

Малева М.Г., Игнатова А.С., Соколов Н.А., Борисова Г.Г.

МИКРОЗЕЛЕНЬ *VIGNA RADIATA* С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЙОДА: ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PGP-РИЗОБАКТЕРИЙ И ВНЕКОРНЕВОГО ЙОДИРОВАНИЯ

M.G. Maleva, A.S. Ignatova, N.A. Sokolov, G.G. Borisova

IODINE-ENRICHED *VIGNA RADIATA* MICROGREENS: AN ENVIRONMENTALLY ORIENTED APPROACH USING PGP-RHIZOBACTERIA AND FOLIAR IODIZATION

Аннотация. Дефицит эссенциальных микроэлементов, в частности йода, представляет серьезную угрозу для здоровья населения. В связи с этим поиск эффективных методов биофортификации растительного сырья, включая использование стимулирующих рост растений (PGP) ризобактерий, является актуальной задачей. Цель исследования – сравнить PGP-активность трех штаммов *Pseudomonas* sp. (CTF2, CTF7, STF13), а также их влияние на параметры роста, содержание фотосинтетических пигментов и накопление йода в микрозелени *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek (маш) в сочетании с внекорневой обработкой растворами йодида и йодата калия. Штаммы были выделены из ризосферы *Tussilago farfara* на техногенно нарушенных территориях. Вегетационный эксперимент проводили в гидропонной системе с инокуляцией семян и последующей обработкой растений йодом. Обнаружено, что самой высокой способностью к синтезу индолил-3-уксусной кислоты и активностью 1-аминоциклопропан-1-карбонат-дезаминазы обладал штамм STF13. Инокуляция семян этим штаммом приводила к наибольшему увеличению сырой и сухой биомассы 14-суточных проростков, а также индекса их силы роста. Все изученные штаммы повышали содержание хлорофиллов и каротиноидов в среднем на 19% по сравнению с контролем. Внекорневая обработка йодом значительно увеличивала содержание фотосинтетических пигментов (в среднем на 23%) и способствовала накоплению йода в микрозелени: при использовании KI содержание элемента возрастало в 14,3 раза, KIO₃ – в 8,8 раз. Таким образом, сочетание инокуляции семян *V. radiata* перспективными штаммами *Pseudomonas* sp. (особенно STF13 и CTF2) с внекорневой подкормкой йодом повышает биологическую

Abstract. The deficiency of essential micronutrients, particularly iodine, poses a serious threat to public health. In this regard, the search for effective methods of biofortification of plant materials, including the use of plant growth-promoting (PGP) rhizobacteria, is a relevant task. The aim of this study was to evaluate the PGP-activity of three *Pseudomonas* sp. strains (CTF2, CTF7, STF13), as well as their effect on growth parameters, photosynthetic pigment content, and iodine accumulation in *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek (mung bean) microgreens in combination with foliar treatment with potassium iodide and potassium iodate solutions. The strains were isolated from the rhizosphere of *Tussilago farfara* growing in technogenically disturbed areas. A vegetation experiment was conducted using a hydroponic system with seed inoculation followed by iodine treatment of the plants. It was found that strain STF13 exhibited the highest ability to synthesize indole-3-acetic acid and the highest 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase activity. Inoculation of seeds with this strain led to the greatest increases in fresh and dry biomass of 14-day-old seedlings, as well as in their growth vigor index. All studied strains increased the content of chlorophylls and carotenoids by an average of 19% compared to the control. Foliar treatment with iodine significantly increased the content of photosynthetic pigments (by 23% on average) and promoted the accumulation of iodine in microgreens: when using KI, the content of the element increased by 14.3 times, KIO₃ – by 8.8 times. Thus, the combination of inoculating *V. radiata* seeds with promising *Pseudomonas* sp. strains (especially STF13 and CTF2) together with foliar iodine application increases the

ценность микрозелени, что подтверждает эффективность данного подхода.

Ключевые слова: маш, биофортификация, ростстимулирующие ризобактерии, ростовые параметры, фотосинтетические пигменты, йодид и йодат калия, накопление йода.

Сведения об авторах: *Малева Мария Георгиевна*, ORCID: 0000-0003-1686-6071, канд. биол. наук, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, maria.maleva@mail.ru; *Игнатова Алена Сергеевна*, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, ignatovaa1452@gmail.com; *Соколов Никита Александрович*, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, levi2005@yandex.ru; *Борисова Галина Григорьевна*, ORCID: 0000-0001-6663-9948, д-р. географ. наук, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, G.G.Borisova@urfu.ru.

biological value of microgreens, confirming the effectiveness of this approach.

Keywords: mung bean, biofortification, plant growth-promoting rhizobacteria, growth parameters, photosynthetic pigments, potassium iodide and potassium iodate, iodine accumulation

About the authors: *Maria G. Maleva*, ORCID: 0000-0003-1686-607, Candidate of Biological Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, maria.maleva@mail.ru; *Alena S. Ignatova*, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, ignatovaa1452@gmail.com; *Nikita A. Sokolov*, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, levi2005@yandex.ru; *Galina G. Borisova*, ORCID: 0000-0001-6663-9948, Doctor of Geographical Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, G.G.Borisova@urfu.ru.

Малева М.Г., Игнатова А.С., Соколов Н.А., Борисова Г.Г. Микрозелень *Vigna radiata* с повышенным содержанием йода: экологически ориентированный подход с использованием PGP-ризобактерий и внекорневого йодирования // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2026. № 2(74). С. 71-83. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/26-2/07>

Maleva, M.G., Ignatova, A.S., Sokolov, N.A., & Borisova, G.G. (2026). Iodine-Enriched *Vigna Radiata* Microgreens: an Environmentally Oriented Approach Using PGP-Rhizobacteria and Foliar Iodization. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2(74), 71-83. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/26-2/07>

Введение

Проблема дефицита эссенциальных элементов и биологически активных веществ в рационе питания населения является актуальной как для России, так и для зарубежных стран [1; 2; 4; 5; 9]. В настоящее время йод (I) относится к наиболее важным микроэлементам, необходимым для правильного функционирования органов человека и животных [7; 12; 18]. Основная роль йода заключается в участии в биосинтезе гормонов щитовидной железы – тироксина и трийодтиронина, которые регулируют многочисленные физиологические и биохимические процессы [2; 7; 13]. Поэтому его дефицит в продуктах питания представляет серьезную угрозу для здоровья населения во всем мире [9; 14].

Одним из наиболее перспективных подходов к обеспечению сбалансированного и экологически безопасного питания населения является биофортификация, или обогащение растительного сырья и продуктов растениеводства, включая микрозелень [4; 10; 11; 13]. Эксперименты по обогащению различных видов культурных растений микроэлементами путем внесения их в почву или внекорневого опрыскивания проводились многими

авторами [2; 5; 11-14; 18-21]. Результаты этих исследований свидетельствуют о значительном потенциале отдельных видов микрорзелени в борьбе со скрытым голодом в качестве эффективного и экологически безопасного пищевого ресурса.

В последние годы значительный интерес вызывает биообогащение культурных растений и микрорзелени макро- и микроэлементами с использованием PGPR (от англ. “Plant Growth Promoting Rhizobacteria” – ризобактерии, стимулирующие рост растений) [1; 18]. Применение PGPR для биофортификации почв и растений является перспективным благодаря таким свойствам бактерий, как производство фитогормонов и сидерофоров, азотфиксация, солюбилизация соединений фосфора, калия, цинка и других элементов, которые в нерастворимой форме недоступны растениям [1; 8]. Кроме того, многие авторы отмечают, что инокуляция PGPR стимулирует в растениях синтез низкомолекулярных антиоксидантов и витаминов [1; 8; 18]. Тем не менее, биофортификация с использованием PGPR до сих пор не получила широкого применения.

В настоящее время во многих странах мира все более популярным становится выращивание *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek (маш) для пищевых целей. Микрорзелень *V. radiata* привлекает потребителя легкостью получения, вкусовыми достоинствами, широким спектром применения, физиологическим влиянием на организм [6; 11]. Несмотря на растущий интерес к этой культуре, вопросы сочетанного применения PGPR и йодирования остаются вне поля зрения исследователей. Восполняя этот пробел, настоящая работа впервые оценивает возможность улучшения роста и биообогащения микрорзелени *V. radiata* с использованием PGPR в сочетании с внекорневой подкормкой раствором йода.

Таким образом, цель исследования – оценить PGP-свойства трех штаммов ризобактерий (*Pseudomonas* sp.), а также их влияние на параметры роста, содержание фотосинтетических пигментов и накопление йода в микрорзелени *V. radiata* после внекорневой обработки растворами йодида и йодата калия.

Материалы и методы

Три штамма *Pseudomonas* sp. (CTF2, CTF7 и STF13), отобранные для эксперимента, были выделены в 2023 г. из ризосферы *Tussilago farfara* L. (мать-и-мачеха обыкновенная) сем. Asteraceae, произрастающей на двух техногенно нарушенных участках: CTF2 и CTF7 – вблизи Карабашского медеплавильного предприятия (Челябинская область); STF13 – вблизи рудника «Сафьяновская медь» (Свердловская область). Молекулярно-генетическая идентификация полученных штаммов была проведена с использованием секвенирования генома 16S рНК [18; 19]. Поиск последовательностей гена у отобранных штаммов проводили в базе данных National Center for Biotechnology Information (NCBI), биоинформационный анализ проводили с помощью пакета программ MEGA11.

Отобранные штаммы были протестированы на способность к синтезу индолил-3-уксусной кислоты (ИУК), продукции сидерофоров и аммиака, а также на активность фермента 1-аминоциклопропан-1-карбонат (АЦК)-дезаминазы и устойчивость к разным концентрациям (от 0 до 0,1%) йодида (KI) и йодата калия (KIO₃), как было описано ранее

[16; 18]. Способность к образованию ИУК оценивали спектрофотометрически при длине волны 530 нм после реакции изолятов с реагентом Сальковского [18]. Способность к продукции сидерофоров оценивали с использованием хромазуrol-S (Fe-CAS) агара, а аммиака – по изменению окраски после инкубации культур с реактивом Несслера [16]. Активность АЦК-деаминазы определяли спектрофотометрически при длине волны 540 нм после их выращивания в тритиказно-соевом бульоне до достижения стационарной фазы [16]. Для оценки устойчивости изолятов к йоду их подвергали действию возрастающих концентраций (0; 0,001%; 0,01%; и 0,1%) йодида (KI) и йодата (KIO₃) калия на чашках Петри с Луриа–Бертани (LB) агаром [18]. Измерения проводили в трех независимых повторностях.

Вегетационный эксперимент включал контрольный вариант (неинокулированные растения, НР) и три опытных, с инокуляцией семян *V. radiata* штаммами STF2, STF7 и STF13. Влияние селективных штаммов на прорастание семян оценивали на чашках Петри. Зрелые семена, сходные по размеру и форме, стерилизовали 70%-м этанолом в течение 30 с, затем 2 мин – 4%-м гипохлоритом натрия и несколько раз промывали стерильной дистиллированной водой. Семена оставляли в воде на ночь до набухания, и часть из них инокулировали в течение 2 часов отдельными штаммами (10⁸ КОЕ/мл), предварительно выращенными на среде LB. В контрольном варианте использовали только стерильную среду LB. В каждую чашку Петри помещали по 30 семян (по 10 чашек на вариант) и ежедневно фиксировали прорастание семян до полных всходов (5 суток). После этого здоровые проростки переносили в пластиковые проращиватели («Домашний АэроСАД», ООО «СмартГидроКомпания», Россия) с гидропонным питательным раствором [18]. Каждая повторность составляла 3 независимых проращивателя, включающих по 60 проростков. Микрозелень выращивали при следующих условиях: плотность фотосинтетического потока фотонов 180 ± 20 мкмоль/(м² с), обеспечиваемая фитолампами (ULI-P10-18W/SPFR IP40); день/ночь режим 14/10 ч при температуре 23 ± 3 °С. На 7-е сутки от замачивания семян проростки опрыскивали 0,01% раствором KI (I₁) или KIO₃ (I₂) или просто стерильной водой без йода (0). Общее время экспозиции – 14 суток.

Всхожесть семян (%) определяли как отношение количества семян, проросших за 5 суток, к их общему количеству × 100. Средневзвешенное время прорастания семян (сутки) рассчитывали как отношение суммы произведений количества семян, проросших на день учета, на номер дня, к общему количеству проросших семян [15]. Сырую и сухую биомассу, индекс силы роста, а также содержание фотосинтетических пигментов оценивали у 14-суточных растений *V. radiata*. Индекс силы роста (vigor index II [15]) рассчитывали как произведение процента всхожести (%) на среднюю сухую биомассу одного проростка (г).

Фотосинтетические пигменты экстрагировали из свежих листьев (30 мг) в 80% растворе ацетона. Содержание хлорофиллов *a*, *b* (Хл *a*, Хл *b*) и каротиноидов определяли спектрофотометрически («APEL» PD-303UV, Япония) при 470, 647 и 663 нм и

рассчитывали согласно Lichtenthaler [17]. Содержание йода в сухой надземной биомассе семян определяли по ГОСТ 28458-90 [3] и выражали в мкг/г сухого веса.

Полученные данные были проанализированы с использованием MS-Excel 16.0 и Statistica 13.0. В таблицах и на рисунках представлены средние арифметических значения и их стандартные ошибки. Для определения отдельного и совместного влияния двух факторов (инокуляции бактериальными штаммами и опрыскивания йодом) был проведен однофакторный и двухфакторный дисперсионный анализ ANOVA. Значимость различий между вариантами оценивали с помощью критерия Тьюки при $p < 0,05$. Разными латинскими буквами обозначены достоверные различия между вариантами.

Результаты и их обсуждение

Все изученные штаммы *Pseudomonas* sp. были способны продуцировать ИУК, однако наиболее высокий уровень синтеза отмечен у STF13 (табл. 1). Наиболее высокая активность АЦК-дезаминазы наблюдалась у штаммов STF13 и STF2, в то время как у штамма STF7 она была в 7 раз ниже. Все изоляты проявляли способность к продукции сидерофоров, тогда как способность к образованию аммиака была отмечена только у STF13. Тестирование штаммов на устойчивость к соединениям йода показало высокий уровень их йодотолерантности (табл. 1).

Таблица 1

Результаты тестирования отобранных штаммов рода *Pseudomonas* sp. на некоторые PGP-свойства и устойчивость к соединениям йода

Штамм	Синтез ИУК, мг/л	Активность АЦК-дезаминазы, нМ/мг белка час	Продукция сидерофоров	Продукция NH ₃	Устойчивость к KI и KIO ₃
STF2	12,98 ± 0,07 ^{ab}	88,42 ± 3,47 ^a	+	–	высокая
STF7	12,20 ± 0,51 ^b	12,62 ± 0,88 ^b	+	–	высокая
STF13	14,25 ± 0,25 ^a	89,81 ± 3,33 ^a	+	+	высокая

Всхожесть семян является одной из важнейших характеристик культурных растений [18]. Через 5 суток экспозиции всхожесть семян *V. radiata* в контрольном варианте составляла 87%. Инокуляция семян всеми отобранными штаммами PGPR снижала всхожесть семян в среднем на 4%, по сравнению с контролем (рис. 1А). Средневзвешенное время прорастания у неинокулированных семян и инокулированных штаммами STF7 и STF13 практически не отличалось и в среднем составляло 2,5 суток (рис. 1Б). Быстрее всего прорастали семена при заражении штаммом STF2 (2,2 суток).

Сырая биомасса двухнедельных семян *V. radiata*, инокулированных разными штаммами *Pseudomonas* sp. (STF2, STF7, STF13) изменялась незначительно и не зависела от обработки йодом (рис. 1В). Наибольшая ее величина была отмечена при использовании штамма STF13 (в среднем на 13% выше НР и на 22% выше, чем при инокуляции STF7). Результаты двухфакторного ANOVA подтвердили высокую значимость бактериальной инокуляции на накопление сырой биомассы ($p < 0,001$), тогда как обработка обеими формами йода не приводила к достоверным изменениям (рис. 1В). Индекс силы роста, как

и сухая биомасса растений, были также максимальны у семян, инокулированных штаммом STF13, а минимальны – при инокуляции STF7 (рис. 1Г). Исследования, проведенные нами ранее [1], также показали, что инокуляция семян пшеницы увеличивала биомассу семян на 14% по сравнению с контролем. Согласно результатам ANOVA, фактор бактериальной инокуляции оказывал достоверное влияние на накопление сухой биомассы и, соответственно, на величину индекса силы роста, в то же время влияние опрыскивания йодом было статистически незначимым (рис. 1Г).

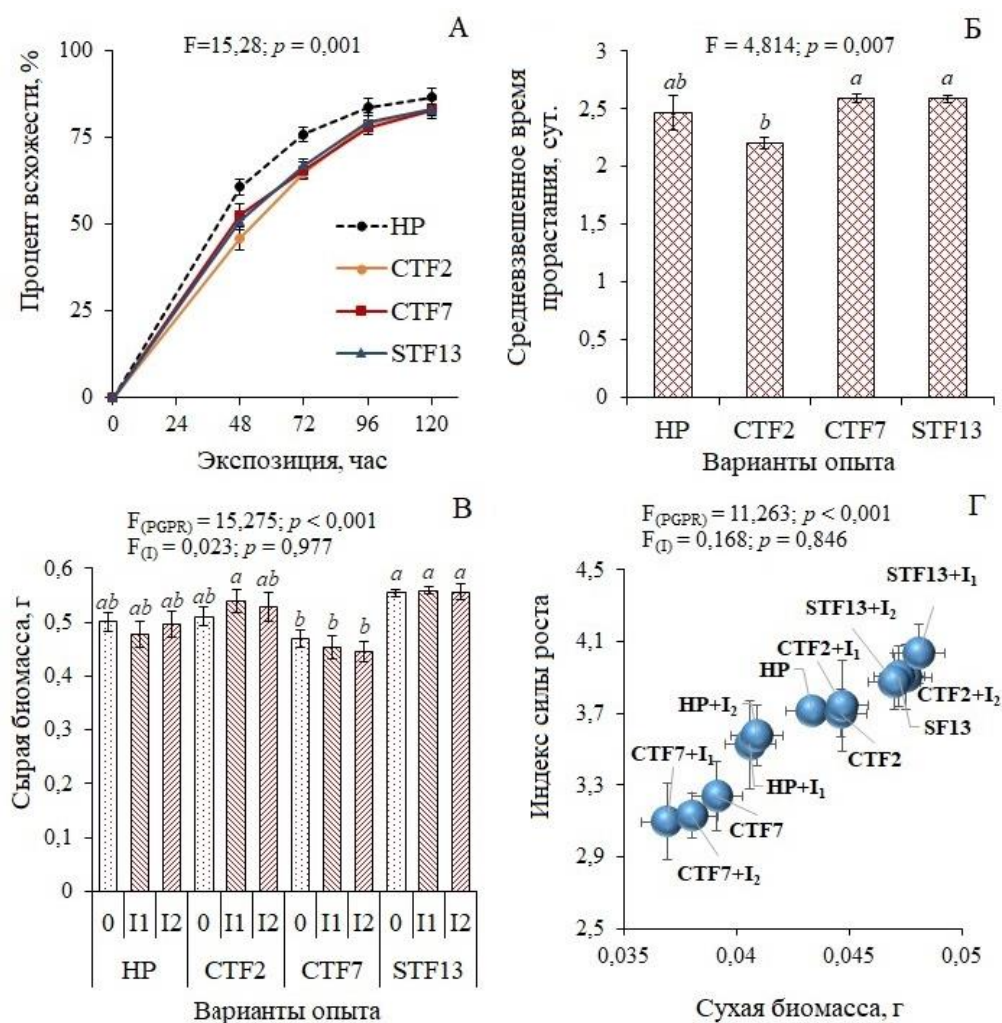


Рис. 1. Процент всхожести (А), средневзвешенное время прорастания (Б) семян; сырая биомасса (В), индекс силы роста и сухая биомасса (Г) 14-суточных растений *V. radiata*

Известно, что хлорофиллы и каротиноиды являются активными иммуномодуляторами в организме человека [4]. Кроме того, каротиноиды являются предшественниками витамина А и обладают антиоксидантными свойствами [18]. Инокуляция семян разными штаммами PGPR без внекорневой подкормки йодом приводила к увеличению содержания Хл а, Хл b и каротиноидов в среднем на 16, 21 и 19%, соответственно (рис. 2А, Б). Аналогичные результаты были получены нами ранее в

горшечном эксперименте на трехнедельной микрозелени гороха [19], где инокуляция штаммом STF2 приводила к существенному (в среднем на 24%) увеличению содержания фотосинтетических пигментов. Также было отмечено [19], что опрыскивание 0,01%-раствором йодида калия совместно с бактериальной инокуляцией вызывала значимый синергический эффект в отношении как хлорофиллов, так и каротиноидов.

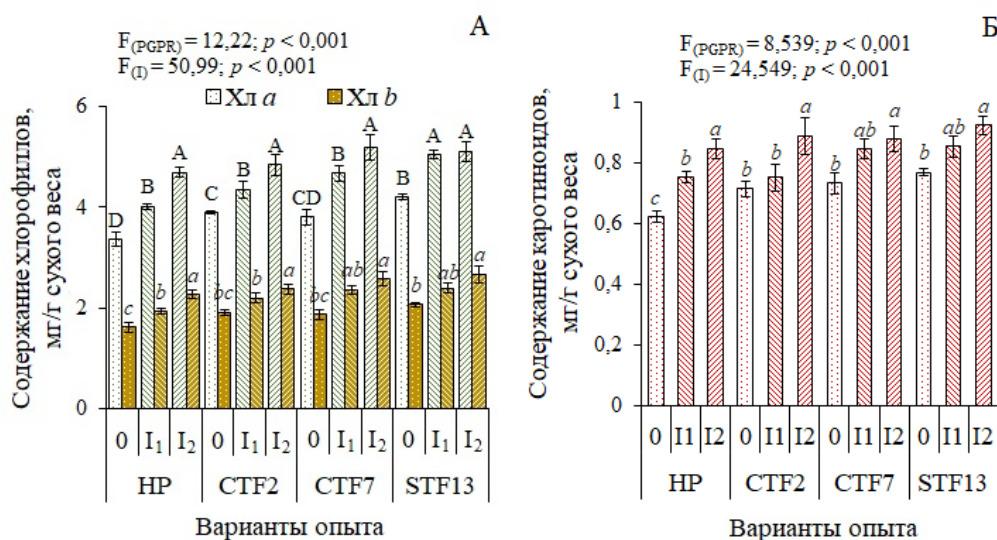


Рис. 2. Содержание хлорофиллов (А) и каротиноидов (Б) в листьях 14-суточных растений *V. radiata*

В нашем эксперименте на *V. radiata* обработка йодом (независимо от инокуляции) также приводила к увеличению содержания как Хл а, так и Хл b (в среднем на 25%), при этом КЮ3 проявлял более высокую эффективность по сравнению с КИ. Анализ изменения содержания каротиноидов выявил сходные тенденции: опрыскивание йодом стимулировало их накопление, увеличивая содержание в среднем на 19%. Как и в случае с хлорофиллами, наибольший эффект оказывал йодат калия (рис. 2Б). Эти результаты согласуются с имеющимися данными [14], свидетельствующими о том, что обработка йодом может стимулировать накопление фотосинтетических пигментов за счет активации антиоксидантных ферментов, защищающих их от окислительного стресса. Известно также [20], что йод способен модулировать экспрессию генов, ответственных за синтез пигментов, чем, по-видимому, объясняются полученные результаты. Проведенный двухфакторный дисперсионный анализ подтвердил достоверное влияние на содержание фотосинтетических пигментов в листьях двухнедельной микрозелени *V. radiata* как инокуляции семян штаммами *Pseudomonas* sp., так и внекорневой обработки йодом (рис. 2А, Б).

В вариантах без опрыскивания йодом его содержание в надземной биомассе *V. radiata* было низким (в среднем 1,4 мкг/г сухого веса), при этом статистически значимых различий между НР и инокулированными PGPR не зафиксировано (табл. 2). Обработка побегов КИ

существенно (в среднем в 14 раз) повышала содержание йода в микрозелени *V. radiata*, независимо от инокуляции. В работе Ciriello et al. [9] показано, что при использовании 8 мкМ KI содержание йода в микрозелени *Brassica rapa* L. увеличивалось в 2 раза, а у *Coriandrum sativum* L. и *Ocimum basilicum* L. – в 7 раз.

Таблица 2

Накопление йода в надземной биомассе 14-суточных растений *V. radiata*

Варианты опыта	Обработка йодом	Содержание йода, мкг/г сухого веса
Контроль (НР)	0	1,39 ± 0,16 ^c
	I ₁	18,39 ± 2,19 ^a
	I ₂	11,59 ± 1,24 ^b
<i>Pseudomonas</i> sp. STF2	0	1,42 ± 0,05 ^c
	I ₁	20,56 ± 1,21 ^a
	I ₂	13,68 ± 1,17 ^b
<i>Pseudomonas</i> sp. STF7	0	1,29 ± 0,05 ^c
	I ₁	19,87 ± 2,12 ^a
	I ₂	12,54 ± 1,45 ^b
<i>Pseudomonas</i> sp. STF13	0	1,38 ± 0,08 ^c
	I ₁	19,78 ± 1,65 ^a
	I ₂	10,67 ± 1,56 ^b

При опрыскивании KIO₃ содержание йода в побегах *V. radiata* также увеличивалось, однако значения оказались в среднем в 1,6 раза ниже, чем при использовании KI. В целом инокуляция семян PGPR не оказывала статистически значимого влияния на накопление йода в побегах *V. radiata*.

Повышенное накопление йода при обработке KI может быть обусловлено тем, что йодид-ион легче поглощается растительными клетками благодаря более высокой подвижности в растворе и способности проникать через мембраны [12]. Ранее также было отмечено [22], что содержание йода в листьях салата-латука, выращенного в гидропонной системе с использованием KI, было значительно выше по сравнению с KIO₃.

Заключение

Установлено, что штамм *Pseudomonas* sp. STF13, обладавший наивысшей ИУК-синтезирующей и АЦК-дезаминазной активностью, при инокуляции семян вызывал максимальное увеличение сырой и сухой биомассы 14-суточных проростков, а также индекса энергии. Тем не менее, все используемые штаммы повышали содержание хлорофиллов и каротиноидов (в среднем на 19%) по сравнению с неинокулированными растениями. Обработка листьев *V. radiata* йодом не оказывала существенного влияния на массу сеянцев, однако значимо увеличивала содержание фотосинтетических пигментов (в среднем на 23%). При опрыскивании растений растворами KI или KIO₃ содержание йода в микрозелени повышалось в 14,3 и 8,8 раз, соответственно, по сравнению с необработанным вариантом. Однако необходимы дальнейшие исследования, особенно в горшечных экспериментах, для подтверждения положительных эффектов, наблюдаемых при сочетании изученных штаммов с внекорневой подкормкой йодом.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания FEUZ-2024–0011.

Литература

1. Борисова Г.Г., Малева М.Г., Дарказанли М., Собенин А.В., Карпухин М.Ю. Влияние Zn-солубилизирующих PGP-ризобактерий на рост и содержание биогенных элементов в сеянцах пшеницы озимой в условиях микрокосма // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24(12). С. 1636-1647. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-12-1636-1647>
2. Голубкина Н.А., Кекина Е.Г., Надежкин С.М. Перспективы обогащения сельскохозяйственных растений йодом и селеном (обзор) // Микроэлементы в медицине. 2015. Т. 16(3). С. 12-19.
3. ГОСТ 28458-90. Растительные корма. Способ определения йода. Москва: Стандартинформ, 2006.
4. Елисеева Л.Г., Белкин Ю.Д., Сими́на Д.В., Осман А., Молодкина П.Г., Сантурян Т.А. Новые направления разработки обогащенных пищевых продуктов для здорового питания // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. Т. 4(118). С. 50-55. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.118.4.009>
5. Елисеева Л.Г., Сими́на Д.В., Сидоренко Ю.И., Токарев П.И., Сантурян Т.А. Разработка подходов биофортификации микрозелени при выращивании в фитотроне городского типа // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2024. Т. 86(4). С. 84-92. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2024-4-84-92>
6. Курьянович А.А., Кинчарова М.Н., Титова И.А. Выращивание проростков маша (*Vigna radiata* L.(R) Wilczek) для пищевых целей // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 4(56). С. 25-30. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2021-4-25-30>
7. Платонова Н.М. Йодный дефицит: современное состояние проблемы // Клиническая и экспериментальная тиреоидология. 2015. Т. 11(1). С. 12-21. <https://doi.org/10.14341/ket2015112-21>
8. Тимофеева А.М., Галямова М.Р., Седых С.Е. Биологическая активность почвенных бактерий, стимулирующих рост растений: фиксация азота, солубилизация фосфата, синтез сидерофоров. Перспективы разработки микробных консорциумов // Агрохимия. 2024. № 5. С. 85-95. <https://doi.org/10.31857/S0002188124050111>
9. Ciriello M., Formisano L., El-Nakhel C., Zarrelli A., Giordano M., De Pascale S., Kyriacou M., Roupheal Y. Iodine biofortification of four microgreens species and its implications for mineral composition and potential contribution to the recommended dietary intake of iodine // Scientia Horticulturae. 2023. Vol. 320. P. 112229. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112229>
10. Consentino B.B., Ciriello M., Sabatino L., Vultaggio L., Baldassano S., Vasto S., Roupheal Y., La Bella S., De Pascale S. Current acquaintance on agronomic biofortification to modulate the yield and functional value of vegetable crops: A review // Horticulturae. 2023. Vol. 9. P. 219. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020219>

11. Dhaliwal S.S., Sharma V., Shukla A., Kaur M., Kaur J., Verma V., Singh P., Barek V., Gaber A., Hossain A. Biofortification of mungbean (*Vigna radiata* L. (Wilczek)) with boron, zinc and iron alters its grain yield and nutrition // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. P. 3506. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30539-6>
12. Dobosy P., Nguyen H.T.P., Záray G., Strelci C., Ingerle D., Ziegler P., Radtke M., Buzanich A.G., Endrédi A., Fodor F. Effect of iodine species on biofortification of iodine in cabbage plants cultivated in hydroponic cultures // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14(1). P. 15794. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66575-z>
13. Golubkina N., Moldovan A., Kekina H., Kharchenko V., Sekara A., Vasileva V., Skrypnik L., Tallarita A., Caruso G. Joint biofortification of plants with selenium and iodine. New field of discoveries // *Plants*. 2021. Vol. 10. P. 1352. <https://doi.org/10.3390/plants10071352>
14. Kiferle C., Martinelli M., Salzano A.M., Gonzali S., Beltrami S., Salvadori P.A., Hora K., Holwerda H.T., Scalonì A., Perata P. Evidences for a nutritional role of iodine in plants // *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 12. P. 671–683. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.616868>
15. Khan S., Ullah A., Ullah S., Saleem M.H., Okla M.K., Al-Hashimi A., Chen Y., Ali S. Quantifying temperature and osmotic stress impact on seed germination rate and seedling growth of *Eruca sativa* Mill. via hydrothermal time model // *Life*. 2022. Vol. 12. P. 400. <https://doi.org/10.3390/life12030400>
16. Kumar A., Tripti, Voropaeva O., Maleva M., Panikovskaya K., Borisova G., Rajkumar M., Bruno L.B. Bioaugmentation with copper tolerant endophyte *Pseudomonas lurida* strain EOO26 for improved plant growth and copper phytoremediation by *Helianthus annuus* // *Chemosphere*. 2021. Vol. 266. P. 128983. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128983>
17. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic membranes // *Methods in Enzymology*. 1987. Vol. 148. P. 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
18. Maleva M., Borisova G., Tripti, Tugbaeva A., Ahamuefule C., Salata A., Kumar A. Biofortification of pea microgreens through zinc-solubilizing bacteria inoculation with foliar iodine application // *Agriculture and Forest*. 2024. Vol. 70(2). P. 123-134. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.70.2.9>
19. Maleva M., Borisova G., Tugbaeva A., Ilyin V., Kumar A. Synergy of new zinc solubilizing PGPR strain *Pseudomonas* sp. CTF2 with foliar iodine application enhances growth and biofortification of pea seedlings // *Microbiology*. 2024. Vol. 93(1). P. S82-S86. <https://doi.org/10.1134/S0026261724609333>
20. Medrano-Macías J., Leija-Martínez P., González-Morales S., Juárez-Maldonado A., Benavides-Mendoza A. Use of iodine to biofortify and promote growth and stress tolerance in crops // *Frontiers in Plant Science*. 2016. Vol. 7. P. 1146. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01146>
21. Şahin Ö. Combined iodine, iron and zinc biofortification of tomato fruit // *Journal of the Institute of Science and Technology*. 2020. Vol. 10(3). P. 2242-2251. <https://doi.org/10.21597/jist.691758>

22. Voogt W., Holwerda H.T., Khodabaks R. Biofortification of lettuce (*Lactuca sativa* L.) with iodine: the effect of iodine form and concentration in the nutrient solution on growth, development and iodine uptake of lettuce grown in water culture // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2010. Vol. 90(5). P. 906-913. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3902>

References

1. Borisova, G.G., Maleva, M.G., Darkazanli, M., Sobenin, A.V., & Karpuxin, M.Yu. (2004). Vliyanie Zn-solyubiliziruyushhix PGP-rizobakterij na rost i sodержanie biogenny`x e`lementov v seyanczax pshenicy ozimoy v usloviyax mikrokozma. *Agrarny`j vestnik Urala*, 24(12), 1636-1647. (in Russ.). <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-12-1636-1647>

2. Golubkina, N.A., Kekina, E.G., & Nadezhkin, S.M. (2015). Perspektivy` obogashheniya sel`skoxozyajstvenny`x rastenij jodom i selenom (obzor). *Mikroe`lementy` v medicine*, 16(3), 12-19. (in Russ.).

3. GOST 28458-90. Rastitel`ny`e korma, Sposob opredeleniya joda. Moskva: Standartinform, 2006. (in Russ.).

4. Eliseeva, L.G., Belkin, Yu.D., Simina, D.V., Osman, A., Molodkina, P.G., & Santuryan, T.A. (2022). Novy`e napravleniya razrabotki obogashhenny`x pishhevy`x produktov dlya zdorovogo pitaniya. *Mezhdunarodny`j nauchno-issledovatel`skij zhurnal*, 4(118), 50-55. (in Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.118.4.009>

5. Eliseeva, L.G., Simina, D.V., Sidorenko, Yu.I., Tokarev, P.I., & Santuryan, T.A. (2024). Razrabotka podxodov biofortifikacii mikrozeleni pri vy`rashhivanii v fitotrone gorodskogo tipa. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenerny`x texnologij*, 86(4), 84-92. (in Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2024-4-84-92>

6. Kur`yanovich, A.A., Kincharova, M.N., & Titova, I.A. (2021). Vy`rashhivanie prorostkov masha (*Vigna radiata* L.(R) Wilczek) dlya pishhevy`x celej. *Vestnik Ul`yanovskoj gosudarstvennoj sel`skoxozyajstvennoj akademii*, 4(56), 25-30. (in Russ.). <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2021-4-25-30>

7. Platonova, N.M. (2015). Jodny`j deficit: sovremennoe sostoyanie problemy` (2015). *Klinicheskaya i e`ksperimental`naya tireoidologiya*, 11(1), 12-21. (in Russ.). <https://doi.org/10.14341/ket2015112-21>

8. Timofeeva, A.M., Galyamova, M.R., & Sedy`x, S.E. (2024). Biologicheskaya aktivnost` pochvenny`x bakterij, stimuliruyushhix rost rastenij: fiksaciya azota, solyubilizaciya fosfata, sintez sideroforov. Perspektivy` razrabotki mikrobnny`x konsorciumov. *Agroximiya*, 5, 85-95. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0002188124050111>

9. Ciriello, M., Formisano, L., El-Nakhel, C., Zarrelli, A., Giordano, M., De Pascale, S., Kyriacou, M., & Roupheal, Y. (2023). Iodine biofortification of four microgreens species and its implications for mineral composition and potential contribution to the recommended dietary intake of iodine. *Scientia Horticulturae*, 320, 112229. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112229>

10. Consentino, B.B., Ciriello, M., Sabatino, L., Vultaggio, L., Baldassano, S., Vasto, S., Roupheal, Y., La Bella, S., & De Pascale, S. (2023). Current acquaintance on agronomic biofortification to modulate the yield and functional value of vegetable crops: A review. *Horticulturae*, 9, 219. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020219>
11. Dhaliwal, S.S., Sharma, V., Shukla, A., Kaur, M., Kaur, J., Verma, V., Singh, P., Berek, V., Gaber, A., & Hossain, A. (2023). Biofortification of mungbean (*Vigna radiata* L. (Wilczek)) with boron, zinc and iron alters its grain yield and nutrition. *Scientific Reports*, 13, 3506. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30539-6>
12. Dobosy, P., Nguyen, H.T.P., Záray, G., Strelci, C., Ingerle, D., Ziegler, P., Radtke, M., Buzanich, A.G., Endrédi, A., & Fodor, F. (2024). Effect of iodine species on biofortification of iodine in cabbage plants cultivated in hydroponic cultures. *Scientific Reports*, 14(1), 15794. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66575-z>
13. Golubkina, N., Moldovan, A., Kekina, H., Kharchenko, V., Sekara, A., Vasileva, V., Skrypnik, L., Tallarita, A., & Caruso, G. (2021). Joint biofortification of plants with selenium and iodine. New field of discoveries. *Plants*, 10, 1352. <https://doi.org/10.3390/plants10071352>
14. Kiferle, C., Martinelli, M., Salzano, A.M., Gonzali, S., Beltrami, S., Salvadori, P.A., Hora, K., Holwerda, H.T., Scaloni, A., & Perata, P. (2021). Evidences for a nutritional role of iodine in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 671-683. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.616868>
15. Khan, S., Ullah, A., Ullah, S., Saleem, M.H., Okla, M.K., Al-Hashimi, A., Chen, Y., & Ali, S. (2022) Quantifying temperature and osmotic stress impact on seed germination rate and seedling growth of *Eruca sativa* Mill. via hydrothermal time model. *Life*, 12, 400. <https://doi.org/10.3390/life12030400>
16. Kumar, A., Tripti, Voropaeva, O., Maleva, M., Panikovskaya, K., Borisova, G., Rajkumar, M., & Bruno, L.B. (2021). Bioaugmentation with copper tolerant endophyte *Pseudomonas lurida* strain EOO26 for improved plant growth and copper phytoremediation by *Helianthus annuus*. *Chemosphere*, 266, 128983. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128983>
17. Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic membranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
18. Maleva, M., Borisova, G., Tripti, Tugbaeva, A., Ahamuefule, C., Salata, A., & Kumar, A. (2024). Biofortification of pea microgreens through zinc-solubilizing bacteria inoculation with foliar iodine application. *Agriculture and Forest*, 70(2), 123-134. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.70.2.9>
19. Maleva, M., Borisova, G., Tugbaeva, A., Ilyin, V., & Kumar, A. (2024). Synergy of new zinc solubilizing PGPR strain *Pseudomonas* sp. CTF2 with foliar iodine application enhances growth and biofortification of pea seedlings. *Microbiology*, 93(1), S82-S86. <https://doi.org/10.1134/S0026261724609333>

20. Medrano-Macías, J., Leija-Martínez, P., González-Morales, S., Juárez-Maldonado, A., & Benavides-Mendoza, A. (2016). Use of iodine to biofortify and promote growth and stress tolerance in crops. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1146. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01146>

21. Şahin, Ö. (2020). Combined iodine, iron and zinc biofortification of tomato fruit. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(3), 2242-2251. <https://doi.org/10.21597/jist.691758>

22. Voogt, W., Holwerda, H.T., & Khodabaks, R. (2010). Biofortification of lettuce (*Lactuca sativa* L.) with iodine: the effect of iodine form and concentration in the nutrient solution on growth, development and iodine uptake of lettuce grown in water culture (2010). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(5), 906-913. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3902>

дата поступления: 01.04.2026

дата принятия: 03.06.2026

© Малева М.Г., Игнатова А.С., Соколов Н.А., Борисова Г.Г., 2026