

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 53.087.44:58.084.1

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-59-67>



Установка для исследования механизмов трансформации CO₂ в системе «Почва-растение-атмосфера»

Ю.К. Альтудов¹, З.И. Дударов²✉, А.Х. Занилов³, Ю.Х. Шогенов⁴

^{1,2,3} Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова; г. Нальчик, Россия

⁴ Российская академия наук; г. Москва, Россия

¹ yka@kbsu.ru; <https://orcid.org/0009-0005-2520-8267>

² zalim-dudar@yandex.ru ✉; <https://orcid.org/0000-0001-5346-363X>

³ amiran78@inbox.ru; <https://orcid.org/0009-0002-8635-6501>

⁴ yh1961s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>

Аннотация. Качественное исследование механизма трансформации парникового углекислого газа в системе «Почва-растение-атмосфера» требует наличия соответствующего инструментария, позволяющего создавать модели экосистем, регистрировать происходящие в них преобразования и обрабатывать полученные данные. Для расширения методологии исследования потоков углекислого газа разработана установка для исследования механизмов трансформации CO₂ в системе «Почва-растение-атмосфера», моделирующая и обеспечивающая автономную жизнедеятельность растительного организма с параллельной регистрацией и демонстрацией суточной динамики концентрации CO₂ внутри полностью замкнутой системы. Для более детализированной оценки направленности трансформации углекислого газа установка обеспечивает полную изоляцию листовой и подземной частей растений. В апробации установки участвовал саженец павловнии массой 7,47 г, сформированные корни которого погружались в речной песок, обогащенный раствором нитроаммофоски (NPK 16:16:16). В течение 30 суток каждые 5 мин измерительный комплекс iMK LoRa регистрировал поглощение и выделение CO₂ в двух зонах установки. В результате модельного эксперимента установлено, что растение способно продолжать свои развитие и рост при отсутствии внешнего источника углекислого газа, а формирование биомассы (+111,8%) происходит за счет механизма корневого углеродного питания. В данном случае почвенный углерод частично (на 76,4%) переходит в атмосферу в результате дыхания растения и снова поглощается в световую фазу, тем самым обеспечивая «малый углеродный цикл». Другая часть почвенного углерода (на 23,6%) принимает непосредственное участие в формировании биомассы растений, минуя преобразование через листовой аппарат. Предложенная установка позволит выявить особенности режимов углеродного питания различных сельскохозяйственных культур для дальнейшего подбора средств и агротехнических приемов по регулированию биомассы.

Ключевые слова: баланс CO₂, газоанализатор, корневое углеродное питание, воздушное питание растений, малый углеродный цикл, «Почва-растение-атмосфера»

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, мнемокод FZZR-2023-0010.

Для цитирования: Альтудов Ю.К., Дударов З.И., Занилов А.Х., Шогенов Ю.Х. Установка для исследования механизмов трансформации CO₂ в системе «Почва-растение-атмосфера» // *Агроинженерия*. 2024. Т. 27, № 1. С. 59-67. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-59-67>

ORIGINAL ARTICLE

Installation for studying the mechanisms of CO₂ transformation in the “Soil-Plants-Atmosphere” system

Yu.K. Altudov¹, Z.I. Dudarov²✉, A.H. Zamilov³, Yu.Kh. Shogenov⁴

^{1,2,3} Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov; Nalchik, Russia

⁴ Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia

¹ yka@kbsu.ru; <https://orcid.org/0009-0005-2520-8267>

² zalim-dudar@yandex.ru✉; <https://orcid.org/0000-0001-5346-363X>

³ amiran78@inbox.ru; <https://orcid.org/0009-0002-8635-6501>

⁴ yh1961s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>

Abstract. A qualitative study of greenhouse carbon dioxide transformation in the soil-plant-atmosphere system requires appropriate tools to make ecosystem models, record the occurring transformations, and process the obtained data. To expand the methodology for studying carbon dioxide flows, the authors developed an installation for studying the mechanisms of CO₂ transformation in the soil-plant-atmosphere system, simulating and ensuring autonomous vital activity of a plant organism with parallel recording and demonstration of the daily dynamics of CO₂ concentration inside a completely closed system. For a more detailed assessment of carbon dioxide transformation, the installation ensures complete isolation of the leaf and underground parts of plants. A foxglove tree (*Paulownia*) seedling weighing 7.47 g was used to test the installation; its formed roots were immersed in river sand enriched with a solution of nitroammophoska (NPK 16:16:16). For 30 days, the iMK LoRa measuring system recorded the absorption and emission of CO₂ in two zones of the installation every 5 minutes. The model experiment showed that the plant is able to continue its development and growth in the absence of an external source of carbon dioxide, and biomass (+111.8%) is formed due to the mechanism of root carbon nutrition. In this case, soil carbon partially (76.4%) goes into the atmosphere as a result of plant respiration and is again absorbed in the light phase, thereby providing a “small carbon cycle”. Another part of the soil carbon (23.6%) takes direct part in the formation of plant biomass, bypassing the transformation through foliation. The proposed installation can identify the features of carbon nutrition modes of various agricultural crops for further selection of means and agrotechnical methods for biomass regulation.

Keywords: CO₂ balance, gas analyzer, root carbon nutrition of plants, air nutrition of plants, inner carbon cycle, “Soil-Plant-Atmosphere” system

Funding: The research work was carried out within the framework of a State assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation with the project code FZZR-2023-0010.

For citation: Altudov Yu.K., Dudarov Z.I., Zamilov A.H., Shogenov Yu.Kh. Installation for studying the mechanisms of CO₂ transformation in the “Soil-Plants-Atmosphere” system. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;26(1):59-67 <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-59-67>

Введение

Ключевую роль в формировании растительной биомассы выполняет углекислый газ (CO₂), который наряду с водой в процессе фотосинтеза под действием световой энергии преобразуется в пластические вещества. Считается, что основным путем поступления углерода в растение является воздушное углеродное питание. Однако данные научной литературы свидетельствуют о наличии не менее важного механизма поступления углерода в растения – корневого углеродного питания, которому в современных практических исследованиях уделяется недостаточное внимание.

В работе [1] была исследована возможность эффективного использования углекислого газа с поливной водой при производстве овощных культур. Способность поглощения диоксида углерода корневой системой растений с использованием

радиоизотопного метода была продемонстрирована советскими учеными [2]. Данный эффект подтверждают и более ранние источники [3].

Проведенный на гидропонной установке эксперимент выявил способность растений к фотосинтезу и активному росту в условиях полного перехода на корневое углеродное питание [4]. Было показано, что при необходимости растения способны осуществлять фотосинтез с привлечением углерода, поступающего через корни. Это свидетельствует о возможном использовании данного механизма в качестве альтернативы листового поглощения углекислого газа (воздушное питание растений).

Имеющиеся результаты исследований не нашли своего применения на практике, в связи с чем отсутствуют комплексные технологии использования диоксида углерода в качестве полноценного элемента

корневого питания растений. В связи с этим имеющийся инструментарий по определению корневого углеродного питания носит характер точечных определений для установления самого факта корневого поглощения и не позволяет проводить долгосрочные исследования и моделировать эксперименты в условиях, приближенных к естественным.

Актуальность использования установки в отрасли сельского хозяйства связана с возможностью установления особенностей режимов углеродного питания различных сельскохозяйственных культур с целью дальнейшего подбора средств и агротехнических приемов по регулированию углеродного режима питания растений.

В настоящее время существуют способы и оборудование, используемые для определения эмиссии CO₂,

в том числе газоаналитические. При этом зарегистрированных средств, определяющих объем диоксида углерода, поглощенного корневой системой растений, не существует.

Цель исследований: экспериментальная оценка работоспособности созданной установки учета эмиссии CO₂ в замкнутом биоцикле «Почва-растение-атмосфера», позволяющая дифференцированно исследовать вклад и интенсивность корневого и листового углеродного питания в общем жизненном цикле растений.

Материалы и методы

Объектом исследований является двухкамерная установка, созданная для изучения механизмов трансформации CO₂ в системе «Почва-растение-атмосфера» (рис. 1) [5]. Установка состоит

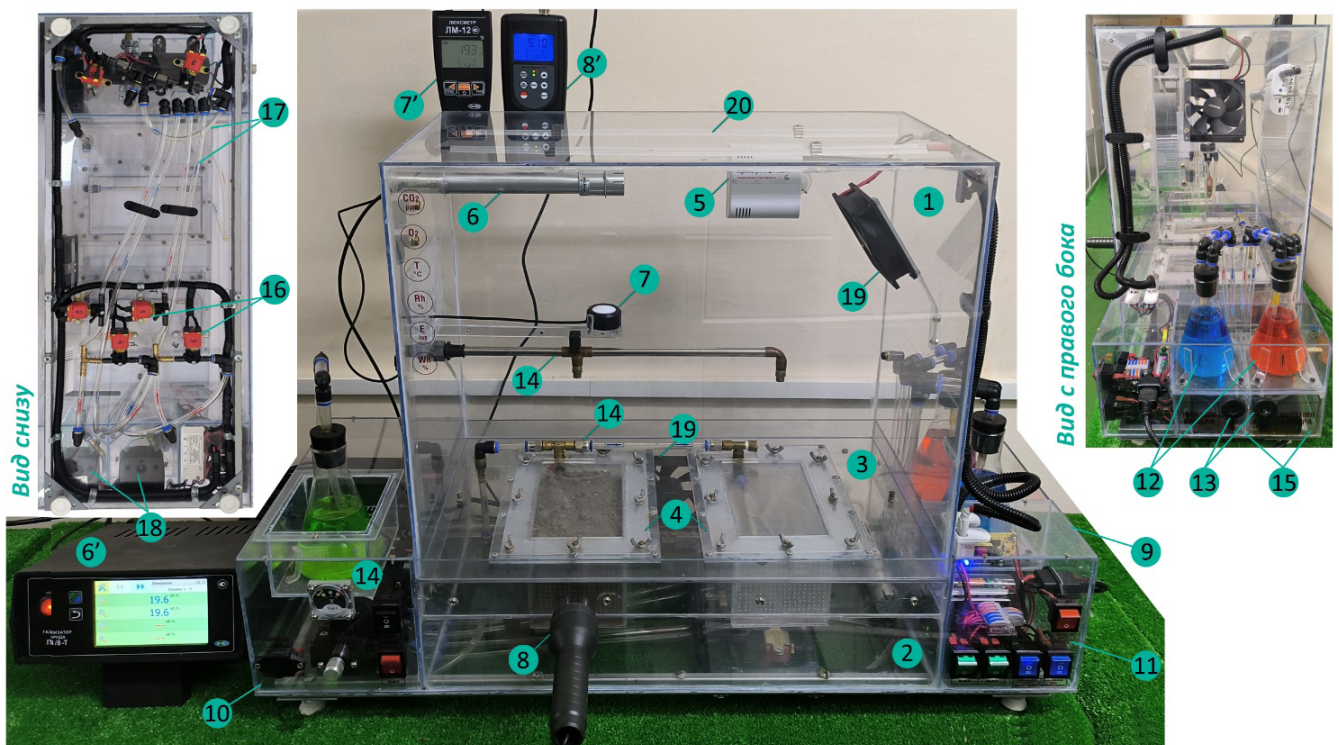


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки:

- 1 – верхняя листовая камера; 2 – нижняя корневая камера; 3 – изолирующая перегородка;
- 4 – лотки с почвой для выращивания растений; 5 – датчик концентрации CO₂, температуры и влажности воздуха;
- 6 и 6' – датчики O₂ и газоанализатор кислорода соответственно; 7 и 7' – фотометрический зонд и люксметр соответственно;
- 8 – зонд и влагомер почвы; 9 и 10 – боковые дополнительные боксы; 11 – электрический блок установки с тумблерами;
- 12 – ловушки CO₂ листовой и корневой камер; 13 – механические клапаны листовой и корневой камер;
- 14 – система полива и фертигации; 15 – компрессорные камеры;
- 16 и 17 – автоматизированные электромагнитные клапаны и воздушные трубки, смонтированные под основанием установки;
- 18 – микрокомпрессоры; 19 – вентиляторы; 20 – фитолампа

Fig. 1. General view of the experimental installation:

- 1 – upper leaf chamber; 2 – lower root chamber; 3 – insulating partition; 4 – trays with soil for growing plants;
- 5 – sensor of CO₂ concentration, temperature and air humidity; 6 and 6' – O₂ sensors and oxygen gas analyzer, respectively;
- 7 and 7' – photometric probe and lux meter, respectively; 8, 8' – probe and soil moisture meter; 9 and 10 – additional side boxes;
- 11 – electrical module of the unit with toggle switches; 12 – CO₂ traps of the leaf and root chambers;
- 13 – mechanical valves of the leaf and root chambers; 14 – irrigation and fertigation system; 15 – compressor chambers;
- 16 and 17 – automated electromagnetic valves and air tubes mounted under the unit base; 18 – microcompressors;
- 19 – fans; 20 – phytolamp

из двух частей: верхней листовой камеры 1 и нижней корневой камеры 2. Верхняя камера представляет собой бокс высотой 40 см, глубиной 30 см и шириной 50 см с боковыми гранями из прозрачного монолитного поликарбоната толщиной 3 мм. Нижняя корневая камера, выполненная из того же материала, имеет высоту 15 см, глубину 30 см и ширину 50 см. Размеры используются для пересчета объема углекислого газа в атмосфере камеры из относительных показателей (ppm) в физические параметры (мг CO₂). Для этого используется масса диоксида углерода, равная 1,84 мг/м³.

Камеры разделены между собой перегородкой 3 с вырезами под лотки 4 с почвой/субстратом для выращивания растений. Перегородка изолирует части установки друг от друга и препятствует перемещению газового состава из одной камеры в другую.

В лотках 4 на боковых гранях имеются отверстия диаметром 1 мм, позволяющие беспрепятственно попадать почвенным газам в нижнюю камеру 2 и обратно.

Во время эксперимента по разделению процессов корневого и листового углеродного питания в биоцикле «Почва-растение-атмосфера» после появления всходов поверхность почвы в лотках покрывали нейтральным для растений и почвы жидким латексом, который препятствовал проникновению почвенного воздуха в верхнюю камеру и атмосферным газам верхней камеры в почву. Практика использования данной экспериментальной установки показала, что такой подход позволяет надежно

дифференцировать зоны для отдельного детального анализа процессов, протекающих в верхней и нижней частях растений.

Для создания благоприятных условий растениям и моделирования циклов, близких к реальным, в каждой камере осуществляли независимый контроль концентрации углекислого газа (CO₂), температуры (T), влажности воздуха (Rh), концентрации кислорода (O₂), освещенности (E) (только в верхней камере) и объемной влажности почвы (W) (только в нижней камере) (рис. 2).

Параметры CO₂, T и Rh контролировали через единый измерительный комплекс 5 iMK LoRa (производство ООО «Измерение и Контроль», г. Санкт-Петербург), взаимодействующий по протоколу LoRaWAN с контроллером микроклимата iMK 2500, который подключен к Интернету и облачному сервису. Данные с периодичностью 1, 5 или 10 мин, задаваемые исследователем в зависимости от решаемых задач, передаются на сервер сбора данных. Исходные показатели с облачного сервера можно экспортировать в любой момент, в том числе с учетом предварительных процедур обработки, а именно усреднение временного ряда с шириной окна для сглаживания 5 мин, 1 ч, 3 ч и сутки. Параметры контролировались в режиме реального времени с возможностью получения уведомлений на мобильное устройство в случае отклонения от заданных опытных значений. Через специальные SMS-команды возможно дистанционное управление экспериментальным процессом.

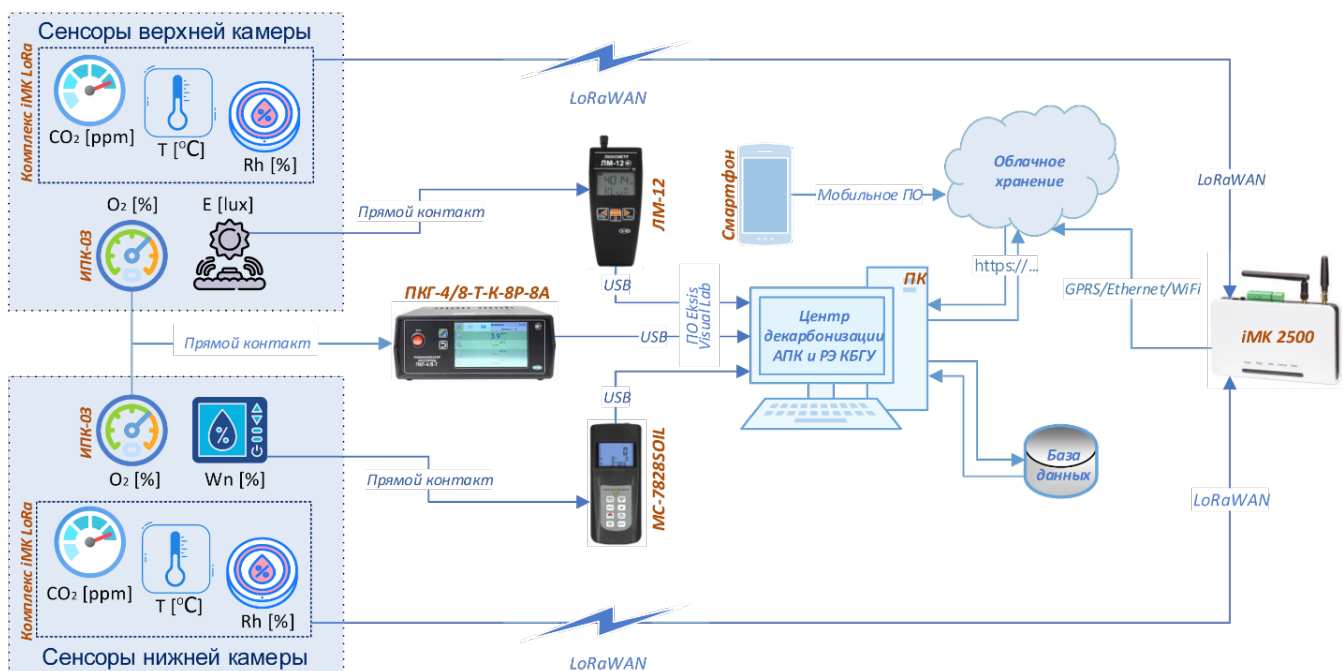


Рис. 2. Структурная блок-схема установки
 Fig. 2. Structural block diagram of the installation

Комплекс iMK LoRa, работающий по технологии недисперсный инфракрасный (NDIR) и оснащенный функцией Automatic Baseline Correction, позволяет контролировать концентрацию CO₂ в диапазоне 0...5000 ppm (частей на миллион) с разрешением 1 ppm и точностью определения ±30 ppm. Технология предусматривает выполнение автоматической калибровки без использования технических газов, температуры в пределах от +2 до +50°C с точностью 0,1°C и влажности воздуха (Rh) без конденсата 20...80%.

В случае нарушения работоспособности комплекса и его перезапуска во время эксперимента в камеры установки интегрированы механические узлы, позволяющие манипулировать измерительными блоками, не нарушая герметичность камер и не прерывая исследования.

Непрерывный мониторинг концентрации кислорода (O₂) производили в камерах датчиками 6 микрофонного типа ИПК-03 (производство АО «Экологические сенсоры и системы», г. Зеленоград) с диапазоном измерения 0...30% об. долей и точностью определения ±0,4% об. долей, подключенных к газоанализатору 6' кислорода ПКГ-4/8-Т-К-8Р-8А(Е5) той же фирмы, который управлялся программным обеспечением Eksis Visual Lab.

Для контроля электромагнитного светового воздействия на опытные растения в листовую камеру интегрирован фотометрический зонд 7 с диапазоном измерения 1...200000 Лк, подключенный к внешнему цифровому регистратору 7' марки ЛМ-12 (производство АО «Экологические сенсоры и системы», г. Зеленоград).

Установленный в лоток с почвой профессиональный влагомер MC-7828 Soil (8, 8') позволял контролировать объемную влажность почвы в диапазоне 0...100% с точностью ±1,5%.

Управление экспериментальным процессом осуществлялось с помощью реализованных в установке технических узлов:

- систем извлечения (утилизации) избыточной концентрации CO₂ в камерах и подачи воздуха с естественным содержанием кислорода;
- системы имитации воздушного потока и перемешивания воздушной массы внутри камер;
- системы регулирования освещенности;
- системы регулирования влажности почвы, обеспечивающей управление поливом с функцией фертигации и распыление средств защиты растений и удобрений.

По бокам нижней камеры (рис. 1) установлены прозрачные дополнительные боксы (9, 10). В правом боксе 9, разделенном на три части, размещены

электрический блок установки 11, система извлечения (утилизации) 12 избыточной концентрации CO₂ и система подачи воздуха 13 из внешней атмосферы. В левом дополнительном боксе 10 размещена система регулирования влажности почвы с учетом фертигации и распыления средств защиты растений и удобрений 14.

С целью улавливания избыточной концентрации углекислого газа воздушные массы верхней и нижней камер принудительно продувались сквозь емкость 12 с абсорбирующим раствором (ловушки). Для подачи воздуха в камеру с естественным содержанием кислорода использовались механические клапаны 13 на боковых гранях изолированных компрессорных камер 15.

Соответствующие нижней и верхней камерам ловушки 12 установлены в нише над компрессорными камерами 15. Направления воздушных масс регулировали автоматизированными электромагнитными клапанами 16 и воздушными трубками 17, расположенными в нижней части установки. Микрокомпрессоры 18 и электромагнитные клапаны включали/отключали соответствующими тумблерами, размещенными на лицевой стороне электрического блока 11.

Перемешивание воздушной массы в верхней и нижней камерах осуществляли вентиляторами 19. Источник тока вентиляторов и тумблеры включения/отключения размещены на лицевой стороне электрического блока.

Световой режим в установке поддерживали специализированными фитолампами 20 мощностью 15 Вт с фотосинтетическим фотонным потоком 22,5 мкмоль/с с длиной волн красного спектра 630...670 нм и длиной синего спектра 420...460 нм, которые включались/отключались тумблером на лицевой стороне электрического блока 11. Имитация светового режима в установке достигалась фотопериодичностью 12 ч.

Интегрированная в установку система полива и опрыскивания (14), состоящая из диафрагменного насоса, электромагнитных клапанов, регулирующих направление жидкости, емкости и магистралей для подачи жидкости, специального рукава с распылительными форсунками, позволила поддерживать влажность почвы на должном уровне в лотках, установленных внутри камеры, и вносить средства защиты растений и удобрения.

Апробация установки для оценки возможного вклада корневого углеродного питания в формирование растительной биомассы проводилась на базе центра декарбонизации АПК и региональной экономики КБГУ им. Х.М. Бербекова. В модельном

эксперименте в качестве объекта исследований использовался саженец павлонии войлочной (*Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud., 1841) со сформированной корневой системой. Демонстрация возможности регистрации необходимых параметров в установке с растением, имеющим аналогичный со всеми другими автотрофными растениями механизм поглощения CO₂, свидетельствует о пригодности технического решения для изучения особенностей углеродного питания всех автотрофных растений, в том числе сельскохозяйственных.

Масса саженца естественной влажности на момент погружения в модуль составила 7,47 г. В качестве субстрата использовался промытый речной песок (0,8 кг), обогащенный минеральными элементами питания в виде комплексного удобрения нитроаммофоски (NPK 16:16:16) в дозе 10 г в физическом весе. Измерительный комплекс iMK LoRa регистрировал поглощение и выделение CO₂ каждые 5 мин. По пикам концентрации CO₂ (рис. 3), которые приходились на момент смены светового режима, рассчитывался суточный баланс углекислого газа. Продолжительность эксперимента составила 30 суток.

Расчет дополнительно сформированной биомассы производился после извлечения саженца из камеры. Очищенный от песка саженец взвешивался.

Замерялась его влажность, и дифференцированно определялось содержание углерода в листьях, корнях и стебле с использованием элементарного анализатора углерода MultiEA 200CS при температуре 1100°C.

По сопоставлению данных о массе C-CO₂ в атмосфере установки к массе углерода, накопленного саженцем за 30 суток, устанавливались факт наличия альтернативного механизма поглощения углерода и его количественное определение.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенного эксперимента было установлено, что способность вегетирующего саженца павлонии войлочной поглощать CO₂ из атмосферы имеет свои пределы.

Вследствие ночного дыхания саженца павлонии прослеживается рост концентрации CO₂ в атмосфере камеры (синяя линия на рисунке 3). Начиная с третьих суток пики суточных концентраций (поток) варьируют в пределах 223...371 ppm (среднее значение 341 ppm). В световую фазу выделенный растением углекислый газ поглощается (сток) до пределов 123...78 ppm (среднее значение 109 ppm), что отражает потенциал растительной углеродной секвестрации (красная линия на рисунке 3). В результате в камере формируется среднесуточный баланс CO₂ – 232 ppm, отражающий разницу между

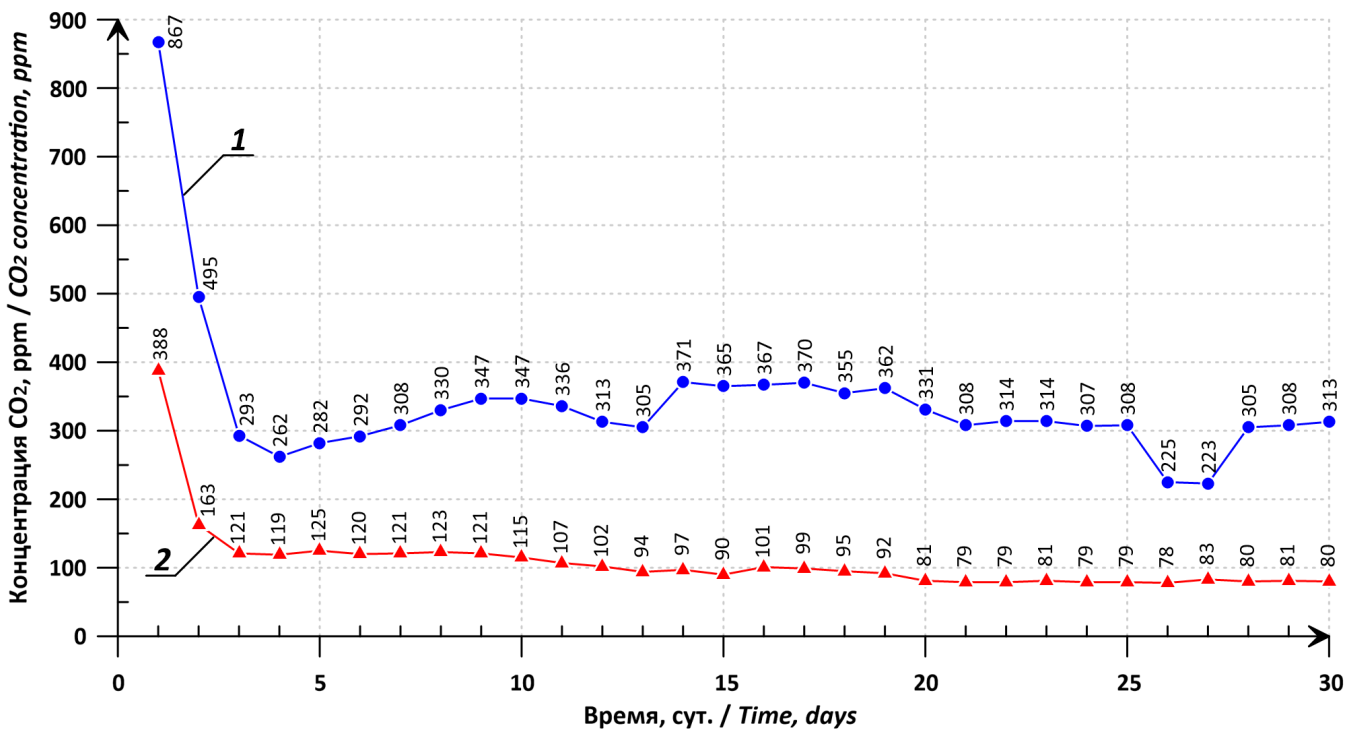


Рис. 3. Пики суточных концентраций CO₂ в камере:
1 – поток; 2 – сток

Fig. 3. Peaks of daily CO₂ concentrations in the chamber:
1 – flow; 2 – uptake

средними значениями ночного и светового режимов. При этом месячный баланс составляет, соответственно, 6960 ppm. В светлую фазу растением поглощается объем углекислого газа, выделенный самим же растением в ночную фазу, без поступления извне, что рассматривается как малый внутренний цикл [6]. По данным А.В. Наумова¹, его вклад в формирование чистой первичной продукции может достигать 60%. Случаи преобладания потока над стоком углекислого газа отмечаются в естественных лесных экосистемах [7].

С позиции устоявшихся убеждений в исключительности воздушного углеродного питания растений и того, что дыхание растений сопряжено с распадом части ранее синтезированного органического вещества [8], следует ожидать, что биомасса экспериментального саженца павловнии войлочной должна увеличиться. В нашем опыте биомасса экспериментального растения возросла с 7,47 до 15,82 г, то есть на 8,35 г, или на 111,8%, за счет как образования новых пар листьев с момента закладки опыта, так и увеличения площади имевшихся листьев.

Было установлено, что в приращенной биомассе (8,35 г) при влажности саженца 91,74% содержится 274,9 мг поглощенного ею углерода (рис. 4). При этом из листовой (верхней) камеры было поглощено лишь 210,0 мг углерода. Расчет массы углерода, образуемой в листовой камере в течение эксперимента, производился по формуле:

$$M = (C \cdot T \cdot m \cdot V) / K = (232 \text{ ppm} \cdot 30 \text{ сут.} \cdot 1,84 \text{ мг/м}^3 \cdot 0,06 \text{ м}^3) / 3,66 = 210 \text{ мг,}$$

где M – масса углерода в атмосфере камеры, принявшая участие в формировании биомассы, мг; C – среднесуточный баланс CO₂ в атмосфере камеры, ppm; T – продолжительность наблюдения, сут.; m – масса CO₂ в 1 м³ камеры, мг/м³; V – объем камеры, м³; K – коэффициент пересчета CO₂ в элементарный углерод.

Из расчетов следует, что в формировании биомассы саженца вклад углерода из листовой камеры составляет 76,4%. Поскольку система в экспериментальной установке была замкнутой и доступа к источникам углерода извне не было, то остальные 23,6% углерода, по нашему мнению, приходятся непосредственно на корневое поглощение с преобразованием его в биомассу растения. Таким образом, в системе «Растение-атмосфера» был выделен «малый углеродный цикл», на долю которого

¹ Наумов А.В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности: Монография. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2009. 208 с.

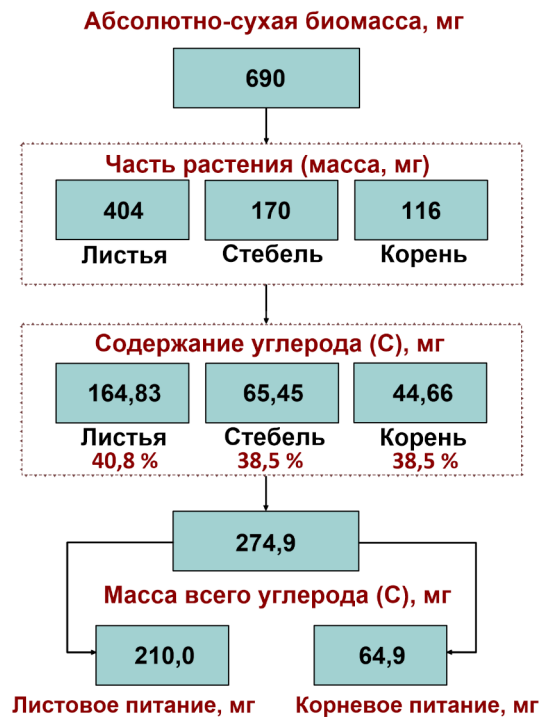


Рис. 4. Содержание углерода в приращенной биомассе, мг

Fig. 4. Carbon content in the incremented biomass, mg

приходится 76,4% поглощенного углерода, и подтверждено наличие механизма корневого углеродного питания, доля которого в модельном эксперименте составила 23,6%.

На основе полученных данных можно рассмотреть возможность модернизации традиционной схемы углеродного цикла (рис. 5).

В представленной схеме (рис. 5) часть углерода, выделяемого в результате дыхания почвы, перехватывается вегетирующими растениями, поддерживая механизм воздушного питания растений. Часть почвенного углерода, в том числе в виде углекислого газа, поглощается непосредственно корневой системой.

Выводы

Результаты апробации установки для определения интенсивности листового и корневого углеродного питания позволили подтвердить наличие «малого углеродного цикла» в системе «Растение-атмосфера», доля поглощенного углерода в котором оценивается в эксперименте в 76,4%, а также наличие корневого поглощения углерода (23,6%), принявшего непосредственное участие в формировании биомассы растений.

Полученные данные указывают на научно-практическую значимость изобретения и открывают перспективы для его использования в целях изучения поведения отдельных компонентов экосистем и разработки технологий углеродной секвестрации.

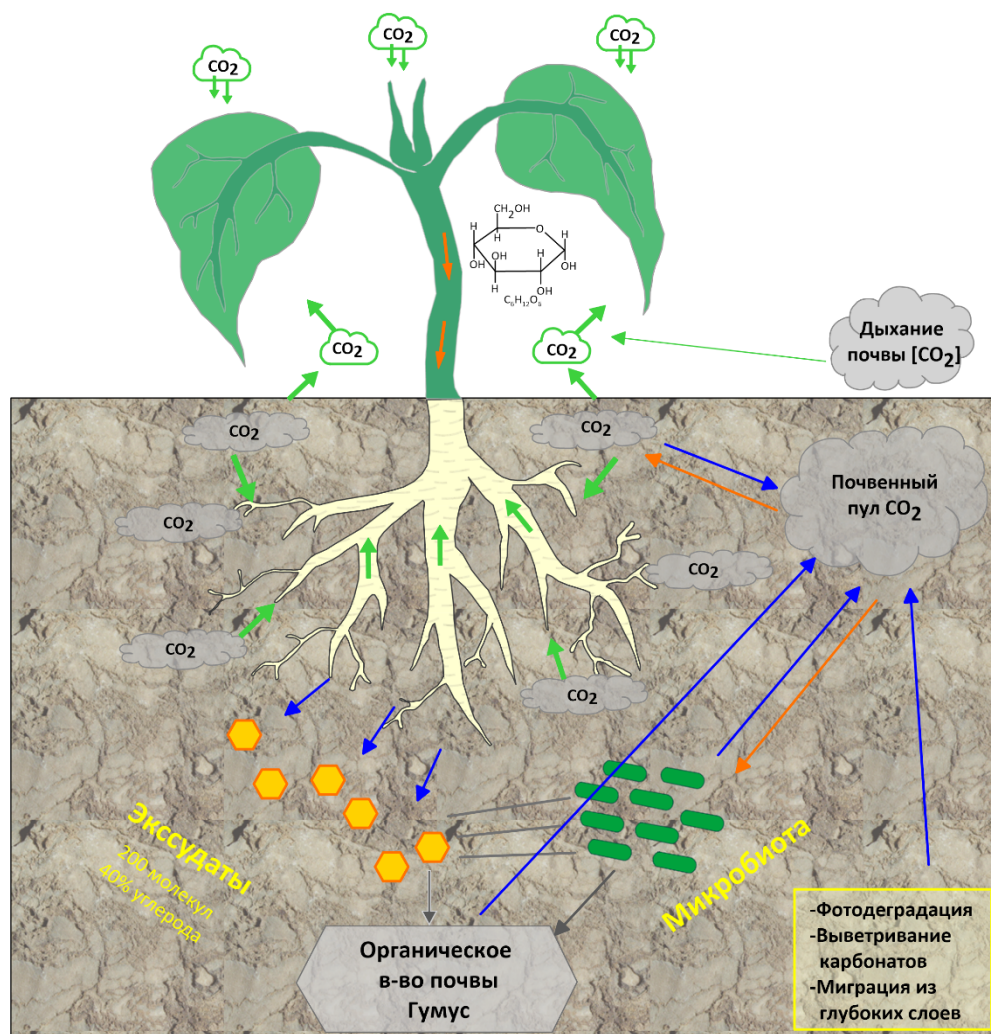


Рис. 5. Модель углеродного питания растений

Fig. 5. Model of carbon nutrition of plants

Список источников

1. Ильин С.Н. Применение углекислого газа в качестве подкормки в защищенном грунте // Вестник ИрГСХА. 2017. № 80. С. 88-91. EDN: ZFHROB
2. Курсанов А.Л. Использование в СССР радиоактивных изотопов в биологии и сельском хозяйстве // Доклады советской делегации на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии «Применение изотопов в технике, биологии и сельском хозяйстве», г. Женева. М.: Издательство Академии наук СССР, 1955. С. 273-287. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/doklady-zheneva-1955_primnenie-izotopov_1955/p286/
3. Breazeale J.F. The absorption of carbon by the roots of plants. *Journal of Agriculture Research*. 1924; XXVI(7):303-311
4. Покровский С.Г. Корневое углеродное питание растений – как возможный источник ошибок радиоуглеродного датирования // Актуальные проблемы современной науки. 2006. № 6 (32). С. 214-217. EDN: IJGVHN
5. Альтудов Ю.К., Дударов З.И., Занилов А.Х. Система учета баланса CO₂ в цикле «почва – растение – атмосфера» // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6 (116). С. 13-20. <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2023-6-116-13-20>
6. Смагин А.В., Глаголев М.В., Суворов Г.Г., Шнырев Н.А. Методы исследования потоков газов и состава почвенного

References

1. Ilyin S.N. Application of carbon dioxide as fertilizing in protected ground. *Vestnik IrGSHA*. 2017;80:88-91. (In Russ.)
2. Kursanov A.L. Use of radioactive isotopes in biology and agriculture in the USSR. *Reports of the Soviet delegation at the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy "Application of Isotopes in Technology, Biology and Agriculture"*, Geneva. Moscow. Izdatel'stvo akademii nauk SSSR. 1955. P. 273-287 (In Russ.)
3. Breazeale J.F. The absorption of carbon by the roots of plants. *Journal of Agriculture Research*. 1924; XXVI(7):303-311.
4. Pokrovskiy S.G. Root carbon nutrition of plants as a possible source of radiocarbon dating errors. *Aktualnye Problemy Sovremennoj Nauki*. 2006;6:214-217 (In Russ.)
5. Altudov Yu.K., Dudarov Z.I., Zanilov A.Kh. System for accounting for CO₂ balance in the "soil – plant – atmosphere" cycle. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023;6(116):13-20. <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2023-6-116-13-20> (In Russ.)
6. Smagin A.V., Glagolev M.V., Suvorov G.G., Shnyrev N.A. Methods for studying gas fluxes and the composition of soil air in field conditions using a portable PGA-7 gas analyzer. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17: Pochvedenie*. 2003;3:29-36 (In Russ.)

воздуха в полевых условиях с использованием портативного газоанализатора ПГА-7 // Вестник Московского университета. Серия 17 «Почвоведение». 2003. № 3. С. 29-36. EDN: TMFJGN
7. Botch M.S., Kobak K.I., Vinson T.S., Kolchugina T.P. Carbon pools and accumulation in peatlands of the former Soviet Union. *Global Biogeochemical Cycles*. 1995;9(1):37-46. <https://doi.org/10.1029/94GB03156>

8. Смасhevский Н.Д. Экология фотосинтеза // Астраханский вестник экологического образования. 2014. № 2 (28). С. 165-180. EDN: SFDJTF

Информация об авторах

¹ **Альтудов Юрий Камбулатович**, д-р техн. наук, д-р экон. наук, профессор, и.о. ректора; SPIN-код: 4372-3599, AuthorID: 258947; yka@kbsu.ru; <https://orcid.org/0009-0005-2520-8267>

² **Дударов Залим Исламович**, научный сотрудник Центра декарбонизации АПК и региональной экономики; SPIN-код: 7752-5370, AuthorID: 725802; zalim-dudar@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5346-363X>

³ **Занилов Амиран Хабинович**, канд. с.-х. наук, старший научный сотрудник Центра декарбонизации АПК и региональной экономики; SPIN-код: 2031-5449, AuthorID: 324946; amiran78@inbox.ru; <https://orcid.org/0009-0002-8635-6501>

⁴ **Шогенов Юрий Хасанович**, академик РАН, д-р техн. наук, начальник сектора механизации, электрификации и автоматизации отдела сельскохозяйственных наук; SPIN-код: 7335-0970, AuthorID: 483282; yh1961s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>

^{1,2,3} Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова (КБГУ); 360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

⁴ Российская академия наук; 119334, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, 32 А

Вклад авторов

Ю.К. Альтудов – концептуализация, руководство исследованием;

З.И. Дударов – разработка установки, проведение исследований, визуализация, анализ литературных источников и создание черновика рукописи;

А.Х. Занилов – методология, проведение исследований, формальный анализ, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

Ю.Х. Шогенов – концептуализация, формулирование общих выводов.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что конфликта интересов в отношении авторства и публикации нет.

Статья поступила 13.08.2024, после рецензирования и доработки 20.12.2024; принята к публикации 23.12.2024.

7. Botch M.S., Kobak K.I., Vinson T.S., Kolchugina T.P. Carbon pools and accumulation in peatlands of the former Soviet Union. *Global Biogeochemical Cycles*. 1995;9(1):37-46. <https://doi.org/10.1029/94GB03156>

8. Smashevskiy N.D. Ecology of photosynthesis. *Astrahanskiy Vestnik Ekologicheskogo Obrazovaniya*. 2014;2(28):165-180 (In Russ.)

Author Information

¹ **Yuri K. Altudov**, DSc(Eng), DSc(Econ), Professor, Acting Rector; yka@kbsu.ru; <https://orcid.org/0009-0005-2520-8267>

² **Zalim I. Dudarov**, Researcher Center for Decarbonization of the Agro-Industrial Sector and Regional Economy; zalim-dudar@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5346-363X>

³ **Amiran Kh. Zanirov**, Senior Researcher, Center for Decarbonization of the Agro-Industrial Sector and Regional Economy; amiran78@inbox.ru; <https://orcid.org/0009-0002-8635-6501>

⁴ **Yuri Kh. Shogenov**, Full Member of the RAS, DSc (Eng), Head of the Mechanization, Electrification and Automation Sector; yh1961s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7588-0458>

^{1,2,3} Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov (KBSU); 360004, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Chernyshevskogo Str., 173

⁴ Agricultural Sciences Department, Federal State Budgetary Institution “Russian Academy of Sciences”; Russia, 119334, Moscow, Leninsky Ave., 32 A

Author Contribution

Yu.K. Altudov – conceptualization and research supervision; Z.I. Dudarov – investigation, visualization, literature review, writing – original draft preparation;

A.Kh. Zanirov – methodology, investigation, formal analysis, writing – review and editing of the manuscript;

Yu.Kh. Shogenov – conceptualization, general conclusions.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest regarding authorship and publication of this article.

Received 13.08.2024; Revised 20.12.2024; Accepted 23.12.2024