

УДК 632.9:57.021

## БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ШТАММОВ *Bacillus subtilis* И САЛИЦИЛАТА ХИТОЗАНА ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ПШЕНИЦЫ

© 2024 г. И. И. Новикова<sup>2</sup>, Л. Е. Колесников<sup>1, \*</sup>, Э. В. Попова<sup>2</sup>, Б. А. Хассан<sup>3</sup>, Н. С. Прияткин<sup>4</sup>, Д. Ю. Радишевский<sup>1</sup>, И. Л. Краснобаева<sup>2</sup>, Л. А. Хигерович<sup>2</sup>, Ю. Р. Колесникова<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, факультет агротехнологий, почвоведения и экологии, Санкт-Петербург, Пушкин, 196601 Россия

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, лаборатория микробиологической защиты растений, Санкт-Петербург, Пушкин, 196608 Россия

<sup>3</sup>Ministry of Agriculture, Agricultural Research Office, Abo-Ghreib, St. Al-Zaytun, H. 10081, Baghdad, Iraq

<sup>4</sup>Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, 195220 Россия

<sup>5</sup>ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова, Санкт-Петербург, 190031 Россия  
\*e-mail: kleon9@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.08.2023 г.

После доработки 02.11.2023 г.

Принята к публикации 05.11.2023 г.

Показано, что применение при возделывании пшеницы полифункциональных комплексов на основе бактериальных штаммов *Bacillus subtilis* и 0.1%-ного салицилата хитозана приводило к существенному снижению поражаемости растений болезнями: желтой и бурой ржавчиной, мучнистой росой, корневой гнилью и обуславливало рост морфометрических показателей продуктивности. Такая тенденция была связана со значительным влиянием полифункциональных комплексов на увеличение числа первичных и узловых корней; длину узловых корней; продуктивную кустистость; число колосков в колосе, массу зерен одного колоса. Однако эффективность защитных и стимулирующих обработок пшеницы зависела также от комплекса природно-климатических факторов сезонов вегетации пшеницы.

**Ключевые слова:** биопрепараты, салицилат хитозана, бактериальные штаммы, *Bacillus subtilis*, мягкая пшеница, элементы продуктивности, болезни пшеницы

DOI: 10.31857/S0555109924020109 EDN: FZRAGF

Альтернатива химическим средствам защиты растений — использование индукторов болезнестойкости растений, способных стимулировать врожденные механизмы защиты растений, в том числе изменять обмен веществ в неблагоприятную для возбудителя болезни сторону. При этом формирование защитного ответа обусловлено экспрессией генов под действием сигнальных молекул и экзогенных биологически активных веществ — иммуномодуляторов [1, 2]. Перспективный индуктор болезнестойкости растений — хитозан. Однако его биологическая эффективность определяется его составом и свойствами: молекулярной массой, наличием примесей, степенью замещения и др. Чем ниже молекулярная масса полимера, тем легче он проникает в ядра клеток растений, способствуя ускорению морфогенеза, накоплению фитоалексинов и хитиназ, вызывая ускорение роста и повышенную устойчивость к фитопатогенам [3–6].

Хитозан обладает высокой ростостимулирующей и элиситорной активностью, выраженными антибактериальными и фунгицидными свойствами. Он совместим с органическими и микробиологическими средствами защиты, усиливает и пролонгирует их действие, оставаясь безопасным для растений, почвы и человека [7]. Хитозан обладает свойствами биофунгицидов, биобактерицидов и биовирулицидов, тем самым обеспечивая комплексную защиту растений от вредных микроорганизмов. Хитозан — N-деацетилированное производное хитина, основного структурного полимера, входящего, в частности, в состав оболочки насекомых, экзоскелета ракообразных. По химической природе хитозан — это линейный полимер, природный полисахарид, состоящий из связанных между собой 1,4-гликозидными связями D-глюкозамина и N-ацетил-D-глюкозамина [8].

Постоянно ведутся поиски хитинсодержащего сырья, специфичного для отдельных регионов, но основной его источник — отходы от переработки различных ракообразных — крабов, креветок и криля. Альтернативой хитозану, получаемому из панцирей ракообразных, являются хитозан-глюкановые комплексы (ХтГК), выделенные из высших базидиальных грибов [9]. Для практического применения в растениеводстве в России был разработан ряд биопрепаратов на основе хитозана с коммерческими наименованиями “Нарцисс”, “Экогель” и “Агрохит” [3].

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-аммиак-лиазу, пероксидазу, липоксигеназу, супероксиддисмутазу [10]. Высокая биологическая эффективность биопрепаратов на основе бактерий рода *Bacillus* определяется их особенностью активно колонизировать ризосферу растений, синтезировать антибиотики широкого спектра антимикробной активности и долгое время сохраняться в растительном биоценозе в форме эндоспор. Их применение для защиты сельскохозяйственных культур может снизить поражаемость растений многими возбудителями болезней [11].

Бактерии рода *Bacillus*, и в частности *B. subtilis* Z-14, синтезируют липопептидные антибиотики, в том числе итурины, фенгицины и сурфактины [12]. Они оказывают прямое или косвенное ингибирующее действие на возбудителей микозов растений, но не токсичны для самих растений [13]. Липопептидные антибиотики относительно стабильны по своей природе и устойчивы к кислотам и щелочам, что гарантирует длительность их антагонистического действия. Итурины и фенгицины обладают широким спектром действия против фитопатогенных грибов [14]. Штаммы *B. subtilis* способны синтезировать сурфактин и повышать устойчивость пшеницы к болезням [15, 16]. Обработка растений бактериями может индуцировать биосинтез и метаболизм терпеноидов, активность хитиназы, фенилпропаноидов, активизировать механизмы активации защитных сигнальных путей [10].

Однако жизнедеятельность бактерий при различных метеорологических условиях может варьировать, большое влияние на них оказывают внешние факторы, такие как свет, температура и влажность. При определенном сочетании метеофакторов эффективность бактериальных препаратов в полевых условиях нестабильна и может существенно снижаться в отношении вредных организмов [17].

Одно из наиболее приоритетных направлений в практике экологизированного адаптивного земледелия в настоящее время — использование

полифункциональных биопрепаратов, эффективных в отношении широкого спектра фитопатогенов и позволяющих получить качественную сельскохозяйственную продукцию. Подобные препараты могут положительно влиять как на отдельные стороны обмена веществ, так и на функциональное состояние растительного организма в целом [5, 18].

Прогресс в семеноведении тесно связан с техническими инновациями и их доступностью для применения. Кроме того, на основе технологических достижений разрабатываются новые методы оценки качества семян для их тестирования [19]. Инструментальные методы, потенциально пригодные для неинвазивной оценки качества семян, можно разделить на три группы [20]. Первая группа — группа оптических методов, которые включают цифровую оптическую визуализацию [21], мультиспектральную визуализацию [22], измерение флуоресценции хлорофилла [23]. К интроскопическим методам относятся микрофокусная рентгенография [24, 25], компьютерная микротомография [26] и магнитно-резонансная томография [27]. Третью группу составляют электрофизические методы (электрофотография) [28].

Цель настоящей работы — биологическое обоснование эффективности применения полифункциональных комплексов на основе штаммов *B. subtilis* и 0.1%-ного салицилата хитозана при возделывании мягкой пшеницы.

## МЕТОДИКА

Место проведения работы — лаборатория микробиологической защиты растений ФГБНУ ВИЗР, кафедра защиты и карантина растений ФГБОУ ВО СПбГАУ. Экспериментальные исследования выполнены на полях научно-производственной базы “Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР” ФГБНУ “Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова” (ВИР).

Растительным материалом для проведения исследования послужил сорт мягкой пшеницы яровой Ленинградская 6, к-64900 из отдела генетических ресурсов пшеницы ВИР.

Образцы пшеницы были высеваны на делянках площадью 1.0 м<sup>2</sup> рядовым способом посева с междурядьями 15 см и расстоянием в ряду 1–2 см (300 зерен/м<sup>2</sup>). Глубина заделки семян: 5–6 см. Полевой опыт по определению влияния биопрепаратов и хитозановых комплексов на фитосанитарное состояние посевов выполнен в трехкратной повторности.

Материалом для исследований служили штаммы *B. subtilis* И-5, *B. subtilis* ВКМ В-2604D и *B. subtilis* ВКМ В-2605D (Государственная коллекция фитопатогенных микроорганизмов и их вредителей ВИЗР), проявляющие высокую антагонистическую

активность в отношении тест-культур фитопатогенных грибов и бактерий. При глубинном культивировании бактерии выращивали на оптимизированной кукурузно-мелассной среде следующего состава (г/л): кукурузный экстракт — 30, меласса — 15; pH 7.8 (ООО “Каргилл”, ООО “Агроресурс”, Россия) при 27–28°C в течение 72 ч с аэрацией (150 об./мин, шейкер-инкубатор NewBrunswick™ Innova® 44, Германия) в колбах объемом 750 мл с 100 мл среды. Отбор проб и оценку развития культур осуществляли с помощью светового микроскопа Axio Imager A-2 (“Karl Zeiss”, Германия) один раз в сутки. Титры жизнеспособных клеток определяли методом серийных разведений с высевом на агаризованные среды: агар Чапека (“HiMedia Laboratories”, Индия); сухой питательный агар СПА (АО “НПО “Микроген”, Россия).

В полевых опытах в качестве стандарта использовали биопрепарат Витаплан СП, разработанный в ВИЗР на основе высокоактивных штаммов *Bacillus subtilis* (ВКМ В-2604D и ВКМ В-2605D), который широко используется в России для защиты сельскохозяйственных культур от грибных и бактериальных болезней.

Схема опыта предусматривала следующие варианты:

- без обработки (контроль);
- Витаплан, СП (стандарт, титр жизнеспособных клеток  $10^{10}$  КОЕ/г);
- Культуральная жидкость (КЖ) штамма *B. subtilis* И-5 (титр жизнеспособных клеток  $10^{10}$  КОЕ/мл);
- КЖ штаммов *B. subtilis* ВКМ В-2604D и *B. subtilis* ВКМ В-2605D в соотношении 1 : 1 (КЖ *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D), титр жизнеспособных клеток  $10^{10}$  КОЕ/мл;
- полифункциональный комплекс *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ (титр жизнеспособных клеток  $10^{10}$  КОЕ/мл), салицилат хитозана (СХ) в концентрации 0.1% добавляли в питательную среду для культивирования штаммов (титр жизнеспособных клеток  $10^{10}$  КОЕ/мл);
- полифункциональный комплекс *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ (титр жизнеспособных клеток  $10^{10}$  КОЕ/мл), салицилат хитозана в концентрации 0.1% добавляли в питательную среду для культивирования штамма.

В условиях полевого опыта использовали препараты в разведении 1 : 10. Проводили полусухое протравливание семян яровой мягкой пшеницы (сорт Ленинградка 6, к-64900) перед посевом при норме применения 2.5 мл/100 г семян и трехкратное опрыскивание вегетирующих растений рабочими растворами препаратов при норме применения 100 мл/м<sup>2</sup>. Стандарт Витаплан, СП использовали при норме применения 2 мг/100 г семян для предпосевной обработки и 40 мг/10 м<sup>2</sup> для опрыскивания

растений в соответствии с регламентом применения Витаплана, СП (“Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных для применения на территории РФ”, 2023 г.).

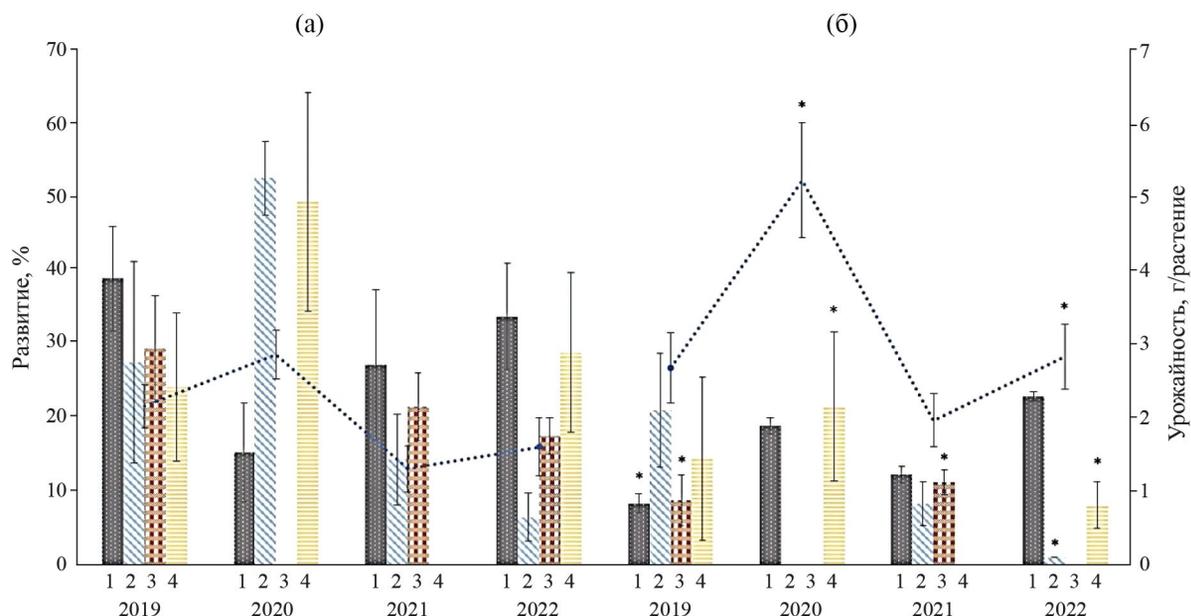
Метеорологические данные были предоставлены отделом агрометеорологии ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова (ВИР). Данные по общему числу пятен на Солнце и среднемесячным числам Вольфа были предоставлены Королевской обсерваторией Бельгии (SILSO, World Data Center) и Дальневосточным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Россия).

Для микрофокусной съемки семян использовали аппаратно-программный комплекс на основе передвижной рентгенодиагностической установки ПРДУ-02, применяемой для контроля качества семян (совместная разработка ФГБНУ АФИ и Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ им. В.И. Ульянова-Ленина; предприятие-изготовитель ЗАО “ЭЛТЕХ–Мед”, Санкт-Петербург, Россия). Коэффициент увеличения изображения при рентгеновской съемке составлял 3.0½. Программная обработка цифровых рентгеновских изображений семян пшеницы осуществлялась в программе “ВидеоТест–Морфология 5.2”. Анализировали следующие параметры изображений: средний размер проекции семени (мм), среднюю яркость рентген-проекции семени (ед. яркости), округлость семени (относительные единицы, отн. ед.), удлиненность семени (относительные единицы).

Подробное описание методов фитопатологического и фитометрического анализов посевов пшеницы, а также алгоритмы статистической обработки данных эксперимента приведены в статьях [29, 30].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследований (2019–2022 гг.) было проанализировано влияние природно-климатических факторов на динамику изменения фитометрических и фитопатологических характеристик посевов пшеницы при применении полифункционального комплекса *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ. Максимальное увеличение урожайности пшеницы (на 82.6% по сравнению с контролем) наблюдали в 2020 г., что было связано с существенным ростом продуктивности кустистости растений и массы колоса — на 58.7 и 26.9% соответственно. Кроме того, в 2020 г. при его применении зарегистрировано наибольшее снижение пораженности растений мучнистой росой и желтой ржавчиной по сравнению с контролем — на 52.5 и 27.8% соответственно (рис. 1). При этом пораженность растений корневой гнилью была незначительна. Метеоусловия вегетационного периода 2020 г. отличались максимальным числом выпавших осадков



**Рис. 1.** Поражаемость пшеницы болезнями и ее урожайность в контрольном варианте (а) и при использовании полифункционального комплекса *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ (б) в 2019–2022 гг.: 1 — развитие корневой гнили; 2 — развитие мучнистой росы; 3 — развитие бурой ржавчины; 4 — развитие желтой ржавчины; 5 — урожайность пшеницы. \*Различия достоверны согласно 95%-ному доверительному интервалу для средних измерений показателя.

в мае ( $O_{\text{май}} = 61.3$  мм), июне ( $O_{\text{июнь}} = 66.8$  мм), июле ( $O_{\text{июль}} = 90.6$  мм), а в августе значения метеопказателя составило:  $O_{\text{авг/сут}} = 97.2$  мм. Сумма температур в мае —  $T_{\text{май}} = 119.6^{\circ}\text{C}$ , а в июне-августе —  $528.4$ ,  $499.9$  и  $485.4^{\circ}\text{C}$  соответственно. Теплолагообеспеченность в вегетационный период в июле и августе была на уровне переувлажнения (гидротермический коэффициент:  $\text{ГТК} = 2.0$ ).

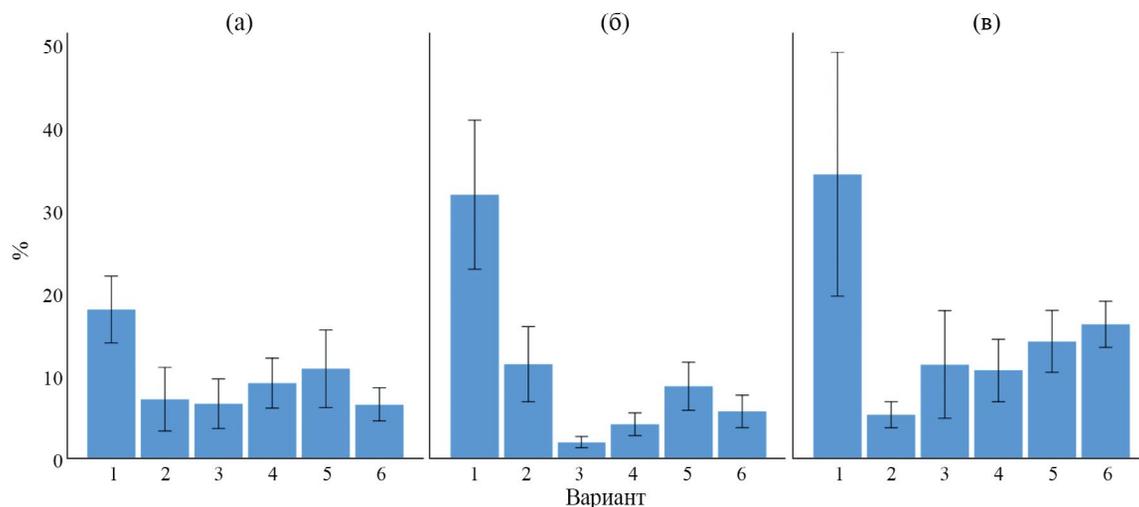
Кроме того, существенный рост урожайности пшеницы на 76.4% при применении полифункционального комплекса *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ был выявлен также и в 2022 г. Вегетационный период 2022 г. отличался минимальным числом выпавших осадков в мае ( $O_{\text{май}} = 4.3$  мм) и максимальным — в августе ( $O_{\text{авг}} = 138.5$  мм). При этом в августе сумма температур была максимальной  $T_{\text{авг/сут}} = 544.9^{\circ}\text{C}$ . Значения ГТК в июле и августе существенно варьировали:  $\text{ГТК}_{\text{июль}} = 1.2$  (достаточное увлажнение);  $\text{ГТК}_{\text{август}} = 2.5$  (переувлажнение), годовое число пятен на Солнце было максимальным:  $N_s = 83.1$ .

Методом непараметрического корреляционного анализа изучена метеорологическая обусловленность изменений в фитопатологических и морфометрических показателях продуктивности пшеницы при применении полифункционального комплекса *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ, а также их причинно-следственные связи с активностью Солнца. Выявлены факторы, определяющие наибольшее экологическое варьирование указанных показателей

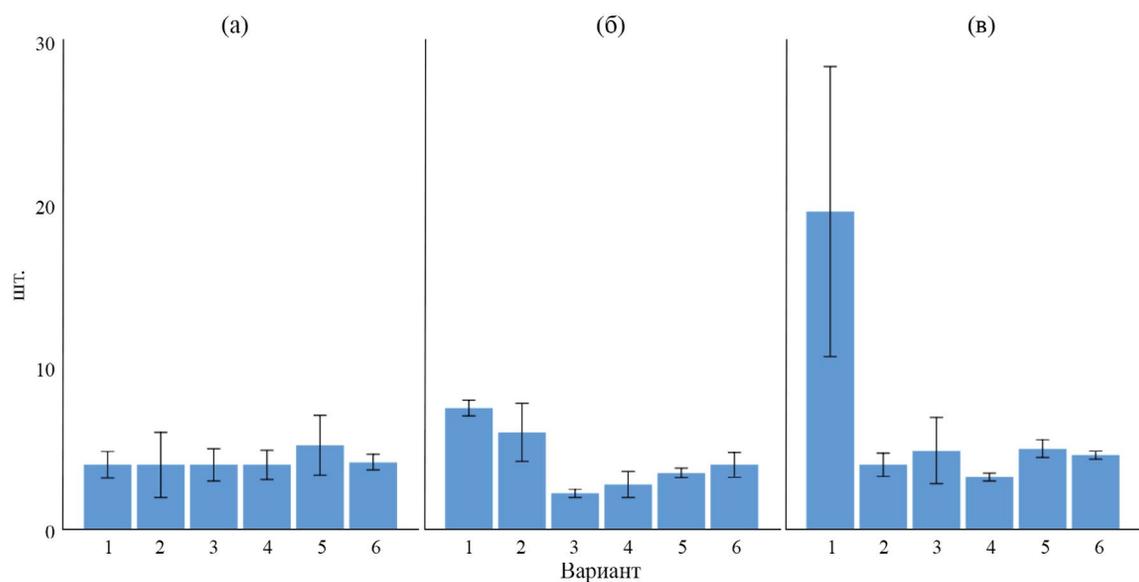
по годам исследования, характеризующие эффективность применения полифункционального комплекса. Существенное влияние на повышение эффективности полифункционального комплекса в отношении пораженности пшеницы мучнистой росой, характеризуемой площадью пятна с налетом, оказала сумма осадков в июле, с ростом величины которой наблюдали снижение данного показателя патогенеза ( $r = -0.99$ ).

Зарегистрировано снижение эффективности полифункционального комплекса *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ в отношении развития мучнистой росы ( $r = 0.99$ ) и увеличение в отношении площади пустулы бурой ржавчины ( $r = -0.99$ ) с увеличением суммы температур в августе. Величины относительных изменений числа пятен с налетом мучнистой росы и площади пустулы бурой ржавчины при применении полифункционального комплекса по сравнению с контролем обратно коррелировали с годовым числом пятен на Солнце ( $r = -0.99$ ). Рост УФ-индекса в июне оказывал положительное влияние на развитие бурой ржавчины пшеницы, что обуславливалось снижением эффективности полифункционального комплекса к болезни ( $r = 0.99$ ).

Выявлены прямые корреляционные связи при  $P < 0.05$  между изменением урожайности пшеницы  $Y_w$  при применении полифункционального комплекса *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ и суммой температур в августе ( $r = 0.96$ ), годовым числом пятен на Солнце ( $r = 0.97$ ),



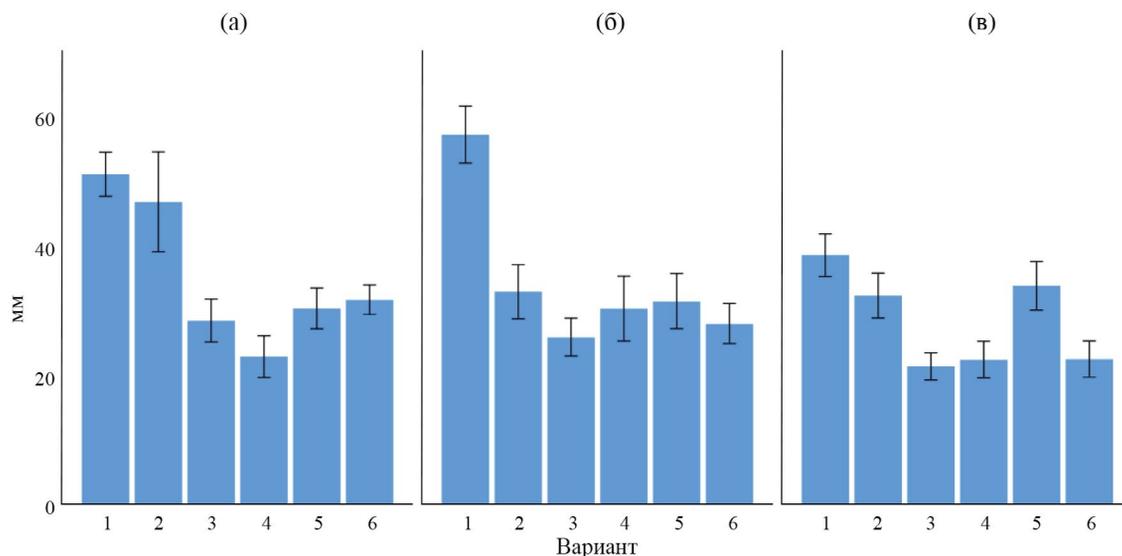
**Рис. 2.** Интенсивность развития желтой ржавчины (%) пшеницы при использовании бактериальных штаммов *B. subtilis* (2, 6) и полифункциональных комплексов с 0.1% CX (4, 5), 2022 г.: 1 — контроль (вода); 2 — *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D; 3 — Витаплан, СП; 4 — *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% CX; 5 — *B. subtilis* И-5 + 0.1% CX; 6 — *B. subtilis* И-5. (а, б, в — повторности опыта).



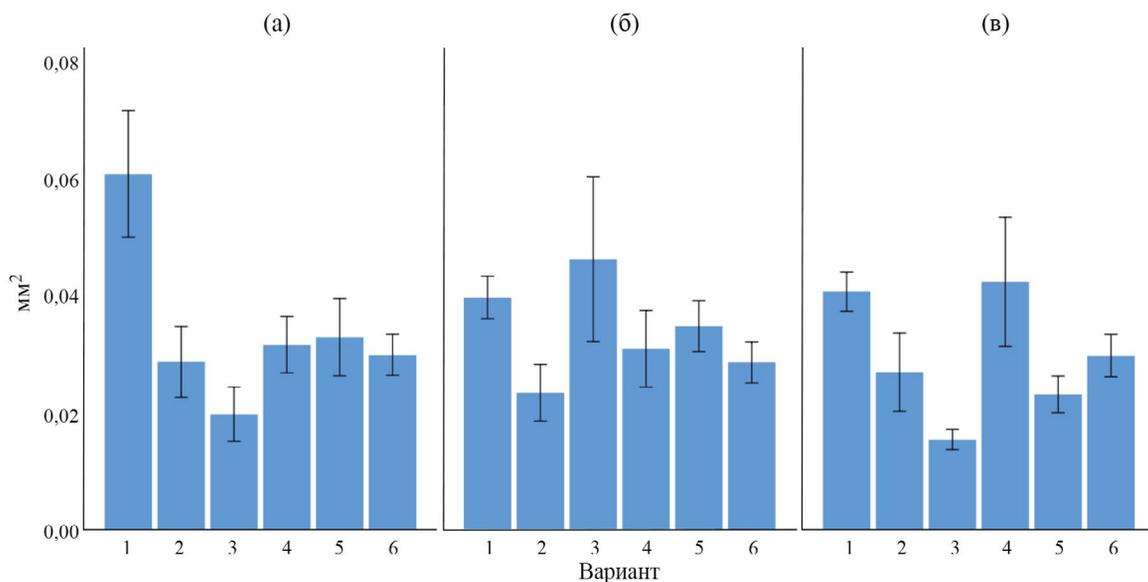
**Рис. 3.** Число полос с пустулами желтой ржавчины пшеницы при использовании бактериальных штаммов *B. subtilis* (2, 6) и полифункциональных комплексов с 0.1% CX (4, 5), 2022 г.: 1 — контроль (вода); 2 — *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D; 3 — Витаплан, СП; 4 — *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% CX; 5 — *B. subtilis* И-5 + 0.1% CX; 6 — *B. subtilis* И-5 (а, б, в — повторности опыта).

числом пятен на Солнце в июле ( $r = 0.96$ ). Наибольшее число достоверных коэффициентов корреляции выявлено между суммой температур в июле, УФ-индексом в июле и относительными изменениями в значениях морфометрических показателей продуктивности пшеницы при применении полифункционального комплекса: фаза цветения ( $r = 0.98-0.99$ ), площадь предфлагового листа ( $r = 0.99$ ), длина колоса ( $r = 0.98-0.99$ ). Однако его эффективность снижалась в отношении массы колоса с увеличением суммы температур в июле

( $r = -0.98$ ) и УФ-индекса в июле ( $r = -0.95$ ). Рост величины ГТК в августе определял увеличение числа зерен в колосе ( $r = 0.97$ ) в указанном варианте опыта, но при этом приводил к снижению длины узловых корней ( $r = -0.97$ ). Понижение суммы температур и УФ-индекса в мае влияло на рост вегетативной массы растений ( $r = -0.96$ ), общей кустистости растений ( $r = -0.97$ ) по сравнению с контролем при применении полифункционального комплекса, но приводило к снижению числа колосков в колосе ( $r = 0.96$ ).



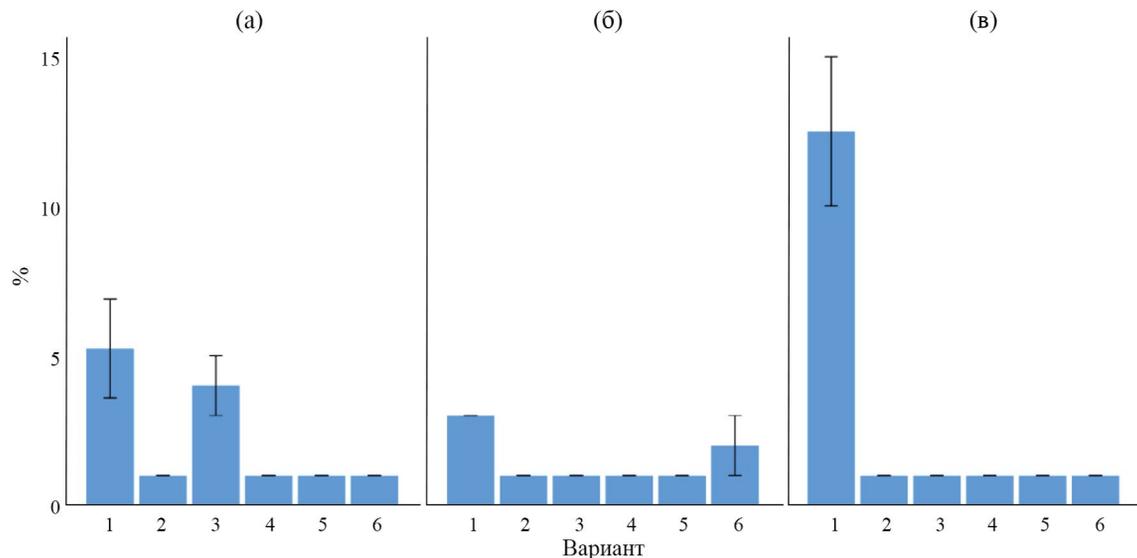
**Рис. 4.** Длина полосы с пустулами желтой ржавчины пшеницы при использовании бактериальных штаммов *B. subtilis* (2, 6) и полифункциональных комплексов с 0.1% CX (4, 5), 2022 г.: 1 — контроль (вода); 2 — *B. subtilis* VKM B-2604D + VKM B-2605D; 3 — Витаплан, СП; 4 — *B. subtilis* VKM B-2604D + VKM B-2605D + 0.1% CX; 5 — *B. subtilis* И-5 + 0.1% CX; 6 — *B. subtilis* И-5 (а, б, в — повторности опыта).



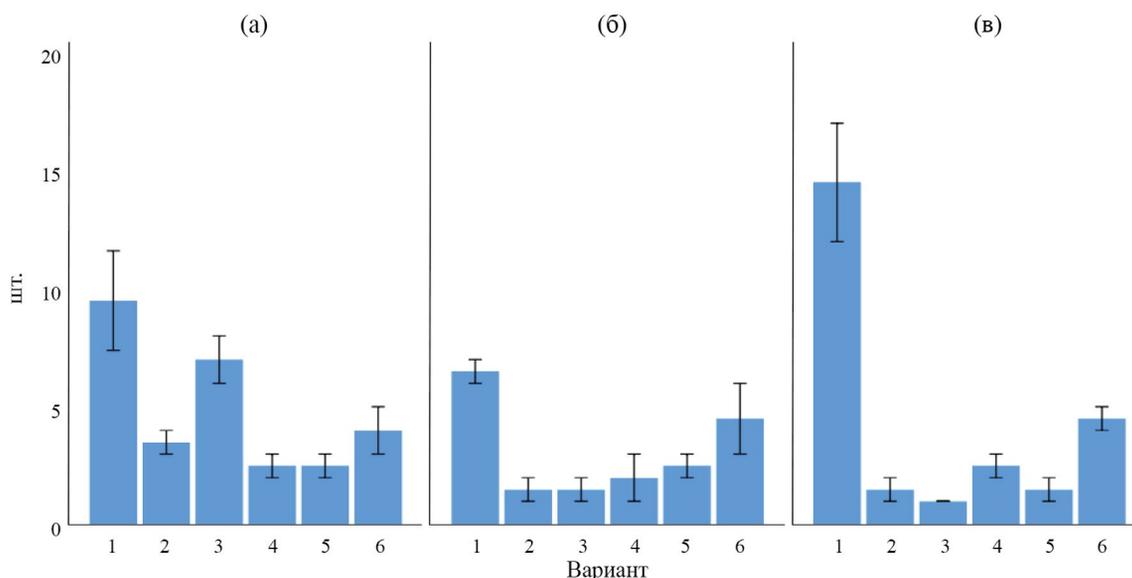
**Рис. 5.** Площадь пустулы желтой ржавчины пшеницы при использовании бактериальных штаммов *B. subtilis* (2, 6) и полифункциональных комплексов с 0.1% CX (4, 5), 2022 г.: 1 — контроль (вода); 2 — *B. subtilis* VKM B-2604D + VKM B-2605D; 3 — Витаплан, СП; 4 — *B. subtilis* VKM B-2604D + VKM B-2605D + 0.1% CX; 5 — *B. subtilis* И-5 + 0.1% CX; 6 — *B. subtilis* И-5 (а, б, в — повторности опыта).

На втором этапе исследований (2022 г.) осуществлен сравнительный анализ эффективности: полифункционального комплекса *B. subtilis* VKM B-2604D + VKM B-2605D + 0.1% CX, биопрепарата Витаплан, СП, бактериальных штаммов *B. subtilis* VKM; *B. subtilis* B-2604D, *B. subtilis* VKM B-2605D, *B. subtilis* И-5, полифункционального комплекса *B. subtilis* И-5 + 0.1% CX. В 2022 г.

во всех вариантах опыта с использованием микробиологических препаратов и полифункциональных комплексов отмечено существенное снижение интенсивности развития желтой ржавчины на посевах пшеницы (рис. 2). В среднем по трем повторностям было установлено, что наибольшей биологической эффективностью в отношении болезни отличались полифункциональный комплекс



**Рис. 6.** Интенсивность развития мучнистой росы (%) пшеницы при использовании бактериальных штаммов *B. subtilis* (2, 6) и полифункциональных комплексов с 0.1% СХ (4, 5), 2022 г.: 1 — контроль (вода); 2 — *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D; 3 — Витаплан, СП; 4 — *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ; 5 — *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ; 6 — *B. subtilis* И-5 (а, б, в — повторности опыта).

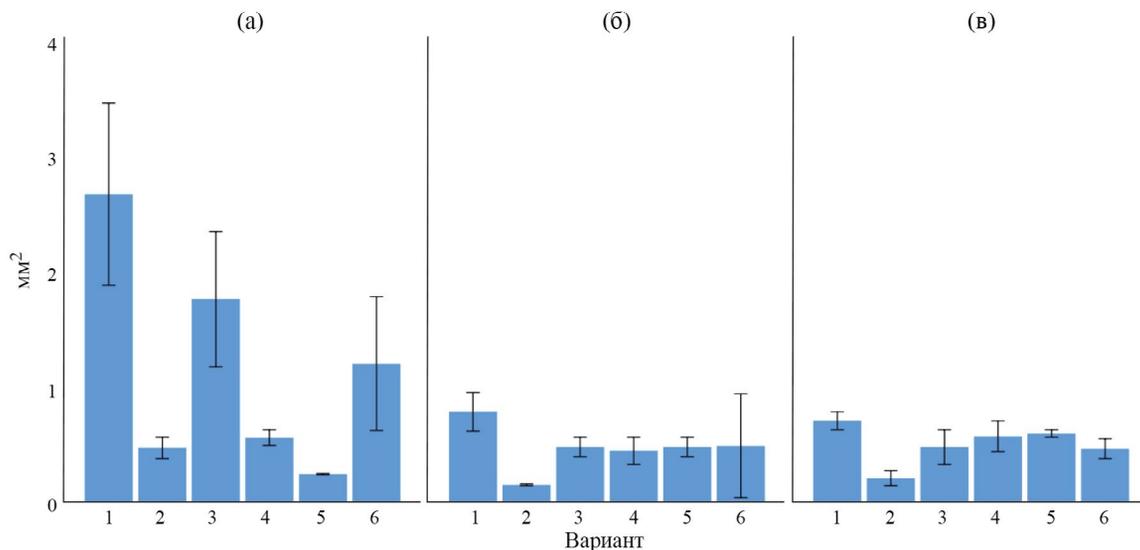


**Рис. 7.** Число пятен с налетом мучнистой росы (%) пшеницы при использовании бактериальных штаммов *B. subtilis* (2, 6) и полифункциональных комплексов с 0.1% СХ (4, 5), 2022 г.: 1 — контроль (вода); 2 — *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D; 3 — Витаплан, СП; 4 — *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ; 5 — *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ; 6 — *B. subtilis* И-5 (а, б, в — повторности опыта).

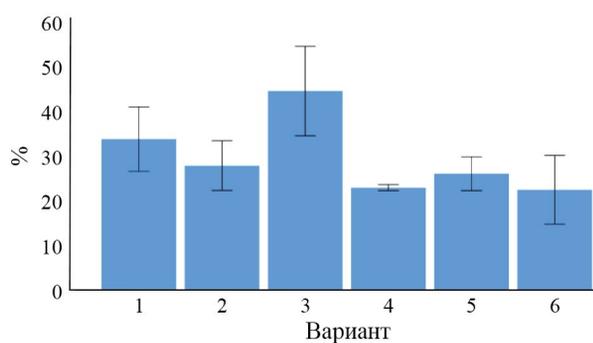
*B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ, а также бактериальные штаммы *B. subtilis* ВКМ В-2604D, *B. subtilis* ВКМ В-2605D и биопрепарат “Витаплан, СП”. В указанных вариантах опыта по сравнению с контролем развитие желтой ржавчины снижалось на 21–22% (биологическая эффективность БЭ = 72–73%). При использовании полифункционального комплекса *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ развитие болезни снизилось на 18.5%

относительно контроля (БЭ 62.7%), а в варианте опыта с *B. subtilis* И-5 — на 18.8% (БЭ 63.7%).

Минимальное значение числа полос желтой ржавчины на флаговом листе,  $N_{пж} = 3.31 \pm 0.41$  шт., было выявлено в варианте опыта *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D (рис. 3), что было на 76.2% меньше, чем в контроле ( $N_{пж} = 13.9 \pm 2.53$  шт.). При использовании полифункционального комплекса *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ число



**Рис. 8.** Площадь пятна с налетом мучнистой росы (%) пшеницы при использовании бактериальных штаммов *B. subtilis* (2, 6) и полифункциональных комплексов с 0.1% CX (4, 5). 2022 г.: 1 — контроль (вода); 2 — *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D; 3 — Витаплан, СП; 4 — *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% CX; 5 — *B. subtilis* И-5 + 0.1% CX; 6 — *B. subtilis* И-5 (а, б, в — повторности опыта).

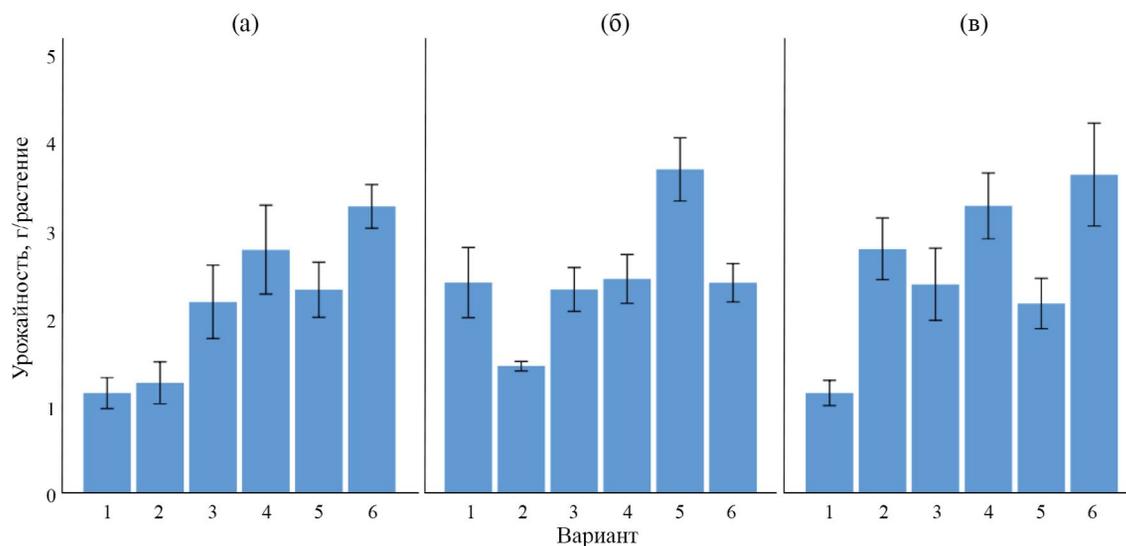


**Рис. 9.** Развитие корневой гнили (%) пшеницы при использовании бактериальных штаммов *B. subtilis* (2, 6) и полифункциональных комплексов с 0.1% CX (4, 5), 2022 г.: 1 — контроль (вода); 2 — *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D; 3 — Витаплан, СП; 4 — *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% CX; 5 — *B. subtilis* И-5 + 0.1% CX; 6 — *B. subtilis* И-5.

полос с пустулами желтой ржавчины снизилось на 66.6% относительно контроля.

Наибольшее снижение длины полосы с пустулами желтой ржавчины было отмечено в варианте опыта Витаплан, СП (на 45.2%) и *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% CX (на 43.5%). При применении комплекса *B. subtilis* И-5 + 0.1% CX величина показателя снизилась по сравнению с контролем на 26.5% (рис. 4).

После применения биопрепарата Витаплан, СП и бактериальных штаммов *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D отмечено наибольшее снижение значений площади пустулы желтой ржавчины (рис. 5). В данном варианте опыта изменение фитопатологического показателя составило 32–38%. В вариантах *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% CX – 12.8%, *B. subtilis* И-5 + 0.1% CX – 21.0%.



**Рис. 10.** Урожайность пшеницы (г/растение) при использовании бактериальных штаммов *B. subtilis* (2, 6) и полифункциональных комплексов с 0.1% СХ (4, 5), 2022 г.: 1 — контроль (вода); 2 — *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D; 3 — Витаплан, СП; 4 — *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ; 5 — *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ; 6 — *B. subtilis* И-5. Повторности опыта: а — первая, б — вторая, в — третья.

Определено существенно снижение развития мучнистой росы во всех вариантах опыта при применении бактериальных штаммов и полифункциональных комплексов (рис. 6). Биологическая эффективность полифункциональных комплексов *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ и *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ в отношении болезни составила 92,8%, а развитие болезни снизилось на 12,8%.

В наибольшей степени снизилось число пятен с налетом мучнистой росы — на 87–88%, а также их площадь — на 75–86,9% в вариантах опыта *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D, *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ, *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ (рис. 7 и 8).

Выявлена тенденция снижения интенсивности развития корневой гнили пшеницы в вариантах опыта: Витаплан, КЖ — на 5,9%; *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ — на 7,7%; *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ — на 10,8%; *B. subtilis* И-5 — на 11,3% (рис. 9).

Снижение поражаемости пшеницы болезнями при применении бактериальных штаммов *B. subtilis* и полифункциональных комплексов с 0.1% СХ оказало существенное влияние на рост биологической  $Y_b$  (рис. 10) и потенциальной урожайности  $Y_w$  (рис. 11). В среднем по трем повторностям наибольший рост урожайности  $Y_b = 69–93\%$  и  $Y_w = 86–92\%$  по сравнению с контролем зарегистрирован в вариантах опыта с использованием полифункциональных комплексов: *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ, *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ, а также в варианте *B. subtilis* И-5.

При использовании биопрепарата Витаплан, СП увеличение урожайности составило:  $Y_b = 42.7\%$  и  $Y_w = 44.1\%$ .

Особенности изменений морфометрических показателей продуктивности мягкой пшеницы при использовании бактериальных штаммов *B. subtilis* и полифункциональных комплексов с 0.1% СХ приведены в табл. 1. В вариантах опыта с применением полифункциональных комплексов: *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ и *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ отмечен рост 33,3 и 38,1% показателей к контролю соответственно. Однако максимальное увеличение морфометрических показателей продуктивности (57,1%) отмечено в варианте опыта с *B. subtilis* И-5, показатель для Витаплан, СП — 28,6%; *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D — 42,9%. При этом варианты опытов по убыванию величины относительного роста показателей, характеризующих только структуру колоса, было *B. subtilis* И-5–55,6% < *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ = *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D — 44,4% < Витаплан, СП — 11,1%.

При применении полифункциональных комплексов выявлен максимальный рост значений следующих морфометрических показателей по сравнению с другими вариантами опыта: *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ — число первичных корней на 39,6%; число узловых корней на 54,7%; длина узловых корней на 21,8%; продуктивная кустистость на 57,3%; число колосков в колосе на 6,6%; *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ — масса зерен одного колоса на 18,8% с меньшим на 0,9% числом пустых колосков в колосе.

Таблица 1. Морфометрические показатели продуктивности мягкой пшеницы при использовании бактериальных штаммов *B. subtilis*

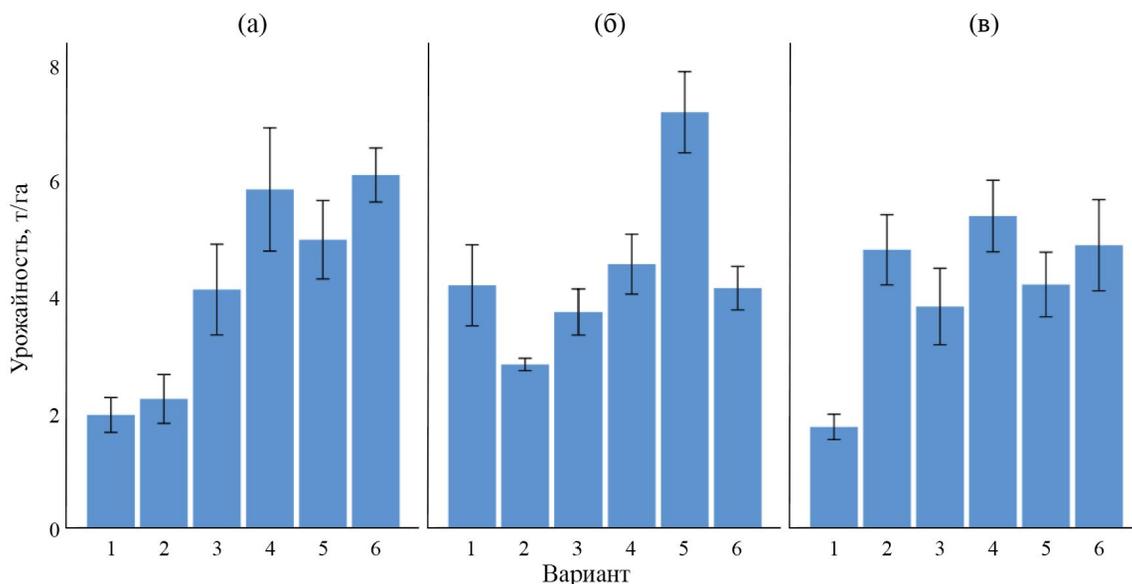
и полифункциональных комплексов с 0.1%-ным салицилатом хитозана

Варианты опыта	Фаза растения, балл	Высота растения, см	Число первичных корней, шт.	Длина первичных корней, мм	Длина узловых корней, шт.	Число узловых корней, мм	Продуктивная кустистость	Общая кустистость	Площадь флага-листа, см <sup>2</sup>
Контроль (вода)	69.2 ± 0.6	75.0 ± 1.9	5.2 ± 0.4	45.6 ± 3.0	13.6 ± 1.3	44.7 ± 2.6	1.7 ± 0.1	2.0 ± 0.2	3.4 ± 0.1
<i>B. subtilis</i> ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D	61.5* 1.4	75.9 ± 4.1	6.1 ± 0.5	66.1 ± 4.1	16.0 ± 1.3	38.5 ± 2.6	1.8 ± 0.2	2.9** ± 0.3	6.7** ± 0.8
Витаплан. СП	67.5* ± 0.6	74.9 ± 2.0	5.9 ± 0.3	52.9 ± 3.6	17.2** ± 1.2	46.9 ± 3.2	2.3** ± 0.2	3.1** ± 0.2	3.6 ± 0.1
<i>B. subtilis</i> ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% CX	67.9 ± 0.7	72.5 ± 2.2	5.9 ± 0.4	59.7** ± 3.9	15.8 ± 1.1	44.7 ± 3.3	2.3** ± 0.3	3.5** ± 0.3	3.5 ± 0.2
<i>B. subtilis</i> И-5 + 0.1% CX	63.4* ± 1.0	71.4 ± 2.4	7.2** ± 0.3	59.5** ± 3.4	21.1** ± 1.8	54.5** ± 3.6	2.7** ± 0.2	3.6** ± 0.3	3.3 ± 0.2
<i>B. subtilis</i> И-5	65.9* ± 1.0	75.3 ± 2.8	6.2 ± 0.5	59.3** ± 4.7	15.9 ± 1.3	49.2 ± 3.1	2.6** ± 0.2	3.2** ± 0.3	3.7 ± 0.2

Продолжение табл. 1

Варианты опыта	Площадь предфлага-листа, см <sup>2</sup>	Масса корней, г	Масса вегетивной части, г	Длина колоса, мм	Число колосков в колосе	Масса колоса, г	Масса зерен одного колоса, г	Масса 1000 зерен, г	Число зерен в колосе	Число зерен в колоске колоса	Вес зерен в колоске колоса, г	Пустые колоски в колосе, %
Контроль (вода)	5.2 ± 0.2	0.7 ± 0.1	1.3 ± 0.1	70.9 ± 1.8	15.0 ± 0.2	0.5 ± 0.0	1.1 ± 0.1	32.4 ± 0.9	32.7 ± 1.8	2.2 ± 0.1	0.1 ± 0.0	1.4 ± 0.2
<i>B. subtilis</i> ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D	8.1** ± 0.7	1.2** ± 0.1	2.7** ± 0.2	78.5** ± 1.6	15.8** ± 0.3	0.7** ± 0.0	1.2 ± 0.1	36.5** ± 1.0	32.3 ± 2.4	2.2 ± 0.1	0.1 ± 0.0	1.5 ± 0.3
Витаплан. СП	5.5 ± 0.2	1.2** ± 0.1	1.6** ± 0.1	74.7 ± 1.6	15.7** ± 0.2	0.6 ± 0.0	1.0 ± 0.1	32.3 ± 1.1	31.0 ± 1.4	2.1 ± 0.1	0.1 ± 0.0	0.9 ± 0.2
<i>B. subtilis</i> ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% CX	5.0 ± 0.2	1.0 ± 0.1	1.6** ± 0.1	73.4 ± 1.6	15.5 ± 0.2	0.7 ± 0.1	1.2** ± 0.1	36.0** ± 1.0	34.4 ± 1.3	2.3 ± 0.1	0.1** ± 0.0	0.9* ± 0.2
<i>B. subtilis</i> И-5 + 0.1% CX	4.9 ± 0.2	0.8 ± 0.1	1.5** ± 0.1	72.6 ± 1.4	16.0** ± 0.2	0.4 ± 0.0	1.0 ± 0.1	33.8 ± 1.2	29.1 ± 1.2	2.1* ± 0.1	0.1* ± 0.0	1.4 ± 0.3
<i>B. subtilis</i> И-5	6.1** ± 0.4	1.1** ± 0.1	1.9** ± 0.1	76.6** ± 1.4	15.6 ± 0.2	0.7** ± 0.0	1.2** ± 0.1	36.4** ± 0.8	33.3 ± 1.1	2.5** ± 0.1	0.1** ± 0.0	1.2 ± 0.3

\*Различия с контролем существенно меньше при  $P < 0.05$ . \*\*Различия с контролем существенно больше при  $P < 0.05$ .



**Рис. 11.** Урожайность пшеницы (т/га) при использовании бактериальных штаммов *B. subtilis* (2, 6) и полифункциональных комплексов с 0.1% СХ (4, 5), 2022 г.: 1 — контроль (вода); 2 — *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D; 3 — Витаплан, СП; 4 — *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ; 5 — *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ; 6 — *B. subtilis* И-5 (а, б, в — повторности опыта).

Определено существенное увеличение массы зерен в колоске колоса на 15.1% при применении полифункционального комплекса *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ, а также в варианте опыта со штаммом *B. subtilis* И-5 — на 15.5%. Снижение показателя на 14.2% выявлено при применении полифункционального комплекса *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ. Существенный рост числа зерен в колоске колоса на 10.8% отмечен в варианте *B. subtilis* И-5, тенденция роста на 3.8% — в варианте *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ.

Результаты морфометрической и рентгенографической оценки полученных семян пшеницы при обработке растений бактериальными штаммами и полифункциональными комплексами

представлены в табл. 2. После обработки растений бактериальными штаммами и полифункциональными комплексами на основе 0.1%-ного СХ достоверно увеличивался средний размер получаемых семян, особенно варианте *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ, а также округлость зерен — в вариантах *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D и *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ. Удлиненность зерен, напротив, снижалась достоверно лишь в варианте *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ. Средняя яркость рентген-проекции семян достоверно увеличивалась в варианте *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ и снижалась в варианте *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D и Витаплан, СП.

По данным [31], параметры прорастания тесно связаны с морфометрическими параметрами семян, которые могут определяться и с помощью

**Таблица 2.** Результаты морфометрической и рентгенографической оценки семян пшеницы при обработке растений бактериальными штаммами и полифункциональными комплексами

Вариант опыта	Показатель			
	Средний размер, мм	Средняя яркость рентген-проекции, ед. яркости	Округлость, отн. ед.	Удлиненность, отн. ед.
Контроль (вода)	4.97 ± 0.042	135.4 ± 0.61	0.508 ± 0.005	1.990 ± 0.0188
<i>B. subtilis</i> ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D	4.91 ± 0.043	133.7 ± 0.62*	0.520 ± 0.006*	1.957 ± 0.0196
Витаплан СП	5.16 ± 0.076*	132.1 ± 0.84*	0.507 ± 0.008	2.007 ± 0.0288
<i>B. subtilis</i> ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ	5.04 ± 0.040	134.7 ± 0.57	0.510 ± 0.005	1.978 ± 0.0188
<i>B. subtilis</i> И-5 + 0.1% СХ	5.07 ± 0.038*	136.8 ± 0.58*	0.520 ± 0.005*	1.951 ± 0.0186*
<i>B. subtilis</i> И-5	4.99 ± 0.083	136.4 ± 1.11	0.510 ± 0.008	1.980 ± 0.0426

\* Различия существенны при  $p < 0.05$  по сравнению с контролем.

рентгенографического анализа: большие семена прорастали раньше и показали лучшее прорастание по сравнению с мелкими в лабораторных условиях.

Согласно работе [32], оптические характеристики рентгенограмм важны для обеспечения качества семян. По данным [33], параметр относительной оптической плотности позволяет делать выводы относительно плотности внутренних тканей семян и, следовательно, относительно физиологического качества семян. При формировании зерна в неблагоприятных условиях увеличивается количество внешних оболочек и снижается объём эндосперма. С увеличением округлости зерен их посевные качества ухудшались, а с увеличением удлиненности зерен — наоборот улучшались [34]. Можно предположить, что удлиненные зерна имеют более полноценно сформированный зародыш.

Таким образом, следует отметить, что в последние годы усилия многих исследователей направлены на разработку методов повышения эффективности биопрепаратов. Как показали результаты настоящей работы, этой цели можно достичь путем повышения индуцирующей активности штамма-продуцента путем включения в состав препаративной формы природных или синтетических активаторов болезнестойчивости. Это направление исследований активно развивается в лаборатории микробиологической защиты ФГБНУ ВИЗР. Высокий защитный эффект таких комплексных препаративных форм обусловлен сочетанием антагонистических свойств штамма микроорганизма со способностью индуктора устойчивости совместно с активными микробными метаболитами активировать механизмы естественной устойчивости растений к фитопатогенам.

В России для защиты сельскохозяйственных культур от грибных и бактериальных болезней широко применяется биопрепарат Витаплан СП, разработанный в ВИЗР на основе высокоактивных штаммов *B. subtilis* (ВКМ В-2604D и ВКМ В-2605D) [35–37]. Для усиления его биологической эффективности в препаративную форму в качестве индуктора устойчивости был включен СХ. В проведенных ранее исследованиях была выявлена высокая активность СХ, индуцирующего устойчивость к бурой ржавчине и темно-бурой пятнистости пшеницы [1]. Обработка им (0.1%) вегетирующих растений пшеницы уменьшала степень поражения растений корневой гнилью на 79.0%, желтой ржавчиной — на 29.1% и полностью подавляла развитие мучнистой росы в период вегетации растений [38]. Полученные результаты подтвердили перспективность использования разработанных новых полифункциональных препаративных форм для расширения ассортимента микробиологических средств защиты растений.

\*\*\*

Бактериальные штаммы и полифункциональные комплексы на их основе: *B. subtilis* И-5, *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605, Витаплан, СП; *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ, *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ существенно снижали интенсивность развития болезней, увеличивали урожайность и улучшали морфометрические показатели пшеницы. Однако на примере полифункционального комплекса *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ показано, что на эффективность защитных и стимулирующих обработок пшеницы оказывали влияние природно-климатические факторы вегетационных периодов, а также фитосанитарное состояние посевов. Добавление 0.1% СХ к бактериальным штаммам *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D и *B. subtilis* И-5 повышало биологическую эффективность таких комплексов в отношении желтой ржавчины пшеницы и мучнистой росы. Снижение поражаемости растений возбудителями болезней при применении бактериальных штаммов и полифункциональных комплексов влияло на урожайность пшеницы и ее морфометрические показатели. Наибольший рост урожайности пшеницы зарегистрирован в вариантах опыта *B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1% СХ, *B. subtilis* И-5 + 0.1% СХ, а также в варианте *B. subtilis* И-5. Перспективой дальнейших исследований в области влияния стимулирующих и защитных обработок пшеницы на показатели скрытой неоднородности и дефектности семян является выявление факторов, прежде всего связанных с их энзимомикозным истощением. Актуальна оценка посевных качеств полученных семян (стандартный тест на энергию прорастания и всхожесть, измерение длины первичных корней и проростка), а также сопоставление этих показателей с полученными в данной работе морфометрическими и рентгенографическими характеристиками зерен. Результаты работы могут быть использованы для разработки ресурсосберегающей технологии возделывания пшеницы и оптимизации фитосанитарного состояния агроэкосистем.

Работа была выполнена в рамках государственного задания в соответствии с тематическим планом ВИР по проекту 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”.

**ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.** Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института (учреждения, организации). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

## СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попова Э.В., Коваленко Н. М., Сокоурнова С. В., Тюттерев С. Л. и др. // Прикл. биохимия и микробиология. 2018. Т. 54. № 5. С. 540–545. <https://doi.org/10.1134/S055510991805015X>
2. Попова Э. В., Домнина Н. С., Сокоурнова С. В., Коваленко Н. М., Тюттерев С. Л. // Сельскохозяйственная биология. 2021. Т. 56. № 1. С. 158–170. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.1.158rus>
3. Варламов В. П., Албулов А. И., Фролова М. А., Гринь А. В., Мысякина И. С. // Экобиотех. 2019. Т. 2. № 4. С. 529–532. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2019-2-4-529-532>
4. Карнова Н. В., Шагдарова Б. Ц., Лялина Т. С., Ильина А. В., Терешина В. М., Варламов В. П. // Прикл. биохимия и микробиология. 2019. Т. 55. № 4. С. 386–395. <https://doi.org/10.1134/S0555109919040068>
5. Новикова И.И., Попова Э. В., Краснобаева И. Л., Коваленко Н. М. // Сельскохозяйственная биология. 2021. Т. 56. № 3. С. 511–522. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.3.511rus>
6. Novikova I., Minin V., Titova J., Krasnobaeva I., Zharov A., Perekopsky A. // Agronomy Research. 2021. V. 19. № 3. P. 1617–1626. <https://doi.org/10.15159/AR.21.135>
7. Павлюшин В.А., Тюттерев С. Л., Попова Э. В., Новикова И. И., Быкова Г. А., Домнина Н. С. // Биотехнология. 2010. № 4. С. 69–80.
8. Зимица Ю.А., Срослова Г. А., Постнова М. В. // Вестник ВолГУ. Серия 11. Естественные науки. Природные системы и ресурсы. 2018. Т. 8. № 3. <https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2018.3.3>
9. Минаков Д.В., Верецагин А. Л., Морозенко Ю. В., Базарнова Н. Г. // Химия растительного сырья. 2019. № 1. С. 251–257. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019014368>
10. Xie D., Cai X., Yang C., Xie L., Qin G., Zhang M. et al. // Pest Management Science. 2021. V. 77. P. 4375–4382. <https://doi.org/10.1002/ps.6471>
11. Stein T. // Mol. Microbiol. 2005. V. 56. P. 845–857. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2005.04587.x>
12. Мойне А.-Л., Cleveland T. E., Tuzun S. // FEMS Microbiol. Letters. 2004. V. 234. P. 43–49.
13. Zhang D., Guo X., Wang Y., Gao T., Zhu B. // Let. Appl. Microbiol. 2017. V. 65. P. 512–519. [doi.org/10.1111/lam.12809](https://doi.org/10.1111/lam.12809)
14. Guo Q., Dong W., Li S., Lu X., Wang P., Zhang X., Wang Y., Ma P. // Microbiological Research. 2014. V. 169. P. 533–540.
15. Сидорова Т.М., Асатурова А. М., Хомяк А. И. // Сельскохозяйственная биология. 2018. Т. 53. № 1. С. 29–37. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2005.04587.x>
16. Черепанова Е.А., Благова Д. К., Бурханова Г. Ф., Сарварова Е. С., Максимов И. В. // Экобиотех. 2019. Т. 2. № 3. С. 339–346. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2019-2-3-339-346>
17. Zhang X., Chen X., Qiao X., Fan X., Huo X., Zhang D. // Journal of Separation Science. 2021. V. 44. P. 931–940.
18. Павлюшин В.А., Новикова И. И., Бойкова И. В. // Защита и карантин растений. 2022. № 4. С. 10–18.
19. van Duijn B., Priyatkin N. S., Bruggink H., Gomes F., Boelt B., Gorian F., Martinez M. A. // Informativo ABRATE. 2017. V. 27. № 2. P. 18–22.
20. Прияткин Н.С., Архипов М. В., Шукина П. А., Мирская Г. В., Чесноков Ю. В. // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57. № 5. С. 911–920. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.5.911rus>
21. Dell'Aquila A. // Biometry Crop Sci. 2006. V. 1. № 1. P. 20–31.
22. Boelt B., Shrestha S., Salimi Z., Jørgensen J. R., Nicolaisen M., Carstensen J. M. // Seed Science Research. 2018. V. 28. № 3. P. 222–228. <https://doi.org/10.1017/S09602585180002353>
23. Jalink H., Frandas A., van der Schoor R., Bino J. B. // Scientia Agricola (Piracicaba, Braz.). 1998. V. 55. P. 88–93. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161998000500016>
24. Архипов М.В., Потрахов М. Н. Микрофокусная рентгенография растений. СПб: Технолит, 2008. 194 с.
25. Gomes-Junior F.G., Yagushi J. T., Belini U. L., Cicero S. M., Tomazello-Filho M. // Seed Science and Technology. 2012. V. 40. № 1. P. 102–107. <https://doi.org/10.15258/sst.2012.40.1.11>
26. Del Nobile M. A., Laverse J., Lampignano V., Cafarelli B., Spada A. Applications of Tomography in Food Inspection. In: Industrial tomography. Systems and applications / Ed. Mi Wang. Woodhead Publishing. Elsevier Ltd., 2015. P. 693–710. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-118-4.00025-3>
27. Foucat L., Chavagnat A., Renou J.-P. // Scientia Horticulturae, 1993. V. 55. P. 323–331.
28. Martinez M.A., Priyatkin N. S., van Duijn B. // Seed Testing International. 2018. V. 156. P. 53–56.
29. Колесников Л.Е., Попова Э. В., Новикова И. И., Прияткин Н. С., Архипов М. В., Колесникова Ю. Р. и др. // Сельскохозяйственная биология. 2019. Т. 54. С. 1024–1040. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2019.5.1024rus>
30. Kolesnikov L.E., Novikova I. I., Popova E. V., Priyatkin N. C., Zuev E. V., Kolesnikova Y. R., Solodyanikov M. D. // Agronomy Research. 2020. V. 18. № 4. P. 2436–2448. <https://doi.org/10.15159/AR.20.206>
31. Cicek E., Tilki F. // J. Biol. Sci. 2007. V. 7. P. 438–441.
32. Huang M., Wang Q. G., Zhu Q. B., Qin J. W., Huang G. // Seed Science and Technology. 2015. V. 43. № 3. P. 337–366.
33. Abud H.F., Cicero S. M., Gomes Junior F. G. // Acta Scientiarum: Agronomy. 2018. V. 40. № 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v40i1.34950>
34. Рутковская Т.С., Архипов М. В., Пасынкова Е. Н., Прияткин Н. С., Конончук П. Ю., Кочерина Н. В., Симон К. В. // Агрофизика. 2022. № 1. С. 42–48. <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2022.01.07>

35. Новикова И.И., Бойкова И. В., Морозов Д. О. // Информационный бюллетень ВПРС МОББ. 2011. № 42. С. 147–154.
36. Новикова И.И., Бойкова И. В., Павлюшин В. А., Зейрук В. Н. и др. // Вестник защиты растений. 2013. № 4. С. 12–21
37. Novikova I.I., Titova Yu.A., Boykova I. V., Zeyruk V. N., Krasnobaeva I. L. // Bulletin of Plant Protection. 2017. № 3. P. 16–23.
38. Колесников Л.Е., Попова Э. В., Новикова И. И., Колесникова Ю. Р. и др. // Прикл. биохимия и микробиология. 2022. Т. 58. № 3. С. 294–301. <https://doi.org/10.31857/S0555109922030072>

## The Biological Efficiency of Multifunctional Complexes Based on *Bacillus subtilis* Strains and Chitosan Salicylate in Wheat Cultivation

I. I. Novikova<sup>b</sup>, L. E. Kolesnikov<sup>a, \*</sup>, E. V. Popova<sup>b</sup>, B. A. Hassan<sup>c</sup>,  
N. S. Priyatkin<sup>d</sup>, D. Yu. Radishevskiy<sup>a</sup>, I. L. Krasnobaeva<sup>d</sup>,  
L. A. Higerovich<sup>b</sup>, and Yu. R. Kolesnikova<sup>e</sup>

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State Agrarian University, St. Petersburg, Pushkin, 196601 Russia

<sup>b</sup>All-Russian Research Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Pushkin, 196608 Russia

<sup>c</sup>Ministry of Agriculture, Agricultural Research Office, Abo-Ghraib, St. Al-Zaytun, H. 10081, Baghdad, Iraq

<sup>d</sup>Agrophysical Research Institute (ARI), St. Petersburg, 195220

<sup>e</sup>N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), St. Petersburg, 190031 Russia

\*e-mail: kleon9@yandex.ru

The influence of multifunctional complexes capable of causing a growth-stimulating effect on plants and inhibiting the development of a wide range of diseases on the Leningradka 6 spring soft wheat cultivar (k-64900) was investigated. In the research, it was found that the application of multifunctional complexes based on the *Bacillus subtilis* bacterial strains and 0.1% chitosan salicylate in wheat cultivation led to a significant decrease in the incidence of plant diseases: yellow and brown rust, powdery mildew, root rot and caused an increase in morphometric productivity indicators. This tendency was associated with a significant influence of multifunctional complexes on the increase in the number of primary and nodal roots; the length of nodal roots; productive bushiness; the number of spikelets per spike; the grains weight per spike. However, the effectiveness of protective and stimulating wheat treatments depended on the complex of natural and climatic factors of wheat vegetation seasons.

**Keywords:** biopreparations, chitosan salicylate, bacterial strains, *Bacillus subtilis*, soft wheat, productivity elements, wheat diseases