

АГРОНОМИЯ

4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология
(сельскохозяйственные науки)

Научная статья

УДК 633.81

doi: <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i3pp55-64>

**Оценка микрозелени кориандра посевного (*Coriandrum sativum* L.), выращенного
в условиях вертикального земледелия с использованием ассоциативных ризобактерий**

**Ян Викторovich Пухальский¹, Николай Иванович Воробьев², Алла Ивановна Якубовская³,
Марина Алексеевна Астапова¹, Ирина Алексеевна Каменева³, Дмитрий Константинович Левоневский¹**

¹Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН) –
СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Россия

³Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, г. Симферополь, Россия

e-mail: puhalskyan@gmail.com

Аннотация. Для изучения влияния ассоциативных ризобактерий на рост, урожайность и изменение биохимического состава молодых растений (микрозелени) кориандра (*Coriandrum sativum* L.), культивируемых в условиях защищенного грунта, был проведен модельный вегетационный эксперимент на экспериментальной многоярусной гидропонной установке. Эксперимент включал в себя три варианта использования питательного субстрата: питательный раствор на основе минеральных солей; 1,0%-я суспензия штамма *Azospirillum spp.* и комбинированное использование химии с инокулянтом. Контролем служил вариант выращивания растений на дистиллированной воде без прочих добавок. По истечении 14 суток наибольшие значения по урожайности и высоте растений отмечали на варианте с использованием минеральной жидкости. Увеличение биометрических показателей массы растений составило 7,7 % в сравнении с контролем. Также на данном варианте растения быстрее набирали высоту (+4,4 %) на протяжении всего цикла динамики их роста. Наименьшие показатели по биомассе и высоте отмечали на варианте с использованием чистого инокулянта. Этот результат отразился также и на анализе биохимии растений. Зафиксировано снижение концентрации общего хлорофилла и аскорбиновой кислоты в зеленой биомассе на 15,0 и 20,0 % соответственно. Самые высокие значения по содержанию витамина С получены на варианте совместного использования минеральных солей и бактерий. Прибавка к контролю здесь составила 23,5 %. На минеральном растворе этот показатель также повышался, однако прибавка равнялась лишь 5,8 %. Интересен факт снижения суммарной аккумуляции эссенциальных макроэлементов в побегах в среднем по всем вариантам на 12,0 %, в сравнении с контролем. На всех вариантах отмечали увеличение доли натрия, при снижении концентрации калия. Возможно, это связано с перераспределением питательных веществ в пользу развития корневой системы на раннем этапе вегетации, поскольку поглощение и транспорт данных элементов по ионным каналам в растениях происходит с участием одних и тех же белков.

Ключевые слова: кориандр посевной; вертикальное земледелие; гидропоника; ризобактерии *Azospirillum*; вычислительная нейронная сеть; индекс когнитивной значимости эмпирических данных

Для цитирования: Пухальский Я. В., Воробьев Н. И., Якубовская А. И., Астапова М. А., Каменева И. А., Левоневский Д. К. Оценка микрозелени кориандра посевного (*Coriandrum sativum* L.), выращенного в условиях вертикального земледелия с использованием ассоциативных ризобактерий // Аграрный научный журнал. 2024. № 3. С. 55–64. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i3pp55-64>.

AGRONOMY

Original article

**Evaluation of microgreens of coriander (*Coriandrum sativum* L.) grown
in vertical farming using associative rhizobacteria**

**Jan V. Puhalsky¹, Nikolay I. Vorobyov², Alla I. Yakubovskaya³, Marina A. Astapova¹, Irina A. Kameneva³,
Dmitry K. Levonevsky¹**

¹St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAN) –
St. Petersburg Federal Research Center RAS, St. Petersburg, Russia

²All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, St. Petersburg, Pushkin, Russia

³Scientific Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russia

e-mail: puhalskyan@gmail.com





Abstract. To study the effect of associative rhizobacteria on the growth, yield and change in the biochemical composition of young plants (microgreens) of coriander (*Coriandrum sativum* L.) cultivated in protected ground conditions, a model vegetation experiment was carried out on an experimental multi-tiered hydroponic installation. The experiment included three options for using a nutrient substrate: a nutrient solution based on mineral salts; 1.0 % suspension of *Azospirillum spp.* and the combined use of chemistry with an inoculant. The control is the option of growing plants on distilled water without other additives. After 14 days, the highest values in terms of yield and plant height were noted in the variant with the use of mineral liquid. The increase in biometric indicators of plant weight was 7.7 % in comparison with the control. Also, in this variant, the plants gained faster in height (+4.4 %), during the assessment of the entire cycle of their growth dynamics. The lowest values for biomass and height were noted for the variant using pure inoculant. This result was also reflected in the analysis of plant biochemistry. A decrease in the concentration of total chlorophyll and ascorbic acid in green biomass by 15.0 and 20.0 %, respectively, was recorded. The highest values for the content of vitamin C were obtained in the variant of the combined use of mineral salts and bacteria. The increase in control here was 23.5 %. On the mineral solution, this figure also increased, but the increase was only 5.8 %. An interesting fact is that the total accumulation of essential macroelements in the shoots decreased by an average of 12.0 % for all variants, compared to the control. In addition, in all variants, an increase in the proportion of sodium was noted, with a decrease in the concentration of potassium. This may be due to the redistribution of nutrients in favor of the development of the root system at an early stage of vegetation, since the absorption and transport of these elements through ion channels in plants occurs with the participation of the same proteins.

Keywords: coriander; vertical farming; hydroponics; rhizobacterium *Azospirillum*; computational neural network; cognitive significance index of empirical data

For citation: Puhalsky J. V., Vorobyov N. I., Yakubovskaya A. I., Astapova M. A., Kameneva I. A., Levonevsky D. K. Evaluation of microgreens of coriander (*Coriandrum sativum* L.) grown in vertical farming using associative rhizobacteria. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2024;(3):55–64. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i3pp55-64>.

Введение. Кориандр посевной (*Coriandrum sativum* L.) – однолетняя эфиромасличная культура из семейства Сельдерейные (*Apiaceae* Lindl) или Зонтичные (*Umbelliferae*). В Государственный реестр селекционных достижений РФ включено 13 сортов кориандра.

Вегетационный период кориандра составляет в среднем при озимом сроке сева 270–280 дней, при яровом – 110–150 дней [4]. Это зависит от ряда факторов, прежде всего от гидротермических условий. В среднем период роста занимает 120 суток. Общая площадь посева кориандра в мире составляет около 500 тыс. га. В России эти показатели колеблются – 100–170 тыс. га. Посевы культуры сосредоточены в основном в центральных и юго-восточных областях страны. Главные районы возделывания кориандра в России – Воронежская область и Краснодарский край [5].

Культивируется растение в основном для получения плодов (семян), из которых производят эфирное масло, используемое в кулинарии в качестве ароматической добавки при приготовлении маринадов, копченостей, хлебобулочных изделий. Также плоды и эфирное масло используют в парфюмерно-косметическом, фармацевтическом и ликероводочном производствах.

В качестве специй в пищевой промышленности кориандр не обязательно возделывать до виргинильной фазы роста. Зеленую биомассу под названием «кинза» можно собирать уже на этапе получения всходов и первых листьев, в качестве микрозелени или микрогрин. Однако на долю выхода последнего в общем объеме валового продукта приходится лишь около 5 %, или 15–20 тыс. га от общего числа посевных площадей [5]. Повысить сбор урожая пряной зелени можно путем ее выращивания в условиях защищенного грунта, на многоярусных фитоустановках (рисунок 1) с системой проточной гидропоники [1, 6].

Для создания интенсивной светокультуры используется светодиодное освещение. Дополнительно подобные установки могут оснащаться робототехническими системами, работающими на основе искусственного интеллекта (ИИ). Помимо основных датчиков влажности и температуры здесь может применяться компьютерное (нейронное) зрение, которое на основе оперативной обработки серии образов с полученных цветных изображений размерностью от 256×256 пикселей позволяет давать оценку состояния развития растений на определенной фазе вегетации [3]. Таким образом, с помощью внедрения в технологию интенсивного выращивания растений интеллектуальных методов машинного обучения можно on line проводить круглосуточный мониторинг управления их ростом, а также вести разработку новых алгоритмов уско-

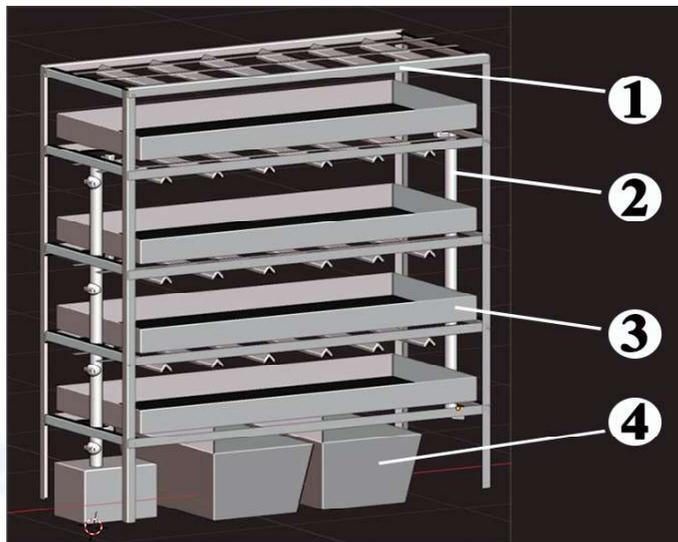


Рисунок 1 – Внешний вид вертикальной фитофермы. Основные компоненты (узлы):

- 1) металлический остов с линейными фитобустерами по 15 Вт; 2) магистральная система слива/залива воды с таймером и насосом; 3) пластиковый поддон с отверстиями под слив; 4) резервуар (бак) для смешивания питательного раствора*

Figure 1 – Appearance of a vertical phytofarm. Main components (assemblies):

- 1) Metal frame with linear phytoboosters of 15 W each; 2) Main water drain/fill system with timer and pump; 3) Plastic tray with holes for drainage; 4) Reservoir (tank) for mixing the nutrient solution*

ренного развития конкретной культуры по общему ряду входящих параметров. Основным преимуществом данных методик по сравнению с традиционными является системный контроль выращивания растений в беспочвенной среде на искусственных нейтральных субстратах. Здесь можно обеспечить идеальные санитарные условия, чтобы избежать воздействия на культуру патогенной микрофлоры и вредителей.

Известно, что ювенильные проростки кинзы, как и взрослые растения, богаты по содержанию витамина С, макро- и микроэлементов. Продолжительность выращивания молодых растений кинзы составляет всего 14 суток. Поэтому их можно выращивать на фитоферме по конвейерной методике круглогодичного сбора урожая по два раза в месяц.

Беспочвенное выращивание в закрытых фитофермах является перспективным и выгодным направлением не только с практической (коммерческой) точки зрения. Оно позволяет проводить научные эксперименты по изучению оптимальных условий выращивания современных селекционных сортов растений на ранних фазах онтогенеза.

В качестве биологической добавки при выращивании кориандра рекомендуют использовать штаммы полезных микроорганизмов (ассоциативных ризобактерий и грибов арбускулярной микоризы) в сочетании с органическими добавками (осадки сточных вод, навоз и др.) [7, 16]. Среди наиболее изученных полезных почвенных ризобактерий для инокуляции кориандра можно выделить род *Azospirillum* [8, 17]. Преимущество азоспирилл связано в первую очередь с их способностью фиксировать атмосферный азот, что уменьшает применение минеральных удобрений на 50 %, а также синтезировать фитогормоны, в частности индол-3-уксусную кислоту, на применение которой отзывчив кориандр [2]. Кроме того, при инокуляции семян растений азоспириллами отмечен эффект снижения заболеваемости их вторичными инфекциями, при поражении фитогельминтом (стеблевой нематодой) [14].

Цель исследований – сравнительное изучение роста, развития и изменения биохимических показателей микрозелени кориандра в результате инокуляции семенного материала бактериями рода *Azospirillum* на фоне применения минеральных удобрений; подбор оптимальной композиции питательных растворов для выращивания молодой зелени кориандра на вертикальных гидропонных фитофермах.

Материалы и методы. Эксперимент проводили на вертикальной четырехъярусной фитоферме (1560×500×2000 см) в закрытом помещении, при полной светокультуре, без дополнительного поступления естественного солнечного света. Растения выращивали в течение 14 суток до полного развития семядолей с парой настоящих листьев.





Параметры микроклимата на фитоферме: температура воздуха 23 ± 1 °C, относительная влажность 65 ± 5 %, концентрация углекислоты 800–1000 ppm. Для инсоляции на каждом ярусе был установлен линейный фитосветильник LEDforPlant (Россия) ($100 \times 50 \times 2$ см), состоящий из шести запараллеленных в ряд светодиодных бустеров, мощностью по 15 Вт каждый. Итоговая характеристика света от лампы на высоте подвеса 40 см: PPF (ФАР) – 370 мкмоль $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$; световой поток – 24 600 лм; цветовая температура – 3000 К. Фотопериод в опыте составил 14 ч в сутки.

Семена растений сеяли в черные пластиковые лотки с дренажными отверстиями на дне, заполненные питательным субстратом в виде кокосового волокна. На каждый лоток приходилось по 8 г семян. Оптимальные гидротермические показатели влажности субстрата поддерживали путем систематического увлажнения лотков. Соотношение влаги к сухой массе брикета во всех вариантах составляло 5:1.

Питательный раствор для увлажнения кокосового субстрата готовили с использованием минерального удобрения Fertica leaf power (азот общий (N) – 15,0 %, фосфора (P_2O_5) – 30,0 %, калия (K_2O) – 15,0 %, магния (Mg) – 2,5 %, меди (Cu) – 0,01 %, железа (Fe) – 0,1 %, серы (S) – 3,7 % (SO_3 – 9,2 %), бора (B) – 0,02 %, марганца (Mn) – 0,05 %, молибдена (Mo) – 0,01 %, цинка (Zn) – 0,01 %), кальциевой селитры (кальций (CaO) – 19 %), азота общего (N) – 15,5 %) и сульфата магния (MgO – 17,0 % и S – 16,0 %), разведенных в воде. Внесение в субстрат штаммов *Azospirillum* spp – из расчета 0,05 л на 5 л воды (1,0 %). Контролем служил вариант без внесения микроорганизмов и минеральных удобрений. Уровень кислотности (pH) субстрата во всех вариантах опыта – 5,8–6,0.

Схема опыта:

- контроль (дистиллированная вода) – 1-й ярус;
- ризобактерии *Azospirillum* spp – 2-й ярус;
- минеральный раствор – 3-й ярус;
- минеральный раствор + *Azospirillum* spp – 4-й ярус.

На каждый вариант (ярус) приходилось по девять повторностей. Лотки при этом ранжировали между собой с перемещением по разным ярусам, для учета конверсии воздушных масс в помещении.

По окончании эксперимента были проведены морфометрическая оценка полученной биомассы растений, а также ее биохимический анализ. Сырую и сухую биомассу микрорзелени измеряли на аналитических весах. Сразу после среза 10 г свежей микрорзелени из каждого лотка немедленно замораживали в жидком азоте, а затем хранили при температуре -80 °C до лиофилизации в морозильной камере MDF-C8V1 (Sanyo, Япония). Также оставляли 0,2 г влажных листьев для определения содержания в них общего хлорофилла. Для этого их экстрагировали в темноте при комнатной температуре в течение 24 ч в 8 мл 80%-го аммиачного ацетона [12,13]. Гомогенат центрифугировали, фильтровали и в полученной жидкости определяли содержание фотосинтетических пигментов на спектрофотометре UV-2700 (Shimadzu, Japan) при длинах волн 663 и 645 нм [19], исходя из формулы (1) [15].

$$\text{Общий хлорофилл} = 20,2 \cdot \text{OD}_{645} + 8,2 \cdot \text{OD}_{663}, \quad (1)$$

где OD – оптическая плотность на определенных длинах волн.

Также на данном приборе в области УФ-спектра (525 нм) проводили количественное определение аскорбиновой кислоты по стандартной методике [10].

Оставшуюся сырую биомассу с каждого лотка высушивали в сушильном шкафу с принудительной подачей воздуха при 65 °C до достижения постоянной массы, измельчали на лабораторной мельнице и оставляли для элементного анализа методом оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES) на приборе Agilent 5100 (Agilent, США) [11]. По каждому элементу строили градуировочную кривую с точностью $R \geq 0,998$. Эталонном служил многоэлементный раствор для ICP (Sigma-Aldrich (Merck), США).

Обработку экспериментальных данных проводили с помощью Excel 2010 (Microsoft Corp., США). Также для оценки качества выращенных растений кориандра была разработана и использована оригинальная вычислительная нейронная сеть CompNN (рисунок 2).

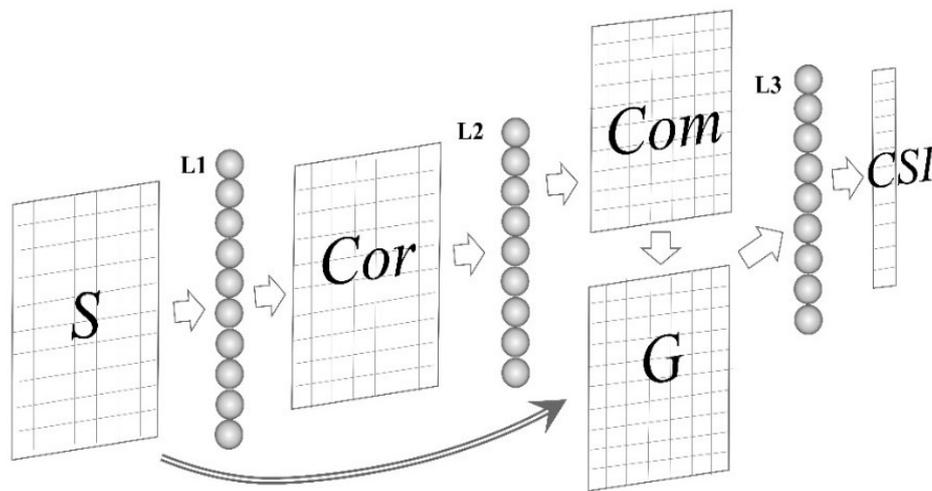


Рисунок 2 – Вычислительная нейронная сеть CompNN для определения индекса когнитивной значимости данных содержания биохимических элементов в растениях (вектор CSI).

L1, L2, L3 – слои искусственных нейронов, выполняющих матричные преобразования числовых данных.

Описание и формулы преобразований в CompNN приведены в тексте

Figure 2 – Computational neural network CompNN for determining the index of cognitive significance of data on the content of biochemical elements in plants (CSI vector). L1, L2, L3 – layers of artificial neurons that perform matrix transformations of numerical data. Description and formulas for transformations in CompNN are given in the text

Данная сеть производит расчет индекса когнитивной значимости эмпирических данных содержания эссенциальных элементов в растениях (индекс CSI, 1...10 б/р, Cognitive Saliense Index) на основе процедуры корреляционного, дискриминантного, кластерного и когнитивного анализов.

Используя индекс SCI, удастся прогнозировать по содержанию биогенных элементов в растениях оптимальность условий их выращивания на фитофермах. При этом предполагалось, что увеличение значения индекса CSI сигнализирует об улучшении условий выращивания растений.

Алгоритм вычислений в нейронной сети CompNN.

Слой нейронов L1 выполняет нормализацию исходных данных матрицы S по формулам (2–4), а затем вычисляет матрицу корреляций (Cor) по формуле (5).

$$D_{jk} = \frac{1}{V_j} (S_{jk} - M_j); \quad (2)$$

$$M_j = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 S_{jk}; \quad (3)$$

$$V_j = \sqrt{\sum_{k=1}^4 (S_{jk} - M_j)^2}; \quad (4)$$

$$Cor_{mn} = CoefficientCorrelation (D_{m1}, \dots, D_{m4}; D_{n1}, \dots, D_{n4}), \quad (5)$$

где S_{jk} – данные содержания биохимических элементов в растениях с порядковыми номерами аккумуляционных характеристик ($j, m, n = 1, \dots, 4$) и с порядковыми номерами вариантов опыта ($k = 1, \dots, 4$); *Coefficient Correlation* – функция, вычисляющая коэффициенты корреляции по стандартному алгоритму.

Слой вычислительных нейронов L2 вычисляет в пространстве исходных данных матрицы S матрицу собственных векторов $Comp$ (по алгоритму Маркова) (6).

$$Comp = EigenVectors (Cor). \quad (6)$$

В слое L3 вычисляется матрица G , содержащая проекции исходных данных на главные компоненты, и вычисляется вектор CSI по формуле (7).

$$CSI_k = G_{1k} \cdot b + 5, \quad (7)$$

где G_{1k} – вектор проекций исходных данных на первую главную компоненту; $k = 1, \dots, 4$ – порядковые номера вариантов опыта; $b = 5, 13$.



Результаты исследований. По истечении 14 суток наибольшие значения урожайности и высоты растений отмечали на варианте с использованием минеральной жидкости (рисунок 3). Увеличение биометрических показателей массы растений здесь составило 7,7 % в сравнении с контролем.

Также на данном варианте растения быстрее набирали высоту (+4,4 %), на протяжении всего цикла динамики их роста (рисунок 4). Наименьшие показатели по биомассе и высоте отмечали на варианте с использованием чистого инокулянта. Данные здесь получились даже ниже, чем на контроле. На варианте совместного внесения микробов с минеральными удобрениями также отмечали более низкие значения, чем на варианте с добавлением химии, но сопоставимые с контролем на воде.

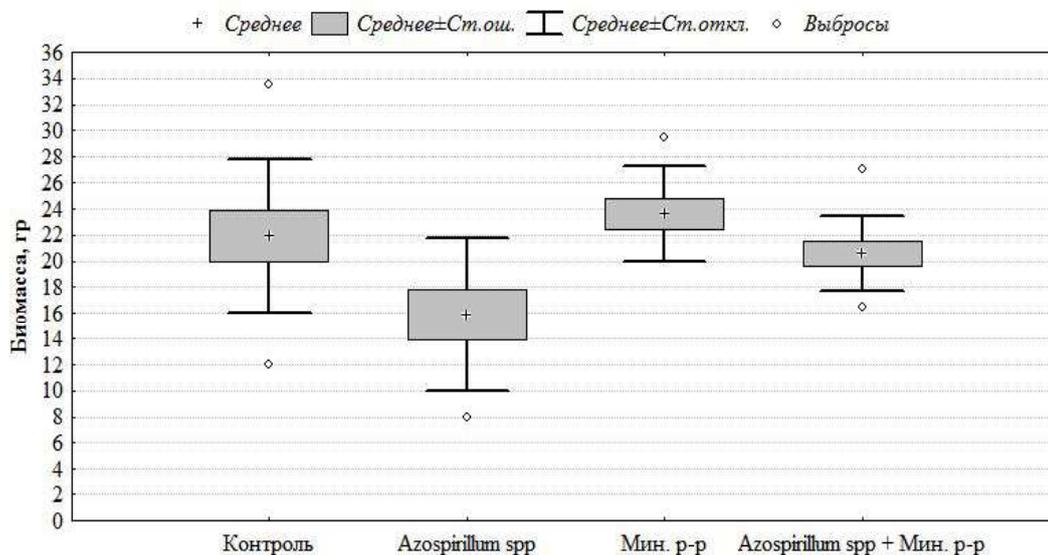


Рисунок 3 – Диаграмма полученных значений сырой биомассы микрозелени кориандра в лотке, выращенной в условиях вертикального земледелия. Все данные выражены как среднее ± стандартная ошибка
Figure 3 – Diagram of the obtained results of raw biomass of coriander microgreens in a tray grown under vertical farming conditions. All data are expressed as mean ± standard error

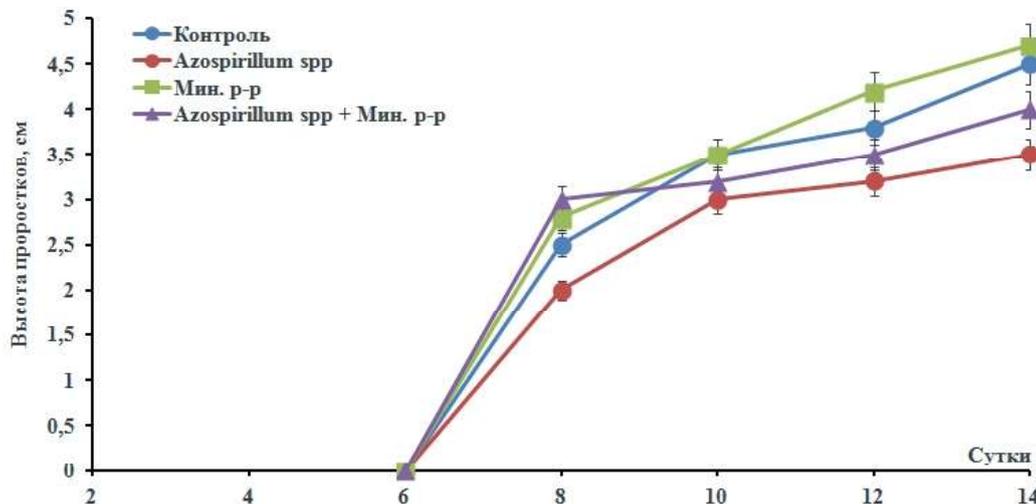


Рисунок 4 – Высота побегов микрозелени кориандра, выращенной в условиях вертикального земледелия. Все данные выражены как среднее ± стандартная ошибка
Figure 4 – Shoot height of coriander microgreens grown under vertical farming conditions. All data are expressed as mean ± standard error

Можно предположить, что на первых этапах роста, при нехватке в среде питательных веществ, бактерии за счет экохимических интеграций согласовывают цикл своего роста и развития с растительным партнером. Макросимбионт при этом выделяет в среду дополнительные низкомолекулярные вещества, которые в виде появившегося энергетического питательного ресурса и берут на себя микробы для успешной колонизации корневой системы, чтобы в дальнейшем





помогать культивару развиваться на более поздних этапах роста, при образовании эффективного симбиоза. Возникшее таким образом перераспределение первичных метаболитов в среде в пользу микробов и приводит к переключению программы развития макросимбионта на другую, изначально запрограммированную в его генетическом коде. Этим же можно объяснить более низкие показатели роста растений на варианте 4 в сравнении с вариантом 3. Вероятно, только здесь микробы перетягивают на себя еще и часть питательных элементов из жидкого субстрата. Из положительных особенностей можно отметить наибольшее снижение степени разброса ошибки средних значений на последнем варианте, что показывает тенденцию в пользу более выровненного развития продукции.

Результаты изменения биометрических показателей отразились также и на анализе биохимии растений (таблица 1). Зафиксировано снижение концентрации общего хлорофилла и аскорбиновой кислоты в зеленой биомассе на 15,0 и 20,0 % соответственно. Самые высокие значения по содержанию аскорбиновой кислоты были получены на варианте совместного использования минеральных солей и бактерий. Прибавка к контролю здесь составила 23,5 %. Похожий результат совместного действия микробов на фоне внесения минеральных добавок уже был отмечен ранее [18]. На минеральном растворе показатель накопления витамина С также повышался, однако прибавка равнялась лишь 5,8 %.

Таблица 1 – Урожайность, содержание общего хлорофилла и аскорбата в микрозелени кориандра, выращенного на искусственном субстрате в контролируемой среде на вертикальной гидроустановке

Table 1 – Productivity, content of total chlorophyll and ascorbate in coriander microgreens grown on an artificial substrate in a controlled environment on a vertical hydraulic installation

Вариант	Урожайность, кг сырой массы м ⁻²	Сухая масса, г/м ²	Общий хлорофилл, мг кг ⁻¹ сырой биомассы	Общая аскорбиновая кислота, мг/100 г сухой массы
Контроль (а)	1,05 ± 0,09 ^b	135,77 ± 12,15 ^b	12,38 ± 0,35 ^b	14,72 ± 1,18 ^{bd}
<i>Azospirillum</i> spp (b)	0,76 ± 0,09 ^{acde}	98,35 ± 12,13 ^{ac}	10,54 ± 0,44 ^{acde}	11,71 ± 0,57 ^{acde}
Минеральный раствор (с)	1,13 ± 0,06 ^b	146,24 ± 7,62 ^{bde}	13,11 ± 0,36 ^{bde}	15,58 ± 1,11 ^{bd}
Мин. р-р + <i>Azospirillum</i> spp (d)	0,99 ± 0,05 ^b	127,17 ± 6,05 ^{bc}	12,16 ± 0,30 ^{bc}	18,18 ± 0,45 ^{abce}
Среднее (е)	0,98 ± 0,04 ^b	126,88 ± 5,59 ^{bc}	12,05 ± 0,24 ^{bc}	15,05 ± 0,58 ^{bd}
Коэффициент корреляции с CSI, ±0,02	0,83	0,83	0,88	0,70

Примечание: a, b, c, d, e – уровень значений, значимо различающихся между собой ($p \leq 0,05$). Все данные выражены как среднее ± стандартная ошибка, $n = 9$ (здесь и далее).

В ходе исследований отмечали снижение суммарной аккумуляции эссенциальных макроэлементов в побегах по вариантам в среднем на 12,0 % в сравнении с контролем (таблица 2). Возможно, на раннем этапе вегетации этот процесс также связан со снижением надземной биомассы растений, в результате перераспределения питательных веществ в пользу развития корневой системы.

Следует отметить, что на всех вариантах наблюдалось увеличение доли натрия, при снижении концентрации калия. Это указывает на существование антагонистической связи между данными элементами, поскольку их поглощение и транспорт по ионным каналам растений происходят с участием одних и тех же белков [18]. Результаты дисперсионного анализа по данным элементам приведены в таблице 3.

Наибольшую величину индекс CSI = 7,3 достигал в варианте опыта, в котором применялась минеральная композиция питательных веществ, а инокуляция ризобактерий *Azospirillum* отсутствовала. Следовательно, выбранная композиция питательных веществ оказывает благоприятное действие на развитие растений. Бактерии *Azospirillum* не оказывали позитивного действия на развитие растений. При их применении индекс CSI снижался по величине (4,1 – 2,8 = 1,3;



Таблица 2 – Содержание эссенциальных макроэлементов в микрозелени кориандра, выращенного на искусственном субстрате в контролируемой среде на вертикальной гидроустановке

Table 2 – The content of essential macroelements in coriander microgreens grown on an artificial substrate in a controlled environment in a vertical hydraulic installation

Вариант	Ca, г элемента в кг ⁻¹ сухой биомассы	Mg, г элемента в кг ⁻¹ сухой биомассы	Na, г элемента в кг ⁻¹ сухой биомассы	K, г элемента в кг ⁻¹ сухой биомассы	Индекс CSI б/р, ±0,1
Контроль (а)	5,45 ± 0,35 ^{bc}	4,19 ± 0,06 ^b	0,43 ± 0,04 ^{bcd}	15,67 ± 0,38 ^{bcd}	4,1
<i>Azospirillum spp</i> (b)	3,78 ± 0,23 ^{acd}	3,89 ± 0,16 ^a	0,69 ± 0,04 ^a	13,91 ± 0,57 ^{acd}	2,8
Минеральный раствор (с)	6,92 ± 0,60 ^{ab}	4,50 ± 0,50	0,64 ± 0,05 ^a	11,68 ± 0,78 ^{ab}	7,3
Минеральный раствор + <i>Azospirillum spp</i> (d)	5,39 ± 0,83 ^b	4,38 ± 0,32	0,65 ± 0,03 ^a	11,81 ± 1,05 ^{ab}	5,7
Коэффициент корреляции с CSI, ±0,02	0,94	0,97	0,12	-0,74	

Таблица 3 – Результаты двухфакторного дисперсионного анализа накопления эссенциальных макроэлементов в биомассе микрозелени кориандра

Table 3 – Results of two-factor analysis of variance of accumulation of essential macroelements in biomass of coriander microgreens

Элемент	Факт инокуляции (1)		Факт внесения минеральных солей (2)		1×2	
	F	p	F	p	F	P
Ca	8,37**	0,0068	7,78**	0,0088	0,02	0,8982
Mg	0,47	0,4985	1,7	0,2019	0,09	0,7715
Na	9,22**	0,0047	3,86	0,0583	8,45**	0,0066
K	1,22	0,2782	16,97***	0,0003	1,63	0,2106

Примечание: **: ***значения достоверные при $p \leq 0,05$; $p \leq 0,01$; $p \leq 0,001$. F – критерий Фишера; p – уровень значимости.

7,3 – 5,7 = 1,6). Эти бактерии не фиксировали азот для растений, так как контакт с атмосферой в гидропонной системе у бактерий отсутствует. Поэтому часть питательного ресурса, предназначенного для растений, поглощалась бактериями, в результате чего растения развивались медленнее. Вероятно, этот негативный эффект можно устранить, если применить аэрацию питательного раствора.

Индекс CSI позитивно коррелирован с биомассой растений и биохимическими показателями растений (см. таблицу 1), $r = 0,83$; $0,83$; $0,88$; $0,70$. Это означает, что возрастание индекса CSI характеризует возрастание интенсивности процессов развития растений, скорость набора ими биомассы и интенсивность внутренних биохимических процессов в растениях.

Отрицательная корреляция коэффициента корреляции с индексом CSI для калия ($r = -0,74$) может означать, что в питательной композиции процентное содержание данного иона нужно уменьшать.

Закключение. При совместном использовании минеральных удобрений с ризосферными бактериями из рода *Azospirillum* микрозелень кориандра, выращенная в гидропонной среде, получается низкорослей, чем контрольные растения, однако более выровненной по высоте и богаче по содержанию аскорбиновой кислоты.

Необходимо продолжать вести скрининг среди ассоциативных ризобактерий с целью подбора селекционных видов, проявляющих стимулирующий эффект уже на ювенильных проростках.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках бюджетной темы FFZF-2022-0006.

Благодарности. Авторы признательны заведующему лабораторией экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий, к.б.н. Ю.В. Лактионову за предоставление штаммов ассоциативных микроорганизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вершинина О. В., Князева И. В. Технологические приемы выращивания кориандра на вертикальных стеллажах // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 2(58). С. 100–106.
2. Использование ауксиновых регуляторов роста для повышения продуктивности кориандра посевного (*Coriandrum sativum* L.) в условиях Нечерноземной зоны РФ / Е. Л. Маланкина [и др.] // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2013. № 3. С. 146–150.
3. Рогачев А. Ф., Мелихова Е. В., Зеляковский Д. В. Фитотронный комплекс на основе системы технического зрения для интенсивного выращивания растений // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2023. № 4(275). С. 82–88.
4. Специализированные коллекции эфиромасличных культур ФГБУН «НИИСХ Крыма». Кориандр посевной *Coriandrum sativum* L., фенхель обыкновенный *Foeniculum vulgare* Mill / Н. В. Невкрытая [и др.] // Методические рекомендации по селекции и семеноводству эфиромасличных культур семейства Сельдевые *Apiaceae* L. Симферополь: АРИАЛ, 2022. 200 с.
5. Степанова Н. Ю. Агробиологическая оценка сортов кориандра в условиях Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2021. Т. 4. С. 20–27.
6. Шаляпина А. Ф., Макаров П. Н. Технология выращивания шпината и кориандра в закрытых системах методом проточной гидропоники в установках вертикального типа // Безопасный Север – чистая Арктика: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. Сургут, 2020. С. 312–318.
7. Coriander (*Coriandrum sativum* L.) in Combination with Organic Amendments and Arbuscular Mycorrhizal Inoculation: An Efficient Option for the Phytomanagement of Trace Elements-Polluted Soils / J. Fontaine, J. Duclercq, N. Facon, D. Dewaele, F. Laruelle, B. Tisserant, A. Lounès-Hadj Sahraoui // Microorganisms. 2022. Vol. 10. No. 11. 2287.
8. Darzi M. T., Shirkhodaei M., Hadi M. H. S. Effects of Vermicompost and *Azotobacter* and *Azospirillum* bacteria on quantity and quality of essential oil of coriander (*Coriandrum sativum* L.) // International Journal of Farming and Allied Sciences. 2013. Vol. 2. No. 5. P. 1277–1283.
9. Effect of mineral vs. biofertilizer on the growth, yield and essential oil content of coriander (*Coriandrum sativum* L.) / A. R. Rahimi, K. Mashayekhi, S. Amini, E. Soltani // Medicinal and Aromatic Plant Science and Biotechnology. 2009. Vol. 3. No. 2. P. 82–84.
10. Kacar B., İnal A. Bitki Analizleri. Nobel Yayın No: 1241 // Fen Bilimleri. 2008. Vol. 63. No. 1.
11. Kampfenkel K., Vanmontagu M., Inzé D. Extraction and determination of ascorbate and dehydroascorbate from plant tissue // Analytical biochemistry. 1995. Vol. 225. No. 1. P. 165–167.
12. Lichtenthaler H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // Methods in enzymology. Academic Press, 1987. Vol. 148. P. 350–382.
13. Lichtenthaler H. K., Buschmann C. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UVVIS spectroscopy // Current protocols in food analytical chemistry. 2001. Vol. 1. No. 1. P. F4. 3.1–F4. 3.8.
14. Malhotra S. K., Vashishtha B. B., Apparao V. V. Influence of nitrogen *Azospirillum* sp. and farmyard manure on growth, yield and incidence of stem gall disease in coriander (*Coriandrum sativum* L.) // Journal of Spices and Aromatic Crops. 2006. Vol. 15. No. 2. P. 115–117.
15. Nondestructive determination of total chlorophyll content in maize using three-wavelength diffuse reflectance / D. D. Gu, W. Z. Wang, J. D. Hu, X. M. Zhang, J. B. Wang, B. S. Wang // Journal of Applied Spectroscopy. 2016. Vol. 83. P. 541–547.
16. Rendimento e qualidade fisiológica de sementes de coentro cultivado com adubação orgânica e mineral / E. U. Alves, A. P. Oliveira, L. A. Bruno, R. Sader, A. U. Alves // Revista Brasileira de Sementes. 2005. Vol. 27. No. 1. P. 132–137.
17. Singh S. P. Effect of *Azospirillum* on growth and yield parameters of coriander (*Coriandrum sativum* L.) // Journal of Eco-friendly Agriculture. 2016. Vol. 11. No. 1. P. 15–17.
18. Spinach plants favor the absorption of K⁺ over Na⁺ regardless of salinity, and may benefit from Na⁺ when K⁺ is deficient in the soil / J. F. Ferreira, J. B. da Silva Filho, X. Liu, D. Sandhu // Plants. 2020. Vol. 9. No. 4. P. 507.
19. Wellburn A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution // Journal of plant physiology. 1994. Vol. 144. No. 3. P. 307–313.



REFERENCES

1. Vershinina O. V., Knyazeva I. V. Technological methods of growing coriander on vertical racks. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2022; 2(58):100–106. (In Russ.).
2. The use of auxin growth regulators to increase the productivity of coriander (*Coriandrum sativum* L.) in the non-chernozem zone RF / E. L. Malankina, N. M. Przhevalsky, N. I. Kuznetsov, P. D. Denisov, A. P. Gryaznov. *Proceedings of the Timiryazev Agricultural Academy*. 2013;3:146–150. (In Russ.).
3. Rogachev A. F., Melikhova E. V., Zelyakovskiy D. V. Phytotron complex based on the system of technical vision for intensive plant cultivation. *Proceedings of the Volgograd State Technical University*. 2023;4(275):82–88. (In Russ.).
4. Skipor Specialized collections of essential oil crops FGBUN “NIISKh Crimea”. Coriander *Coriandrum sativum* L., Common fennel *Foeniculum vulgare* Mill. / N. V. Nevkryaia, S. I. Krivda, O. M. Zolotilova, V. A. Zolotilov, S. S. Babanina, E. D. Ametova, M. P. Marchenko, I. A. Novikov, E. N. Drobotova, N. S. Krivchik. *Guidelines for the selection and seed production of essential oil crops of the Celery Apiaceae L. family*. Simferopol, IT “ARIAL”; 2022. 200 p. (In Russ.).
5. Stepanova N. Yu. Agrobiological assessment of coriander varieties in the conditions of the Leningrad region. *Bulletin of the St. Petersburg State Agrarian University*. 2021;4:20–27. (In Russ.).
6. Shalyapina A. F., Makarov P. N. Technology of growing spinach and coriander in closed systems by flow hydroponics in vertical plants. *Collection: Safe North - clean Arctic. Materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference*. Surgut; 2020:312–318. (In Russ.).
7. Coriander (*Coriandrum sativum* L.) in Combination with Organic Amendments and Arbuscular Mycorrhizal Inoculation: An Efficient Option for the Phytomanagement of Trace Elements-Polluted Soils / J. Fontaine, J. Duclercq, N. Facon, D. Dewaele, F. Laruelle, B. Tisserant, A. Lounès-Hadj Sahraoui. *Microorganisms*. 2022;10(11):2287.
8. Darzi M. T., Shirkhodaei M., Hadi M. H. S. Effects of Vermicompost and *Azotobacter* and *Azospirillum* bacteria on quantity and quality of essential oil of coriander (*Coriandrum sativum* L.). *International Journal of Farming and Allied Sciences*. 2013;2(5):1277–1283.
9. Effect of mineral vs. biofertilizer on the growth, yield and essential oil content of coriander (*Coriandrum sativum* L.) / A. R. Rahimi, K. Mashayekhi, S. Amini, E. Soltani. *Medicinal and Aromatic Plant Science and Biotechnology*. 2009;3(2): 82–84.
10. Kacar B., İnal A. Bitki Analizleri. Nobel Yayın No: 1241. *Fen Bilimleri*. 2008;63(1).
11. Kampfenkel K., Vanmontagu M., Inzé D. Extraction and determination of ascorbate and dehydroascorbate from plant tissue. *Analytical biochemistry*. 1995; 225(1):165–167.
12. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in enzymology*. 1987;148:350–382.
13. Lichtenthaler H. K., Buschmann C. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UVVIS spectroscopy. *Current protocols in food analytical chemistry*. 2001;1(1):F4–3.
14. Malhotra S. K., Vashishtha B. B., Apparao V. V. Influence of nitrogen *Azospirillum* sp. and farmyard manure on growth, yield and incidence of stem gall disease in coriander (*Coriandrum sativum* L.). *Journal of Spices and Aromatic Crops*. 2006;15(2):115–117.
15. Nondestructive determination of total chlorophyll content in maize using three-wavelength diffuse reflectance / D. D. Gu, W. Z. Wang, J. D. Hu, X. M. Zhang, J. B. Wang, B. S. Wang. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2016;83:541–547.
16. Rendimento e qualidade fisiológica de sementes de coentro cultivado com adubação orgânica e mineral / E. U. Alves, A. P. Oliveira, L. A. Bruno, R. Sader, A. U. Alves. *Revista Brasileira de Sementes*. 2005; 27(1):132–137.
17. Singh S. P. Effect of *Azospirillum* on growth and yield parameters of coriander (*Coriandrum sativum* L.). *Journal of Eco-friendly Agriculture*. 2016;11(1): 15–17.
18. Spinach plants favor the absorption of K⁺ over Na⁺ regardless of salinity, and may benefit from Na⁺ when K⁺ is deficient in the soil / J. F. Ferreira, J. B. da Silva Filho, X. Liu, D. Sandhu. *Plants*. 2020; 9(4):507.
19. Wellburn A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of plant physiology*. 1994;144(3):307–313.

Статья поступила в редакцию 03.07.2023; одобрена после рецензирования 15.08.2023; принята к публикации 23.08.2023.

The article was submitted 03.07.2023; approved after reviewing 15.08.2023; accepted for publication 23.08.2023.

