

СОВМЕСТИМОСТЬ ПЕНОГАСИТЕЛЕЙ НА СИЛИКОНОВОЙ ОСНОВЕ
СО ШТАММОМ *BACILLUS VELEZENSIS* MGMM30

Л.З. Каримова, А. А. Загидуллин, Н. Ю. Серов, А.Р. Валиев, Ш.З. Валидов

Реферат. В настоящее время наблюдается значительный интерес к использованию биологических средств защиты растений как экологичной альтернативе химическим фунгицидам в интегрированных системах защиты растений. Целью работы является изучение влияния шести композиций пеногасителей, которые могут быть использованы для культивирования агента биологической защиты растений *Bacillus velezensis* MGMM30 на жизнеспособность штамма, фитопатогенную нагрузку и ростовые параметры проростков. Методика включала проращивание семян на питательных средах, во влажных камерах и в рулонах фильтровальной бумаги с оценкой зараженности основными семенными патогенами (*Alternaria sp.*, *Fusarium sp.* и др.) и биометрических показателей. Результаты показали дифференцированное влияние пеногасителей: композиции 3Т80-SiO₂ и 4Т80-SiO₂ в сочетании со штаммом продемонстрировали наиболее выраженный эффект, снизив зараженность семян до 0% на питательной среде и обеспечив высокую всхожесть (78–86,7%) при значительном подавлении патогенов в других методах. Вариант 5Т80 также показал высокую эффективность в снижении инфекционного фона. Таким образом, пеногасители, которые используются для получения культуры агента биологической защиты *B. velezensis* MGMM30 могут увеличивать эффективность биологического агента, что открывает перспективы для разработки промышленных форм биопротравителей с повышенной эффективностью.

Ключевые слова: пеногасители, яровая пшеница, *Bacillus velezensis*, фитопатогены, семенная инфекция, биопрепараты.

Для цитирования: Совместимость пеногасителей на силиконовой основе со штаммом *Bacillus velezensis* MGMM30 / Л.З. Каримова, А.А. Загидуллин, Н. Ю. Серов, А.Р. Валиев, Ш.З. Валидов // Агробιοтехнологии и цифровое земледелие. 4(16). С. 67-72 <http://dx.doi.org/10.12737/2782-490X-2025-4-4-67-72>

Введение. Предпосевная обработка семян остается ключевым элементом интегрированных систем защиты растений, позволяя снизить пораженность посевов семенными и почвенными инфекциями, улучшить стартовое развитие и повысить урожайность культур. В условиях роста требований к экологической безопасности и сокращения применения классических химических фунгицидов возрастает интерес к биопрепаратам на основе антагонистических бактерий и грибов, применяемым в составе протравителей семян [1, 2, 3].

Биологические протравители на основе родов *Bacillus* рассматриваются как экологически более безопасная альтернатива, обеспечивающая контроль широкого спектра фитопатогенов. Штаммы *Bacillus velezensis* характеризуются высокой антагонистической активностью к широкому спектру фитопатогенных грибов за счет синтеза липопептидов, ферментов и других метаболитов, что делает их перспективной основой биологических протравителей [1, 4, 5].

Современные тренды в разработке протравителей включают создание комбинированных форм с использованием биоконтрольных агентов, наноматериалов и полимерных покрытий, обеспечивающих пролонгированное высвобождение действующих веществ и снижение негативного воздействия на окружающую среду. При этом, свойства вспомогательных компонентов (ПАВ, полимеров, пеногасителей) существенно влияют на распределение активных веществ на поверхности семени, степень

вымывания фунгицидов, а также выживаемость микроорганизмов в процессе хранения и после посева.

Пеногасители являются необходимым компонентом при ферментационном культивировании многих микроорганизмов. В тех случаях, когда для обработки растений используется культура микроорганизмов вместе с культуральной жидкостью, пеногасители также попадают на растения и их влияние на растительно-микробные взаимодействия должно приниматься во внимание. В научной и промышленной практике практически отсутствуют систематические исследования по оценке влияния современных пеногасителей на жизнеспособность и антагонистическую активность штаммов *Bacillus* при совместном применении на семенах зерновых культур, что создает риск снижения эффективности биопрепаратов или, наоборот, недоиспользования потенциала композиционных систем [6, 7].

Рынок средств для обработки семян демонстрирует устойчивый рост, что связано с необходимостью интенсификации производства при одновременном снижении пестицидной нагрузки и повышении устойчивости культур к стрессам. В этих условиях разработка пеногасителей, адаптированных к биоформуляциям и не угнетающих жизнеспособность продуцентов, является важным элементом технологической оптимизации процессов протравливания семян и обеспечения микробиологической безопасности посевного материала [7, 8].

Цель исследования – оценить влияние

различных композиций пеногасителей на совместимость со штаммом *Bacillus velezensis* и их эффективность в снижении фитопатогенной нагрузки на семенной материал и проростки яровой пшеницы.

Задачи исследования:

- оценить влияние пеногасителей на всхожесть и биометрические показатели проростков яровой пшеницы при различных методах проращивания;
- оценить способность пеногасителей в композиции с *Bacillus velezensis* снижать зараженность семян и проростков основными семенными фитопатогенами;
- выделить композиции пеногасителей, обеспечивающие максимальное снижение фитопатогенной нагрузки при сохранении или улучшении ростовых параметров растений.

Условия, материалы и методы. Работу

выполняли в лаборатории молекулярно-генетических и микробиологических методов на базе ФИЦ КазНЦ РАН (г. Казань, Россия) в 2025 году.

Использовали перспективный штамм *Bacillus velezensis* MGMM30, который продуцирует большое количество антимикробных метаболитов: липопептиды, полипептиды, ферменты, непептидные соединения [9]. Поверхностно-активные вещества, которые представляют собой амфипатические молекулы с полярными и гидрофобными участками, могут быть связаны с фунгицидной активностью [10]. Также для этого штамма показано защитное действие при заражении томатов бактериальным фитопатогеном *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* DC3000 [11].

В эксперименте применяли шесть пеногасителей (табл. 1).

Таблица 1 – Состав пеногасителей в процентном соотношении

Наименование	Вода	Tw80	ПМС ₂₀₀	2-HDol	D ₃	D ₄	SiO ₂
1T80	25	10	10	35	20	-	-
3T80	25	10	10	35	-	20	-
3T80-SiO ₂	25	10	30	35	-	-	1
4T80	25	10	10	35	-	20	-
4T80-SiO ₂	25	10	10	35	-	20	1
5T80	25	10	10	35	-	-	20

Tw80 – Твин 80, ПМС200 – полидиметилсульфоксан, 2-HDol – 2-гексил-1-деканол; D₃ – Гексаметилциклотрисилоксан, (M = 222); D₄ – Октаметилциклотрисилоксан, (M = 296).

В качестве тест культуры использовали семена яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Гранни, репродукция – СЭ.

Схема опыта включала инокуляцию семян рабочими растворами штамма *Bacillus velezensis* и пеногасителями. Биометрические показатели семян и их зараженность основными семенными фитопатогенами (*Alternaria* spp., *Bipolaris* spp., *Fusarium* spp., *Penicillium*, *Aspergillus*, *Mucor*) оценивались тремя методами:

В чашки Петри с питательной средой Кинг Б, в стерильных условиях разложили семена яровой пшеницы. Семена пшеницы были заранее стерилизованы в этиловом спирте 70% в течении 2-3 минут, затем трехкратно промыты дистиллированной водой и высушены на фильтровальной бумаге, далее семена инокулировали штаммами с добавлением пеногасителей согласно схеме опыта. В чашку Петри закладывали 25 семян в 3-х кратной повторности. Семена проращивали в климатостате КС-200 СПУ в течении 3 суток, при температуре 26°C.

В чашки Петри с двойным слоем фильтровальной бумаги, увлажненной стерильной дистиллированной водой разложили семена яровой пшеницы. Семена пшеницы были заранее стерилизованы в этиловом спирте 70% в течении 2-3 минут, затем трехкратно промыты дистиллированной водой и высушены на фильтровальной бумаге, далее семена

инокулировали штаммами с добавлением пеногасителей согласно схеме опыта. В чашку Петри закладывали 25 семян в трехкратной повторности. Семена проращивали в течение 5 суток в климатостате КС-200 СПУ, при температуре 25°C.

Метод фитоэкспертизы семян с использованием рулонов фильтровальной бумаги. Семена пшеницы были заранее стерилизованы в этиловом спирте 70% в течении 2-3 минут, затем трехкратно промыты дистиллированной водой и высушены на фильтровальной бумаге, далее семена инокулировали штаммами с добавлением пеногасителей согласно схеме опыта. Семена проращивали в течении 3 суток в климатостате КС-200 СПУ, при температуре 25°C, без освещения, далее 4 суток при освещении 16/8.

Зараженность семян определяли путем подсчета количества семян с проросшими колониями в общем количестве семян.

Результаты и обсуждения. По результатам оценки зараженности семян яровой пшеницы сорта Гранни на питательной среде Кинг Б максимальная зараженность (100%) отмечена в контроле с водой, что отражает высокий исходный фитопатогенный фон семенного материала. Внесение штамма MGMM 30 без пеногасителей уменьшило зараженность до 60%, подтверждая выраженную антагонистическую активность штамма в отношении семенных фитопатогенов.

Таблица 2 – Зараженность семян яровой пшеницы сорта Гранни на питательной среде Кинг Б

Вариант	Зараженность семян, %
Контроль (H ₂ O)	100
MGMM 30	60
1T80 + MGMM 30	26,7
3T80 + MGMM 30	6,7
3T80-SiO ₂ + MGMM 30	0
4T80 + MGMM 30	100
4T80-SiO ₂ + MGMM 30	0
5T80 + MGMM 30	80

Композиции штамма MGMM 30 с пеногасителями продемонстрировали дифференцированное влияние на фитопатогенную нагрузку: варианты 1T80 и 3T80 снижали зараженность до 26,7 и 6,7% соответственно, что указывает на синергизм штамма и данных составов пеногасителей. Наиболее выраженный защитный эффект зафиксирован для вариантов 3T80-SiO₂ и 4T80-SiO₂, в которых зараженность семян не выявлялась, что свидетельствует о практически полном подавлении патогенной микрофлоры при сохранении активности *Bacillus velezensis* в присутствии указанных композиций.

Варианты 4T80 и 5T80 без добавления SiO₂ показали менее выраженный эффект: в случае 4T80 зараженность оставалась на уровне 100%, а при 5T80 составляла 80%, что может свидетельствовать о неблагоприятном влиянии отдельных компонентов пеногасителя на колонизацию семян штаммом или

формирование защитной пленки.

То есть, включение диоксида кремния в состав пеногасителей 3T80 и 4T80 обусловило резкое снижение фитопатогенной нагрузки, что позволяет рассматривать эти композиции как наиболее перспективные для биологических протравителей на основе *Bacillus velezensis*.

В условиях влажных камер (табл. 3) контроль с водой характеризовался удовлетворительной всхожестью (73,3%) при минимальной длине стебля и корня, тогда как вариант только с MGMM 30 демонстрировал снижение всхожести до 40% при заметном увеличении длины надземной и корневой системы, но с более высокой зараженностью (46,7%). Это указывает на то, что штамм стимулирует рост отдельных проростков, однако без оптимизации формуляции его защитный эффект в условиях высокой инфекционной нагрузки ограничен.

Таблица 3 – Биометрические показатели и зараженность проростков яровой пшеницы, пророщенных в условиях влажных камер

Вариант	Всхожесть, %	Длина стебля, мм	Длина корня, мм	Количество корешков, шт	Зараженность семян, %
Контроль (H ₂ O)	73,3±3	2,05±0,51	4,10±0,70	3±0,64	20
MGMM 30	40,0±3	8,47±0,52	9,07±0,68	4±0,67	46,7
1T80 + MGMM 30	60,0±3	5,63±0,61	6,93±0,71	4±0,56	20
3T80 + MGMM 30	53,3±3	4,40±0,58	6,90±0,82	3±0,62	40
3T80-SiO ₂ + MGMM 30	80,0±3	6,77±0,63	8,07±0,78	4±0,64	13,3
4T80 + MGMM 30	73,3±3	8,60±0,70	9,77±0,64	4±0,58	26,7
4T80-SiO ₂ + MGMM 30	86,7±3	5,03±0,54	7,17±0,59	3±0,56	6,67
5T80 + MGMM 30	60,0±3	4,83±0,64	6,93±0,67	4±0,58	26,7

Добавление пеногасителей повлияло как на ростовые параметры, так и на фитопатогенную нагрузку. Вариант 3T80-SiO₂ + MGMM 30 обеспечил повышение всхожести до 80%, увеличение длины стебля и корня по сравнению с MGMM 30 и снижение зараженности до 13,3%, что свидетельствует о благоприятном сочетании ростостимулирующего и защитного эффектов. Композиция 4T80-SiO₂ + MGMM 30 также повысила всхожесть (86,7%), при этом отмечалось снижение зараженности до 6,67% при сохранении удовлетворительных биометрических показателей, что указывает на эффективное подавление патогенов при минимальном стрессовом воздействии на растения.

Вариант 4T80 + MGMM 30 без диоксида

кремния обеспечил максимальную длину стебля (8,6 мм) и корня (9,77 мм) среди рассмотренных вариантов, однако зараженность проростков оставалась на уровне 26,7%, что говорит о преимущественно ростостимулирующем, а не защитном эффекте такой композиции. Для варианта 1T80 + MGMM 30 отмечена умеренная всхожесть и уменьшение зараженности до 20%, тогда как 5T80 + MGMM 30 демонстрировал лишь частичное снижение фитопатогенной нагрузки (26,7%) при средних ростовых показателях.

При использовании метода рулонов (табл. 4) контрольный вариант и чистый штамм MGMM 30 характеризовались сопоставимой всхожестью (74-76%) при умеренной длине стебля и корня и зараженности на

уровне 10-22%, что отражает действие стандартизированной лабораторной методики с меньшей экспозицией к патогенам по сравнению с влажными камерами. Вариант 3T80 + MGMM 30 демонстрировал заметное

увеличение длины стебля (12 мм) и корня (13,22 мм), а также числа корешков (5 шт.), при снижении зараженности до 14%, что подтверждает как ростстимулирующее, так и умеренное защитное действие композиции.

Таблица 4 – Биометрические показатели и зараженность проростков яровой пшеницы, пророщенных в рулонах

вариант	Всхо- жесть, %	Длина стебля, мм	Длина колеопти- ле, мм	Длина корня, мм	Количе- ство кореш- ков, шт.	Зара- женност ь семян, %
Контроль (H ₂ O)	74±3	8,52±2,28	3,04±0,60	10,76±0,74	4±0,68	22
MGMM 30	76±3	9,46±1,44	3,10±0,30	11,72±1,08	3±0,65	10
1T80 + MGMM 30	70±3	11,22±0,58	2,96±0,40	12,3±0,80	4±0,64	16
3T80 + MGMM 30	72±3	12,00±1,60	3,20±0,30	13,22±0,88	5±0,59	14
3T80-SiO ₂ + MGMM 30	78±3	12,20±0,7	2,92±0,18	12,28±0,72	3±0,62	14
4T80 + MGMM 30	74±3	11,48±2,12	3,08±0,02	11,64±0,86	3±0,58	8
4T80-SiO ₂ + MGMM 30	80±3	11,54±1,06	3,02±0,18	13,06±1,74	4±0,54	10
5T80 + MGMM 30	78±3	10,34±2,36	2,72±0,48	10,7±0,30	4±0,52	2

Пеногасители 3T80-SiO₂ и 4T80-SiO₂ в сочетании с MGMM 30 обеспечили высокую всхожесть (78–80%) и сохранение или увеличение длины корневой системы при умеренном или низком уровне зараженности (8-14%), что указывает на стабильный защитный эффект в условиях, моделирующих более продолжительное прорастивание. Особенно показателен вариант 5T80 + MGMM 30, где при высокой всхожести (78%) наблюдалась минимальная зараженность (2%), что свидетельствует о выраженном снижении фитопатогенной нагрузки на проростки при сохранении нормального роста.

Сопоставление результатов трех методик показывает, что отдельные композиции пеногасителей (3T80-SiO₂, 4T80-SiO₂, 5T80) не только обеспечивают технологическое подавление пенообразования, но и существенно снижают уровень семенных и ранневсходовых инфекций в присутствии *Bacillus velezensis* MGMM 30. Это позволяет предположить, что оптимизированные формулы пеногасителей создают условия для более

равномерной колонизации поверхности семян антагонистическими бактериями и формирования устойчивого микробного барьера против фитопатогенов.

Выводы. Включение пеногасителей в состав рабочей суспензии *Bacillus velezensis* MGMM 30 существенно модифицирует уровень фитопатогенной нагрузки на семена и проростки яровой пшеницы.

Наиболее эффективными с точки зрения снижения зараженности семян и проростков при сохранении или повышении всхожести и ростовых показателей оказались композиции 3T80-SiO₂, 4T80-SiO₂ и 5T80, обеспечивающие почти полное подавление патогенов в отдельных вариантах опыта.

Правильно подобранные пеногасители не только не снижают эффективность биопрепарата на основе *Bacillus velezensis* MGMM 30, но и способствуют более эффективному снижению фитопатогенного фона семенного материала, что важно при создании промышленных форм биологических протравителей.

Литература

1. Seed Treatment With Systemic Fungicides: Time for Review / M.S. Ayesha, T.S. Suryanarayanan, K.N. Nataraja, et. al. // *Frontiers in Plant Science*. 2021. V. 12. Article 654512. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34408757> (дата обращения 12.10.2025). doi: 10.3389/fpls.2021.654512.
2. Recent Advances in Nano-Enabled Seed Treatment Strategies for Sustainable Agriculture: Challenges, Risk Assessment, and Future Perspectives / Shelar A, Nile SH, Singh AV, et al. // *Nano-micro Lettters*. 2023. V.15. Article 54. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36795339>. (Дата обращения 25.09.2025). doi: 10.1007/s40820-023-01025-5.
3. Sustainable management of peanut damping-off and root rot diseases caused by *Rhizoctonia solani* using environmentally friendly bio-formulations prepared from batch fermentation broth of chitinase-producing *Streptomyces cellulosa* / Abo-Zaid, G.A., Darwish, M.H., Ghazlan, H.A. et al. // *BMC plant biology*. 2024. V.24. Article 760. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39118060>. (Дата обращения 25.09.2025). doi: 10.1186/s12870-024-05441-6.
4. A Novel Seed-Dressing Formulation Based on an Improved Mutant Strain of *Trichoderma virens*, and Its Field Evaluation / Mukherjee P.K., Mehrete S.T., Sherkhane P.D. et. al. // *Frontiers in microbiology*. 2019. V.10. 1910. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6730527>. (Дата обращения 25.09.2025). doi:10.3389/fmicb.2019.01910.
5. Symbiotic regulation of plant growth, development and reproduction / Rodriguez R., Freeman D.C., McArthur E.D. et. al. // *Communicative & Integrative Biology*. 2009. V.2. P.141-143. doi: 10.4161/cib.7821.
6. Industrial antifoam agents impair ethanol fermentation and induce stress responses in yeast cells / Nielsen J.C., Senne de Oliveira L.F., Rasmussen T. G. et al. // *Applied microbiology and biotechnology*. 2017. V.101 (22). P. 8237-8248. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5719808>. (Дата обращения 20.09.2025). doi:

10.1007/s00253-017-8548-2.

7. Догадина М. А., Правдюк А. И., Криворотова Е. И. Вызовы и тренды рынка биопестицидов // Вестник аграрной науки. 2024. № 2 (107). С. 40–48. doi: 10.17238/issn2587-666X.2024.2.40.

8. Лысов А.К. Проблемы применения средств защиты растений и пути снижения их техногенного воздействия на окружающую среду // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 3(116). С.34-51.

9. Патент № 2823280 С1 РФ. Штамм эндофитной бактерии *Bacillus velezensis* MGMM30 для стимуляции роста, снижения развития болезней и повышения урожайности сельскохозяйственных культур: заявл. 25.12.2023 : опубл. 22.07.2024 / Д. М. Афордоаньи, Ш. З. Валидов, Е. Ю. Шульга, Б. Р. Исламов; заявитель ФИЦ «КазНЦ РАН».

10. Сидорова Т. М., Асатурова А. М., Аллахвердян В. В. / Хроматографические профили антигрибных экзо- и эндометаболитов бактерий *Bacillus velezensis* // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 2(26). С. 191-199. Doi: 10.33952/2542-0720-2021-2-26-191-199.

11. The Effect of *Bacillus subtilis* and *Bacillus velezensis* on the Antioxidative Responses of Tomato Plants Facing *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* DC3000 Infection / Sumaira, E. A. Gavrilova, S. Z. Validov et al. // Journal of Phytopathology. 2025. V.173. № 5. P. e70178. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jph.70178> (Дата обращения 30.09.2025). doi: 10.1111/jph.70178.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

Сведения об авторах:

Каримова Лилия Зяудатовна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических и микробиологических методов, e-mail: Karimova-lcd@mail.ru

Загидуллин Алмаз Анварович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, e-mail: almaz_zagidullin@mail.ru.

Серов Никита Юрьевич – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: n.serov@knc.ru.

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия.

Валиев Айрат Расимович – доктор технических наук, первый проректор, чл.-корр. АН РТ, e-mail: ayratvaliev@mail.ru

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия.

Валидов Шамиль Завдатович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией молекулярно-генетических и микробиологических методов, e-mail: sh.validov@knc.ru

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия.

COMPATIBILITY OF SILICONE-BASED ANTIFOAMING COMPOSITIONS WITH *BACILLUS VELEZENSIS* MGMM30 STRAIN

L. Z. Karimova, A. A. Zagidullin, N. Yu. Serov, A. R. Valiev, Sh. Z. Validov

Abstract. Nowadays, there is a significant interest in the use of biological plant protection products as an ecologically friendly alternative to chemical fungicides in integrated plant protection systems. The aim of the study was to investigate the effect of six antifoaming compositions that can be used to cultivate the biological plant protection agent *Bacillus velezensis* MGMM30 on strain viability, phytopathogenic load and growth parameters of seedlings. The methodology included seed germination on nutrient media, in humid chambers and on filter paper rolls, with assessment of infection by major seed-borne pathogens (*Alternaria* sp., *Fusarium* sp., etc.) and biometric parameters. The results demonstrated differential effects of defoamers: compositions 3T80-SiO₂ and 4T80-SiO₂ in combination with the strain demonstrated the most pronounced effect, reducing seed infestation to 0% on nutrient medium and ensuring high germination rates (78–86.7%), while significantly suppressing pathogens in other methods. 5T80 variant also showed high efficacy in reducing infection background. Thus, antifoaming compositions used in the production of *B. velezensis* MGMM30 bioprotection agent can enhance the effectiveness of biological agent, opening up prospects for the development of industrial forms of bio-fungicides with improved efficacy.

Key words: antifoaming compositions, spring wheat, *Bacillus velezensis*, phytopathogens, seed infection, biopreparations.

For citation: Karimova L.Z., Zagidullin A.A., Serov N.Yu., Valiev A.R., Validov Sh.Z. Compatibility of silicone-based antifoaming compositions with *Bacillus velezensis* MGMM30 strain. Agrobiotechnologies and digital farming. 4(16). 67-72 p. <http://dx.doi.org/10.12737/2782-490X-2025-4-4-67-72>

References

1. Ayesha MS, Suryanarayanan TS, Nataraja KN. Seed treatment with systemic fungicides: time for review. [Internet]. Frontiers in Plant Science. 2021; Vol.12. Article 654512. [cited 2025, October 12]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34408757>. doi: 10.3389/fpls.2021.654512.

2. Shelar A, Nile SH, Singh AV. Recent advances in nano-enabled seed treatment strategies for sustainable agriculture: challenges, risk assessment, and future perspectives. [Internet]. Nano-micro Lettters. 2023; Vol.15. Article 54. [cited 2025, September 25]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36795339>. doi: 10.1007/s40820-023-01025-5.

3. Abo-Zaid GA, Darwish MH, Ghazlan HA. Sustainable management of peanut damping-off and root rot diseases caused by *Rhizoctonia solani* using environmentally friendly bio-formulations prepared from batch fermentation broth of chitinase-producing *Streptomyces cellulosa*. [Internet]. BMC plant biology. 2024; Vol.24. Article 760. [cited 2025, September 25]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39118060>. doi: 10.1186/s12870-024-05441-6.

4. Mukherjee PK, Mehrete ST, Sherkhane PD. A novel seed-dressing formulation based on an improved mutant strain of *Trichoderma virens* and its field evaluation. [Internet]. Frontiers in microbiology. 2019; Vol.10. 1910; [cited 2025, September 25]. Available from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6730527>. doi:10.3389/fmicb.2019.01910.

5. Rodriguez R, Freeman DC, McArthur ED. Symbiotic regulation of plant growth, development and reproduction. Communicative & Integrative Biology. 2009; Vol.2. 141-143 p. doi: 10.4161/cib.7821.

6. Nielsen JC, Senne de Oliveira LF, Rasmussen TG. Industrial antifoam agents impair ethanol fermentation and

induce stress responses in yeast cells. [Internet]. Applied microbiology and biotechnology. 2017; Vol.101 (22). 8237-8248 p. [cited 2025, September 20]. Available from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5719808>. doi: 10.1007/s00253-017-8548-2.

7. Dogadina MA, Pravdyuk AI, Krivorotova EI. [Challenges and trends of biopesticides market]. Vestnik agrarnoy nauki. 2024; 2 (107). 40-48 p. doi: 10.17238/issn2587-666X.2024.2.40.

8. Lysov AK. [Problems of application of plant protection products and ways of reducing their technogenic impact on the environment]. AgroEkoInzheneriya. 2023; 3(116). 34-51 p.

9. Afordoani DM, Validov ShZ, Shulga EYu, Islamov BR. Patent № 2823280 C1 RF. Shtamm endofitnoy bakterii *Bacillus velezensis* MGMM30 dlya stimulyatsii rosta, snizheniya razvitiya bolezney i povysheniya urozhaynosti selskokhozyaystvennykh kultur. [Strain of endophytic bacterium *Bacillus velezensis* MGMM30 for stimulation of growth, reduction of diseases development and increase of agricultural crops productivity]. Zayavl. 25.12.2023. opubl. 22.07.2024. zayavitel FITs KazNTs RAN.

10. Sidorova TM, Asaturova AM, Allakhverdyan VV. [Chromatographic profiles of antifungal exo- and endometabolites of *Bacillus velezensis* bacteria]. Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki. 2021; 2(26). 191-199 p. Doi: 10.33952/2542-0720-2021-2-26-191-199.

11. Sumaira, Gavrilova EA, Validov ShZ. The effect of *Bacillus subtilis* and *Bacillus velezensis* on the antioxidative responses of tomato plants facing *Pseudomonas syringae* pv. tomato DC3000 Infection. [Internet]. Journal of Phytopathology. 2025; Vol.173. 5. e70178 p. [cited 2025, September 30]. Available from: abs/10.1111/jph.70178. doi: 10.1111/jph.70178.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest. The work was carried out as part of the state assignment of the Federal Research Center of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.

Authors:

Karimova Liliya Zyauatovna – Ph.D. of Agricultural Sciences, senior researcher of Molecular Genetic and Microbiological Methods Laboratory, e-mail: karimova-lcd@mail.ru

Zagidullin Almaz Anvarovich – Ph.D. of Chemical Sciences, senior researcher, e-mail: almaz_zagidullin@mail.ru.

Serov Nikita Yurevich – Ph.D. of Chemical Sciences, leading researcher, e-mail: n.serov@knc.ru.

Federal Research Center “Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, Kazan, Russia.

Valiev Ayrat Rasimovich – Doctor of Technical Sciences, First Vice-Rector, corresponding member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, e-mail: ayratvaliev@mail.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.

Validov Shamil Zavdatovich – Ph.D. of Biological Sciences, Head of Molecular Genetic and Microbiological Methods Laboratory, e-mail: sh.validov@knc.ru

Federal Research Center “Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, Kazan, Russia.