



БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 58.084.1+581.5

**В.В. Величко, С.А. Ушакова,
А.А. Тихомиров**

ВЛИЯНИЕ ШАГА КОНВЕЙЕРА НА ГАЗООБМЕН СИСТЕМЫ «САЛАТ – ПОЧВОПОДОБНЫЙ СУБСТРАТ»

**V.V. Velichko, S.A. Ushakova,
A.A. Tikhomirov**

THE EFFECT OF A CONVEYER STEP ON GAS EXCHANGE OF THE “LETTUCE – SOIL-LIKE SUBSTRATE” SYSTEM

Величко В.В. – канд. биол. наук, науч. сотр. лаб. управления биосинтезом фототрофов Института биофизики СО РАН, г. Красноярск. E-mail: vladimir_velitchko@hotmail.com

Ушакова С.А. – канд. биол. наук, вед. науч. сотр. лаб. управления биосинтезом фототрофов Института биофизики СО РАН, г. Красноярск. E-mail: sofya-ushakova@yandex.ru

Тихомиров А.А. – д-р биол. наук, проф., зав. лаб. управления биосинтезом фототрофов Института биофизики СО РАН, г. Красноярск. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru

Velichko V.V. – Cand. Biol. Sci., Staff Scientist, Lab. of Phototrophic Biosynthesis Management, Institute of Biophysics, SB RAS, Krasnoyarsk. E-mail: vladimir_velitchko@hotmail.com

Ushakova S.A. – Cand. Biol. Sci., Leading Staff Scientist, Lab. of Phototrophic Biosynthesis Management, Institute of Biophysics, SB RAS, Krasnoyarsk. E-mail: sofya-ushakova@yandex.ru

Tikhomirov A.A. – Dr. Biol. Sci., Prof., Head, Lab. of Phototrophic Biosynthesis Management, Institute of Biophysics, SB RAS, Krasnoyarsk. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru

Включение почвоподобного субстрата (ППС) в состав систем жизнеобеспечения человека с высокой степенью замкнутости массообменных процессов требует вести точный учет интенсивности его газообмена как звена-минерализатора растительной биомассы. Целью данной работы являлось исследование влияния шага конвейера на газообмен системы «салат – почвоподобный субстрат». В качестве несъедобной растительной биомассы использовали солому пшеницы, которая восполняла минеральные вещества в ППС, вынесенные со съедобной частью ранее выращенных на нем растений. При этом количество вносимой в ППС растительной массы рассчитывали по эквивалентному содержанию азота в соломе пшеницы и в съедобной биомассе убранных растений салата. Были про-

ведены два цикла выращивания салата на ППС. В первом цикле исследований были получены газообменные характеристики одновозрастного ценоза салата, выращенного на ППС. Во втором – CO_2 -газообмен конвейеров с межинтервальными шагами между возрастами растений в 4 и 7 суток. Выращивание растений проводили в герметичных вегетационных камерах с непрерывной регистрацией концентрации CO_2 . Результаты показали, что одним из определяющих условий оптимального числа возрастов салата в конвейере является период интенсивного выделения CO_2 из ППС после внесения в него растительной биомассы. При этом межинтервальный шаг слабо влияет на количество вносимой в ППС растительной биомассы и продуктивность растений, но способствует определению уровня и

величины колебаний CO_2 в атмосфере экспериментальной модели «салат – ППС».

Ключевые слова: CO_2 -газообмен, почвоподобный субстрат, биолого-техническая система жизнеобеспечения, биоконверсия растительных отходов, конвейерное выращивание растений.

Inclusion of the soil-like substrate (SLS) into life support systems with a high closure degree requires keeping an accurate intensity record of its gas exchange as a mineralization part of plant biomass. The given work is aimed at comparative estimation of CO_2 gas exchange of the experimental model "lettuce-SLS" with a periodic introduction of inedible plant biomass in it. Wheat straw was used as inedible plant biomass to supply mineral substances in the SLS which were taken away with edible biomass of the plants grown on it earlier. Here, the amount of vegetable mass introduced in the SLS was calculated according to equivalent of nitrogen content in wheat straw and in edible biomass of gathered lettuce. Two cycles of lettuce growing on the SLS were carried out. In the result of the first research gas exchange characteristics of one-age lettuce cenosis cultivated on the SLS were obtained. In the result of the second research CO_2 gas exchange characteristics of the conveyors with steps of 4 days and 7 days between plant ages were registered. The plants were grown in pressurized vegetative chambers with continuous registration of CO_2 concentration. It was found out that the period of intensive CO_2 emission from the SLS after inedible plant biomass introduction into it appears to be one of characterizing conditions for optimal lettuce age numbers in a conveyor. Here an interval step weakly affects the amount of plant biomass inserted in the SLS and the plant productivity, but contributes to the determination of CO_2 level and quantity fluctuations in the atmosphere of the experimental model "lettuce-the SLS".

Keywords: CO_2 gas exchange, a soil-like substrate (SLS), biological-technical life support system (BTLSS), biological oxidation of plant wastes, conveyor plant cultivation.

Введение. Для повышения степени замкнутости массообменных процессов при включении высших растений в состав биолого-технических систем жизнеобеспечения (БТСЖО) человека

необходимо утилизировать растительные отходы внутри системы, чтобы вернуть в массообмен заключенные в отходах соединения [1]. Один из методов деструкции органических отходов внутри БТСЖО был предложен Н.С. Мануковским с соавторами [2]. В его основе лежит использование почвоподобного субстрата (ППС) как корнеобитаемой среды для выращивания растений и одновременно как реактора-минерализатора для биоконверсии растительных отходов под действием жизнедеятельности червей и микроорганизмов, населяющих ППС [2, 3]. При этом следует иметь в виду, что внесение растительных отходов в ППС возможно только в дискретном режиме, т.е. в момент посева растений. В этом случае необходимо учитывать, что поступление CO_2 , выделяющегося при разложении органических отходов, может быть неравномерным, и в БТСЖО периодически может наблюдаться выброс CO_2 , превышающий ПДК для человека. Особенно ярко это может проявиться при выращивании салатных культур, так как состояние технической зрелости у них совпадает с максимальной интенсивностью поглощения CO_2 : уборка растений в этом состоянии сопровождается существенным снижением интенсивности связывания CO_2 в системе, а закладка несъедобной биомассы в субстрат перед посевом следующего поколения, напротив, приводит к увеличению выделения CO_2 в атмосферу системы. Уменьшить разобщенность во времени этих двух процессов можно за счет организации непрерывного (конвейерного) выращивания на ППС растений, представленных одновременно несколькими возрастными группами растений, с периодическим внесением в ППС растительных отходов. Данный способ выращивания растений уже апробировался в условиях БТСЖО на нейтральных субстратах для поддержания постоянства газовой среды и регулярного получения свежей растительной продукции [1].

Тем не менее работы по определению оптимального числа одновременно представленных возрастов, определяющие межинтервальный шаг конвейера, требуют дополнительных исследований в условиях модельных экспериментов по выращиванию растений на ППС.

Цель исследования. Сравнительная оценка интенсивности изменения концентрации CO_2 в искусственной экосистеме «салат – почвопо-

добный субстрат» при различных межинтервальных шагах конвейеров.

Объект и методы исследования. Объектами исследования служили разновозрастные ценозы растений салата (*Lactuca sativa* L., сорт Московский парниковый), выращиваемые на ППС с периодическим внесением в него несъедобной растительной биомассы. Длительность вегетации салата составляла 28 суток.

В первой серии экспериментов определяли интенсивность изменения концентрации CO_2 в герметичной камере при выращивании одновозрастного ценоза салата на ППС от посева до состояния технической зрелости. Во второй – оценивали интенсивность изменения концентрации CO_2 в герметичной камере при выращивании разновозрастных ценозов салата, сформированных при различных межинтервальных шагах конвейера.

Перед формированием конвейеров в ППС вносили солому пшеницы в количестве 904 г/м^2 (ожидаемый урожай салата – 284 г/м^2 , в расчете на сухое вещество) при содержании общего азота 3,5 % в съедобной части салата. Исходный ППС был получен после выращивания одновозрастного ценоза салата. Внесение соломы пшеницы в ППС связано с восполнением минеральных веществ, вынесенных со съедобной биомассой ранее выращенных на нем растений. Количество вносимой в ППС соломы рассчитывали по эквивалентному содержанию азота в соломе пшеницы и в съедобной биомассе убранных растений. В последующих ротациях салата перед посевом каждого нового поколения растений в ППС также вносили солому пшеницы, рассчитанную описанным выше способом. Таким образом были сформированы конвейеры с межинтервальными шагами 4 и 7 суток. Выбор межинтервальных шагов конвейеров был сделан с учетом технологичности культивирования растений, переработки и хранения продуктов в условиях, приближенных к искусственной экосистеме, и потребности сокращения дополнительных устройств, площадей, числа необходимых операций и времени, затрачиваемого человеком на их выполнение [1, 4].

Выращивание растений проводили в герметичных вегетационных камерах с непрерывной регистрацией концентрации CO_2 инфракрасным газоанализатором (LI-COR 820, США). Концен-

трацию CO_2 в камере поддерживали в диапазоне 500–1500 ppm.

Ценозы салата выращивали при круглосуточном освещении с интенсивностью ФАР на уровне верхних листьев $150 \pm 15 \text{ Вт/м}^2$ и относительной влажностью воздуха около 70 %. Все конвейеры поливались несменяемыми ирригационными растворами, в которых находились экстрагируемые из ППС соединения. Так как ППС имел высокую влагоемкость, полив растений осуществляли один раз в сутки.

Результаты и их обсуждение. В результате выращивания одновозрастного ценоза салата на ППС была получена кривая изменений концентрации CO_2 в атмосфере системы (рис. 1). На основании полученных данных видно, что интенсивность поступления CO_2 в атмосферу системы в ходе культивирования салата была неодинакова. Так, максимальная скорость эмиссии CO_2 приходилась на первые 4 суток вегетации после внесения растительных отходов в ППС, с резким (в 2,4 раза) ее снижением на 5-е сутки вегетации. При дальнейшем культивировании растений интенсивность поступления CO_2 в атмосферу продолжала постепенно снижаться и к концу эксперимента была приблизительно равна скорости эмиссии CO_2 в начале вегетации салата.

Известно, что растительный опад состоит из легко- и трудноокисляемой органики, соотношение которой может определять скорость полного разложения почвенным редуцентами. При этом в микробиологической деструкции растительного опада, в зависимости от стратегии развития микроорганизмов, выделяют быстрый и медленный этапы биоконверсии сложной органики [5–7]. Если принять во внимание этот факт, то становится очевидным, что всплеск выделения CO_2 в атмосферу системы в первые 4 дня эксперимента был связан с интенсивным разложением легкоокисляемой части внесенной соломы пшеницы в ППС, исчерпание которой привело к резкому снижению эмиссии CO_2 на 5-й день. Тогда как дальнейшее понижение поступления CO_2 в атмосферу системы «салат – ППС» определялось результирующей разнонаправленных процессов: постепенно возрастающим фотосинтезом растений салата и скоростью разложения оставшейся трудноокисляемой части пшеницы. При этом выравнивание

скоростей эмиссии CO_2 между началом и концом эксперимента может говорить о том, что большая часть внесенных в ППС растительных

остатков была минерализована микробиологическим сообществом субстрата.

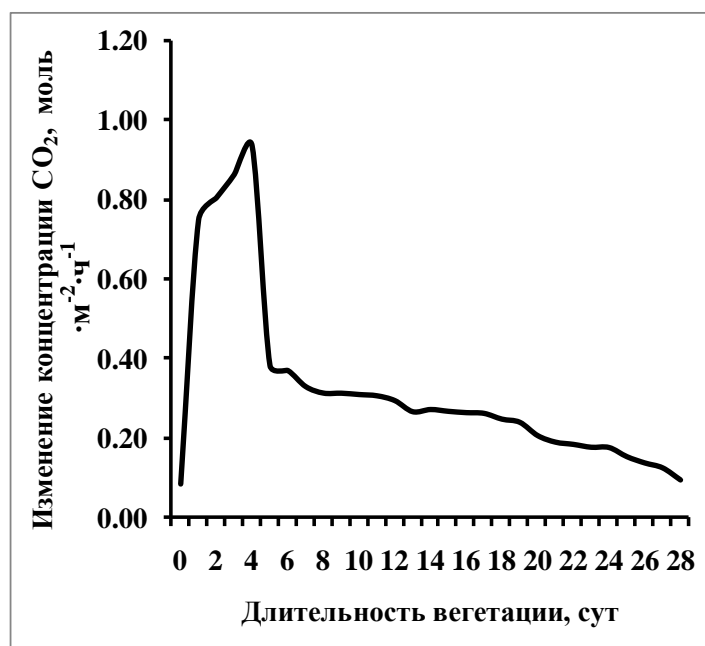


Рис. 1. Скорость изменения концентрации CO_2 в вегетационной камере в процессе роста одновозрастного ценоза салата при выращивании на ППС

Таким образом, выращивание одновозрастного ценоза салата на ППС показало, что наиболее резкие изменения концентрации CO_2 в системе возможны в первые 4 суток после внесения растительных отходов в ППС. Поэтому уменьшение межинтервального шага конвейера салата менее 4 суток будет нерациональным для БТСЖО.

Вторая серия экспериментов выращивания салата на ППС с периодическим внесением в него несъедобной растительной биомассы была осуществлена при таких же условиях, что и в исследовании по эмиссии CO_2 в одновозрастном ценозе салата. Межинтервальный шаг у конвейеров составлял 4 и 7 суток.

На протяжении длительной работы конвейеров интенсивность процессов их CO_2 -газообмена была неодинакова. У конвейера с межинтервальным шагом 4 суток скорость эмиссии CO_2 в атмосферу вегетационной камеры в момент до и после уборки была в среднем в 2,5 раза меньше по сравнению с конвейером с межинтервальным шагом в 7 суток. Причем диапазон колебаний выделения CO_2 в атмосфе-

ру в конвейере с межинтервальным шагом в 4 суток составлял от 0,021 до 0,042 моль · м⁻² · ч⁻¹ посева против 0,008–0,032 моль · м⁻² · ч⁻¹ в конвейере с межинтервальным шагом 7 суток (рис. 2). Увеличение диапазона колебаний в конвейере с межинтервальным шагом 7 суток связано с тем, что в ППС перед посевом следующего поколения растений вносили больше растительных отходов по сравнению с конвейером с шагом 4 суток (табл.). Тогда как повышение общего уровня содержания CO_2 в вегетационной камере конвейера с меньшим межинтервальным шагом связано с большим количеством возрастов растений и, следовательно, с более частым внесением растительных остатков в ППС.

Одним из важных показателей в БТСЖО является продуктивность растений, характеризующая оптимальность условий их культивирования. В таблице сведены данные по продуктивности салата и количеству вносимой соломы пшеницы в ППС, из которых видно, что при работе обоих конвейеров продуктивности достоверно не отличались между собой (табл.).

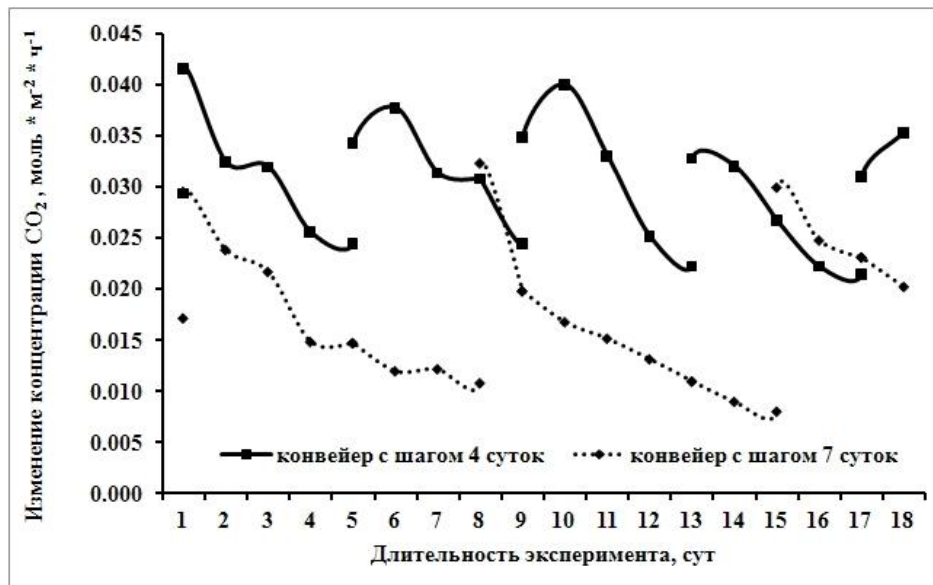


Рис. 2. Скорость изменения концентраций CO_2 в атмосфере вегетационных камер при конвейерном способе выращивания салата на ППС с шагом 4 и 7 суток. Разрывы на графике показывают уборку салата и посев следующего поколения

Продуктивность салата и количество вносимой в ППС соломы пшеницы (после уборки растений) при разном шаге конвейера

Конвейер с шагом	Номер урожая*					Средн.
	1	2	3	4	5	
	Продуктивность, $г \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$					
4 суток	3,7	4,4	4,0	3,8	3,8	$3,9 \pm 0,1$
7 суток	3,9	4,0	4,9	-	-	$4,3 \pm 0,4$
	Количество вносимой в ППС соломы, $г \cdot м^{-2}$					
4 суток	42,0	46,4	43,3	45,1	44,2	$44,2 \pm 0,8$
7 суток	74,2	72,7	88,3	-	-	$78,4 \pm 6,1$

* Цифрами указана последовательность уборок салата, сделанных после формирования конвейеров.

Таким образом, уменьшение межинтервального шага конвейера с 7 до 4 суток ведет к сужению амплитуды колебаний CO_2 в атмосфере экспериментальной модели «салат – ППС», но поднимает его общий уровень в системе. Одновременно с этим увеличение количества возрастов салата не оказывало существенного влияния на продуктивность выращиваемых растений.

Выводы. Проведенные исследования выявили, что одним из определяющих условий оптимального числа возрастов салата в конвейере является период интенсивного выделения CO_2 из ППС после внесения в него растительной биомассы. При этом межинтервальный шаг слабо влияет на продуктивность растений, но

способствует определению уровня и величине колебаний CO_2 в атмосфере экспериментальной модели «салат – ППС». Дальнейшие исследования будут направлены на изучение эмиссии CO_2 из ППС при конвейерном культивировании длительно вегетирующих растений.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы по теме № 56.1.4 «Оценка устойчивости ценозов высших растений замкнутых экологических систем, включающих человека, к выращиванию на питательных средах из минерализованных органических отходов».

Литература

1. *Gitelson J.I., Lisovsky G.M., MacElroy R.D.* Manmade closed ecological systems. – London and New York: Taylor & Francis Group, 2000.
2. *Manukovsky N.S., Kovalev V.S., Rygalov V.Ye.* [et al.]. Waste bioregeneration in life support CES: Development of soil organic substrate // *Adv. Space Res.* – 1997. – V. 10. – P. 1827–1832.
3. *Velichko V.V., Tikhomirov A.A., Ushakova S.A.* [et al.]. Production characteristics of the “higher plants–soil-like substrate” system as an element of the bioregenerative life support system // *Adv. SpaceRes.* – 2013. – V. 51. – P. 115–123.
4. *Черниговский В.Н.* Проблемы космической биологии. – М.: Наука. 1975. – Т. 28. – С. 311.
5. *Duong T.T.T., Baumann K., Marschner P.* Frequent addition of wheat straw residues to soil enhances carbonmineralization rate // *Soil Biology & Biochemistry.* – 2009. – V. – 41. – P. 1475–1482.
6. *Hopkins D.W., Gregorich E.G.* Carbon as a substrate for soil organisms, in: *Biological Diversity and Function in Soils.* – Cambridge University Press, 2005. – P. 57–79.
7. *Machinet G.E., Bertrand I., Barrière Y.* [et al.]. Impact of plant cell wall network on biodegradation in soil: Role of lignin composition and phenolic acids in roots from 16 maize genotypes // *Soil Biology & Biochemistry.* – 2011. – V. 43. – P. 1544–1552.

Literatura

1. *Gitelson J.I., Lisovsky G.M., MacElroy R.D.* Manmade closed ecological systems. – London and New York: Taylor & Francis Group, 2000.
2. *Manukovsky N.S., Kovalev V.S., Rygalov V.Ye.* [et al.]. Waste bioregeneration in life support CES: Development of soil organic substrate // *Adv. Space Res.* – 1997. – V. 10. – P. 1827–1832.
3. *Velichko V.V., Tikhomirov A.A., Ushakova S.A.* [et al.]. Production characteristics of the “higher plants–soil-like substrate” system as an element of the bioregenerative life support system // *Adv. SpaceRes.* – 2013. – V. 51. – P. 115–123.
4. *Chernigovskij V.N.* Problemy kosmicheskoy biologii. – М.: Nauka. 1975. – Т. 28. – С. 311.
5. *Duong T.T.T., Baumann K., Marschner P.* Frequent addition of wheat straw residues to soil enhances carbonmineralization rate // *Soil Biology & Biochemistry.* – 2009. – V. – 41. – P. 1475–1482.
6. *Hopkins D.W., Gregorich E.G.* Carbon as a substrate for soil organisms, in: *Biological Diversity and Function in Soils.* – Cambridge University Press, 2005. – P. 57–79.
7. *Machinet G.E., Bertrand I., Barrière Y.* [et al.]. Impact of plant cell wall network on biodegradation in soil: Role of lignin composition and phenolic acids in roots from 16 maize genotypes // *Soil Biology & Biochemistry.* – 2011. – V. 43. – P. 1544–1552.

