

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АССОЦИАТИВНЫХ РИЗОБАКТЕРИЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ФИТОСАНИТАРНОГО СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР*

Л.Е. Колесников¹, кандидат биологических наук, А.А. Белимов², доктор биологических наук, Б.А. Хасан³, Ю.Р. Колесникова⁴, кандидат сельскохозяйственных наук, М.В. Киселев¹, кандидат сельскохозяйственных наук, Д.С. Минаков¹, аспирант

¹Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,
196601, Санкт-Петербург – Пушкин, Петербургское ш., 2
E-mail: kleon9@yandex.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии,
196608, Санкт-Петербург, ш. Подбельского, 3
E-mail: belimov@rambler.ru

³Ministry of Agriculture, Agricultural Research Office,
Abo-Ghraib, St. Al-Zaytun, H. 10081, Baghdad
E-mail: bashar_alamiry@yahoo.com

⁴Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР),
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42-44
E-mail: jusab@yandex.ru

Исследования проводили с целью определения влияния ассоциативных ризобактерий на развитие возбудителей болезней мягкой пшеницы и тритикале. Изучали варианты замачивания семян и двукратного опрыскивания растений жидкостью со штаммами *Bacillus subtilis* 124-11, *Sphingomonas* sp. K1B и *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 (титр 10^8 ... 10^9 кл/мл) и органоминеральной композицией Batr Gum. В контрольном варианте растения обрабатывали водой и Batr Gum. Наибольшей в опыте эффективностью в отношении желтой и бурой ржавчины пшеницы обладал штамм *Bacillus subtilis* 124-11, тритикале – *Sphingomonas* sp. K1B. Применение *Bacillus subtilis* 124-11 на сорте Ленинградская 6 снижало интенсивность развития желтой ржавчины на 12 %, числа пустул – на 47 %, длины полосы с пустулами – на 41 %, площади пустулы – на 39 %; развития бурой ржавчины – на 9 %, числа пустул – на 50 %, площади пустулы – на 40 %. Обработка сорта Диа штаммом *Sphingomonas* sp. K1B уменьшала пораженность растений бурой ржавчиной на 13 %, числа пустул – на 59 %, площади пустулы – на 52 %. Снижение интенсивности развития мучнистой росы на пшенице и числа пятен с налетом зарегистрировано при использовании штамма *Sphingomonas* sp. K1B на сорте Ленинградская 6 – на 12 %, Ажеба – 19 %, Тризо – 13 %, Сударыня – 3 %. При использовании ассоциативных ризобактерий на сорте пшеницы Сударыня, а также тритикале Аист Харьковский и Диа выявлено уменьшение гельминтоспориозной корневой гнили, которое было наибольшим (на 32 %) от штамма *Sphingomonas* sp. K1B. Совместное применение бактериальных штаммов с органоминеральным удобрением Batr Gum снижало развитие мучнистой росы и желтой ржавчины эффективнее, чем их раздельное использование.

THE OPTIMIZATION OF GRAIN CROPS' PHYTOSANITARY CONDITION WITH THE ASSOCIATIVE RHIZOBACTERIA APPLICATION

L.E. Kolesnikov¹*, A.A. Belimov², B.A. Hassan³, Yu.R. Kolesnikova⁴, M.V. Kiselev¹, D.S. Minakov¹

¹Saint-Petersburg State Agrarian University,
196601, Sankt-Peterburg-Pushkin, Peterburgskoe sh., 2
E-mail: kleon9@yandex.ru

²All-Russian Research Institute for Agricultural Microbiology,
196608, Sankt-Petersburg-Pushkin, sh. Podbelskogo, 3
E-mail: belimov@rambler.ru

³Ministry of Agriculture, Agricultural Research Office,
Abo-Ghraib, St. Al-Zaytun, H. 10081, Baghdad
E-mail: bashar_alamiry@yahoo.com

⁴Federal Research Center the Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR),
190000, Sankt-Peterburg, ul. Bol'shaya Morskaya, 42-44
E-mail: jusab@yandex.ru

The effectiveness of the associative rhizobacteria influence on the intensity of the soft wheat and triticale diseases' development was studied. According to the experimental scheme, seeds were soaked and plants were sprayed twice with a working fluid, containing rhizobacteria strains of *Bacillus subtilis* 124-11, *Sphingomonas* sp. K1B and *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 (titer 10^8 - 10^9 cfu/ml), and other variants with combined treatment with a liquid organomineral composition Batr Gum were used. In the control plants were treated with water and Batr Gum (by 10 ml/l of water). The biopreparations influence on the diseases development was investigated using generally accepted accounting scales and additional phytopathological indicators. The *Bacillus subtilis* strain 124-11, had the

*работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2021-1055 от «28» сентября 2021 г. о предоставлении гранта в форме субсидии из федерального бюджета на реализацию проекта: «Мобилизация генетических ресурсов микроорганизмов на базе Ведомственной коллекции полезных микроорганизмов сельскохозяйственного назначения (ВКСМ) при ФГБНУ ВНИИСХМ с использованием сетевого принципа организации» и в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР № 0481-2022-0001 «Структурирование и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве».

maximal effectiveness against yellow and brown rust of wheat, and *Sphingomonas* sp. K1B – against triticale rusts. In particular, the treatment of the local cultivar Leningradskaya 6 with *Bacillus subtilis* 124-11 led to a decrease in the development of yellow rust by 12 %, the pustules number by 47 %, the strip length by 41 %, the pustule area by 39 %; the brown rust development by 9 %, the pustules number by 50 %, the pustule area by 40 %. After the Dua, k-828 cultivar treatment with the *Sphingomonas* sp. K1B strain, a decrease in the plants affection by brown rust was observed by 13 %, the pustules number decreased by 59 %, the pustule area by 52 %. A significant decrease in the powdery mildew development on soft wheat and a decrease in the number of spots with plaque were recorded when using the *Sphingomonas* sp. K1B strain on cultivars: Leningradskaya 6 – by 12 % (79.4 %), Ajeeba – 19 % (72.5 %), Trizo – 13 % (87.2 %), Sudarynya – 3 % (60 %). On the soft wheat cultivar Sudarynya and triticale cultivars Aist Kharkovskiy and Dua, a decrease in helminthosporiotic root rot was revealed when using associative rhizobacteria; the maximal decrease in the disease development (by 32 %) was noted when using the strain *Sphingomonas* sp. K1B. When bacterial strains were used combined with the organomineral fertilizer Batr Gum, the development of powdery mildew and yellow rust was much slower than when they were used separately, while the greatest effectiveness against these diseases (by 31 % and 91 %) was revealed in the «Batr Gum + *Pseudomonas fluorescens* SPB2137» experimental variant.

Ключевые слова: пшеница мягкая (*Triticum aestivum* L.), тритикале (*Triticosecale* Wittm. ex A. Camus), стимулирующие рост ассоциативные ризобактерии (PGPR), болезни зерновых культур, фотосинтетические пигменты, продуктивность пшеницы.

Key words: soft wheat (*Triticum aestivum* L.), triticale (*Triticosecale* Wittm. ex A. Camus), growth-stimulating associative rhizobacteria (PGPR), diseases of grain crops, photosynthetic pigments, wheat productivity

В последние годы под влиянием антропогенного воздействия происходят необратимые изменения в структурно-функциональной организации агроэкосистем, наблюдается снижение биоразнообразия микроорганизмов и обеднение генофонда растений. Перестройка почвенной биоты приводит к уменьшению ее микробиологической активности и ухудшению плодородия почвы [1]. Фитосанитарная дестабилизация агроэкосистем, наблюдаемая в ряде регионов РФ, обуславливает необходимость разработки новых ресурсосберегающих агротехнологий возделывания сельскохозяйственных культур, направленных не только на повышение их продуктивности и улучшение качества урожая, но и на снижение развития и распространённости возбудителей болезней [2].

Одним из факторов, оказывающих существенное влияние на улучшение фитосанитарного состояния посевов зерновых культур, выступает использование полифункциональных биопрепаратов, составными элементами которых служат биологически активные вещества ростостимулирующего и защитного действия, а также живые культуры микроорганизмов [3, 4]. Ризосферные микроорганизмы способны формировать с корневой системой различного типа ассоциации и образовывать специфические бактериальные сообщества, способствующие улучшению адаптации растений к внешним воздействиям, а также повышающие их устойчивость к вредным организмам [5, 6].

Ризобактерии оказывают плеiotропное действие на растения, однако характер их влияния может варьировать в зависимости от абиотических и биотических факторов, а также от генотипа растения и биоценоза почвы [7, 8]. Основные механизмы положительного влияния ризобактерий на жизнедеятельность растений обусловлены прямой или непосредственной стимуляцией их роста посредством синтеза регуляторов роста, а также подавлением развития почвенных фитопатогенных микроорганизмов – микроскопических грибов и бактерий [9]. Ризобактерии могут повышать потенциал адаптации растений к абиотическим стрессам даже в случае произрастания на загрязненных тяжелыми металлами почвах, что позволяет использовать их в технологиях фиторемедиации почв [10].

Устойчивые и восприимчивые к болезням зерновые культуры различаются по видовому составу микроорганизмов, населяющих ризосферу [11]. Некоторые бактерии, широко используемые в биологической защите растений (*Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp., *Serratia* spp. и *Paenibacillus* spp.) могут индуцировать ферменты, связанные с проявлением устойчивости растений к болезням, включая хитиназу, фенилаланин-аммиачную лиазу,

пероксидазу, липоксигеназу и супероксиддисмутазу [12]. Кроме того, бактерии могут ингибировать развитие болезней, снижая содержание железа, необходимого для роста фитопатогенов [13].

В связи с изложенным, достаточно востребованы исследования по использованию ризобактерий в практике растениеводства и защиты растений, результаты которых закладывают основы для создания микробиологических препаратов, снижающих и оптимизирующих применение химических средств защиты растений и минеральных удобрений [5].

Цель исследований – определение эффективности штаммов ассоциативных ризобактерий в отношении интенсивности развития особоопасных болезней мягкой пшеницы и тритикале.

Методика. Работу выполняли в 2018, 2021 и 2022 гг. на полях научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» ФГБНУ «ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова» (ВИР). Лабораторные исследования выполнены в ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии» (ВНИИСХМ) и на кафедре защиты и карантин растений, в испытательной лаборатории экологического контроля объектов окружающей среды, в биохимической лаборатории ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО СПбГАУ).

Микрополевой опыт закладывали в четырехкратной повторности методом организованных повторений. Площадь учетной делянки для одного варианта составляла 1,0 м², варианты по делянкам в повторениях располагали систематически. Посев проводили рядовым способом с междурядьями 15 см и расстоянием в ряду 1...2 см при глубине заделки семян 5...6 см (300 зерен на 1 м²). Сразу после посева делянки укрывали Лутрасилом согласно общепринятым рекомендациям и методикам ВИР по проведению микрополевых экспериментов.

Использовали сорта яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) Ленинградская 6 (к-64900), Сударыня (к-66407), Тризо (к-64981), Ажеба (к-55721) и яровой тритикале (*Triticosecale* Wittm. ex A. Camus) Dua (к-828) и Аист Харьковский (к-2778). Объектом изучения были штаммы ассоциативных ризобактерий *Bacillus subtilis* 124-11, *Sphingomonas* sp. K1B и *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 из Водоственной коллекции полезных микроорганизмов сельскохозяйственного назначения при ФГБНУ ВНИИСХМ.

Схема опыта предусматривала замачивание семян и двукратное опрыскивание растений в фазы выхода

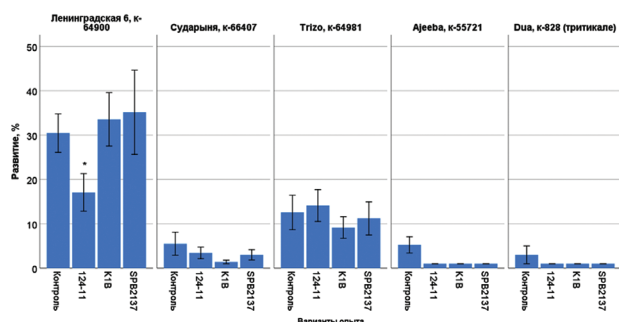


Рис. 1. Интенсивность развития желтой ржавчины на сортах мягкой пшеницы и тритикале (2022 г.) при применении штаммов ассоциативных ризобактерий (здесь и на рисунках со 2 по 10 указаны варианты опыта: контроль – вода, 124-11 – *B. subtilis* 124-11, K1B – *Sphingomonas* sp. K1B, SPB2137 – *Ps. fluorescens* SPB2137; вертикальные линии – стандартные ошибки для средних; * – достоверное изменение величины показателя, по сравнению с контролем, по t-критерию Стьюдента при $p < 0,05$).

в трубку и начала цветения. Норма расхода рабочей жидкости (10^8 кл/мл и 10^9 кл/мл соответственно) при замачивании семян – 2 мл суспензии на 10 г семян, при опрыскивании растений – 100 мл/м².

Кроме того, схема опыта включала варианты с использованием органоминерального удобрения Batr Gum. Доза применения 10 мл/л воды. При формировании полифункциональных комплексов к рабочему раствору Batr Gum добавляли чистые бактериальные культуры в пропорции 1:1, в частности, к 100 мл рабочего раствора Batr Gum – 100 мл культуральной жидкости согласно вариантам опыта: *B. Subtilis* 124-11 + Batr Gum, *Sphingomonas* sp. K1B + Batr Gum, *Ps. fluorescens* SPB2137 + Batr Gum. Расход рабочего раствора Batr Gum и полифункциональных комплексов: при замачивании семян – 2 мл на 10 г семян, при опрыскивании растений – 100 мл/м². Опрыскивание растений осуществляли в вечерние часы в фазы выхода в трубку и начала цветения.

Удобрение Batr Gum – жидкая органоминеральная композиция на основе гуминовых кислот, в состав которой входят микроэлементы и полигидроксикарбоновые кислоты (янтарная, лимонная, молочная, аскорбиновая).

Пораженность растений пшеницы и тритикале болезнями (бурая и желтая ржавчина, мучнистая роса, септориозно-пиренофорозная пятнистость) определяли, как по комплексу общепринятых параметров развития болезни, так и по дополнительным фитопатологическим показателям. Морфобиологические признаки и структуру урожайности растений изучали в фазы развития зародышевого побега (стадия 3-листьев), колошения-цветения и созревания по комплексу показателей, описанному ранее [14].

Содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов во флаговых листьях пшеницы определяли спектрофотометрическим методом [15] с использованием спектрофотометра SPEKOL-11 (Carl Zeiss Jena).

Алгоритм компьютерной обработки результатов исследования включал создание в системе MS Excel базы данных фитопатологических и фитометрических показателей зерновых культур согласно вариантам опыта, конвертирование их значений в кодировочную таблицу IBM SPSS с последующей статистической обработкой. С использованием методов описательной статистики по

вариантам опыта были определены средние значения фитопатологических и фитометрических показателей посевов, стандартные ошибки и 95 %-ные доверительные интервалы для средних. Кроме того, в работе использовали методы непараметрического корреляционного анализа на основе расчета коэффициентов ранговой корреляции Спирмена и факторного анализа.

Метеорологические условия вегетационных периодов 2018, 2021 и 2022 гг. сильно различались. Суммы температур в мае с даты посева зерновых культур (10 мая) в 2018 г. ($\Sigma T = 295,8$ °C) и 2021 г. ($\Sigma T = 289,1$ °C) были значительно выше, чем в 2021 г. ($\Sigma T = 120,4$ °C). В мае 2021 г. отмечена существенно большая сумма осадков ($O = 67,7$ мм), чем в 2018 г. ($O = 2,4$ мм) и 2021 г. ($O = 4,3$ мм).

Средняя температура в июне 2021 г. была выше нормы на 3,4 °C, а в июне 2018 и 2022 гг. – ниже соответственно на 1,2 и 0,3 °C. Согласно величинам гидро-термического коэффициента увлажнения Селянинова (ГТК) июль 2021 г. (ГТК=2,0) отличался большей влагообеспеченностью, по сравнению с 2018 г. (ГТК=1,0) и 2022 г. (ГТК=1,2). В августе 2021 и 2022 гг. метеосостояния не различались (ГТК=2,6 и 2,5), тогда как в 2018 г. величина ГТК была значительно ниже.

Результаты и обсуждение. В 2022 г. развитие возбудителя бурой ржавчины *Puccinia recondita* Rob. ex Desm. f. sp. *tritici* на пшенице и тритикале было незначительным, сильное развитие возбудителя желтой ржавчины *Puccinia striiformis* West. f. sp. *tritici* Erikss. et Henn., превышающее экономический порог вредоносности, отмечено только на сорте Ленинградская 6 ($R = 29,5 \pm 4,0$ %). На остальных сортах мягкой пшеницы и тритикале оно было незначительным (рис. 1). В варианте с обработкой сорта Ленинградская 6 штаммом *B. subtilis* 124-11, снижение интенсивности развития болезни составило 12 %. При этом число пустул возбудителя существенно уменьшилось на 47 % (с 844 шт./лист до 444 шт./лист). Несущественное снижение развития болезни при использовании *B. subtilis* 124-11 было выявлено на сортах мягкой пшеницы Сударыня (на 2 %), Ажеба (на 4 %) и сорте тритикале Дуа (на 2 %).

Во всех вариантах опыта с обработкой сорта Ленинградская 6 штаммами ассоциативных ризобактерий в 2022 г. отмечено существенное снижение длины полосы с пустулами желтой ржавчины, по сравнению с контролем: *B. subtilis* 124-11 – на 41 %, *Ps. fluorescens* SPB2137 – на 31 %, *Sphingomonas* sp. K1B – на 8 %. Статистически достоверное уменьшение величины этого показателя на 19 % было также зарегистрировано на сорте Ажеба в варианте с *Sphingomonas* sp. K1B.

Обработка растений сорта Ленинградская 6 штаммом *B. subtilis* 124-11 привела к снижению площади пустулы, по сравнению с контролем, на 39 % (с 0,038 мм² до 0,024

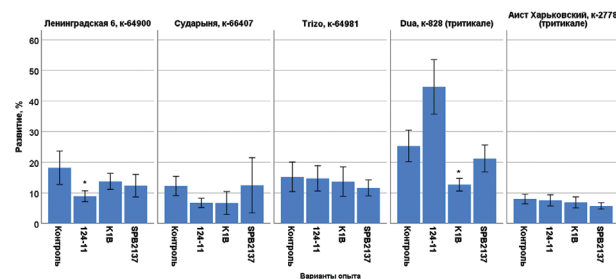


Рис. 2. Развитие бурой ржавчины на сортах мягкой пшеницы и тритикале при применении штаммов ассоциативных ризобактерий (2021 г.).

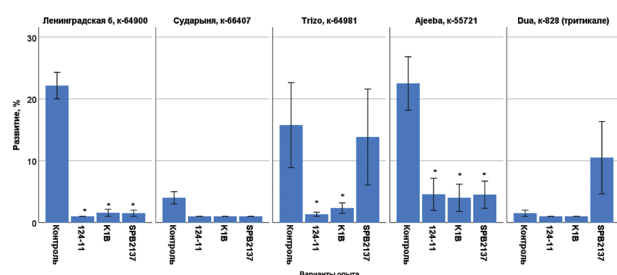


Рис. 3. Интенсивность развития мучнистой росы на сортах мягкой пшеницы и тритикале при применении штаммов ассоциативных ризобактерий (2022 г.).

мм²), штаммом *Sphingomonas* sp. K1B на сорте Сударыня – на 48 % (с 0,029 мм² до 0,015 мм²).

В 2021 г. наблюдали обратную картину, при отсутствии симптомов желтой ржавчины на сортах мягкой пшеницы и тритикале отмечали сильное развитие бурой ржавчины. Его статистически достоверное снижение на 9 % наблюдали на сорте мягкой пшеницы Ленинградская 6 при использовании штамма *B. subtilis* 124-11, а также на сорте тритикале Дуа в варианте с *Sphingomonas* sp. K1B – на 5 % (рис. 2).

При использовании *B. subtilis* 124-11 и *Sphingomonas* sp. K1B на указанных сортах мягкой пшеницы и тритикале число пустул микромицета уменьшилось на 50 и 58 %, а площадь пустул – на 40 и 52 % соответственно. Кроме того, зарегистрировано статистически достоверное снижение числа пустул бурой ржавчины при применении *B. subtilis* 124-11 на сорте Сударыня на 79 %.

В 2022 г. на сортах мягкой пшеницы Ленинградская 6, Trizo и Ажеба отмечено сильное развитие возбудителя мучнистой росы *Blumeria graminis* (DC.) Speer f. sp. *tritici* на уровне и больше экономического порога вредоносности (рис. 3). Статистически достоверное снижение развития болезни было зарегистрировано при использовании всех штаммов ассоциативных ризобактерий на сортах Ленинградская 6 и Ажеба: *B. subtilis* 124-11 – на 12,8 % и 18 %; *Sphingomonas* sp. K1B – на 12 % и 19 %; *Ps. fluorescens* SPB2137 – на 12 % и 18 %. На сорте Trizo развитие мучнистой росы было существенно меньше, чем в контроле, в вариантах с обработкой штаммами *B. subtilis* 124-11 и *Sphingomonas* sp. K1B – на 14 % и 13 % соответственно.

При использовании более объективного показателя – числа пятен с налетом мучнистой росы, на сорте Ленинградская 6 снижение поражаемости пшеницы микромицетом при обработке ассоциативными ризобактериями *Bacillus subtilis* 124-11 составило 76,0 %, *Sphingomonas*

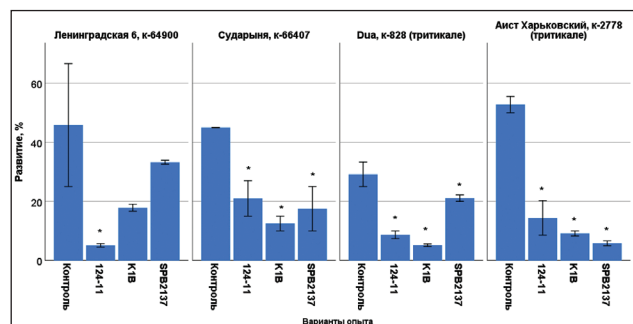


Рис. 4. Развитие корневой гнили мягкой пшеницы и тритикале при применении штаммов ассоциативных ризобактерий (2021 г.).

sp. K1B – 79,4 %, *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 – 84,8 %; на сорте Сударыня – соответственно 53,3; 60,0 и 66,7 %; на сорте Trizo при использовании *Bacillus subtilis* 124-11 – 89,1 %, *Sphingomonas* sp. K1B – 87,2 %; Ажеба в варианте с *Sphingomonas* sp. K1B – на 72,5 %.

При применении штамма *B. subtilis* 124-11 на сортах Ленинградская 6 и Ажеба отмечено уменьшение площади пятен с налетом мучнистой росы на 49 и 87 % соответственно. Кроме того, на сорте Ажеба существенное снижение величины этого показателя патогенеза зарегистрировано при применении *Sphingomonas* sp. K1B (на 72 %) и *Ps. fluorescens* SPB2137 (на 82 %).

В 2022 г. поражаемость пшеницы и тритикале корневой гнилью, вызываемой микроскопическим грибом *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.), была незначительной. В 2021 г. статистически достоверное снижение болезни во всех вариантах опыта с применением ассоциативных ризобактерий выявлено на сорте мягкой пшеницы Сударыня, а также сортах тритикале Аист Харьковский и

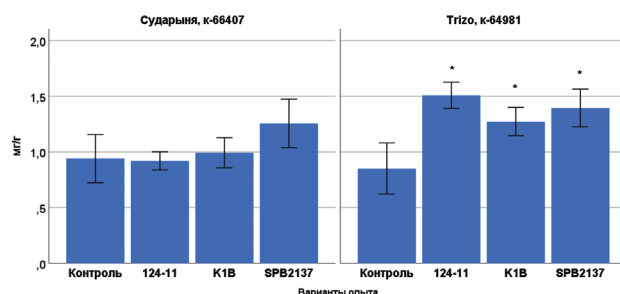


Рис. 5. Содержание хлорофилла а во флаговых листьях пшеницы (2018 г.).

Дуа (рис. 4). Симптомы поражения корневой гнилью на сорте Trizo не наблюдали. Кроме того, выявлено существенное (на 39 %) снижение развития болезни на сорте Ленинградская 6 при обработке посевов штаммом *B. subtilis* 124-11.

В 2018 г. штаммы бактерий не оказывали достоверного влияния на содержание хлорофилла а в листьях пшеницы сорта Сударыня, выявлена только тенденция повышения величины этого показателя, особенно в варианте с использованием *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 на 34 %. Содержание хлорофилла а во всех вариантах опыта на сорте Trizo существенно выросло (рис. 5).

В среднем по двум сортам наибольшее увеличение хлорофилла а на 49 % (t=2,5) зарегистрировано при применении штамма *Ps. fluorescens* SPB2137 (t=2,6), что

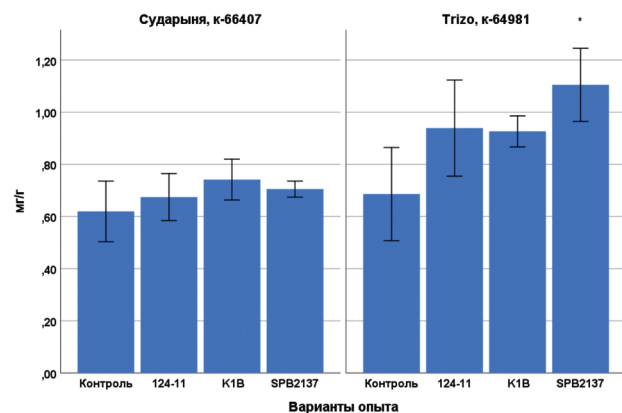


Рис. 6. Содержание хлорофилла b во флаговых листьях пшеницы (2018 г.).

Факторный анализ фитометрических показателей пшеницы (2018 г)

Показатель	Факторные нагрузки	
	F ₁	F ₂
Фаза онтогенеза согласно шкале Эукарпия (Цадокса), балл	0,47	0,18
Высота растения, см	0,45	-0,21
Число корней, шт.	-0,85	0,04
Длина корней, мм	-0,70	0,45
Число узловых корней, шт.	-0,24	0,49
Длина узловых корней, мм	-0,70	-0,41
Продуктивная кустистость, шт.	-0,53	-0,12
Общая кустистость, шт.	-0,74	0,46
Длина колоса, мм	-0,12	0,20
Число колосков в колосе, шт.	0,05	-0,15
Площадь флагового листа, см ²	0,31	-0,38
Площадь предфлагового листа, см ²	0,06	-0,49
Масса корней, г	-0,85	-0,08
Масса колоса, г	0,13	-0,57
Масса вегетативной части, г	-0,51	-0,57
Число колосков в колосе, шт.	0,07	-0,09
Число зерен в колосе, шт.	0,09	0,91
Масса зерен одного колоса, г	-0,31	0,41
Масса 1000 зерен, г	-0,41	-0,72
Потенциальная урожайность, г/растение	-0,53	0,24
Развитие корневой гнили, %	0,75	0,50
Развитие бурой ржавчины, %	0,06	0,98
Число пустул бурой ржавчины, шт.	0,04	0,98
Площадь пустулы бурой ржавчины, мм ²	0,16	0,87
Развитие септориозно-пиренофорозной пятнистости, %	0,35	-0,17
Хлорофилл <i>a</i> , мг/г	-0,54	0,20
Хлорофилл <i>b</i> , мг/г	-0,63	0,41
Хлорофилл <i>a</i> и <i>b</i> , мг/г	-0,61	0,29
Каротиноиды, мг/г	-0,73	0,32
Хлорофиллы <i>a</i> / <i>b</i> , ед.	0,08	-0,23
Хлорофиллы <i>a</i> и <i>b</i> / каротиноиды, ед.	0,49	0,02

обуславливало существенный рост при $p < 0,05$ числа (на 21 %) и длины узловых корней (на 14 %), длины колоса (на 10 %), числа колосков в колосе (на 8 %) и массы 1000 зерен (на 7 %).

Содержание хлорофилла *b* у разных сортов пшеницы и в различных вариантах опыта существенно не изменялось, за исключением варианта со штаммом *Ps. fluorescens* SPB2137 на сорте Trizo, в котором оно существенно выросло, по сравнению с контролем, на 61 %. Тенденция роста содержания хлорофилла *b*, по сравнению с контролем, отмечена у растений сорта Trizo при обработках *B. subtilis* 124-11 – на 37 %, *Sphingomonas* sp. K1B – на 35 % (рис. 6).

Существенно большим суммарным содержанием хлорофилла *a* и *b* во флаговых листьях пшеницы при использовании штаммов *B. subtilis* 124-11 и *Ps. fluorescens* SPB2137, по сравнению с контролем, отличался сорт Trizo. В среднем по сортам Сударыня и Trizo достоверный рост фотосинтетических пигментов на 44 % ($t=2,4$) зарегистрирован в варианте с использованием *Ps. fluorescens* SPB2137.

Наибольшее в опыте увеличение соотношения хлорофиллов (*a* и *b*) к каротиноидам, по сравнению с контролем, выявлено при обработке растений сортов

Сударыня и Trizo штаммом *Ps. fluorescens* SPB2137 – на 10 % и 7 % соответственно, что, по нашему мнению, может быть одним из показателей устойчивости сортов к внешним неблагоприятным факторам и экологической пластичности растений.

С использованием метода главных компонент факторного анализа и критерия вращения – варимакс были определены нормированные факторные нагрузки, характеризующие взаимосвязи между элементами продуктивности пшеницы, интенсивностью поражения растений болезнями и содержанием фотосинтетических пигментов в листьях пшеницы (см. табл.). По результатам расчетов выделены два фактора F₁ и F₂, которые объясняют соответственно 24 % и 21 % общей дисперсии переменных показателей.

В F₁ отмечены следующие тенденции. Возрастание содержания каротиноидов во флаговых листьях пшеницы ($P = -0,73$) приводило к снижению интенсивности развития корневой гнили пшеницы. Растения с повышенной концентрацией каротиноидов характеризовались большим числом ($P = -0,85$) и длиной корней ($P = -0,70$), длиной узловых корней ($P = -0,70$), массой корней ($P = -0,85$), а также отличались меньшим поражением корневой гнилью ($P = 0,75$).

В F₂ показано, что усиление интенсивности поражения пшеницы бурой ржавчиной (по развитию болезни – $P = 0,98$, по числу пустул – $P = 0,98$, по площади пустулы – $P = 0,87$) приводило к снижению массы 1000 зерен пшеницы ($P = -0,72$), при увеличении числа зерен в колосе ($P = 0,91$).

Кроме того, с использованием коэффициентов ранговой корреляции Спирмена установлено повышение интенсивности поражения растений корневой гнилью с увеличением соотношения суммы хлорофилла *a* и *b* к каротиноидам ($r = 0,67$; $P = 0,04$). Более интенсивное развитие на пшенице септориозно-пиренофорозной пятнистости, вызываемой микроскопическими грибами *Stagonospora nodorum* (Berk.) и *Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechsler., приводило к снижению содержания в листьях растений хлорофилла *b* ($r = -0,52$; $P = 0,03$).

Использование органоминерального удобрения Batr Gum и штамма *Ps. fluorescens* SPB2137 в 2022 г. не оказывало существенного влияния на интенсивность развития желтой ржавчины на растениях сорта Ленинградская 6, однако при их совместном применении развитие болезни статистически достоверно снизилось на 31 %, а число пустул – на 44 % (рис. 7). Тенденция повышения эффективности в отношении снижения раз-

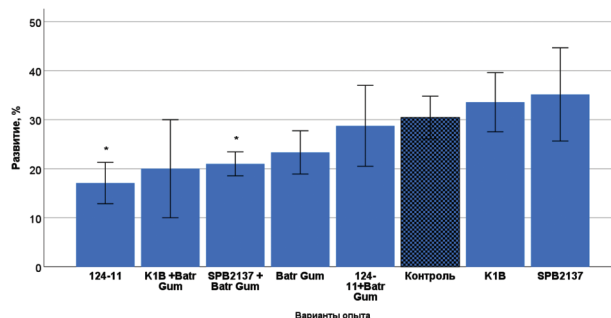


Рис. 7. Интенсивность развития желтой ржавчины пшеницы при применении штаммов ассоциативных ризобактерий, органоминерального удобрения Batr Gum и полифункциональных комплексов на сорте Ленинградская 6 (2022 г.).

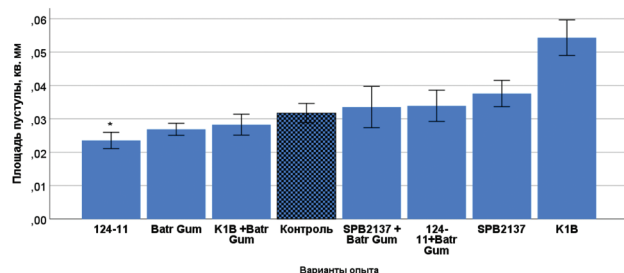


Рис. 8. Площадь пустулы желтой ржавчины при применении штаммов ассоциативных ризобактерий, органоминерального удобрения Batr Gum, полифункциональных комплексов на сорте Ленинградская 6 (2022 г.).

вития желтой ржавчины (на 34 %) выявлена в варианте опыта с совместным применением Batr Gum и штамма *Sphingomonas* sp. K1B, по сравнению с их раздельным использованием.

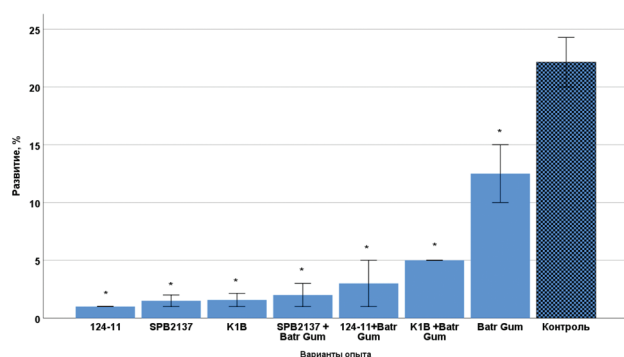


Рис. 9. Интенсивность развития мучнистой росы при применении штаммов ассоциативных ризобактерий, органоминерального удобрения Batr Gum, полифункциональных комплексов (2022 г.).

Максимальная в опыте площадь пустулы желтой ржавчины выявлена в варианте со штаммом *Sphingomonas* sp. K1B (рис. 8). Однако при его совместном использовании с органоминеральным удобрением Batr Gum выявлена тенденция к снижению величины этого показателя. Причем площадь пустулы в варианте с Batr Gum была статистически достоверно меньше, по сравнению с контролем, на 30 %.

Развитие мучнистой росы в варианте с органоминеральным удобрением Batr Gum было существенно меньше, чем в контроле. Его совместное применение со штаммами ассоциативных ризобактерий незначительно снижало эффективность микроорганизмов в отношении развития болезни (рис. 9). Аналогичная тенденция прослеживалась по площади пятен с налетом мучнистой росы, за исключением совместного применения штамма *Ps. fluorescens* SPB2137 и Batr Gum (рис. 10). В этом варианте величина фитопатологического показателя снизилась, по сравнению с контролем, на 78 %, что больше, чем при обработке раствором, содержащим микроорганизмы в чистом виде.

Таким образом, эффективность штаммов ассоциативных бактерий в отношении снижения вредоносности болезней зависела от вида и сорта зерновой культуры, типа патогенеза, формируемого развитием возбудителей болезней, а также использования совместного с ними органоминерального удобрения. Результаты работы подтверждают имеющиеся в литературе сведения, о

том, что максимальный эффект от применения бактериальных препаратов можно обеспечить на основе тщательного выявления тех штаммов, которые в большей степени соответствуют биологическим свойствам исследуемых видов и сортов растений [5, 16]. При этом адаптивный потенциал растений к факторам внешней среды во многом может определяться характером взаимодействия их корневой системы с комплексом микроорганизмов, видовой состав которых зависит от возделываемой культуры [17, 18]. Однако следует учитывать, что развитие растений во времени, в свою очередь, может сопровождаться изменениями состава корневых экссудатов и корневых ризодепозитов, что может влиять на численность микроорганизмов, в том числе ризосферных бактерий [5].

Наибольшей в опыте эффективностью в отношении желтой и бурой ржавчины на сортах мягкой пшеницы обладал штамм *B. subtilis* 124-11, тритикале – *Sphingomonas* sp. K1B. Выраженное снижение интенсивности развития мучнистой росы и корневой гнили на мягкой пшенице и тритикале наблюдали при использовании штамма *Sphingomonas* sp. K1B. Кроме того, этот штамм обладал наиболее выраженным защитным действием против развития корневой гнили и комплекса показателей развития бурой ржавчины. Содержание хлорофилла *a* в листьях пшеницы в варианте с *Sphingomonas* sp. K1B увеличилось на 30 %, по сравнению с контролем. Развитие корневой гнили пшеницы уменьшалось с возрастанием концентрации каротиноидов во флаговых листьях пшеницы и снижением соотношения – суммы хлорофилла *a* и *b* к каротиноидам. Эту тенденцию можно объяснить тем, что чем больше содержание каротиноидов в растении, тем больше в нем антиоксидантных веществ, способных ингибировать патогенез, обусловленный развитием корневой гнили. Более интенсивное развитие на растениях септориозно-пиренофорозной пятнистости приводило к снижению содержания в листьях хлорофилла *b*.

Имеющиеся в литературе данные свидетельствуют о том, что ассоциативные ризобактерии способны замедлять развитие фитопатогенных микромицетов, с одной стороны, вследствие повышения жизненного статуса растения, в том числе обусловленного увеличением поступления азота, фосфора, калия, с другой – благодаря выделению химических соединений, обладающих фунгицидной активностью, а также вытеснению патогенов посредством подавления их роста [5, 18].

Образование бактериями фитогормонов, витаминов и других биологически активных веществ относится к

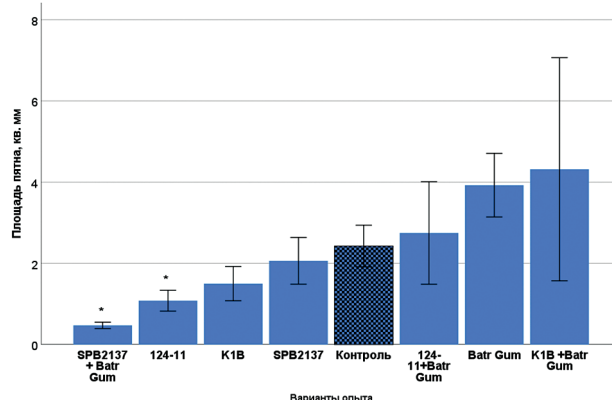


Рис. 10. Площадь пятен с налетом мучнистой росы при применении штаммов ассоциативных ризобактерий, органоминерального удобрения Batr Gum, полифункциональных комплексов (2022 г.).

важнейшим механизмам взаимодействия в растительно-бактериальных ассоциациях [19]. Наибольшей ростостимулирующей активностью обладал штамм *Pseudomonas fluorescens* SPB2137, использование которого определяло увеличение большинства элементов продуктивности пшеницы и существенно повышало содержание хлорофилла *a* и суммарного содержания хлорофилла *a* и *b* в листьях пшеницы – на 49 % и 44 %, по сравнению с контролем, соответственно. Эти процессы сопровождались увеличением числа и длины узловых корней, длины колоса, числа колосков в колосе, массы 1000 зерен растений. Использование штамма *Bacillus subtilis* 124-11 приводило к статистически достоверному росту содержания фотосинтетических пигментов только на сорте Trizo (на 77 % и 59 % соответственно) и сопровождалось существенным ростом только общей кустистости растений. Содержание хлорофилла *b* достоверно не изменялось по сортам и вариантам опыта, однако для сорта Trizo выявлена выраженная тенденция роста величины этого показателя в варианте с *Pseudomonas fluorescens* SPB2137.

Следует отметить, что продуктивность сельскохозяйственных культур, в том числе зерновых, во многом определяют комплекс сложных физиологических (фотосинтез, рост и дыхание) и биохимических процессов, экологические условия и агротехника выращивания, однако главную роль в формировании урожая играет фотосинтез. Оптимизация работы фотосинтетического аппарата на разных уровнях его организации способна повысить урожай зерна на 10...60 % [20].

Совместное применение штаммов *Ps. fluorescens* SPB2137 и *Sphingomonas* sp. K1B с органоминеральным удобрением Batr Gum оказывало больший защитный эффект в отношении желтой ржавчины, чем при их раздельном применении. Обратный эффект отмечали при использовании такой комбинации со штаммом *B. subtilis* 124-11. Совместное применение удобрения Batr Gum со штаммами ассоциативных ризобактерий снижало их эффективность в отношении возбудителя мучнистой росы по интенсивности развития болезни и числу пятен с налетом. Только в варианте со штаммом *Ps. fluorescens* SPB2137 площадь пятна с налетом мучнистой росы снизилась, по сравнению с контролем, на 81 %.

Обмен веществ облигатных паразитов оптимально приспособлен к метаболизму растения-хозяина, а в составе органоминерального удобрения Batr Gum, содержится комплекс химических элементов и соединений, оказывающих ростостимулирующие действия на растения. При применении удобрения повышается жизнеспособность растения, изменяется его элементный состав, что может влиять на устойчивость или восприимчивость к болезням, в том числе генетически детерминированную [21].

Выводы. Ассоциативные ризобактерии снижают поражаемость растений возбудителями болезней. Применение биопрепаратов таких ризобактерий на зерновых культурах будет способствовать сохранению естественных биоценологических связей в агроэкосистемах, а также баланса между их составными компонентами. Однако эффективность ассоциативных ризобактерий нестабильна и зависит от многих факторов.

Литература

- Лысов А.К., Павлюшин В.А. Фитосанитарное проектирование агроэкосистем и дистанционное зондирование // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 5. С. 101–112.
- Формирование агроэкосистемы становление сообществ вредных видов биотрофов / В.А. Павлюшин, Н.А. Вилкова, Г.И. Сухорученко и др. // *Вестник защиты растений*. 2016. № 2 (88). С. 5–15.
- Тихонович И.А., Проворов Н.А. Сельскохозяйственная микробиология как основа экологически устойчивого агропроизводства: фундаментальные и прикладные аспекты // *Сельскохозяйственная биология*. 2011. Т. 46. № 3. С. 3–9.
- Павлюшин В.А., Новикова И.И., Бойкова И.В. Микробиологическая защита растений в технологиях фитосанитарной оптимизации агроэкосистем: теория и практика (обзор) // *Сельскохозяйственная биология*. 2020. Т. 55. № 3. С. 421–438.
- Ароматические карбоновые кислоты корневых экссудатов ячменя и их влияние на рост *Fusarium culmorum* и *Pseudomonas fluorescens* / А.И. Шапошников, В.Ю. Шахназарова, Н.А. Вишневская и др. // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2020. Т. 56. № 3. С. 292–300.
- Ризосферные бактерии / Н.В. Феоктистова, А.М. Марданова, Г.Ф. Хадиева и др. // *Ученые записки казанского университета. Серия естественные науки*. 2016. 158 (2). С. 207–224.
- Гвоздева М.М., Волкова Г.В. Защита озимой пшеницы от комплекса заболеваний в условиях центральной зоны Краснодарского края с преимущественным использованием биологических фунгицидов // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 3. С. 18–25.
- Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning / J. Vacheron, G. Desbrosses, M.L. Bouffaud, et al. // *Front Plant Sci*. 2013. № 4. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2013.00356/full> (дата обращения: 22.12.2022).
- Potential role of phytohormones and plant growth-promoting rhizobacteria in abiotic stresses: consequences for changing environment / S. Fahad, S. Hussain, A. Bano et al. // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. Vol. 22. P. 4907–4921.
- Tak H. I., Ahmad F., Babalola O. O. Advances in the application of plant growth-promoting rhizobacteria in phytoremediation of heavy metals // *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2013. Vol. 223. P. 33–52.
- Characterization of the microbial communities in wheat tissues and rhizosphere soil caused by dwarf bunt of wheat / T. Xu, W. Jiang, D. Qin, et al. // *Scientific Reports*. 2021. № 11. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-85281-8#citeas> (дата обращения: 23.12.2022).
- Studies on the control effect of *Bacillus subtilis* on wheat powdery mildew / D. Xie, X. Cai, C. Yang, et al. // *Pest Management Science*. 2021. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ps.6471> (дата обращения: 23.12.2022).
- Garcia-Fraile P., Menendez E., Rivas R. Role of bacterial biofertilizers in agriculture and forestry // *AIMS Journal*. 2015. Vol. 2. P. 183–205.
- Identification of the effectiveness of associative rhizobacteria in spring wheat cultivation / L.E. Kolesnikov, A.A. Belimov, E.Y. Kudryavtseva, et al. // *Agronomy Research*. 2021. Vol. 19. No. 3. P. 1530–1544.
- Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. 429 с.
- Исследование эффективности штаммов ассоциативных ризобактерий в посевах различных видов рас-

- тений / Г.А. Воробейков, Т.К. Павлова, С.В. Кондрат и др. // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. 2011. № 141. С. 114–123.
17. Молекулярный анализ микробных сообществ ризосфер злаков, выращенных на контрастных почвах / А.О. Зверев, Е.В. Першина, В.М. Шапкин и др. // Микробиология. 2020. Т. 89. №2. С. 235–246. doi: 10.31857/s0026365620010188.
18. Роль корневых экссудатов ячменя как источника питания во взаимоотношениях между *Fusarium culmorum* и *Pseudomonas fluorescens* / А.И. Шапошников, Н.А. Вишневская, В.Ю. Шахназарова и др. // Микология и фитопатология. 2019. Т. 53. № 5. С. 311–318.
19. Взаимодействие ризосферных бактерий с растениями: механизмы образования и факторы эффективности ассоциативных симбиозов (обзор) / А.И. Шапошников, А.А. Белимов, Л.В. Кравченко и др. // Сельскохозяйственная биология. 2011. № 3. С. 16–22.
20. Furbank R.T., Quick W.P., Sirault X.R.R. Improving photosynthesis and yield potential in cereal crops by targeted genetic manipulation: prospects, progress and challenges // Field crops research. 2015. Vol. 182. P.19–29.
21. Масс-спектральный анализ содержания некоторых химических элементов во флаговых листьях у изогенных линий пшеницы (*Triticum aestivum* L.) с различной устойчивостью к бурой ржавчине / Л.Е. Колесников, О.И. Бурова, Ю.Р. Колесникова и др. // Сельскохозяйственная биология. 2018. Т. 53. № 1. С. 72–84.

Поступила в редакцию 12.12.2022

После доработки 27.12.2022

Принята к публикации 12.01.2023