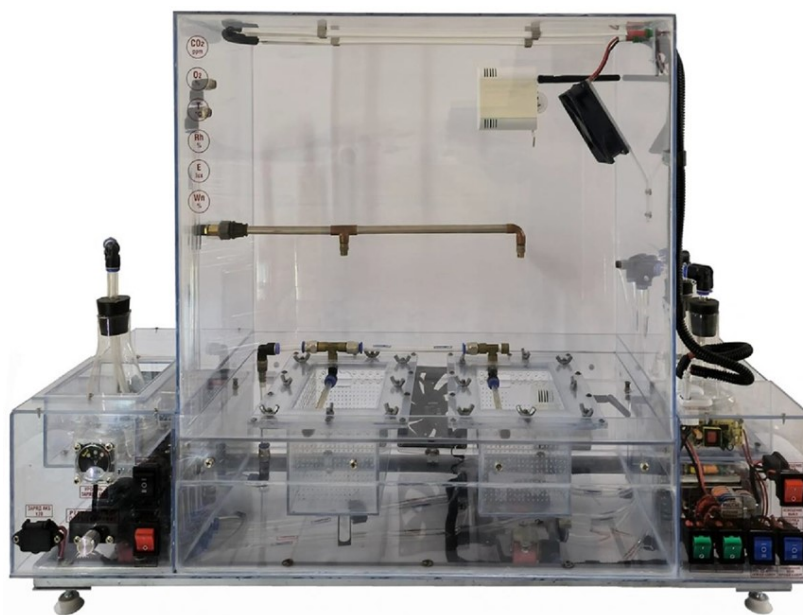


Рис. 1 - Вид установки для учета потоков CO_2 в замкнутом биоцикле «почва-растение-атмосфера»

Установка состоит из двух частей, разделенных между собой перегородкой для возможности ограничения смешивания газового состава верхней (листовой) и нижней (корневой) камер. Для поддержания светового режима верхняя камера оснащена специализированными фитолампами с длиной волн красного спектра 630-670 нм и синего спектра – 420-460 нм. Регистрация концентраций CO_2 в атмосфере камер осуществляется с помощью не дисперсного инфракрасного сенсора углекислого газа (NDIR) с частотой 1 раз в 10 минут с диапазоном измерений 0-5000 ppm. Текущие и архивированные данные о концентрациях CO_2 выводятся на монитор компьютера или смартфона. Установка позволяет производить наблюдения в автономном режиме на протяжении более 30 суток, до момента накопления критичной биомассы растениями в камере. Размеры верхней камеры составляют: 0,5м (длина) x 0,3м (ширина) x 0,4м (высота). Объем листовой камеры 0,06 м³.

В качестве объекта исследования использовался саженец павлонии войлочной (*Paulownia tomentosa*) со сформированной корневой системой и тремя парами листьев. Масса саженца составила 7,47 г. Эксперимент инициирован 08 мая 2024 года. В качестве субстрата использовался промытый речной песок (800 г) обогащенного 10 г комплексного минерального удобрения (NPK 16:16:16). Продолжительность наблюдения составила 30 суток. На протяжении всего периода производилась регистрация показателей CO_2 . В конце срока эксперимента зафиксирована

образовавшаяся биомасса растения и проведен расчет баланса CO_2 -эквивалента, сформированного в системе «растение-атмосфера». Периодичность светового режима (фотопериод), имитирующего день и ночь составляет 12ч.

Результаты и обсуждение. Фотосинтез и дыхание зеленых растений являются смежными тесно связанными процессами и имеют равнозначное значение для устойчивой их жизнедеятельности. При этом считается, что поглощение диоксида углерода зелеными частями растения имеет исключительное значение для формирования их биомассы, а, образуемое органическое вещество при фотосинтезе расходуется на дыхание [9]. В таком случае конечная величина продуктивности растительности оценивается как разница между первичной нетто-продуктивностью и вкладом гетеротрофного дыхания растений, в результате которого расходуется образованное органическое вещество [10]. Следовательно, если данные показатели по тем или иным причинам выравниваются, то следует ожидать прекращения прироста растительной биомассы. Ожидается, что при отсутствии исчерпывающих объяснений выводы многолетних и качественных исследований, к которым авторы относят работы Кобак К.И. подвергаются критике [11]. Например, в дискуссионной статье [11] со ссылкой на работу [10] приводятся данные о функционировании сосняка черничного начиная с начала сентября до конца апреля в режиме углеродного источника, что должно было сопровождаться деградацией биомассы в лесном массиве, так как углекислый газ на ряду

со светом являются ведущими факторами ответственными за протекание фотосинтеза. В таком случае возникает вопрос: если альтернативный путь поступления углерода в растение не рассматривается, то как долго оно способно полноценно функционировать в режиме

дефицита CO₂?

В результате эксперимента была продемонстрирована возможность накопления биомассы растением павлонии в условиях нулевого баланса CO₂ в листовой камере экспериментальной установки (рис. 2).

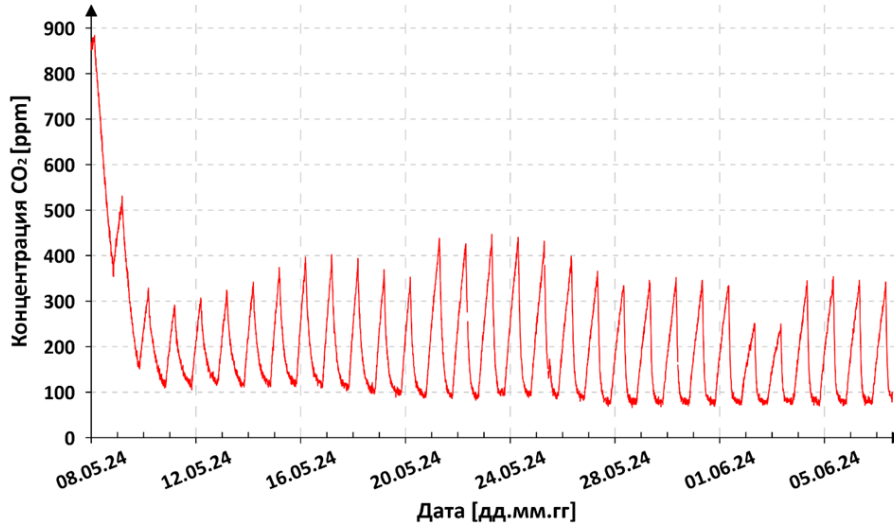


Рис.2. – Суточная динамика изменения концентрации CO₂ (ppm) в изолированной листовой камере

Как видно из рисунка выше, изначально имевшийся объем CO₂ (867 ppm) в камере к началу эксперимента был поглощен за 2-е суток, после чего источником периодически образующегося объема углекислого газа в

камере является углекислый газ, продуцированный в результате дыхания самого растения, без поступления его извне, а возможность извлечения растениями CO₂ из атмосферы имеют определенные пределы (рис. 3).

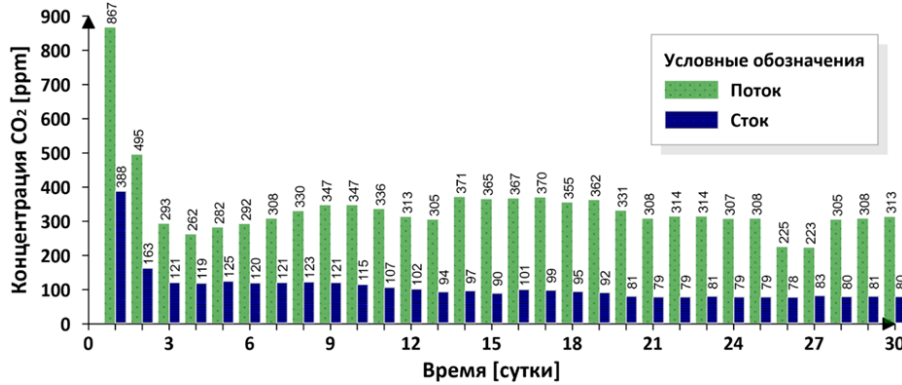


Рис.3 – Максимальные и минимальные значения суточных концентраций CO₂ в камере

Диаграмма выше демонстрирует, что, начиная с третьих суток среднесуточное минимальное значение CO₂ составляло 109 ppm, а максимальное среднесуточное значение соответствовало 341 ppm, что отражало показатели стока (поглощения углекислого газа экспериментальным растением в процессе фотосинтеза) и потока газа (поступление в атмосферу углекислого газа в результате дыхания экспериментального растения), соответственно. При этом, по мере роста растения и накопления биомассы способность поглощения углекислого газа возрастала, что наблюдается по показателям трех временных точек 10.05-19.05 (начальная фаза), 20.05-29.05 (промежуточная фаза) и 30.05-07.06

(конечная фаза), где показатели демонстрировали средние значения в каждой декаде 121, 95 и 80 ppm, соответственно. При этом можно предположить, что способностью извлечения CO₂ не прямо пропорционально биомассе растений, которая увеличилась за время эксперимента более, чем в 2 раза (на 111,8%), с 7,47 г до 15,82 г.

Расчет углеродного баланса. Среднесуточный объем диоксида углерода, который находился в камере за период проведения эксперимента был равен 232 ppm. Таким образом, имея данные о продолжительности эксперимента, суточном балансе CO₂ в модуле и объеме камеры мы можем рассчитать какое количество углерода CO₂ из атмосферы камеры

пошло на формирование биомассы павловнии по формуле:

$$M = (C \times T \times m \times V) / K$$

где,

M – масса углерода в атмосфере камеры, принявшая участие в формировании биомассы, мг;

C – среднесуточный баланс CO_2 в атмосфере камеры, ppm;

T – продолжительность наблюдения, сутки;

m – масса CO_2 , $\text{мг}/\text{м}^3$;

V – объем камеры, м^3 ;

K – коэффициент пересчета CO_2 в элементарный углерод.

Расчет:

$$M = (232 \text{ ppm} \times 30 \text{ сут.} \times 1,84 \text{ мг}/\text{м}^3 \times 0,06 \text{ м}^3) / 3,66 = 210 \text{ мг}$$

В соответствии с произведенными

расчетами мы имеем, что на формирование биомассы павловнии из атмосферы листовой камеры экспериментального модуля было использовано 210 мг элементарного углерода. Отсюда следует, что биомасса наземной части растения, в соответствии с обозначенными выше представлениями о формировании органического вещества фотосинтезирующих растений [10] в камере не должна превышать в пересчете на углерод полученную цифру.

Перед закладкой эксперимента был произведен учет массы саженца с корневой системой и произведены замеры площади 6-и имевшихся листьев (табл.). По истечении 30-и суток был произведен повторный учет массы растения с корневой системой и рассчитана площадь всех листьев, включая вновь образовавшиеся, которые отчетливо видны на снимках (рис.4).

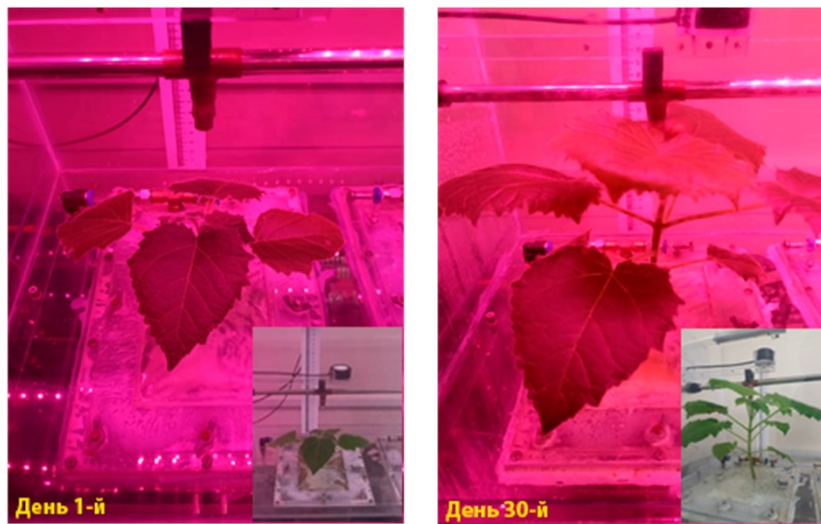


Рис.4. –Визуализация роста биомассы опытного растения

На момент закладки эксперимента были сформированы 2 полноценных яруса (4 листа), а листья 3-го яруса находились на стадии формирования. Общая площадь

6 имевшихся листьев в процессе развития растения увеличилась на 93,9% (рис. 5) и дополнительно сформировалось еще 2 яруса.

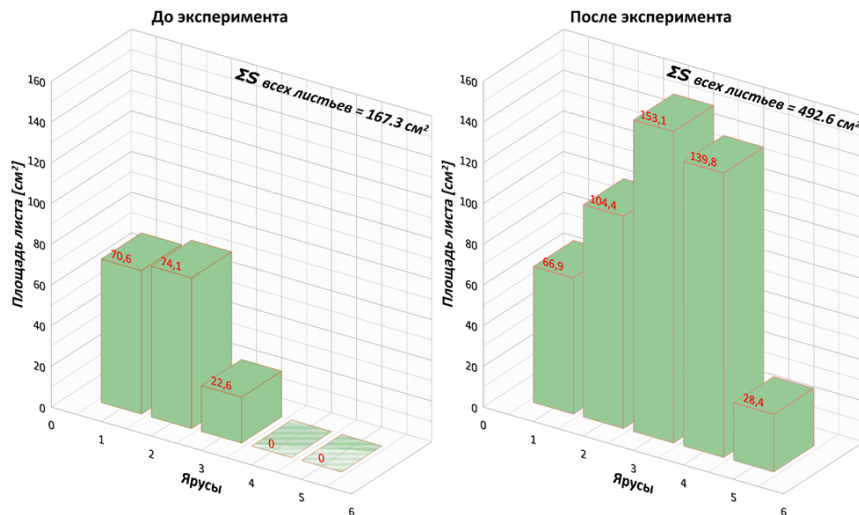


Рис. 5 - Изменение листовой площади в динамике, см^2

Как видно из рисунка 5, общая площадь листьев за период наблюдения возросла на 194%, учитывая незначительное редуцирование листьев первого яруса.

Масса саженца за 30 суток увеличилась на 111,8%, и составила 15,82 г. при начальных

показателях 7,47 г. (таблица). Дальнейший расчет образовавшегося баланса углерода в системе атмосфера-растение проводился на основе содержания элементарного углерода в частях растений, определяемого при температуре 1100 °С на анализаторе MultiEA 200CS.

Таблица - Содержание углерода в приращённой биомассе, мг

| Биомасса прироста | | | | Содержание углерода | | |
|-------------------|---------------------------|----------------|-----------|---------------------|-------------|-------|
| Сырая масса, мг | Абсолютно-сухая масса, мг | Часть растения | Масса, мг | Доля углерода, % | Углерод, мг | |
| 8350 | 690 | Листья | 404 | 40,8 | 164,83 | 274,9 |
| | | Стебель | 170 | 38,5 | 65,45 | |
| | | Корень | 116 | | 44,66 | |

Сопоставление табличных данных и результатов расчета углерода в атмосфере свидетельствует о принятии участия в формировании биомассы растения углерода, сверх того, который фиксировался в атмосфере экспериментальной камеры. В то время как в камере за весь период эксперимента зафиксировано всего 210 мг углерода в форме CO₂, углеродный эквивалент образованной биомассы оказался равен 274,9 мг, что на 64,9 г (23,6% от общей массы) больше «ожидаемого» показателя.

Для прояснения вопроса из какого или каких источников в растение поступило 23,6% углерода, не поглощенного листовым аппаратом опытного растения следует обратить внимание на такой механизм как корневое углеродное питание растений.

Теме корневое углеродное питание в настоящее время не уделяется достаточного внимания исследователей, а в какой-то степени носит негласно табуированный характер. В то же время в научной литературе по данному вопросу существует множество исследований, подчеркивающих роль корней растений в усвоении углекислого газа [12-19].

Не будь данного источника мы в результате эксперимента имели бы добавленную абсолютно сухую массу растения не 690 мг, а равную 527,2 мг. То есть если поглощенный объем CO₂ идет на образование органического вещества, и оно же распадается в процессе гетеротрофного дыхания мы должны иметь массу, растения равную стартовой его массе без изменения.

Полученные в результате модельного эксперимента данные подтверждают и наличие, так называемого «малого внутреннего цикла» биологического круговорота углерода, когда лесные экосистемы поглощают эмитированный самими же растениями углекислый газ [20]. Считается, что за счет малого внутреннего цикла формируется более 60% чистой первичной продукции [5]. В проведенном опыте мы видим, что при определенных условиях автономность может достигать 100%, так как образование биомассы экспериментального растения происходило практически без поступления CO₂ в камеру извне на протяжении всего периода наблюдения (30 суток).

Перспективы направления исследований.

Результаты, проведенного исследования могут быть использованы в качестве научной основы для повышения точности моделей трансформации CO₂ в система «растение-атмосфера» и «почва-растение-атмосфера» с учетом фактора корневого углеродного питания растений, а также интенсивности и продолжительности освещения. Имеются данные, что световой режим в лесном массиве в течение суток в большей степени, чем влажность и температура влияет на колебание CO₂ в атмосфере [21], что, в свою очередь, влияет на физиологические функции, включая образование АТФ и углеродных скелетов [22].

С практической точки зрения для увеличения способности зрелых древесных экосистем фиксировать больше углерода, ограниченной дефицитом питательных веществ в почве, преимущественно азотом и фосфором [23], перспективными является поиск средств, стимулирующих накопление биологического азота и мобилизацию фосфора в почве посредством управления корневыми экссудатами, влияющими на активность почвенной микрофлоры. Учитывая, что управление плодородием почвы в лесах традиционными методами, используемыми в земледелии, не представляется возможным, могут быть использованы катализаторы органического и минерального происхождения (ферменты, аминокислоты, микроэлементы и др.), вносимые беспилотными летательными аппаратами.

Выводы. В процессе модельного эксперимента было установлено, что масса углерода углекислого газа, поступавшего из атмосферы листовой камеры установки недостаточно для формирования полученной конечной биомассы. Так, масса углерода приращенной части растения (+111,8%) составляла 274,9 мг, в то время как в атмосфере на протяжении всего периода наблюдения было зафиксировано всего 210 мг углерода, что может являться свидетельством наличия альтернативного механизма поступления углерода, к каковому относится корневое углеродное питание.

Сведения об источнике финансирования: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, мнемокод FZZR-2023-0010.

Литература

1. Алиева С. С., Аббасова С. М., Сулейманова Е. Дж. Исследование влияния экосистемного потока CO₂ в растительных полях на массу выращенной биомассы в аквамодели FAO // Вестник КрасГАУ. 2018. №2. С. 247-252.
2. Тимохина А. В., Прокушкин А. С., Панов А. В. Суточная и сезонная динамика концентрации CO₂ и CH₄ в атмосфере над экосистемами Западной Сибири (Приенисейская часть) // Вестник КрасГАУ. №12, 2014. С. 83-88.
3. Динамика потоков CO₂ с поверхности почвы в сосновых древостоях Средней Сибири / А. В. Махныкина, А. С. Прокушкин, Е. А. Ваганов и др. // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2016. Т. 9. № 3. С. 338-357. DOI: 10.17516/1997-1389-2016-9-3-338-357.
4. Full Carbon Account for Russia / S. A. Nilsson, A. Z. Shvidenko, V. S. Stolbovoi, et al. // Interim report. IIASA. 2000. 181 p.
5. Наумов А. В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН. 2009. 208 с.
6. Estimation of soil respiration using automated chamber systems in an oak (*Quercus mongolica*) forest at the Nam-San site in Seoul, Korea / S. J. Joo, S. U. Park, M. S. Park, et al. // Science of The Total Environment. 2012. Vol. 416. P. 400-409. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.11.025.
7. Альтудов Ю. К., Дударов З. И., Занилов А. Х. Система учета баланса CO₂ в цикле «почва-растение-атмосфера» // Известия КБНЦ РАН. 2023. №6 (116). С. 13-20. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-13-20.
8. Занилов А. Х., Дударов З. И., Бахов М. Т. Установка для определения интенсивности листового и корневого углеродного питания растений. Патент на промышленный образец RU 142218 от 03.06.2024 г.
9. Смашевский Н. Д. Экология фотосинтеза // Астраханский вестник экологического образования. 2014. № 2 (28). С. 165-180.
10. Кобак К. И. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 248 с.
11. Глаголев М. В., Сабреков А. Ф. Ответ А. В. Смагину: II. Углеродный баланс России // ДОСигИК. 2014. Т. 5. № 2 (10). С. 50-70.
12. Cramer M. D., Lewis O. A., Lips S. H. Inorganic carbon fixation and metabolism in maize roots as affected by nitrate and ammonium nutrition // Physiologia Plantarum. 1993. Vol. 89(3), P.632-639. DOI:10.1111/j.1399-3054.1993.tb05226.x.
13. Root Carbon Dioxide Fixation by Phosphorus-Deficient *Lupinus albus* (Contribution to Organic Acid Exudation by Proteoid Roots) / J. F. Johnson, D. L. Allan, C. P. Vance, et al. // Plant Physiology. 1996. Vol. 112(1). P.19-30. DOI: 10.1104/pp.112.1.19.
14. Wingate L. Weighty issues in respiratory metabolism: intriguing carbon isotope signals from roots and leaves // New Phytologist. 2008. Vol. 177(2). P. 285-287. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2007.02336.x.
15. Курсанов А. Л., Крюкова Я. Я., Варпетян Б. Б. Движение по растению углекислоты, поступающей через корни // Доклады АН СССР. 1952. Т. 85. № 4. С. 913 – 916.
16. Zelawski W., Riech F. P., Stanley R. G. Assimilation and release of internal carbon dioxide by woody plant shoots // Canadian Journal of Botany. 2011. Vol. 48(7). P.1351-1354. DOI:10.1139/b70-204
17. Artega R. N., Poovaiyah B. W., Smith O. E. Changes in Carbon Fixation, Tuberization, and Growth Induced by CO₂ Applications to the Root Zone of Potato Plants // Science. 1979. Vol. 205(4412). P.1279-1280. DOI:10.1126/science.205.4412.1279.
18. Покровский С. Г. Корневое углеродное питание растений – как возможный источник ошибок радиоуглеродного датирования // Актуальные проблемы современной науки. 2006. № 6. С. 214-217.
19. Адаев Н. Л. Занилов А. Х., Амаева А. Г. Проведение расчетов оптимальных значений корневого углеродного питания огурцов и томатов // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов. 2022. С. 8-14.
20. Методы исследования потоков газов и состава почвенного воздуха в полевых условиях с использованием портативного газоанализатора ПГА-7 / А. В. Смагин, М. В. Глаголев, Г. Г. Суворов и др. // Вестник МГУ, сер. Почвоведение. 2003. №3. С. 29-36.
21. Суточная динамика эмиссии CO₂ с поверхности почвы ельника черничного. Информационный ресурс: <https://ib.komisc.ru/add/old/t/ru/ir/vt/02-57/07.html>. Дата обращения 12 августа 2024 г.
22. Шелякин М. Н. Функциональные характеристики листьев растений *Hylotelephium triphyllum* (Haw.) при разной освещенности // Известия Самарского НЦ РАН. 2012. Т. 14. № 1(9). С. 2313-2315.
23. The influence of elevated CO₂ and soil depth on rhizosphere activity and nutrient availability in a mature *Eucalyptus woodland* / J. Pihlblad, L. C. Andresen, C. A. Macdonald, et al. // Biogeosciences. 2023. Vol. 20. P. 505–521, <https://doi.org/10.5194/bg-20-505-2023>.

Сведения об авторах:

Шогенов Юрий Хасанович - академик РАН, доктор технических наук, начальник сектора механизации, электрификации и автоматизации отдела сельскохозяйственных наук, e-mail.ru: yh1961s@yandex.ru
 Российская академия наук, г. Москва, Россия
 Дударов Залим Исламович - научный сотрудник центра декарбонизации АПК и региональной экономики, e-mail.ru: zalim-dudar@yandex.ru
 Занилов Амиран Хабибович, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник центра декарбонизации АПК и региональной экономики, e-mail.ru: amiran78@inbox.ru
 Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик, Россия

ASSESSMENT OF THE CONTRIBUTION OF ROOT CARBON NUTRITION TO THE FORMATION OF PLANT BIOMASS IN A MODEL EXPERIMENT
Yu. Kh. Shogenov, Z. I. Dударov, A. Kh. Zanirov

Abstract. The study of mechanisms of carbon dioxide transformation in agroecosystems from the position of ideas about CO₂ absorption exclusively by chlorophyll-containing parts of vegetative plants does not allow to objectively evaluate the ecosystem role of each component. To evaluate the contribution of root carbon nutrition to the formation of plant biomass, a model experiment was laid down using the author's device, which allows isolating the root and leaf parts of the plant from each other and recording the CO₂ values to calculate its balance. A paulownia seedling (*Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud., 1841) with a known initial mass, vegetating under a 12-hour light regime, was used as an experimental plant. The contribution of root carbon nutrition to biomass formation was calculated from the difference in C-CO₂ in the leaf chamber atmosphere and the content of elemental carbon in the plant at the end of the experiment. The carbon content in plant parts was determined on a MultiEA 200CS carbon analyzer at a temperature of 1100 °C. As a result of 30 days of

observations, it was found that the mass of C-CO₂, which was present throughout the experiment (6960 ppm) in the atmosphere of the leaf chamber with a volume of 0.06 m³, corresponded to 210 mg of carbon. At the same time, the carbon content in the incremented mass of the seedling (690 mg) in absolutely dry form contained 274.9 mg of elemental carbon, which indicates the presence of another alternative source of carbon supply. According to the authors, 64.9 mg of elemental carbon (23.6 % of the total mass), which went to the formation of the incremented biomass of the experimental plant, came through the root system. The obtained results allow us to explain cases when forest areas can form a balance shifted towards the CO₂ flow. An idea of the mechanism of root carbon of plants and its potential allows us to more accurately create models of CO₂ transformation in soil-plant systems.

Key words: plant roots carbon consumption, carbon dioxide, CO₂ balance.

References

1. Alieva SS, Abbasova SM, Suleymanova EDzh. [Investigation of the effect of ecosystem CO₂ flux in plant fields on the mass of grown biomass in the FAO aquamodel]. Vestnik KrasGAU. 2018; 2. 247-252 p.
2. Timokhina AV, Prokushkin AS, Panov AV. [Daily and seasonal dynamics of CO₂ and CH₄ concentration in the atmosphere over the ecosystems of Western Siberia (Enisey part)]. Vestnik KrasGAU. 2014; 12. 83-88 p.
3. Makhnykina AV, Prokushkin AS, Vaganov EA. [Dynamics of CO₂ fluxes from the soil surface in pine stands of Central Siberia]. Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seriya: Biologiya. 2016; Vol.9. 3. 338-357 p. DOI: 10.17516/1997-1389-2016-9-3-338-357.
4. Nilsson SA, Shvidenko AZ, Stolbovoi VS. Full carbon account for Russia. Interim report. IIASA. 2000; 181 p.
5. Naumov AV. Dykhanie pochvy: sostavlyayushchie, ekologicheskie funktsii, geograficheskie zakonomernosti. [Soil respiration: components, ecological functions, geographical patterns]. Novosibirsk: Izdatelstvo Sibirskogo otdeleniya RAN. 2009; 208 p.
6. Joo SJ, Park SU, Park MS. Estimation of soil respiration using automated chamber systems in an oak (*Quercus mongolica*) forest at the Nam-San site in Seoul, Korea. Science of the Total Environment. 2012; Vol.416. 400-409 p. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.11.025.
7. Altudov JuK, Dudarov ZI, Zanirov AKh. [CO₂ balance accounting system in the "soil-plant-atmosphere" cycle]. Izvestiya KBNTs RAN. 2023; 6 (116). 13-20 p. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-13-20.
8. Zanirov AKh, Dudarov ZI, Bakhov MT. [Installation for determining the intensity of leaf and root carbon nutrition of plants]. Patent na promyshlennyy obrazets RU 142218 ot 03.06.2024.
9. Smashevskiy ND. [The ecology of photosynthesis]. Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya. 2014; 2 (28). 165-180 p.
10. Kobak KI. Bioticheskie komponenty uglerodnogo tsikla. [Biotic components of the carbon cycle]. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1988; 248 p.
11. Glagolev MV, Sabrekov AF. [Answer to A.V.Smagin: II. Russia's carbon balance]. Uglerodnyy balans Rossii. DOSiGK. 2014; Vol.5. 2 (10). 50-70 p.
12. Cramer MD, Lewis OA, Lips SH. Inorganic carbon fixation and metabolism in maize roots as affected by nitrate and ammonium nutrition. Physiologia Plantarum. 1993; Vol.89(3). 632-639 p. DOI:10.1111/j.1399-3054.1993.tb05226.x.
13. Johnson JF, Allan DL, Vance CP. Root carbon dioxide fixation by phosphorus-deficient lupinus albus (Contribution to organic acid exudation by proteoid roots). Plant Physiology. 1996; Vol.112(1). 19-30 p. DOI: 10.1104/pp.112.1.19.
14. Wingate L. Weighty issues in respiratory metabolism: intriguing carbon isotope signals from roots and leaves. New Phytologist. 2008; Vol.177(2). 285-287 p. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2007.02336.x.
15. Kursanov AL, Kryukova YaYa, Varapetyan BB. [Movement of carbon dioxide through the roots through the plant]. Doklady AN SSSR. 1952; Vol.85. 4. 913-916 p.
16. Zelawski W, Riech FP, Stanley RG. Assimilation and release of internal carbon dioxide by woody plant shoots. Canadian Journal of Botany. 2011; Vol.48(7). 1351-1354 p. DOI:10.1139/b70-204
17. Arteca RN, Poovaiah BW, Smith OE. Changes in carbon fixation, tuberization, and growth induced by CO₂ applications to the root zone of potato plants. Science. 1979; Vol.205(4412). 1279-1280 p. DOI:10.1126/science.205.4412.1279.
18. Pokrovskiy SG. [Root carbon nutrition of plants as a possible source of radiocarbon dating errors]. Aktualnye problemy sovremennoy nauki. 2006; 6. 214-217 p.
19. Adaev NL, Zanirov AKh, Amaeva AG. [Calculation of optimal values of root carbon nutrition of cucumbers and tomatoes]. Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i aspirantov. 2022; 8-14 p.
20. Smagin AV, Glagolev MV, Suvorov GG. [Methods for studying gas flows and soil air composition in the field using a portable PGA-7 gas analyzer]. Vestnik MGU. ser. Pochvovedenie. 2003; 3. 29-36 p.
21. [Daily dynamics of CO₂ emission from the soil surface of a blueberry spruce forest]. [Internet]. [cited 2024, August 12]. Available from: <https://ib.komisc.ru/add/old/t/ru/ir/vt/02-57/07.html>.
22. Shelyakin MN. [Functional characteristics of *Hylotelephium triphyllum* (Haw.) plant leaves under different illumination]. Izvestiya Samarskogo NTs RAN. 2012; Vol.14. 1(9). 2313-2315 p.
23. Pihlblad J, Andresen LC, Macdonald CA. The influence of elevated CO₂ and soil depth on rhizosphere activity and nutrient availability in a mature *Eucalyptus* woodland. Biogeosciences. 2023; Vol.20. 505-521 p. <https://doi.org/10.5194/bg-20-505-2023>.

Authors:

Shogenov Yuriy Khasanovich - academician of the Russian Academy of Sciences, doctor of technical sciences, head of mechanization, electrification and automation sector of the agricultural sciences department, e-mail.ru: yh1961s@yandex.ru

Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Dudarov Zalim Islamovich - researcher of the center for decarbonization of the agro-industrial complex and regional economy, e-mail.ru: zalim-dudarov@yandex.ru

Zanirov Amiran Khabidovich – Ph.D. in agricultural sciences, senior researcher of the center for decarbonization of the agro-industrial complex and regional economy, e-mail.ru: amiran78@inbox.ru

Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M.Berbekov, Nalchik, Russia.