

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШТАММОВ *BACILLUS SUBTILIS* В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ*

Л.Е. Колесников¹, кандидат биологических наук, И.И. Новикова², доктор биологических наук, В.А. Павлюшин², академик РАН, Е.В. Зувев³, кандидат сельскохозяйственных наук, Ю.Р. Колесникова³, кандидат сельскохозяйственных наук

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

² Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений,
196608, Санкт-Петербург, ш. Подбельского, 3
E-mail: irina_novikova@inbox.ru

³ ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42-44
E-mail: ezuev@vir.nw.ru

Исследования выполняли в 2017–2022 гг. с целью выявления природно-климатических факторов, способных влиять на эффективность штаммов *B. subtilis* в отношении морфометрических показателей и продуктивности мягкой пшеницы, а также развития болезней. Оценивали отзывчивость мягкой пшеницы яровой сорта Ленинградка 6, к-64900 на применение микробиологического препарата Виталплан, СП (титр жизнеспособных клеток $\times 10^{11}$ КОЕ/г) и культуральной жидкости (КЖ) штаммов *B. subtilis* VKM B-2604D и *B. subtilis* VKM B-2605D (при соотношении 1:1 с титром жизнеспособных клеток $\times 10^{10}$ КОЕ/мл). Для проведения исследований в полевых условиях Северо-Запада Российской Федерации осуществляли обработку семян пшеницы перед посевом и трехкратное опрыскивание растений в период вегетации. Эффективность штаммов бактерий в большей степени зависела от показателей влагообеспеченности вегетационного периода, что было подтверждено результатами многомерного шкалирования, корреляционного и факторного анализов. В варианте «Виталплан, СП» в F₂ выявлены высокие положительные факторные нагрузки для суммы осадков в июне, июле, августе, ГТК в июле, относительной влажности в июне (0,73...0,93), фазы растений, высоты растений, площади флагового и предфлагового листьев, массы вегетативной части (0,71...0,80), а при использовании КЖ «*B. subtilis* VKM B-2604D + *B. subtilis* VKM B-2605D» – для суммы осадков в июне, августе, ГТК в июле и августе (0,71...0,88), продуктивной кустистости, массы корней, длины колоса, числа колосков в колосе, числа зерен, массы зерен колоса, биологической, потенциальной урожайности (0,71...0,85). Применение штаммов *B. subtilis* повышало биологическую и потенциальную урожайность соответственно на $32,5 \pm 7,2$ % и $24,3 \pm 7,0$ %, снижало интенсивность развития болезней (корневой гнили – на $11,7 \pm 1,6$ %; мучнистой росы, бурой и желтой ржавчины – на $7,6 \pm 0,7$ %), однако эффективность бактериальных штаммов существенно зависела от природно-климатических факторов периода вегетации пшеницы.

MODELING THE EFFECTIVENESS OF *BACILLUS SUBTILIS* STRAINS DEPENDING ON NATURAL AND CLIMATIC FACTORS IN THE SOFT WHEAT CULTIVATION

L.E. Kolesnikov¹, I.I. Novikova², V.A. Pavlyushin², E.V. Zuev³, Yu.R. Kolesnikova³

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

² All-Russian institute of plant protection,
196608, Saint Petersburg-Pushkin, shosse Podbelskogo, 3,
E-mail: irina_novikova@inbox.ru

³ FRC N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources,
190000, Sankt-Peterburg, ul. Bol'shaya Morskaya, 42-44,
E-mail: ezuev@vir.nw.ru

The studies were carried out in 2017–2022 in order to identify natural and climatic factors that can influence the effectiveness of *B. subtilis* strains in relation to morphometric indicators and soft wheat productivity, the diseases development. The responsiveness of Leningradka 6, k-64900 spring wheat to the microbiological preparation Vitaplan, SP (titer of viable cells $\times 10^{11}$ CFU/g) and cultural liquid (CL) of the *B. subtilis* VKM B-2604D and *B. subtilis* VKM B-2605D (at a ratio of 1:1 with the titer of viable cells $\times 10^{10}$ CFU/ml). In the field conditions of the North-West of the Russian Federation, wheat seeds were treated before sowing and plants were sprayed three times during the growing season. The effectiveness of bacterial strains in relation to productivity and especially dangerous wheat diseases depended more on the indicators of moisture availability of the growing season. This was confirmed by the results of multidimensional scaling, correlation, factor analysis of indicators. In the variant «Vitaplan, SP» in F₂, high positive factor loads were revealed for the precipitation amount in June, July, August, HTC in July, relative humidity in June (0.73...0.93), plant phase, plant height, area of flag and pre-flag leaves, vegetative part weight (0.71...0.80), and when using CL «*B. subtilis* VKM B-2604D + *B. subtilis* VKM B-2605D» – for the precipitation amount in June, August, HTC in July and August (0.71...0.88), productive bushiness, root weight, spike length, spikelets number per spike, grains number, spike grain weight, biological, potential yield (0.71...0.85). The *B. subtilis* strains application allowed to increase biological and potential yields by 32.5 ± 7.2 % and 24.3 ± 7.0 %, and to reduce the intensity of diseases development (root rot – by 11.7 ± 1.6 %; powdery mildew, brown and yellow rust – by 7.6 ± 0.7 %), however, the effectiveness of bacterial strains significantly depended on the climatic factors of wheat growing season.

Ключевые слова: мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L.), штаммы *Bacillus subtilis*, биопрепарат «Виталплан, СП», продуктивность, биологическая эффективность, болезни пшеницы, природно-климатические факторы

Key words: soft wheat (*Triticum aestivum* L.), *Bacillus subtilis* strains, biological preparation «Vitaplan, WP», wheat productivity, biological efficiency, wheat diseases, natural and climatic factors

*Работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР FGEM-2022–0009 «Структурирование и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве».

Важная проблема современного растениеводства – повышение продуктивности сельскохозяйственных культур и стабилизация фитосанитарного состояния агроценозов при сохранении плодородия почвы [1, 2]. На сегодняшний день в России наблюдают значительное изменение климата. По прогнозам Росгидромета, уже к середине XXI в. средняя температура на территории страны поднимется на 2...3 °С. Последствия климатических изменений (повышение температуры, изменение количества осадков, неустойчивый характер погоды), несомненно, отразятся как на продуктивности агроценозов, так и на распространении вредных организмов, а также их вредности. Под воздействием высокой температуры у растений прогнозируют изменения в метаболизме РНК и синтезе белка, нарушение функционирования различных ферментов, что может оказать влияние на их устойчивость к возбудителям болезней [3, 4]. Кроме того, с увеличением потенциальной продуктивности пшеницы в результате селекции возрастает разрыв между максимальной и минимальной урожайностью в различные по метеословиям годы, усиливается экологическая зависимость создаваемых сортов [5].

До сегодняшнего дня одним из основных приемов борьбы с болезнями растений было использование фунгицидов. Однако, воздействуя на микробиом почвы, они вносят существенные отрицательные изменения в его структуру, что обуславливает снижение супрессивности и плодородия почвы, а впоследствии негативно влияет на продуктивность многих культур севооборота [6]. Одной из стратегий повышения урожайности зерновых культур и снижения вредности возбудителей болезней в изменяющихся условиях климата может быть использованием полезных микроорганизмов (PGPB, Plant Growth-Promoting Bacteria), в том числе отселектированных природных штаммов *Bacillus subtilis*. Преимущество спорообразующих бактерий рода *Bacillus*, по сравнению с другими микроорганизмами, заключается в их повсеместном распространении и наличии комплекса ценных для сельскохозяйственного производства характеристик, некоторые из которых используют для разработки микробиологических средств защиты растений [7].

Эффективность контроля плотности популяций фитопатогенов при применении микробиологических препаратов зависит от биологических особенностей штаммов-продуцентов и обусловлена такими факторами как успешная конкуренция за питательные вещества и пространство для колонизации почвы и ризосферы, способность микроорганизмов синтезировать биологически активные соединения и др. [8]. Некоторые штаммы *B. subtilis* могут формировать биопленки вокруг поверхности корней и обладать выраженной антагонистической активностью в отношении фитопатогенных микроорганизмов, синтезируя такие антибиотики, как итурин, фенгицин, миксирин, пумилацидин, сурфактин [9]. Они способны индуцировать реакции фитомунитета посредством физиологических изменений в фотосинтетических и дыхательных путях, регуляции метаболизма углеводов, фенилпропаноидов и азота, а также образования защитных белков у зараженных растений [10, 11]. Штаммы *B. subtilis* обладают ростостимулирующим действием, участвуя в синтезе широкого спектра биологически активных веществ, включая витамины, способствуя улучшению усвоения важнейших элементов минерального питания из почвы, в частности, преобразуют сложные формы химических соединений азота и фосфора в доступную для растений форму [12, 13, 14]. Бациллы способны повышать адаптивный потенциал растений к физиологическим стрессам, в том числе к за-

сухе, засолению, перепадам температур, УФ-излучению, загрязнению почвы тяжелыми металлами [15].

Характер взаимоотношений между штаммами *B. subtilis* и растением-хозяином может варьировать от мутуализма до комменсализма и зависит от вида стрессового воздействия, специфичности взаимодействующих генотипов биообъектов, состава корнеассоциированного микробиома растения. Указанные факторы и их взаимодействие оказывают разностороннее влияние на растительный организм в изменяющихся условиях среды, а изучение этой сложной системы – фитобиома, дает материал для оценки изменчивости положительного действия вносимых микробиологических препаратов и анализа причин их ограниченного мутуалистического влияния [16, 17].

При этом в ряде исследований подчеркнута недостаточная изученность факторов, определяющих варьирование эффективности штаммов *B. subtilis* при возделывании сельскохозяйственных культур, в том числе зерновых, в полевых условиях [18, 19].

Цель исследований – выявление природно-климатических факторов, способных влиять на эффективность штаммов *B. subtilis* в отношении морфометрических показателей продуктивности мягкой пшеницы и интенсивности развития болезней.

Методика. Работу выполняли в 2017–2022 гг. на полях научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова» (Ленинградская обл., 59° 44' с. ш. 30° 24' в. д). Поля имеют выровненный рельеф. Почвы дерново-слабоподзолистые, супесчаные и суглинистые по механическому составу, хорошо окультуренные: водородный показатель солевой вытяжки pH = 4,8 (ГОСТ 26483-8); фосфор подвижный в пересчете на P₂O₅ (ГОСТ Р 54650–2011) – 3455 ± 691 мг/кг; калий подвижный в пересчете на K₂O (ГОСТ Р 54650–2011) – 97,5 ± 14,6 мг/кг; органическое вещество (ГОСТ 26213-2021) – 3,55 ± 0,53 %.

Микрополевой опыт (общая площадь делянки 10 м²) был заложен в трехкратной повторности методом организованных повторений. Площадь учетной делянки одного варианта опыта составила 1,0 м², расположение в повторениях – систематическое.

В работе использовали сорт мягкой пшеницы яровой (*Triticum aestivum* L.) Ленинградская 6, к-64900, который был районирован с 1972 по 2015 гг. Однако до сих пор его используют в качестве модельного во многих исследованиях по пшенице в Северо-Западном регионе России [20, 21].

Объект изучения – штаммы бактерий *B. subtilis* ВКМ В-2604Д и *B. subtilis* ВКМ В-2605Д в двух препаративных формах: Витаплан, СП (смачивающийся порошок, ×10¹¹ КОЕ/г) и культуральная жидкость (КЖ) штаммов-продуцентов (титр ×10¹⁰ КОЕ/мл). В работе использовали КЖ, полученную при глубинном культивировании штаммов-продуцентов препарата Витаплан, СП – *B. subtilis* ВКМ В-2604Д и *B. subtilis* ВКМ В-2605Д. Глубинное культивирование проводили при 28 °С в течение 72 ч на питательной среде следующего состава (г/л): кукурузный экстракт – 30, меласса – 15, pH – 7,2 в колбах объемом 750 мл с 100 мл среды на круговой качалке при 220 об./мин. Титр полученной культуральной жидкости составил 10¹⁰ КОЕ/мл.

Методы производства полифункциональных биопрепаратов и комплексов, объединяющих полезные свойства отселектированных штаммов микроорганизмов-антагонистов возбудителей болезней и активатора

болезнеустойчивости растений салицилата хитозана разработаны И. И. Новиковой (ФГБНУ ВИЗР) [22].

Схема опыта предусматривала следующие варианты: контроль (вода);

Витаплан, СП (стандарт), содержащий клетки штаммов *B. subtilis* ВКМ В-2604Д и *B. subtilis* ВКМ В-2605Д; культуральная жидкость штаммов *B. subtilis* ВКМ В-2604Д и *B. subtilis* ВКМ В-2605Д в соотношении 1:1 (КЖ *B. subtilis* ВКМ В-2604Д + ВКМ В-2605Д).

При проведении исследований в полевых условиях осуществляли обработку семян мягкой пшеницы яровой (сорт Ленинградка 6, к-64900) перед посевом и трехкратное опрыскивание растений в фазы кущения, выхода в трубку, цветения.

Биопрепарат Витаплан, СП, разработанный на основе штаммов *Bacillus subtilis* ВКМ В-2604Д и *B. subtilis* ВКМ В-2605Д без включения дополнительных компонентов включен в Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных для использования на территории РФ. Предпосевную обработку семян Витапланом, СП осуществляли нормой 0,25 мл 1 %-ной суспензии биопрепарата на 1000 семян, опрыскивание растений – из расчета 40 г/га (4 мг/м²). Обработку семян во всех вариантах опыта проводили в течение 1 ч, опрыскивание растений – при расходе рабочего раствора 100 мл/м².

В экспериментальных вариантах растения опрыскивали культуральной жидкостью штаммов *B. subtilis* в разведении 1:10, с титром жизнеспособных клеток $\times 10^9$ КОЕ/мл. В исходной культуральной жидкости титр жизнеспособных клеток составлял $\times 10^{10}$ КОЕ/мл. Титр жизнеспособных клеток в рабочем растворе препарата Витаплан, СП также составлял $\times 10^9$ КОЕ/г (мл) в соответствии с рекомендуемыми нормами применения.

При анализе элементов продуктивности пшеницы использовали следующие показатели: полевая всхожесть, высота растения, количество и длина первичных корней, количество и длина узловых корней, масса корней, продуктивная кустистость, общая кустистость, площадь флагового и предфлагового листа, масса вегетативной части, длина колоса, число колосков в колосе, масса колоса, число зерен в колосе, масса зерен одного колоса, масса 1000 зерен. Кроме того, учитывали биологическую зерновую продуктивность пшеницы (г/растение) и, на ее основе, потенциальную урожайность культуры с единицы площади (т/га) с учетом данных по полевой всхожести, определяющей густоту стеблестоя посевов [23].

Пораженность пшеницы болезнями изучали по комплексу общепринятых параметров их развития и дополнительных фитопатологических показателей: корневая гниль – развитие, %; бурая ржавчина – развитие, %; число пустул и площадь пустулы (мм²); желтая ржавчина – развитие, %; число полос с пустулами, длина полосы с пустулами (мм), число пустул в полосе, суммарное число пустул на листе; площадь пустулы (мм²); мучнистая роса – развитие, %; число и площадь пятен (мм²) с налетом [24]. Биологическую эффективность бактериальных штаммов (БЭ) определяли по формуле Аббота [25].

Алгоритм компьютерной обработки результатов исследования включал создание кодировочной таблицы значений показателей в системе IBM SPSS, конвертирование абсолютных значений, полученных в вариантах опыта в относительные величины, характеризующие их изменение к контролю (без обработки), сопоставление полученных относительных величин показателей с метеорологическими условиями и активностью Солнца по вариантам опыта, повторностям и периоду исследования в программном комплексе Statistica 12.0.

Графические средства пакетов IBM SPSS и Statistica 12.0 использовали для построения категоризированных графиков рассеяния (2D Categorized Scatterplots) средних абсолютных и относительных значений фитопатологических и фитометрических характеристик посевов с указанием стандартной ошибки опыта. Численные методы обработки данных были основаны на выявлении различий между относительными изменениями фитометрических и фитопатологических показателей в вариантах относительно контроля с использованием критерия Стьюдента при $p < 0,05$.

При анализе взаимосвязей изменения относительных величин фитометрических и фитопатологических показателей при применении бактериальных культур (2017–2022 гг.) как между собой, так и в зависимости от комплекса метеорологических факторов, активности Солнца (по числу пятен, индексу Вольфа, УФ-индекса), были построены диагональные матрицы коэффициентов корреляции Пирсона по вариантам опыта и повторностям с указанием уровня их значимости. По относительному числу выявленных положительных $\theta_{к+}$ и отрицательных $\theta_{к-}$ коэффициентов корреляции в вариантах опыта анализировали преобладающие тенденции, обусловленные природно-климатическими факторами.

При построении многомерной модели различий между значениями относительных изменений комплекса фитопатологических показателей в вариантах опыта в зависимости от метеорологических условий периодов вегетации, использовали методику многомерного шкалирования. Матрица различий между указанными показателями в Евклидовом пространстве была представлена в виде двухмерного графического изображения их взаимного расположения. Достоверность модели подтверждена диаграммой Шепарда, отражающей зависимость воспроизведенных расстояний Евклида, рассчитанных для фитопатологических показателей пшеницы и метеофакторов, от исходных с использованием метода монотонного преобразования (регрессии). Исходные величины расстояний были согласованы со ступенчатой функцией их преобразования.

Метод факторного анализа применяли для анализа причинно-следственных связей изменения фитометрических и фитопатологических характеристик посевов пшеницы в зависимости от метеорологических условий и активности Солнца. При построении факторной модели, представленной в работе, было выявлено пять факторов (F_1, \dots, F_5), описывающих линейные статистические связи (корреляции) между рассматриваемыми показателями. Выявленные факторы включали группы показателей, коррелирующих между собой больше, чем с показателями, входящими в группу другого фактора. Каждый из факторов представлял одну из сторон внутренней структуры взаимосвязи между переменными, что было выражено коэффициентами в линейных комбинациях – факторными нагрузками на переменные. По знакам, величинам нагрузок и природе исходных переменных осуществляли интерпретацию выделенных линейных комбинаций.

Результаты и обсуждение. Культуральная жидкость оказала большее влияние на биологическую (Y_0 , г/растение) и потенциальную (Y_n , т/га) урожайность пшеницы, чем Витаплан, СП (рис. 1). В среднем за 2017–2022 гг. увеличение биологической урожайности в варианте опыта с КЖ бактерий, по сравнению с контролем, составило $38,5 \pm 10,8$ %, потенциальной – $26,5 \pm 10,9$ %, при использовании Витаплан, СП – соответственно $26,5 \pm 9,4$ % и $22,1 \pm 10,3$ %, одновременно развитие комплекса болезней снижалось по вариантам опыта на $10,2 \pm 2,1$ % и $7,1 \pm 2,1$ %.

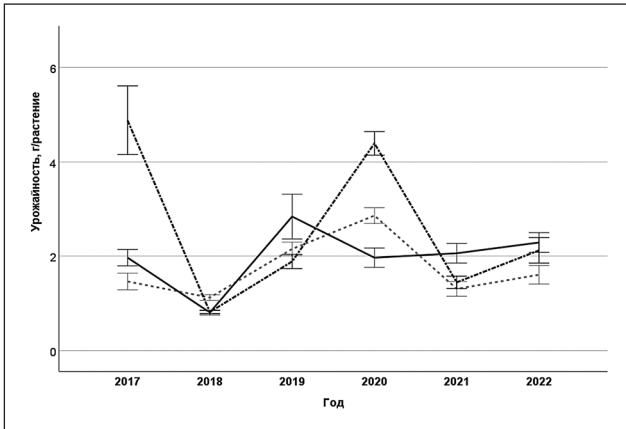


Рис. 1. Динамика биологической урожайности мягкой пшеницы при применении микробиологического препарата Витаплан, СП и культуральной жидкости штаммов *B. subtilis* VKM B-2604D и *B. subtilis* VKM B-2605D: --- контроль (вода), ---- *B. subtilis* VKM B-2604D+ *B. subtilis* VKM B-2605D, — Витаплан, СП.

В 2017 г. в варианте с применением КЖ бактериальных штаммов, по сравнению с контролем, зарегистрировано максимальное в опыте увеличение урожайности пшеницы (на 3,4 г, или 234,5 %) при наибольшем снижении поражения растений (рис. 2а) корневой гнилью на 34,3 % (БЭ = 94,4 %), бурой ржавчиной – на 18,9 % (БЭ=93,4 %). В 2020 г. существенный рост урожайности пшеницы в этом варианте опыта (на 1,5 г, или 53,7 %) был обусловлен самым высоким снижением поражения растений мучнистой росой на 23,9 % (БЭ=44,4 %), корневой гнилью – на 10,1 %, (БЭ=55,2 %), желтой ржавчиной – на 17,8 % (БЭ=38,4 %).

В варианте с применением микробиологического препарата Витаплан, СП наибольший рост урожайности пшеницы на 81,2 %, относительно контроля, выявлен в 2019 г. (см. рис. 1). Это было обусловлено наибольшим снижением развития корневой гнили (рис. 2б) на 22,2 % (БЭ=38,9 %), бурой ржавчиной на 21,6 % (БЭ=62,8 %) и желтой ржавчиной на 22,1 (БЭ=88,1 %).

В среднем за 2017–2022 гг. достоверное ($p < 0,05$) снижение развития корневой гнили в варианте опыта с применением препарата Витаплан, СП, по сравнению с контролем, составляло $5,6 \pm 2,6$ %, с КЖ бактериальных штаммов – $17,8 \pm 2,0$ % (в 38,9 % и 61,1 % случаев), мучнистой росы – соответственно $6,1 \pm 2,9$ % и $6,3 \pm 1,3$ % (в 22,2 % и 50,0 % случаев), бурой ржавчиной – $7,8 \pm 2,4$ % и $10,2 \pm 1,4$ % (в 27,8 % и 44,4 % случаев), желтой ржавчины – $9,0 \pm 1,5$ % и $6,3 \pm 1,7$ % (в 27,8 % и 22,2 % случаев). Более высокая биологическая активность культуральной жидкости бактериальных штаммов, на наш взгляд, обусловлена наличием комплекса биологически активных веществ (БАВ), включающего соединения с разной химической структурой и механизмом действия. В сухой препаративной форме (СП) споры штаммов-продуцентов при наличии влаги прорастают и образуют вегетативные метаболизирующие клетки, что требует некоторого времени.

При анализе взаимосвязей между морфометрическими показателями продуктивности пшеницы и поражаемостью растений болезнями при применении изучаемых препаратов по годам исследования выявлена тенденция снижения числа колосков в колосе с усилением поражения растений мучнистой росой и корневой гнилью ($\theta_{к-} = 58,3$ %). Отмечено преобладание тенденции роста биологической и потенциальной урожайности пшеницы с повышением БЭ биопрепарата Витаплан, СП и КЖ бактериальных штаммов в отношении мучнистой росы, бурой и желтой ржавчины – $\theta_{к+} = 67$ %, корневой гнили – $\theta_{к+} = 83$ % и $\theta_{к+} = 100$ % соответственно.

Во всех вариантах опыта рост полевой всхожести семян пшеницы $\Pi_{в}$, по сравнению с контролем, привел к усилению поражения пшеницы мучнистой росой $R_{м}$ и желтой ржавчиной $R_{ж}$. Указанная зависимость ($R^2 = 0,44$; $F = 14,3$; $P = 0,00007$) имеет вид: $\Pi_{в} = 1,231 \pm 0,41 + 0,497 \pm 0,168 R_{м} + 0,786 \pm 0,237 R_{ж}$. Коэффициенты регрессионной модели статистически значимы при $p < 0,01$. Одним из решающих условий роста продуктивности пшеницы считают формирование оптимального количества растений на единице площади, что в значительной степени зависит от полевой всхожести семян. Возможно, выявленная тенденция связана с изменением густоты стеблестоя, влияющей на микроклимат в по-

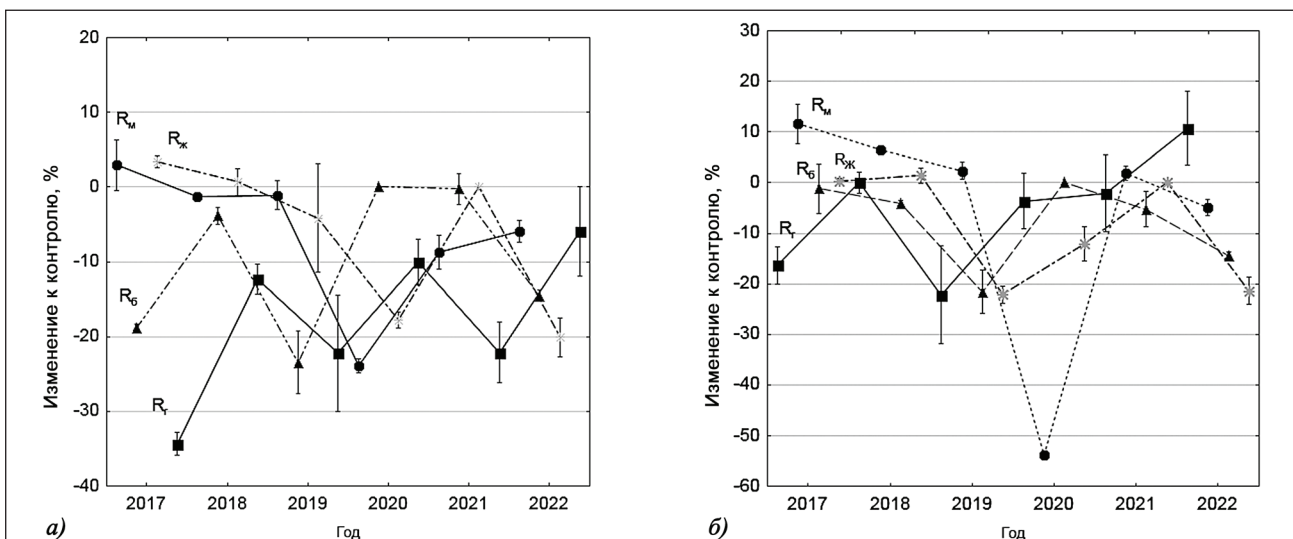


Рис. 2. Динамика относительного изменения развития особо опасных возбудителей болезней пшеницы при применении КЖ (а) штаммов *B. subtilis* VKM B-2604D и *B. subtilis* VKM B-2605D и микробиологического препарата Витаплан, СП (б), по сравнению с контролем (2017–2022 гг.): $R_{г}$ – развитие корневой гнили, $R_{м}$ – мучнистой росы, $R_{б}$ – бурой ржавчины, $R_{ж}$ – желтой ржавчины.

сева, который зависит от равномерности освещения, проветриваемости, температуры, влажности и др., что может определять интенсивность поражения растений болезнями [26].

Увеличение продуктивной кустистости растений сопровождалось ростом площади пятна мучнистой росы, площади пустулы бурой ржавчины ($\theta_{к+}=83\%$) и желтой ржавчины ($\theta_{к+}=67\%$). При этом повышение общей кустистости растений приводило к снижению пораженности растений бурой ржавчиной, корневой гнилью ($\theta_{к-}=83\%$) и желтой ржавчиной ($\theta_{к-}=100\%$). В большинстве вариантов опыта высота растений и площадь флагового листа положительно коррелировали со степенью поражения растений мучнистой росой ($\theta_{к+}=67\%$, $\theta_{к+}=100\%$), бурой ($\theta_{к+}=67\%$, $\theta_{к+}=67\%$) и желтой ($\theta_{к+}=83\%$, $\theta_{к+}=67\%$) ржавчиной, но отрицательно – с развитием корневой гнили ($\theta_{к+}=67\%$, $\theta_{к+}=83\%$). Выявленные зависимости можно объяснить морфологическими и физиолого-биохимическими особенностями растений. Флаговые листья продуктивных стеблей с колосами отличались от непродуктивных большими размерами и содержанием повышенного запаса питательных веществ, необходимого для развития видов ржавчины и мучнистой росы – облигатных паразитов, живущих исключительно за счет растения-хозяина. Возбудители корневой гнили относятся к группе факультативных паразитов и поражают преимущественно ослабленные растения, в том числе – неспособные формировать колосья [27].

Рост массы и числа первичных корней ($\theta_{к+}=67\%$), а также числа и длины узловых корней ($\theta_{к+}=83\%$, $\theta_{к+}=67\%$) приводил к усилению поражения растений мучнистой росой. Развитие желтой и бурой ржавчины также усиливалось с увеличением числа первичных корней ($\theta_{к+}=67\%$), но снижалось с ростом числа и длины узловых корней ($\theta_{к+}=67\%$, $\theta_{к+}=83\%$). Выявлены отрицательные корреляционные взаимосвязи между поражением растений корневой гнилью и числом, длиной первичных ($\theta_{к-}=67\%$) и узловых корней ($\theta_{к-}=67\%$ и $\theta_{к-}=100\%$).

Изучение взаимосвязей между изменениями в фитопатологических характеристиках пшеницы при применении изучаемых препаратов показало, что снижение поражения пшеницы корневой гнилью в варианте с КЖ *B. subtilis* ВКМ В-2604D + *B. subtilis* ВКМ В-2605D сопровождалось усилением развития мучнистой росы пшеницы ($r=-0,63$, $p=0,03$), что способствовало снижению поражения растений бурой ржавчиной ($r=-0,56$, $p=0,02$). Возрастание биологической эффективности в отношении развития мучнистой росы сопровождалось усилением развития бурой ржавчины ($r=0,47$, $p=0,04$) и снижением площади пустулы микромицета ($r=-0,61$, $p=0,008$). Рост биологической эффективности в отношении бурой ржавчины оказывал влияние на снижение площади пустулы желтой ржавчины ($r=-0,47$, $p=0,04$).

В варианте опыта Витаплан, СП отмечено, что с ростом биологической эффективности в отношении корневой гнили наблюдали увеличение площади пустулы бурой ржавчины ($r=0,45$, $p=0,04$), а с ростом биологической эффективности в отношении мучнистой росы выявлено снижение пораженности растений желтой ржавчиной (развитие болезни – $r=-0,49$, $p=0,04$; число полос с пустулами – $r=-0,67$, $p=0,002$). Рост биологической эффективности в отношении бурой ржавчины способствовал снижению числа пустул желтой ржавчины в полосе ($r=-0,49$, $p=0,04$), а увеличение биологической эффективности в отношении желтой ржавчины приводило к уменьшению площади пустулы бурой ржавчины ($r=-0,59$, $p=0,01$).

Табл. 1. Факторный анализ данных о биологической эффективности препарата Витаплан, СП, метеорологических условий и значений относительного изменения к контролю фитопатологических показателей поражения пшеницы болезнями (2017–2022 гг.)

| Показатель | Факторные нагрузки | | | | |
|---|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | F ₁ | F ₂ | F ₃ | F ₄ | F ₅ |
| Фаза развития растения | 0,71* | -0,09 | -0,07 | 0,34 | 0,05 |
| Высота растения, см | 0,80* | 0,03 | -0,01 | 0,21 | -0,08 |
| Число корней, шт. | 0,12 | 0,29 | 0,15 | 0,04 | 0,19 |
| Длина корней, мм | -0,05 | 0,18 | -0,08 | 0,60 | -0,22 |
| Число узловых корней, шт. | 0,04 | 0,06 | -0,13 | 0,84* | 0,02 |
| Длина узловых корней, мм | 0,06 | -0,10 | -0,48 | 0,64 | -0,01 |
| Продуктивная кустистость, шт. | 0,14 | 0,00 | 0,17 | 0,67 | 0,20 |
| Общая кустистость, шт. | -0,39 | 0,26 | -0,12 | 0,53 | 0,22 |
| Площадь флагового листа, см ² | 0,74* | -0,13 | -0,26 | 0,32 | -0,19 |
| Площадь предфлагового листа, см ² | 0,79* | 0,01 | -0,20 | 0,24 | -0,05 |
| Масса корней, г | 0,36 | 0,15 | -0,18 | 0,67 | 0,01 |
| Масса колоса, г | 0,24 | 0,07 | -0,18 | 0,10 | 0,45 |
| Масса вегетативной части, г | 0,77* | 0,15 | -0,40 | 0,03 | -0,06 |
| Всхожесть полевая, % | 0,09 | 0,08 | 0,51 | 0,05 | -0,69 |
| Длина колоса, см | 0,70 | -0,11 | 0,28 | 0,22 | 0,39 |
| Число колосков в колосе, шт. | 0,65 | -0,12 | 0,06 | 0,31 | 0,39 |
| Число зерен в колосе, шт. | 0,42 | 0,22 | 0,35 | 0,14 | 0,04 |
| Масса зерен одного колоса, г | 0,51 | 0,07 | 0,29 | 0,44 | 0,12 |
| Масса 1000 зерен, г | 0,34 | 0,02 | 0,18 | 0,50 | 0,14 |
| Биологическая урожайность, г/растение | 0,12 | 0,08 | 0,25 | 0,79* | 0,12 |
| Потенциальная урожайность, т/га | 0,10 | 0,14 | 0,26 | 0,83* | 0,00 |
| Сумма температур выше 10 °С (май, с 11 числа), °С | -0,08 | -0,46 | 0,50 | 0,05 | -0,64 |
| Сумма осадков (май, с 11 числа), мм | -0,21 | -0,46 | 0,41 | 0,00 | 0,64 |
| Сумма температур (июнь), °С | -0,12 | -0,05 | 0,64 | 0,02 | 0,63 |
| Сумма осадков (июнь), °С | 0,84* | -0,13 | -0,47 | 0,02 | 0,07 |
| Сумма температур (июль), °С | 0,04 | 0,14 | 0,92* | -0,17 | -0,23 |
| Сумма осадков (июль), мм | 0,73* | -0,12 | -0,63 | 0,03 | -0,15 |
| Сумма температур (август), °С | 0,64 | 0,55 | -0,13 | 0,16 | -0,44 |
| Сумма осадков (август), мм | 0,88* | 0,37 | 0,02 | 0,00 | -0,15 |
| ГТК (июль), ед. | 0,93* | -0,08 | 0,11 | -0,18 | 0,06 |
| ГТК (август), ед. | 0,67 | 0,59 | 0,31 | -0,08 | 0,12 |
| Число пятен на Солнце (среднее за год), шт. | 0,01 | 0,96* | 0,05 | 0,21 | 0,01 |
| Число пятен на Солнце (в июле), шт. | -0,01 | 0,95* | 0,11 | 0,21 | 0,04 |
| Число пятен на Солнце (в августе), шт. | 0,18 | 0,94* | -0,06 | 0,22 | -0,08 |
| Число Вольфа (июль), ед. | -0,06 | 0,95* | 0,08 | 0,21 | 0,07 |
| Число Вольфа (август), ед. | 0,00 | 0,95* | -0,08 | 0,22 | -0,01 |
| Относительная влажность (май), % | 0,67 | -0,13 | 0,50 | 0,21 | -0,27 |
| Относительная влажность (июнь), % | 0,74 | -0,30 | -0,38 | -0,10 | -0,39 |
| Относительная влажность (июль), % | 0,28 | -0,14 | -0,87* | -0,18 | 0,03 |
| Относительная влажность (август), % | 0,40 | 0,43 | 0,61 | -0,11 | 0,41 |
| УФ-индекс (май), ед. | 0,16 | -0,31 | 0,54 | -0,47 | -0,48 |
| УФ-индекс (июнь), ед. | -0,30 | 0,31 | 0,69 | -0,06 | 0,50 |
| УФ-индекс (июль), ед. | -0,11 | 0,05 | 0,92* | -0,30 | -0,04 |
| УФ-индекс (август), ед. | -0,35 | 0,86* | 0,06 | -0,17 | 0,09 |
| Развитие мучнистой росы, % | 0,05 | 0,05 | 0,15 | 0,37 | -0,79* |
| Биологическая эффективность (мучнистая роса), % | 0,30 | 0,24 | 0,11 | 0,19 | 0,79* |
| Число пятен с налетом мучнистой росы, шт. | -0,03 | -0,23 | -0,11 | -0,18 | -0,80* |
| Площадь пятна мучнистой росы, мм ² | 0,11 | -0,11 | 0,74* | 0,29 | -0,11 |
| Развитие бурой ржавчины, % | 0,48 | -0,07 | 0,20 | -0,39 | 0,02 |
| Биологическая эффективность (бурая ржавчина), % | -0,50 | 0,39 | -0,30 | 0,34 | -0,24 |
| Число пустул бурой ржавчины, шт. | 0,09 | -0,28 | 0,70 | 0,15 | 0,11 |
| Площадь пустулы бурой ржавчины, мм ² | 0,09 | -0,67 | 0,17 | -0,20 | -0,16 |
| Развитие желтой ржавчины, % | 0,41 | -0,25 | 0,34 | -0,36 | -0,55 |
| Биологическая эффективность (желтая ржавчина), % | -0,48 | 0,11 | -0,06 | 0,47 | 0,54 |
| Число полос с пустулами желтой ржавчины, шт. | 0,18 | -0,17 | 0,01 | -0,40 | -0,70* |
| Длина полосы с пустулами желтой ржавчины, мм | 0,38 | -0,18 | 0,29 | -0,22 | -0,20 |
| Число пустул в полосе желтой ржавчины, шт. | 0,78* | -0,12 | 0,34 | -0,32 | -0,11 |
| Суммарное число пустул желтой ржавчины на лист, шт. | 0,51 | -0,18 | 0,09 | -0,54 | -0,41 |
| Площадь пустулы желтой ржавчины, мм ² | -0,20 | -0,18 | 0,19 | -0,21 | 0,50 |
| Развитие корневой гнили, % | -0,04 | 0,55 | 0,01 | -0,38 | 0,04 |
| Биологическая эффективность (корневая гниль), % | 0,13 | -0,51 | -0,04 | 0,39 | -0,22 |

* (здесь и в табл. 2) – факторные нагрузки статистически достоверны при $p < 0,05$.

Табл. 2. Факторный анализ данных о биологической эффективности культуральной жидкости (КЖ) штаммов *B. subtilis* ВКМ В-2604D и *B. subtilis* ВКМ В-2605D, метеорологических условий и значений относительного изменения к контролю фитопатологических показателей поражения пшеницы особо опасными болезнями (2017–2022 гг.)

| Показатель | Факторные нагрузки | | | | |
|---|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | F ₁ | F ₂ | F ₃ | F ₄ | F ₅ |
| Фаза растения, балл | 0,55 | -0,26 | 0,08 | -0,17 | -0,14 |
| Высота растения, см | 0,39 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | -0,19 |
| Число корней, шт. | 0,09 | 0,16 | 0,07 | 0,15 | 0,57 |
| Длина корней, мм | 0,14 | 0,17 | 0,08 | 0,01 | 0,82* |
| Число узловых корней, шт. | 0,58 | 0,11 | -0,20 | 0,01 | 0,20 |
| Длина узловых корней, мм | -0,17 | -0,53 | -0,15 | 0,36 | 0,55 |
| Продуктивная кустистость, шт. | 0,71* | -0,14 | -0,20 | -0,07 | 0,06 |
| Общая кустистость, шт. | -0,05 | -0,12 | -0,01 | 0,56 | 0,48 |
| Площадь флагового листа, см ² | 0,46 | 0,23 | -0,19 | 0,23 | 0,39 |
| Площадь предфлагового листа, см ² | 0,23 | -0,07 | -0,21 | 0,44 | 0,41 |
| Масса корней, г | 0,74* | 0,11 | -0,22 | 0,08 | 0,26 |
| Масса колоса, г | -0,16 | -0,29 | 0,00 | 0,71* | 0,51 |
| Масса вегетативной части, г | 0,17 | 0,42 | -0,29 | 0,60 | 0,20 |
| Всхожесть полевая, % | -0,11 | 0,36 | 0,39 | -0,69 | 0,13 |
| Длина колоса, см | 0,85* | 0,07 | 0,18 | 0,04 | 0,05 |
| Число колосков в колосе, шт. | 0,75* | 0,03 | 0,08 | -0,05 | -0,16 |
| Число зерен в колосе, шт. | 0,72* | -0,08 | 0,31 | 0,18 | 0,05 |
| Масса зерен одного колоса, г | 0,80* | 0,12 | -0,08 | 0,23 | 0,24 |
| Масса 1000 зерен, г | 0,42 | 0,34 | -0,47 | 0,18 | 0,41 |
| Биологическая урожайность, г/растение | 0,76* | -0,02 | -0,21 | 0,10 | 0,03 |
| Потенциальная урожайность, т/га | 0,71* | 0,11 | -0,15 | -0,01 | 0,32 |
| Сумма температур выше 10 °С (май, с 11 числа), °С | -0,13 | -0,35 | 0,48 | -0,64 | 0,41 |
| Сумма осадков (май, с 11 числа), мм | -0,08 | -0,60 | 0,50 | 0,50 | -0,21 |
| Сумма температур (июнь), °С | 0,09 | -0,21 | 0,71* | 0,56 | -0,18 |
| Сумма осадков (июнь), °С | 0,71* | -0,18 | -0,62 | -0,09 | -0,07 |
| Сумма температур (июль), °С | 0,15 | 0,15 | 0,91 | -0,28 | 0,06 |
| Сумма осадков (июль), мм | 0,55 | -0,11 | -0,77 | -0,25 | 0,02 |
| Сумма температур (август), °С | 0,59 | 0,59 | -0,28 | -0,33 | 0,29 |
| Сумма осадков (август), мм | 0,85* | 0,33 | -0,15 | -0,21 | 0,05 |
| ГТК (июль), ед. | 0,88* | -0,15 | -0,04 | -0,19 | -0,16 |
| ГТК (август), ед. | 0,76* | 0,51 | 0,21 | 0,06 | -0,11 |
| Число пятен на Солнце (среднее за год), шт. | 0,14 | 0,93* | 0,04 | 0,27 | 0,13 |
| Число пятен на Солнце (в июле), шт. | 0,13 | 0,91* | 0,11 | 0,30 | 0,12 |
| Число пятен на Солнце (в августе), шт. | 0,26 | 0,92* | -0,10 | 0,15 | 0,17 |
| Число Вольфа (июль), ед. | 0,08 | 0,91* | 0,09 | 0,33 | 0,11 |
| Число Вольфа (август), ед. | 0,10 | 0,93* | -0,09 | 0,26 | 0,13 |
| Относительная влажность (май), % | 0,69 | -0,16 | 0,37 | -0,32 | 0,37 |
| Относительная влажность (июнь), % | 0,54 | -0,24 | -0,54 | -0,55 | 0,05 |
| Относительная влажность (июль), % | 0,09 | -0,10 | -0,92* | -0,09 | -0,27 |
| Относительная влажность (август), % | 0,58 | 0,29 | 0,57 | 0,31 | -0,22 |
| УФ-индекс (май), ед. | 0,09 | -0,20 | 0,49 | -0,70* | -0,11 |
| УФ-индекс (июнь), ед. | -0,06 | 0,19 | 0,79* | 0,51 | -0,20 |
| УФ-индекс (июль), ед. | 0,02 | 0,05 | 0,95* | -0,15 | -0,13 |
| УФ-индекс (август), ед. | -0,23 | 0,87* | 0,13 | 0,24 | -0,22 |
| Развитие мучнистой росы, % | 0,04 | 0,00 | -0,15 | -0,27 | 0,80* |
| Биологическая эффективность (мучнистая роса), % | -0,39 | 0,55 | 0,17 | -0,30 | -0,33 |
| Число пятен с налетом мучнистой росы, шт. | 0,18 | -0,66 | -0,11 | 0,59 | -0,07 |
| Площадь пятна мучнистой росы, мм ² | 0,63 | -0,27 | 0,41 | 0,06 | -0,08 |
| Развитие бурой ржавчины, % | -0,04 | 0,11 | 0,46 | -0,25 | -0,69 |
| Биологическая эффективность (буря ржавчина), % | 0,01 | 0,34 | -0,63 | 0,01 | 0,57 |
| Число пустул бурой ржавчины, шт. | 0,03 | -0,13 | 0,65 | -0,19 | -0,20 |
| Площадь пустулы бурой ржавчины, мм ² | 0,37 | -0,88* | -0,03 | 0,05 | -0,01 |
| Развитие желтой ржавчины, % | 0,12 | -0,24 | 0,18 | -0,72* | 0,00 |
| Биологическая эффективность (желтая ржавчина), % | -0,03 | 0,08 | 0,16 | 0,72* | -0,01 |
| Число полос с пустулами желтой ржавчины, шт. | 0,35 | -0,05 | -0,25 | -0,68 | 0,04 |
| Длина полосы с пустулами желтой ржавчины, мм | -0,13 | -0,12 | -0,03 | -0,61 | -0,02 |
| Число пустул в полосе желтой ржавчины, шт. | 0,26 | -0,24 | -0,16 | -0,66 | 0,07 |
| Суммарное число пустул желтой ржавчины на лист, шт. | 0,39 | -0,12 | -0,31 | -0,61 | 0,00 |
| Площадь пустулы желтой ржавчины, мм ² | 0,25 | -0,23 | 0,09 | 0,31 | -0,72* |
| Развитие корневой гнили, % | -0,39 | 0,41 | -0,07 | 0,03 | -0,48 |
| Биологическая эффективность (корневая гниль), % | 0,48 | -0,43 | 0,22 | -0,03 | 0,27 |

При изучении взаимосвязей между метеорологическими условиями, активностью Солнца и изменениями в фитометрических и фитопатологических характеристиках посевов пшеницы при применении биопрепарата Витаплан, СП и КЖ штаммов *B. subtilis* ВКМ В-2604D и *B. subtilis* ВКМ В-2605D были выделены факторы (F₁...F₅), которые объясняли общую дисперсию перемешанных в указанных вариантах опыта на 73...74 %.

При обработке Витапланом, СП в F₁ отмечены высокие положительные факторные нагрузки (0,71...0,93) для комплекса таких фитометрических показателей, как фазы развития растений, высота растений, площадь флагового и предфлагового листа, масса вегетативной части, фитопатологического показателя – число пустул в полосе желтой ржавчины, метеорологических показателей – сумма осадков в июне, июле и августе, гидротермического коэффициента ГТК в июле, относительной влажности воздуха в июне (табл. 1).

В F₁ рост значений перечисленных метеорологических показателей оказывал наибольшее влияние на увеличение выделенных морфометрических характеристик пшеницы, а также способствовал усилению развития желтой ржавчины, характеризуемого числом пустул в полосе. Кроме того, они повышали эффективность микробиологического препарата в отношении элементов продуктивности пшеницы, но снижали его эффективность в отношении желтой ржавчины. В F₃ отмечено, что увеличение площади пятна мучнистой росы было связано с ростом суммы температур (P=0,92), УФ-индекса (P=0,92) и снижением относительной влажности воздуха в июле (P=-0,87). В F₄ выявлена зависимость биологической (P=0,79) и потенциальной урожайности (P=0,83) пшеницы от числа узловых корней пшеницы, в F₅ – сопряженность интенсивности развития (P=-0,79), числа пятен с налетом (P=-0,80) мучнистой росы с числом полос с пустулами желтой ржавчины (P=-0,70), то есть биологическая эффективность препарата Витаплан, СП (P=0,79) снижалась с ростом значений указанных фитопатологических показателей.

При использовании КЖ бактерий (табл. 2) в F₁ с ростом суммы осадков в июне (P=0,71), суммы осадков в августе (P=0,85), ГТК в июле (P=0,88), ГТК в августе (P=0,76), наблюдали увеличение продуктивной кустистости пшеницы (P=0,71), массы корней (P=0,74), длины колоса (P=0,85), числа колосков в колосе (P=0,75), числа зерен в колосе (P=0,72), массы зерен одного колоса (P=0,80), биологической урожайности (P=0,76), потенциальной урожайности (P=0,71). В F₂ показано снижение площади пустулы бурой ржавчины (P=-0,88) с ростом активности Солнца, в частности, характеризующей среднегодовым числом пятен (P=0,93) и УФ-индексом в августе (P=0,87). В F₄ со снижением УФ-индекса в мае (P=-0,70) и уменьшением поражаемости пшеницы желтой ржавчиной (P=-0,72), увеличивалась масса колоса (P=0,71). В F₅ наличие более длинных корней у пшеницы (P=0,82) способствовало усилению поражаемости растений мучнистой росой (P=0,80) и снижению площади пустулы желтой ржавчины (P=-0,72).

Активность микробиологических препаратов в значительной степени зависит от погодных условий. Некоторые из них теряют активность при повышенных температурах [3]. Результаты наших исследований свидетельствуют о большей зависимости эффективности влияния КЖ бактерий на морфобиологические показатели продуктивности и интенсивность развития болезней от метеорологических условий периодов вегетации, по сравнению с действием препарата Витаплан, СП, что связано с возможностью снижения биологической

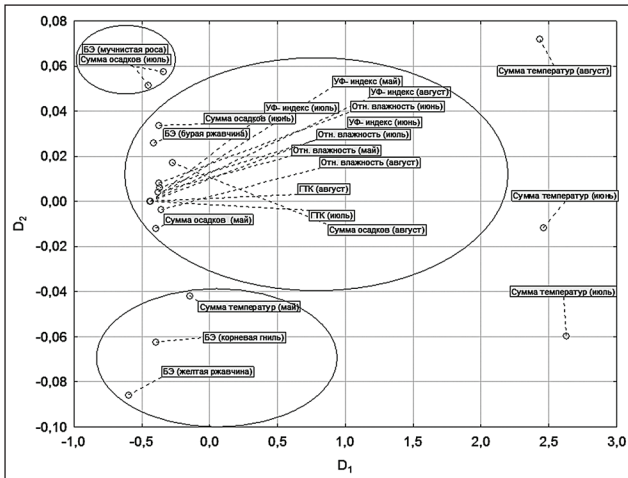


Рис. 3. Многомерное шкалирование данных о биологической эффективности препарата Витаплан, СП и культуральной жидкости штаммов *B. subtilis* ВКМ В-2604D и *B. subtilis* ВКМ В-2605D в отношении болезней пшеницы и метеопказателей периодов фитосанитарного мониторинга (2017–2022 гг.).

активности БАВ при неблагоприятных климатических условиях. При этом значительное влияние на их эффективность оказывала влагообеспеченность вегетационного периода, которую характеризовали сумма осадков в июне и июле–августе, относительная влажность воздуха в июне, ГТК в июле и августе.

По результатам многомерного шкалирования, отражающего взаимосвязи между БЭ препарата Витаплан, СП и КЖ бактерий в отношении болезней пшеницы и метеофакторами периода вегетации, были выявлены сильные взаимосвязи (рис. 3) между изменениями в БЭ бактериальных штаммов в отношении мучнистой росы $[-0,453; 0,051]$ и суммой осадков в июле $[-0,343; 0,057]$; БЭ в отношении желтой ржавчины $[-0,600; -0,086]$, БЭ в отношении корневой гнили $[-0,395; -0,062]$ и суммой температур в мае $[-0,148; -0,042]$; БЭ в отношении бурой ржавчины $[-0,413; 0,026]$ и суммой осадков в мае $[-0,4; -0,012]$, июне $[-0,373; 0,033]$, августе $[-0,275; 0,017]$, относительной влажностью воздуха в мае $[-0,38; 0,004]$, июне $[-0,378; 0,008]$, июле $[-0,369; 0,006]$, августе $[-0,358; -0,004]$; ГТК июля $[-0,440; 0,00005]$, ГТК августа $[-0,440; 0,0001]$, УФ-индекса в мае $[-0,439; 0,00006]$, июне $[-0,438; 0,0001]$, июле $[-0,369; 0,006]$, августе $[-0,439; 0,00006]$. Отмечены взаимосвязи между БЭ в отношении корневой гнили $[-0,395; -0,062]$ и желтой ржавчины $[0,600; -0,086]$.

Методом анализа корреляционных зависимостей между фитометрическими, фитопатологическими показателями посевов пшеницы и метеоусловиями проведения полевого опыта установлено, что наибольшее влияние на биологическую и потенциальную урожайность пшеницы оказала сумма осадков в июне ($\theta_{k+}=83\%$), сумма осадков в июле ($\theta_{k+}=83\%$ и $\theta_{k+}=67\%$), сумма температур в августе ($\theta_{k+}=67\%$ и $\theta_{k+}=100\%$), сумма осадков в августе, ГТК в августе ($\theta_{k+}=83\%$), число пятен на Солнце в августе ($\theta_{k+}=83\%$), относительная влажность воздуха в мае ($\theta_{k+}=83\%$ и $\theta_{k+}=100\%$) и августе ($\theta_{k+}=83\%$). С ростом значений перечисленных метеопказателей эффективность обработки растений изучаемыми препаратами в отношении урожайности пшеницы повышалась (табл. 3).

Величина биологической эффективности микробиологического препарата Витаплан, СП и КЖ штаммов *B.*

subtilis ВКМ В-2604D и *B. subtilis* ВКМ В-2605D в отношении корневой гнили пшеницы снижалась с ростом суммы выпавших осадков в мае ($\theta_{k-}=83\%$) и повышалась с увеличением суммы осадков в июне и июле ($\theta_{k+}=83\%$). Выявлена тенденция преобладания прямых (обратных) корреляционных связей ($\theta_{k+}=\theta_{k-}=63\%$) между биологической эффективностью КЖ бактерий в отношении корневой гнили и суммой температуры выше $10\text{ }^\circ\text{C}$ в мае (суммой температур в июне).

По литературным данным известно, что существенное влияние на проявление антагонистических свойств бактерий оказывает температура. Однако сведения о ее воздействии на интенсивность продуцирования антагонистами соединений, обуславливающих целевую активность штаммов, неоднозначны. У отдельных представителей рода *Bacillus* нижний порог образования антибиотических веществ на глюкозо-дрожжевом экстракте составляет $12\text{ }^\circ\text{C}$, а при росте на почвенном экстракте – $14\text{...}16\text{ }^\circ\text{C}$. Для некоторых бацилл характерен незначительный интервал оптимальных температур ($4\text{...}14\text{ }^\circ\text{C}$), в котором отмечена пролонгированная и максимальная антифунгальная активность [28].

Табл. 3. Многолетняя динамика изменения урожайности пшеницы к контролю при применении культуральной жидкости (КЖ) штаммов *B. subtilis* ВКМ В-2604D и *B. subtilis* ВКМ В-2605D, микробиологического препарата Витаплан, СП в зависимости от некоторых метеопказателей проведения полевых опытов

| Показатель | 2017 г. | 2018 г. | 2019 г. | 2020 г. | 2021 г. | 2022 г. |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Биологическая урожайность (КЖ), г/растение | 151,6 | -25,9 | -6,5 | 60,4 | 13,1 | 38,2 |
| Биологическая урожайность (СП), г/растение | 32,3 | -27,0 | 81,2 | -34,2 | 41,2 | 65,5 |
| Относительная влажность воздуха (май) | 71,6 | 58,9 | 62,0 | 57,6 | 70,0 | 59,0 |
| Сумма осадков (июнь), мм | 119,3 | 16,6 | 33,9 | 66,8 | 10,7 | 34,1 |
| Сумма осадков (июль), мм | 177,9 | 66,7 | 58,0 | 90,6 | 5,7 | 65,7 |
| Сумма температур (август), $^\circ\text{C}$ | 565,3 | 507,7 | 478,0 | 485,4 | 506,5 | 544,9 |
| Сумма осадков (август), мм | 237,4 | 52,9 | 24,9 | 97,2 | 122,5 | 138,5 |
| Относительная влажность воздуха (август), % | 78,9 | 72,5 | 75,0 | 79,8 | 84,0 | 80,0 |
| ГТК (август), ед. | 2,7 | 1,0 | 0,9 | 2,0 | 2,6 | 2,5 |
| Число пятен на Солнце (август), шт. | 32,6 | 8,7 | 0,5 | 7,5 | 22,0 | 75,4 |

Биологическая эффективность изученных бактериальных штаммов в отношении мучнистой росы уменьшалась с понижением суммы температур в июне ($\theta_{k+}=67\%$), повышением суммы осадков в июле ($\theta_{k-}=67\%$), суммы температур ($\theta_{k-}=83\%$) и суммы осадков в августе ($\theta_{k-}=67\%$).

Выявлена тенденция увеличения биологической эффективности бактериальных штаммов к бурой ржавчине с ростом суммы температур в мае ($\theta_{k+}=67\%$), с ростом суммы температур в июне и в июле ($\theta_{k-}=83\%$) и уменьшением суммы выпавших осадков в июне и июле ($\theta_{k+}=67\%$) она снижалась. По данным В. В. Чекмарева [29], факторы погоды оказывают существенное влияние на уровень поражения пшеницы бурой ржавчиной, особенно в мае и июне.

Биологическая эффективность изучаемых препаратов в отношении желтой ржавчины пшеницы снижалась с уменьшением суммы температур в июне ($\theta_{k+}=83\%$), повышением суммы температуры в июле, суммы осадков в июне, июле ($\theta_{k-}=67\%$), ГТК в июле и августе ($\theta_{k-}=83\%$). Развитию желтой ржавчины способствовал рост суммы температур ($\theta_{k+}=100\%$) и снижение суммы осадков в мае ($\theta_{k-}=83\%$), повышение средней темпера-

туры в марте ($\theta_{к+}=83\%$), снижение средней температуры ($\theta_{к-}=83\%$) и суммы осадков в апреле ($\theta_{к-}=67\%$), средней температуры ($\theta_{к-}=100\%$) и суммы осадков в феврале ($\theta_{к-}=83\%$).

Вероятность поражения пшеницы возбудителями болезней определяется, в первую очередь, запасом инфекционного начала на зараженных растениях или растительных остатках, в том числе перезимовавших, сохранившихся под действием различных природно-климатических факторов [30]. В наших исследованиях показано, что метеоусловия периодов, предшествующих проведению фитосанитарного мониторинга пшеницы, действительно оказывали существенное влияние на эффективность бактериальных препаратов в отношении болезней пшеницы. По максимальному числу выявленных коэффициентов корреляции ($\theta_{к+}=\theta_{к-}=100\%$) отмечено преобладание тенденции усиления пораженности растений корневой гнилью с ростом суммы осадков в марте.

Определено увеличение пораженности растений мучнистой росой в вариантах опыта с ростом средней температуры сентября, относительной влажности воздуха в январе–апреле ($\theta_{к+}=100\%$) и снижение – с увеличением суммы осадков в октябре, средней температуры и суммы осадков в декабре, средней температуры в январе, суммы осадков в марте и апреле, УФ-индекса в феврале, апреле, сентябре, октябре, ноябре ($\theta_{к-}=100\%$). Развитие бурой ржавчины усиливалось с ростом суммы осадков в октябре, средней температуры и суммы осадков в декабре, средней температуры в январе, суммы осадков в марте, апреле, УФ-индекса в феврале, сентябре и октябре ($\theta_{к+}=100\%$) и снижалось с повышением средней температуры в сентябре ($\theta_{к-}=100\%$).

Усилению развития желтой ржавчины способствовало повышение относительной влажности воздуха в ноябре, январе–апреле ($\theta_{к+}=100\%$), а снижение – с ростом суммы средней температуры в феврале, УФ-индекса в апреле ($\theta_{к-}=100\%$).

Выводы. Увеличение общей кустистости растений снижало их пораженность бурой и желтой ржавчиной, а также корневой гнилью, но сопровождалось усилением пораженности растений мучнистой росой. При снижении поражения пшеницы корневой гнилью наблюдалось усиление развития мучнистой росы пшеницы ($r=-0,63$, $R=0,03$) и снижение развития бурой ржавчины ($r=0,64$, $R=0,03$).

Эффективность бактериальных штаммов в отношении показателей продуктивности в большей степени зависела от влагообеспеченности вегетационного периода, которую характеризовали сумма осадков в июне–августе, относительная влажность воздуха в июне, ГТК в июле и августе.

Пораженность корневой гнилью усиливалась с ростом суммы осадков в июне и июле, мучнистой росой – с ростом суммы осадков в мае, желтой ржавчиной – с ростом суммы температур в июне. Эффективность бактериальных штаммов в отношении комплекса возбудителей болезней пшеницы возрастала с увеличением суммы осадков в мае (корневая гниль), суммы осадков в августе (мучнистая роса), суммы температур в мае, суммы осадков в августе, ГТК в июле и августе (желтая ржавчина).

Обратные корреляционные связи выявлены между биологической эффективностью исследованных биопрепаратов в отношении развития бурой ржавчины и суммой температур в июне. Отмечены сильные взаимосвязи между биологической эффективностью биопрепаратов в отношении мучнистой росы и суммой осадков в июне; корневой гнили, желтой ржавчины

и суммой температур в мае, бурой ржавчины и суммой осадков (май, июнь, август), относительной влажностью воздуха (май–август), ГТК июля, августа, УФ-индекса (май–август). Выявлена доминирующая тенденция между изменением биологической эффективности бактериальных штаммов по отношению к мучнистой росе в зависимости от суммы осадков в июле, к корневой гнили и желтой ржавчине – от суммы температур в мае.

Литература

1. Павлюшин В. А., Лысов А. К. Фитосанитарная безопасность агроэкосистем и дистанционный фитосанитарный мониторинг в защите растений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 3. С. 69–78.
2. Актуальные проблемы повышения эффективности науки в обеспечении выполнения ключевых задач продовольственной безопасности в зерновом секторе страны / М. В. Архипов, Т. А. Данилова, Л. П. Гусакова и др. // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2018. № 71. С. 5–9.
3. Левитин М. М. Распространение болезней растений в условиях глобального изменения климата // *Сельскохозяйственные науки и Агропромышленный комплекс на рубеже веков*. 2016. № 13. С. 97–101.
4. Михилев А. В. Потепление климата – конкурентное преимущество сельского хозяйства Российской Федерации // *Вестник курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018. № 7. С. 70–73.
5. Влияние климатических условий владимирского оползня на формирование урожайности новых перспективных сортов яровой мягкой пшеницы / Г. В. Игнатова, О. А. Фенова, С. А. Булатова и др. // *Селекция и семеноводство*. 2022. № 4 (102). С. 52–58.
6. Ванькова А. А., Емцев В. Т., Ницэ Л. К. Становление и развитие сельскохозяйственной микробиологии // *Агрохимический вестник*. 2009. № 1. С. 20–23.
7. Микробиологическая защита растений в технологиях фитосанитарной оптимизации агроэкосистем: теория и практика (обзор) // В. А. Павлюшин, И. И. Новикова, И. В. Бойкова // *Сельскохозяйственная биология*. 2020. Т. 55. № 3. С. 421–438.
8. Биологическое обоснование использования индукторов устойчивости на основе хитозана для повышения эффективности биофунгицидов / И. И. Новикова, Э. В. Попова, И. Л. Краснобаева и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2021. Т. 56. № 3. С. 511–522.
9. *Bacillus subtilis IAB/BS03 as a potential biological control agent* / E. Hinarejos, M. Castellano, I. Rodrigo, et al. // *Eur. J. Plant Pathol.* 2016. Vol. 146. P. 597–608. doi: 10.1007/s10658-016-0945-3.
10. *Biological Tool for Crop Improvement through Bio-Molecular Changes in Adverse Environments / R. Radhakrishnan, A. Hashem, Abd E. F. Allah Bacillus: A* // *Front Physiol.* 2017. Vol. 8. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2017.00667/full> (дата обращения: 21.07.2023). doi: 10.3389/fphys.2017.00667.
11. *Comparative proteomic analysis in pea treated with microbial consortia of beneficial microbes reveals changes in the protein network to enhance resistance against Sclerotinia sclerotiorum* / A. Jain, A. Singh, S. Singh, et al. // *J. Plant Physiol.* 2015. Vol. 182. P. 79–94. doi: 10.1016/j.jplph.2015.05.004.
12. Аллагулова Ч. Р., Ласточкина О. В. Снижение уровня окислительного стресса в растениях пшеницы под влиянием эндофитных бактерий в условиях засухи // *Экобиотех.* 2020. Т. 3. № 2. С. 129–134.

13. Mechanism of plant growth promotion elicited by *Bacillus* sp. LKE15 in oriental melon / S. M. Kang, R. Radhakrishnan, K. E. Lee, et al. // *Acta Agric. Scand. Sect. B Soil Plant Sci.* 2015. Vol. 65. P. 637–647. doi: 10.1080/09064710.2015.1040830.
14. Plant growth-promoting rhizobacteria inoculation to enhance vegetative growth, nitrogen fixation and nitrogen remobilisation of maize under greenhouse conditions / K. B. Kuan, R. Othman, K. A. Rahim, et al. // *PLoS ONE.* 2016. Vol. 11. Article e0152478. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0152478> (дата обращения: 21.07.2023). doi.org/10.1371/journal.pone.0152478.
15. Ласточкина О. В. Адаптация и устойчивость растений пшеницы к засухе, опосредованная природными регуляторами роста *Bacillus* spp.: механизмы реализации и практическая значимость (обзор) // *Сельскохозяйственная биология.* 2021. Т. 56. № 5. С. 843–867.
16. Эффективность инокуляции семян яровой пшеницы эндофитными бактериями *Bacillus subtilis* 26Д / Л. И. Пусенкова, С. Р. Гарипова, О. В. Ласточкина и др. // *Проблемы агрохимии и экологии.* 2020. № 3. С. 56–64.
17. Эффективность обработки семян и растений яровой пшеницы и гороха посевного микробиологическими препаратами в модельных и полевых опытах / Л. И. Пусенкова, С. Р. Гарипова, Е. В. Кузина и др. // *Достижения науки и техники АПК.* 2021. Т. 35. № 12. С. 33–37.
18. Завалин А. А. Биопрепараты, удобрения и урожай. М.: ВНИИА Им. Д. Н. Прянишникова, 2005. 302 с.
19. Кожмяков А. П., Белоброва С. Н., Орлова А. Г. Создание и анализ базы данных по эффективности микробных препаратов комплексного действия // *Сельскохозяйственная биология.* 2011. № 3. С. 112–115.
20. Прогнозирование продолжительности вегетационного периода у сортов яровых зерновых культур в условиях изменения климата. / Л. Ю. Новикова, В. Н. Дюбин, И. В. Сеферова и др. // *Сельскохозяйственная биология.* 2012. № 5. С. 78–87.
21. Зуев Е. В., Брыкова А. Н., Кудрявцева Е. Ю. Яровая мягкая пшеница. Результаты многолетнего полевого изучения образцов яровой мягкой пшеницы в условиях Ленинградской области. Каталог ВИР. Город Санкт-Петербург. Издательство: ВИР, 2020. Вып. 917. 71 с. doi 10.30901.978–5–907145–25–2.
22. The Use of Chitosan Salicylate to Increase the Biological Efficiency of Vitaplan against *Cochliobolus sativus*. / I. I. Novikova, E. V. Popova, I. L. Krasnobaeva, et al. // *Applied Biochemistry and Microbiology.* 2022. Vol. 58. No. 3. P. 336–342. doi:10.1134/S0003683822030073.
23. Совместное использование штаммов микроорганизмов и хитозановых комплексов для повышения урожайности пшеницы (*Triticum aestivum* L.) / Л. Е. Колесников, Э. В. Попова, И. И. Новикова и др. // *Сельскохозяйственная биология.* 2019. Т. 54. № 5. С. 1024–1040.
24. 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. doi: 10.15159/ar.21.145.
25. Abbott W. Method of computing the effectiveness of an insecticide // *Econ. Entomol.* 1968. Vol. 8. P. 265–267.
26. Возможные механизмы устойчивости ячменя к мучнистой росе / Б. А. Баташева, Р. А. Абдуллаев, О. Н. Ковалева и др. // *Вестник российской сельскохозяйственной науки.* 2020. № 4. С. 54–57.
27. Устойчивость яровой пшеницы к корневой гнили / М. Койшыбаев, К. Куланбай // *Защита и карантин растений.* 2010. № 7. С. 14–17.
28. Кипрушкина Е. И. Воздействие низкой температуры на динамику численности и проявление биоконтролирующего эффекта бактериями родов *Pseudomonas* и *Bacillus* // *Вестник международной академии холода.* 2007. № 3. С. 34–38.
29. Чекмарев В. В. Новый подход к составлению формул прогноза болезней сельскохозяйственных культур (на примере ржавчинных заболеваний зерновых культур). Тамбов: Принт-сервис, 2016. 186 с.
30. Влияние погодных условий в межфазные периоды вегетации на развитие листовых болезней яровой пшеницы / А. Ю. Кекало, Е. В. Нестерова, М. В. Немченко // *Аграрный вестник Урала.* 2017. № 09 (163). С. 8–15.

Поступила в редакцию 29.03.2023
 После доработки 31.05.2023
 Принята к публикации 22.07.2023