

Использование бактериальной инокуляции для улучшения вегетативного роста и нутрицевтических качеств китайской капусты в условиях регулируемой агроэкосистемы

И. В. Князева¹✉, О. В. Вершинина¹, А. В. Титенков¹

¹ Федеральний научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

✉ E-mail: knyazewa.inna@yandex.ru

Аннотация. В последние годы инокуляция растений полезными микроорганизмами, стимулирующими рост растений PGPR-бактерии в сельском хозяйстве, неуклонно растет, и ожидается, что в будущем они частично заменят химические удобрения, пестициды и другие регуляторы роста, обеспечивая экологически чистое решение для устойчивых методов ведения сельского хозяйства. Следовательно, **целью этого исследования** было изучение бактериальной инокуляции *Bacillus cereus* на улучшение вегетативного роста и нутрицевтических качеств растений китайской капусты пак-чой, выращенных методом гидропонии в условиях регулируемой агроэкосистемы. **Объекты исследований** – растения китайской капусты пак-чой (*Brassica campestris* ssp. *chinensis* L.). **Методы.** При проведении исследований были измерены биометрические показатели, определены показатели сырого, сухого вещества, пищевых волокон и массовой доли золы растений пак-чой согласно ГОСТ. Содержание витаминов, катионов, анионов и аминокислот в растительной продукции оценивали методом капиллярного электрофореза с использованием прибора «Капель-205» (Россия). Полученные результаты обрабатывали статистически с помощью дисперсионного анализа. **Научная новизна.** Определена эффективность применения прикорневой инокуляции бактерий *Bacillus cereus* при выращивании растений пак-чой методом гидропонии в закрытых агроэкосистемах. Установлена зависимость повышения качественных показателей в биомассе растений пак-чой от инокуляции бактериями. **Результаты.** В результате исследований установлено, что инокуляция *B. cereus* оказывала положительное влияние на развитие ассимиляционного аппарата растений пак-чой. На формирование основных морфобиометрических показателей (сырая, сухая масса, длина побега и количество листьев) растений инокуляция бактериями не оказала существенного влияния. Все полученные значения находились на уровне контроля. Растения пак-чой, инокулированные бактериями, показали значительное увеличение концентрации минеральных элементов (K, S и P), аминокислот (пролина, фенилаланина, валина, гистидина и лизина) и витаминов (аскорбиновой кислоты и холина).

Ключевые слова: пак-чой, инокуляция бактериями, *Bacillus cereus*, вегетативный рост, гидропоника, катионы, анионы, аминокислоты, закрытые агроэкосистемы.

Для цитирования: Князева И. В., Вершинина О. В., Титенков А. В. Влияние бактериальной инокуляции на биохимические показатели китайской капусты в условиях регулируемой агроэкосистемы // Аграрный вестник Урала. 2023. № 08 (237). С. 59–67. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-237-08-59-67.

Дата поступления статьи: 10.03.2023, **дата рецензирования:** 20.04.2023, **дата принятия:** 27.04.2023.

Постановка проблемы (Introduction)

Основное генетическое разнообразие самых распространенных капустных зеленных культур вида *Brassica rapa* L. сложилось в Юго-Восточной Азии – первоначально в Китае, затем в Японии и Корее. Оно включает многочисленные морфотипы пекинской, китайской, розеточной, пурпурной, японской капусты и листовой репы [1].

Китайская капуста – пак-чой, или бок-чой, относится к листовым однолетним растениям семейства

капустные. Распространена в странах Юго-Восточной Азии и является одним из самых популярных овощей, выращиваемых в Китае [2]. В России капустные овощи *B. rapa* традиционно используются ограниченно – главным образом в качестве салатных овощей. Пак-чой считается одним из малоизученных нетрадиционных культур для России [3].

Культура пак-чой способна накапливать различные химические элементы (мг / 100 г продукта), такие как фосфор (37), магний (19), натрий (65),

кальций (105) и калий (252). Из микроэлементов в большей степени содержит йод, фтор и селен. Содержание витамина А в этом овоще почти такое же, как и в моркови, а по содержанию витамина С (45 мг / 100 г) превосходит все салатные культуры семейства капустные. Прекрасно подходит в качестве источника витаминов группы В [4].

Во многих индустриально развитых странах (Япония, США, Китай, Сингапур, Южная Корея, страны Евросоюза) быстрорастущие капустные листовые культуры, обладающие ценным биохимическим составом, не только возделывают традиционными способами (открытый и защищенный грунт), но и выращивают в светокультуре в условиях нового интенсивно развивающегося типа растительного производства – на вертикальных фермах закрытого типа (PFAL) [5].

Одним из подходов, который может быть использован для решения некоторых текущих проблем сельского хозяйства, является выращивание растений в закрытых агроэкосистемах с применением полезных микроорганизмов. Инокуляция растений PGPR-бактериями (от Plant Growth Promoting Rhizobacteria – ризобактерии, способствующие росту растений) – новый подход, который основан на использовании потенциала растений и микроорганизмов за счет биологических механизмов взаимодействия между компонентами растительно-микробных систем [6]. Одной из наиболее важных черт штаммов, способствующих росту растений, является повышение биодоступности необходимых элементов, таких как Р, К и Fe. Сорбция биодоступного Р из питательного раствора является одним из ограничивающих факторов урожайности сельскохозяйственных культур. Наиболее эффективные PGPR-бактерии принадлежат к родам *Agrobacterium*, *Azoarcus*, *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Enterobacter*, *Gluconoacetobacter*, *Pseudomonas* и *Serratia* [7].

Различные исследования подтверждают положительное влияние штаммов PGPR-бактерий на увеличение урожайности *Solanum tuberosum* L. [8], параметров роста от 20 % (*Phaseolus vulgaris* L.) до 45 % (*Pisum sativum* L.) [9], сухой биомассы побегов *Brassica rapa* L. – 170 % [10], *Eragrostis tef* (Zucc) – в 2,8 раза по сравнению с контрольным вариантом [11].

PGPR-бактерии, способствующие росту растений, улучшают вегетативный рост *Brassica oleracea* var. *acephala*, содержание пигментов, минералов и пищевую ценность. Применение бактериального штамма AP-303 (*Bacillus amyloliquefaciens* subsp. *plantarum*) показало самые высокие значения по сравнению с необработанными растениями [12]. Бактериальная культура *Bacillus cereus* способствовала усилению биосинтеза органических кислот в плодах томатов [13]. Кроме того, результаты показали, что экзогенное внесение полезных микро-

организмов значительно ($P < 0,05$) усиливало рост растений пак-чой, а также стимулировало активацию хлорофилла и каротиноидов [14].

Род *Bacillus* включает космополитические бактерии, присутствующие во всех средах, включая ризосферную почву. Ассоциированные с корнями виды *Bacillus* обычно способствуют росту растений различными способами, например, продуцированием предшественника фитогормона, то есть индолилуксусной кислоты (IAA-ауксин), солибилизацией фосфатов и образованием сидерофоров, или служат в качестве биоконтроля [15].

С учетом растущего интереса к подходу с использованием PGPR-бактерий необходимы новые исследования для расширения знаний об их воздействии на растения. Актуальным является поиск агрономически ценных штаммов PGPR-бактерий, а также методов их применения для конкретных видов растений или даже сортов в зависимости от условий выращивания.

Целью настоящего исследования было изучение бактериальной инокуляции *Bacillus cereus* на улучшение вегетативного роста инутрицевтических качеств растений китайской капусты пак-чой, выращенных методом гидропонии в условиях регулируемой агроэкосистемы.

Задачи исследования:

- 1) определить влияние бактериальной инокуляции *B. cereus* на морфологические показатели китайской капусты пак-чой.
- 2) изучить действие бактериального инокулирования *B. cereus* нанутрицевтические качества китайской капусты пак-чой.

Методология и методы исследования (Methods)

В качестве объекта исследования использовали растения китайской капусты пак-чой (*Brassica campestris* ssp. *chinensis* L.), семенной материал был приобретен в компании «Агрофирма Партнер» (Россия). Растения пак-чой выращивались в климатической камере производства ВИМ (Россия) с использованием проточной технологии гидропонии в течение 30 суток. Семена высевали в пропитанный питательным раствором субстрат. В качестве субстрата использовали минераловатные кубики размером 7×7 см² марки SPELAND VEGA (Россия). Питание растений осуществлялось водорастворимыми минеральными удобрениями Flora Series® (GHE, Fleurance, Франция).

Изучение влияния бактериальной инокуляции на рост растений пак-чой и качество растительной продукции проводилось в 2021–2022 гг. в отделе закрытых искусственных агроэкосистем для растениеводства на базе Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (Москва). Бактерии *Bacillus cereus* были приобретены в ГУП «Московский городской центр дезинфекции». Приобретенный материал представлял собой высушенные спо-

ры бактерий штамма 96. В стерильных условиях в пробирку Эппендорфа (1,5 мл), содержащую споры бактерий, вносили по 0,5 мл питательной среды и инкубировали в термостате в течение 24 часов при температуре 37 °С до полного изменения цвета среды. Полученную суспензию применяли в качестве инокуляции.

Бактериальную инокуляцию проводили экзогенно один раз за вегетационный период на ранних стадиях развития растений пак-чой (формирования 3–4 настоящих листьев). В прикорневую часть растений вводили суспензию *B. cereus* в концентрации 10³ КОЕ. Контролем служили растения без инокуляции. Эксперимент включал 2 варианта, в каждом варианте по 60 растений (таблица 1). Закладка эксперимента проводилась 4 раза за период исследований.

Биометрический показатель (площадь листовой пластины) измеряли с помощью прибора LI-COR-LI-3100C (США). Определение сырого вещества проводили на аналитических весах LA 230S (Германия). Определение сухого вещества – методом высушивания навески до постоянной массы в сушильном шкафу Memmert UN-450 (Германия) по ГОСТ 28561-90. Анализ массовой доли золы в растительной продукции проводили по ГОСТ ISO 763-2011. Определение пищевых волокон идентифицировали на основе ферментативного гидролиза крахмальных и некрахмальных соединений. Пищевые волокна осаждали этиловым спиртом, высушивали и определяли гравиметрическим методом согласно ГОСТ ISO 763-2011.

Определение содержания витаминов, катионов, анионов и аминокислот в растительной продукции проводили методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель-205» (Россия). Площадь листовой поверхности, сырая, сухая масса, длина побегов и биохимические показатели растений исследовали в конце вегетационного периода на 30-е сутки наблюдений. Для измерения морфометрических параметров и биохимических показателей использовали от 6 до 15 растений с каждого варианта опыта.

Полученные результаты обрабатывали статистически с помощью дисперсионного анализа ANOVA. Достоверные различия между средними рассчитывали с помощью теста Дункана при уровне вероятности $p \leq 0,05$.

Результаты (Results)

Важным показателем, характеризующим фотосинтетическую деятельность растений, является площадь листьев. Определение ассимиляционной поверхности путем сканирования листьев на фотопланиметре позволяет ее определить с высокой степенью точности. В результате исследований установлено, что инокуляция *B. cereus* оказывала положительное влияние на развитие ассимиляционного аппарата растений пак-чой (таблица 2). Динамика нарастания площади листьев отличалась от контрольной. Максимальная ассимиляционная поверхность при внесении бактериальной культуры находилась на уровне 284 см²/растение, что достоверно превышает контрольный вариант на 43 см²/растение и подтверждается статистическими расчетами.

Проанализированные данные относительно сырой и сухой биомассы пак-чой показывают отсутствие статистических различий между биомассой растений, инокулированных PGPR-бактериями по сравнению с контрольной группой. Интенсивность роста растений пак-чой на 30-е сутки наблюдений при инокуляции бактериями составила в среднем по годам исследований 18,23 см, что соответствовало контрольному варианту. По количеству листьев у растений пак-чой различий также не отмечалось. В среднем наблюдалось 6,0–7,0 шт. листьев на растение.

Таким образом, на формирование основных морфобиометрических показателей (сырая, сухая масса, длина побега и количество листьев) растений пак-чой инокуляция бактериями не оказала существенного влияния. Все полученные значения находились на уровне контроля.

Анализ элементного состава биомассы растений пак-чой показал значительные различия в поглощении макроэлементов, таких как Na, Ca, Mg, P, S и K (рис. 1). Для концентраций ионов Na и Mg не было зарегистрировано существенных различий между контролем и инокуляцией. Концентрация Na (53,68–56,53 мг/100 г) и Mg (33,32–35,95 мг/100 г) в надземной биомассе пак-чой при инокуляции бактериями варьировала в пределах контрольной группы растений.

Таблица 1

Схема проведения эксперимента по инокуляции растений пак-чой

Вариант	Характеристика опыта	Норма расхода на растение, мл
Контроль	Без инокуляции <i>Bacillus cereus</i>	0
Опыт	Бактериальная инокуляция <i>Bacillus cereus</i>	5

Table 1

Scheme of the experiment on inoculation of pak-choy plants

Option	Characteristics of the experience	Consumption rate per plant, ml
Control	Without inoculation <i>Bacillus cereus</i>	0
Experience	Bacterial inoculation <i>Bacillus cereus</i>	5

Таблица 2
Морфобиометрические показатели растений пак-чой (n = 15)

Вариант	Сырая масса, г/растение	Сухая масса, г/растение	Длина побега, см	Количество листьев, шт.	Площадь листьев, см ² /растение
Контроль	18,51	1,54	16,29	7,33	241,05
Инокуляция бактериями	18,89	1,61	18,23	6,42	284,07
$HCP_{0,05}$	$F_{\phi} < F_{05}$				15,01

Table 2
Morpho-biometric indicators of pak-choi plants (n = 15)

Option	Raw weight, g/plant	Dry weight, g/plant	Shoot length, cm	Number of leaves, pcs.	Leaf area, cm ² /plant
Control	18.51	1.54	16.29	7.33	241.05
Bacterial inoculation	18.89	1.61	18.23	6.42	284.07
$LSD_{0,05}$	$F_f < F_{05}$				15.01

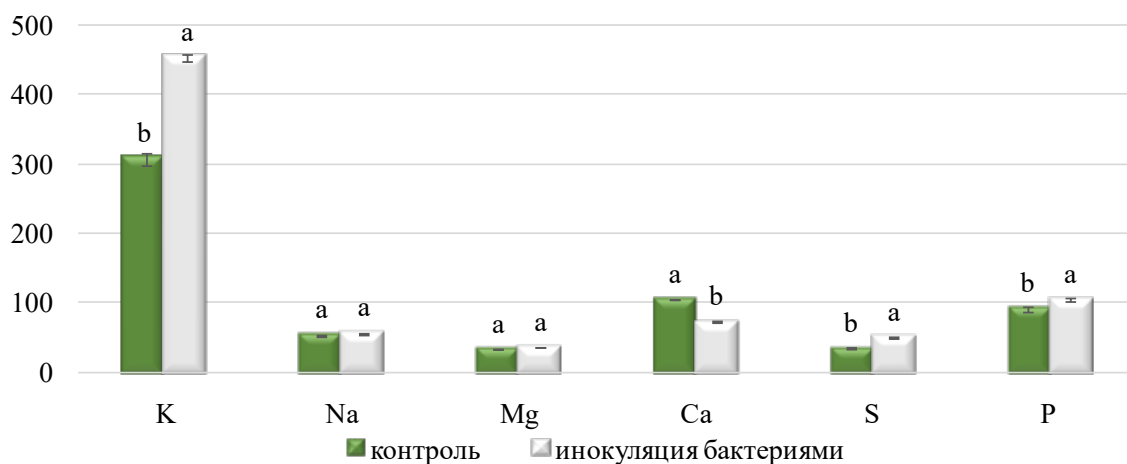


Рис. 1. Накопление макроэлементов в надземной биомассе растений пак-чой, мг / 100 г, в съедобной части (n = 6). Разные буквы указывают на существенные различия между вариантами опыта по критерию Дункана (p ≤ 0,05)

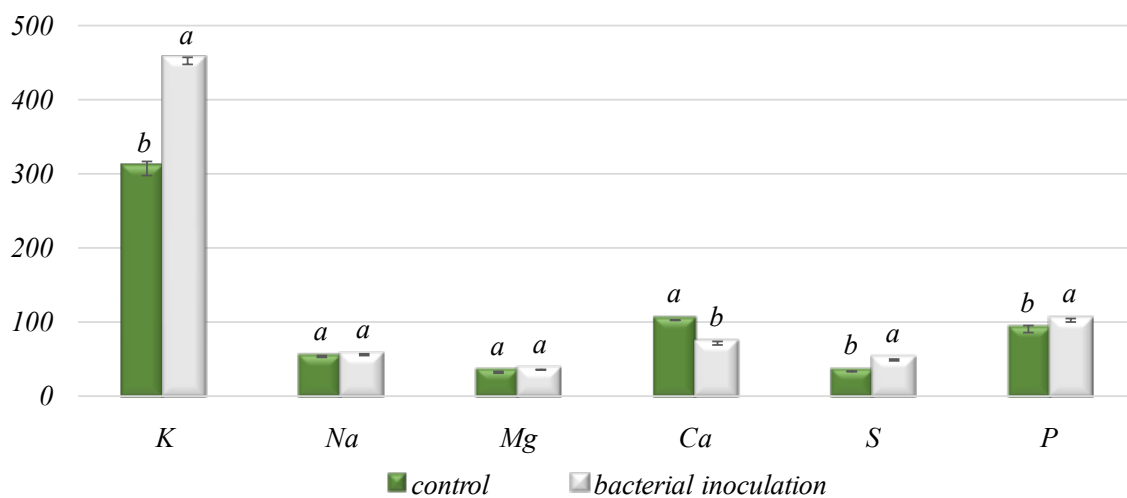


Fig. 1. Macronutrient accumulation in the aboveground biomass of pak-choi plants, mg/100 g, in the edible part (n = 6). Different letters indicate significant differences between the experimental options according to the Duncan criterion (p ≤ 0.05)

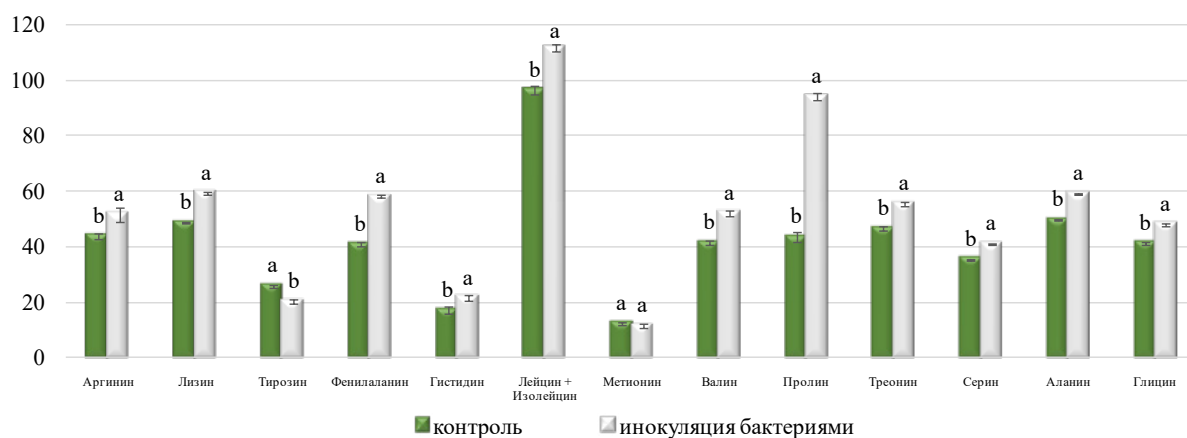


Рис. 2. Накопление аминокислот в надземной биомассе растений пак-чой, мг / 100 г, съедобной части ($n = 6$). Разные буквы указывают на существенные различия между вариантами опыта по критерию Дункана ($p \leq 0,05$)

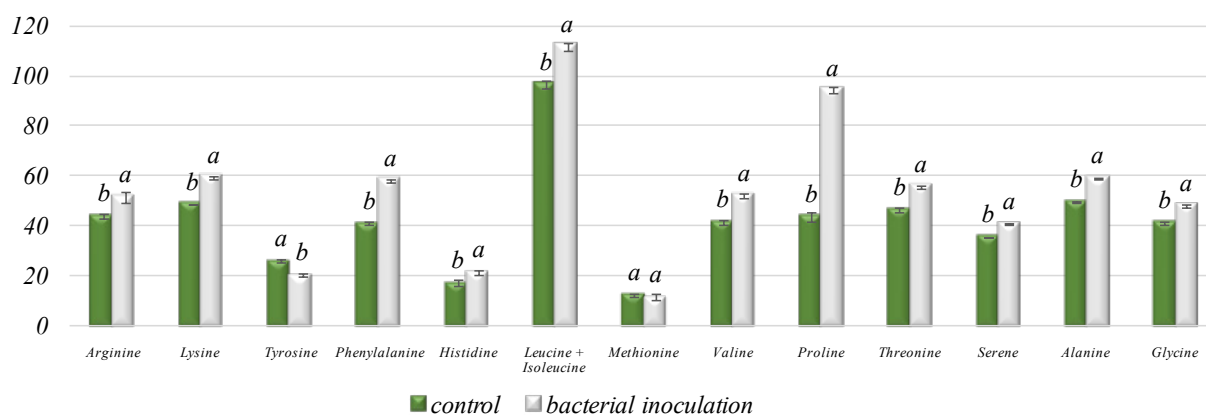


Fig. 2. Amino acid accumulation in the aboveground biomass of pak-choi plants, mg / 100 g, in the edible part ($n = 6$). Different letters indicate significant differences between the experimental options according to the Duncan criterion ($p \leq 0.05$)

Однако однократная инокуляция *B. cereus* повлияла на концентрации К (контроль – 307,43 мг / 100 г; бактерии – 453,31 мг / 100 г), S (контроль – 307,43 мг / 100 г; бактерии – 453,31 мг / 100 г) и Р (контроль – 91,54 мг / 100 г; бактерии – 104,15 мг / 100 г), которые значительно отличались, согласно статистическому анализу данных. Дальнейший анализ показал, что накопление Са не зависело от действия бактерий и его концентрация была выше в контрольном варианте (104,42 мг / 100 г), чем при инокуляции (72,76 мг / 100 г).

Наряду с основными катионами и анионами интерес представляют аминокислоты, которые являются необходимыми для питания человека. Проведенный электрофоретический анализ показал, что применение бактериальной инокуляции растений способствовало увеличению синтеза большинства проанализированных аминокислот (рис. 2).

Отмечено, что содержание пролина, фенилаланина, валина, гистидина и лизина при инокуляции достоверно превышает значения контрольного варианта. Инокуляция растений привела к двукратному увеличению (116 %) содержания пролина в био-

массе пак-чой. Содержание фенилаланина в биомассе растений увеличилось на 41,8 %, валина – на 25,3 %, гистидина – на 24,9 %, лизина – на 21,9 % по сравнению с контролем. Стоит отметить, что инокуляция бактериями оказала обратное действие на накопление тирозина и метионина – их концентрации были несколько снижены относительно контрольной группы растений. Количественное содержание тирозина в контрольном варианте составило 25,87 мг / 100 г, при инокуляции бактериями – 20,20 мг / 100 г.

Общее содержание физико-химических показателей в надземной биомассе растений пак-чой значительно различались (таблица 3). При анализе содержания витаминов (аскорбиновой кислоты и холина) в биомассе пак-чой отмечено большее их накопление при инокуляции растений.

Концентрация аскорбиновой кислоты составила 47,25 мг / 100 г, холина – 17,48 мг / 100 г, что, согласно статистическим расчетам, достоверно превышает контроль. Показатель массовой доли золы выше в контрольном варианте (17,68 %) по отношению к растениям, инокулированным бактериями

(10,30 %). Применение бактериальной культуры не оказало существенного влияния на содержание клетчатки. Данный показатель в варианте с инокуляцией бактериями находился на уровне контроля.

С учетом того, что растения не только служат источниками полезных веществ, но и могут включать вещества, которые представляют опасность для организма человека, было проведено определение содержания нитратов (таблица 4) на соответствие требованиям ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции».

Количественный анализ содержания нитратов в биомассе растений пак-чой позволил установить, что инокуляция растений бактериями не влияет на накопление веществ, представляющих опасность для организма человека. В результате определения содержания нитратов выявлено, что предельно допустимая концентрация во всех образцах не превышала норму. Уровень нитратов в среднем составил 947,4 мг/кг.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

В результате оценки эффективности использования инокуляции *B. cereus* на увеличение накопле-

ния биологически активных веществ в биомассе растений пак-чой был определен технологический прием применения PGPR-бактерий. Однако достоверных различий по урожайности среди вариантов опыта не отмечалось. В среднем по опыту урожайность составила $1,7 \pm 02 \text{ кг/м}^2$.

Инокуляция *B. cereus* не повлияла на большинство морфобиологических показателей (сырая, сухая масса, длина и количество листьев), все значения находились на уровне контроля, за исключением площади листовой поверхности растений пак-чой, которая достоверно увеличилась до $284 \text{ см}^2/\text{растение}$ по сравнению с контрольным вариантом – $241,05 \text{ см}^2/\text{растение}$.

Применение инокуляции *B. cereus* весьма перспективно при выращивании растений пак-чой для повышения пищевой ценности растительной продукции в закрытых агроэкосистемах. Растения пак-чой, инокулированные бактериями, показали значительное увеличение концентрации минеральных элементов К, S и P.

Таблица 3

Физико-химические показатели растений пак-чой (n = 6)

Вариант	Аскорбиновая кислота (C), мг / 100 г	Холин (B ₄), мг / 100 г	Зола, %	Пищевые волокна, %
Контроль	35,13	11,32	17,68	10,83
Инокуляция бактериями	47,25	17,48	10,30	9,41
НСР _{0,05}	4,75	1,97	2,15	$F_{\phi} < F_{05}$

Table 3

Physico-chemical parameters of pak-choi plants (n = 6)

Option	Ascorbic acid (C), mg / 100 g	Choline (B ₄), mg / 100 g	Ash, %	Dietary fiber, %
Control	35.13	11.32	17.68	10.83
Bacterial inoculation	47.25	17.48	10.30	9.41
LSD _{0,05}	4.75	1.97	2.15	$F_f < F_{05}$

Таблица 4

Содержание нитратов в биомассе растений пак-чой (n = 6)

Вариант	Содержание нитратов в съедобной части, мг/кг	
	Исследуемые образцы	Требования ТР ТС 021/2011
Контроль	972,5	2000
Инокуляция бактериями	922,2	
НСР _{0,05}	55,2	

Table 4

Content of nitrates in the biomass of pak-choi plants (n = 6)

Option	Nitrates content in the edible part, mg/kg	
	Tested samples	Requirements of TR CU 021/2011
Control	972.5	2000
Bacterial inoculation	922.2	
LSD _{0,05}	55.2	

Взаимодействие растений и бактерий способствует увеличению накопления аминокислот и витаминов. Установлено, что содержание пролина, фенилаланина, валина, гистидина и лизина при инокуляции достоверно превышает значения контрольного варианта. В частности, содержание пролина в биомассе пак-чой увеличилось в 2 раза (116 %). По синтезу витаминов в биомассе пак-чой

проявлялась аналогичная тенденция. Концентрация аскорбиновой кислоты составила 47,25 мг / 100 г, холина – 17,48 мг / 100 г, что, согласно статистическим расчетам, достоверно превышает контроль.

Кроме того, инокуляция *B. cereus* значительно не повлияла на содержание нитратов, так как предельно допустимая концентрация во всех образцах не превышала норму

Библиографический список

1. Артемьева А. М., Синявина Н. Г., Панова Г. Г., Чесноков Ю. В. Биологические особенности капустных овощных культур вида *Brassica rapa* L. при выращивании в интенсивной светокультуре // Сельскохозяйственная биология. 2021. № 56. С. 103–120. DOI: 10.15389/agrobiology.2021.1.103rus.
2. Han W., Yang Z. Q., Huang L. D., Sun C. X., Yu X. J., Zhao M. F. Fuzzy comprehensive evaluation of the effects of relative air humidity on the morpho-physiological traits of Pakchoi (*Brassica chinensis* L.) under high temperature. // Scientia Horticulturae. 2019. No. 246. Pp. 971–978. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.11.079.
3. Кузьмина А. А. Биологические особенности и технология выращивания пак-чой // Овощеводство – от теории к практике: сборник статей по материалам IV Региональной научно-практической конференции молодых ученых. Краснодар, 2021. С. 44–48.
4. Гиш Р. А. Технология выращивания малораспространенных овощных культур семейства капустные // Научный журнал КубГАУ. 2022. № 176 (02). С. 57–76. DOI: 10.21515/1990-4665-176-005.
5. Pennisi G., Zulfiqar F., Gianquinto G. Sustainable use of resources in plant factories with artificial lighting (PFALs) // European Journal of Horticultural Science. 2020. No. 85. Pp. 297–309.
6. Priarone S., Romeo S., Di Piazza S., Rosatto S., Zotti M., Mariotti M., Roccotiello E. Effects of Bacterial and Fungal Inocula on Biomass, Ecophysiology, and Uptake of Metals of *Alyssoides utriculata* (L.) Medik. // Plants. 2023. No. 12. Article number 554. DOI:org/10.3390/plants12030554.
7. Riaz U., Murtaza G., Anum W., Samreen T., Sarfraz M., Nazir M. Z. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Biofertilizers and Biopesticides // Microbiota and Biofertilizers / K. R. Hakeem, G. H. Dar, M. A. Mehmood, R. A. Bhat (eds.). Springer, Cham., 2021. Pp. 181–196. DOI: 10.1007/978-3-030-48771-3_11.
8. Wu J., Shi Z., Zhu J., Cao, A., Fang W., Yan D., Wang Q., Li Y. Taxonomic response of bacterial and fungal populations to biofertilizers applied to soil or substrate in greenhouse-grown cucumber // Scientific Reports. 2022. No. 12. Article number 18522. DOI: 10.1038/s41598-022-22673-4.
9. Nishu S. D., No J. H., Lee T. K. Transcriptional Response and Plant Growth Promoting Activity of *Pseudomonas fluorescens* DR397 under Drought Stress Conditions // Microbiology Spectrum. 2022. Vol. 10. Article number e00979-22. DOI: 10.1128/spectrum.00979-22.
10. Ozimek E., Hanaka A. Mortierella Specie sas the Plant-Growth-Promoting Fungi Present in the Agricultural Soils // Agriculture. 2021. No. 11 (1). Article number 7. DOI: 10.3390/agriculture11010007.
11. Tsegaye Z., Alemu T., Desta F.A., Assefa F. Plant growth-promoting rhizobacterial inoculation to improve growth, yield, and grain nutrient uptake of teff varieties // Frontiers in Microbiology. 2022. No. 13. Article number 896770. DOI: 10.3389/fmicb.2022.896770.
12. Helaly A. A., Hassan S. M., Craker L. E., Mady E. Effects of growth-promoting bacteria on growth, yield and nutritional value of collard plants // Annals of Agricultural Sciences. 2020. Vol. 65. No. 1. Pp. 77–82. DOI: 10.1016/j.aos.2020.01.001.
13. Князева И. В., Вершинина О. В., Титенков А. В., Джос Е. А. *Bacillus cereus* усиливает процесс биосинтеза органических кислот в плодах томатов // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». 2022. Т. 14. № 4. С. 333–337. DOI: 10.24855/biosfera.v14i4.696
14. Khalid M., Hassani D., Bilal M., Liao J., Huang D. Elevation of secondary metabolites synthesis in *Brassica campestris* ssp. *chinensis* L. via exogenous inoculation of *Piriformospora indica* with appropriate fertilizer // PLoS ONE. 2017. No. 12 (5). Article number e0177185. DOI: 10.1371/journal.pone.0177185.
15. Kumari B., Mallick M. A., Solanki M. K., Solanki A. C., Hora A., Guo W. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): Modern Prospects for Sustainable Agriculture // In: Plant Health Under Biotic Stress / R. Ansari, I. Mahmood (eds.). Springer, Singapore. 2019. Pp. 109–127. DOI: 10.1007/978-981-13-6040-4_6.

Об авторах:

Инна Валерьевна Князева¹, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ORCID 0000-0002-1065-1814, AuthorID 803420; +7 965 116-57-17, knyazewa.inna@yandex.ru

Оксана Владимировна Вершинина¹, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, ORCID 0000-0001-9745-7805, AuthorID 1047285; +7 960 818-81-49, vershinina.oks@yandex.ru
 Андрей Владимирович Титенков¹, лаборант-исследователь, ORCID 0000-0002-4764-1978, AuthorID 1120861; +7 961 166-57-85, tiandr1996@yandex.ru

¹ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

Use of bacterial inoculation to improve vegetative growth and nutraceutical qualities of Chinese cabbage under regulated agroecosystem conditions

I. V. Knyazeva¹✉, O. V. Vershinina¹, A. V. Titenkov¹

¹ Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

✉ E-mail: knyazewa.inna@yandex.ru

Abstract. In recent years, plant inoculation with beneficial plant growth-promoting microorganisms PGPR bacteria in agriculture has been steadily increasing, and they are expected to partially replace chemical fertilizers, pesticides and other growth regulators in the future, providing an environmentally friendly solution for sustainable farming practices. Consequently, **the purpose** of this study was to investigate the bacterial inoculation of *Bacillus cereus* to improve the vegetative growth and nutraceutical qualities of Chinese cabbage pak-choi plants grown by hydroponics under regulated agroecosystem conditions. **Objects** of the study are the plants of Chinese cabbage pak-choy (*Brassica campestris* ssp. *cheninensis* L.). **Methods.** When conducting research, we measured biometric indicators, determined the indicators of crude, dry matter, dietary fiber and mass fraction of ash of pak-choy plants according to GOST. The contents of vitamins, cations, anions and amino acids in plant products were estimated by capillary electrophoresis using “Kapel’-205” device (Russia). The obtained results were processed statistically by means of analysis of variance. Scientific novelty. The efficiency of root inoculation of *Bacillus cereus* bacteria in the cultivation of pak-choy plants by hydroponics in closed agro-ecosystems has been determined. The dependence of the improvement of quality indicators in the biomass of bacterial inoculation of pak-choi plants has been established. **Results.** As a result of studies, it was found that the inoculation of *B. cereus* had a positive effect on the development of the assimilating apparatus of pak-choi plants. The formation of the main morpho-biometric parameters (crude, dry weight, shoot length and number of leaves) of plants was not significantly affected by bacterial inoculation. All obtained values were at the control level. Pak-choi plants inoculated with bacteria showed a significant increase in concentration of mineral elements (K, S and P), amino acids (proline, phenylalanine, valine, histidine and lysine) and vitamins (ascorbic acid and choline).

Keywords: *Brassica campestris* ssp. *Chinensis* L., pak-choi, vegetative growth, hydroponic, cations, anions, amino acids, indoor farming.

For citation: Knyazeva I. V., Vershinina O. V., Titenkov A. V. Ispol’zovanie bakterial’noy inokulyatsii dlya uluchsheniya vegetativnogo rosta i nutritsevticheskikh kachestv kitayskoy kapusty v usloviyakh reguliruemoy agroekosistemy [Effect of bacterial inoculation on biochemical parameters of Chinese cabbage under regulated agroecosystem conditions] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2023. No. 08 (237). Pp. 59–67. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-237-08-59-67. (In Russian.)

Date of paper submission: 10.03.2023, **date of review:** 20.04.2023, **date of acceptance:** 27.04.2023.

References

1. Artem’eva A. M., Sinyavina N. G., Panova G. G., Chesnokov Yu. V. Biologicheskie osobennosti kapustnykh ovoshchnykh kul’tur vida *Brassica rapa* L. pri vyrashchivanii v intensivnoy svetokul’ture [Biological features of cabbage vegetable crops of *Brassica rapa* L. species when growing in intensive light culture] // Agricultural Biology. 2021. No. 56. Pp. 103–120. DOI: 10.15389/agrobiology.2021.1.103rus. (In Russian.)
2. Han W., Yang Z. Q., Huang L. D., Sun C. X., Yu X. J., Zhao M. F. Fuzzy comprehensive evaluation of the effects of relative air humidity on the morpho-physiological traits of Pakchoi (*Brassica chinensis* L.) under high temperature. // Scientia Horticulturae. 2019. No. 246. Pp. 971–978. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.11.079.

3. Kuz'mina A. A. Biologicheskie osobennosti i tekhnologiya vyrashchivaniya pak-choy [Biological features and technology of pak-choi growing] // Ovoshchevodstvo – ot teorii k praktike: sbornik statey po materialam IV Regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh. Krasnodar, 2021. Pp. 44–48. (In Russian.)
4. Gish R. A. Tekhnologiya vyrashchivaniya malorasprostranennykh ovoshchnykh kul'tur semeystva kapustnye [Technology of growing low-spreading vegetable crops of cabbage family] // Scientific Journal of KubGAU. 2022. No. 176 (02). DOI: 10.21515/1990-4665-176-005. (In Russian.)
5. Pennisi G., Zulfiqar F., Gianquinto G. Sustainable use of resources in plant factories with artificial lighting (PFALs) // European Journal of Horticultural Science. 2020. No. 85. Pp. 297–309.
6. Priarone S., Romeo S., Di Piazza S., Rosatto S., Zotti M., Mariotti M., Roccotiello E. Effects of Bacterial and Fungal Inocula on Biomass, Ecophysiology, and Uptake of Metals of *Alyssoides utriculata* (L.) Medik. // Plants. 2023. No. 12. Article number 554. DOI:org/10.3390/plants12030554.
7. Riaz U., Murtaza G., Anum W., Samreen T., Sarfraz M., Nazir M. Z. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Biofertilizers and Biopesticides // Microbiota and Biofertilizers / K. R. Hakeem, G. H. Dar, M. A. Mehmood, R. A. Bhat (eds.). Springer, Cham., 2021. Pp. 181–196. DOI: 10.1007/978-3-030-48771-3_11.
8. Wu J., Shi Z., Zhu J., Cao, A., Fang W., Yan D., Wang Q., Li Y. Taxonomic response of bacterial and fungal populations to biofertilizers applied to soil or substrate in greenhouse-grown cucumber. // Scientific Reports. 2022. No. 12. Article number 18522. DOI: 10.1038/s41598-022-22673-4.
9. Nishu S. D., No J. H., Lee T. K. Transcriptional Response and Plant Growth Promoting Activity of *Pseudomonas fluorescens* DR397 under Drought Stress Conditions // Microbiology Spectrum. 2022. Vol. 10. Article number e00979-22. DOI: 10.1128/spectrum.00979-22.
10. Ozimek E., Hanaka A. Mortierella Specie sas the Plant-Growth-Promoting Fungi Present in the Agricultural Soils // Agriculture. 2021. No. 11 (1). Article number 7. DOI: 10.3390/agriculture11010007.
11. Tsegaye Z., Alemu T., Desta F.A., Assefa F. Plant growth-promoting rhizobacterial inoculation to improve growth, yield, and grain nutrient uptake of teff varieties // Frontiers in Microbiology. 2022. No. 13. Article number 896770. DOI: 10.3389/fmicb.2022.896770.
12. Helaly A. A., Hassan S. M., Craker L. E., Mady E. Effects of growth-promoting bacteria on growth, yield and nutritional value of collard plants // Annals of Agricultural Sciences. 2020. Vol. 65. No. 1. Pp. 77–82. DOI: 10.1016/j.aosas.2020.01.001.
13. Knyazeva I. V., Vershinina O. V., Titenkov A. V., Dzhos E. A. *Bacillus cereus* usilivaet protsess biosinteza organicheskikh kislot v plodakh tomatov [*Bacillus cereus* enhances biosynthesis of organic acids in tomato fruits] // Interdisciplinary scientific and applied journal "Biosphere". 2022. Vol. 14. No. 4. Pp. 333–337. DOI: 10.24855/biosfera.v14i4.696. (In Russian.)
14. Khalid M., Hassani D., Bilal M., Liao J., Huang D. Elevation of secondary metabolites synthesis in *Brassica campestris* ssp. *chinensis* L. via exogenous inoculation of *Piriformospora indica* with appropriate fertilizer // PLoS ONE. 2017. No. 12 (5). Article number e0177185. DOI: 10.1371/journal.pone.0177185.
15. Kumari B., Mallick M. A., Solanki M. K., Solanki A. C., Hora A., Guo W. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): Modern Prospects for Sustainable Agriculture // In: Plant Health Under Biotic Stress / R. Ansari, I. Mahmood (eds.). Springer, Singapore. 2019. Pp. 109–127. DOI: 10.1007/978-981-13-6040-4_6.

Authors' information:

Inna V. Knyazeva¹, candidate of biological sciences, senior researcher, ORCID 0000-0002-1065-1814, AuthorID 803420; +7 965 116-57-17, knyazewa.inna@yandex.ru

Oksana V. Vershinina¹, candidate of agricultural sciences, researcher, ORCID 0000-0001-9745-7805, AuthorID 1047285; +7 960 818-81-49, vershinina.oks@yandex.ru

Andrey V. Titenkov¹, laboratory researcher, ORCID 0000-0002-4764-1978, AuthorID 1120861; +7 961 166-57-85, tiandr1996@yandex.ru

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia