

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2457>
<https://elibrary.ru/ZPULFC>

Оригинальная статья
<https://fpтт.ru>

Антагонистическая активность экстремофильных микроорганизмов в отношении фитопатогенов сельскохозяйственных культур



Л. К. Асякина^{1,*}, Ю. Р. Серазетдинова¹, А. С. Фролова¹,
Н. В. Фотина¹, О. А. Неверова¹, А. Н. Петров²

¹ Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

² Российский биотехнологический университет, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 20.03.2023

Принята после рецензирования: 19.04.2023

Принята к публикации: 02.05.2023

*Л. К. Асякина: alk_kem@kemsu.ru,

<https://orcid.org/0000-0003-4988-8197>

Ю. Р. Серазетдинова: <https://orcid.org/0000-0002-3044-3529>

А. С. Фролова: <https://orcid.org/0000-0003-3988-8521>

Н. В. Фотина: <https://orcid.org/0000-0002-7655-0258>

О. А. Неверова: <https://orcid.org/0000-0002-0309-5709>

А. Н. Петров: <https://orcid.org/0000-0001-9879-482X>

© Л. К. Асякина, Ю. Р. Серазетдинова, А. С. Фролова,
Н. В. Фотина, О. А. Неверова, А. Н. Петров, 2023



Аннотация.

Пшеница (*Triticum aestivum* L.) – это важная сельскохозяйственная культура, фитопатогенами которой являются грибы рода *Fusarium* и *Alternaria*. Для борьбы с ними применяют синтетические пестициды, негативно влияющие на окружающую среду и здоровье человека. Разработка безопасных и эффективных аналогов – биопестицидов – является актуальным вопросом. Цель данной работы заключалась в разработке консорциума на основе экстремофильных микроорганизмов, выделенных из природных источников, для защиты пшеницы от заболеваний, вызванных грибами рода *Alternaria* и *Fusarium*.

Объектами исследования являлись образцы 10 изолятов экстремофильных микроорганизмов. Биохимическую идентификацию изолятов проводили с использованием автоматического микробиологического анализатора Vitek 2 Compact (Biomerieux, Франция). Изоляты оценивали по показателям антимикробной активности в отношении *Escherichia coli* и антагонистической активности в отношении фитопатогенов по методу встречных культур. На основании полученных данных конструировали микробные консорциумы и оценивали их эффективность и способность защищать пшеницу от фитопатогенов.

Из 10 исследованных изолятов наибольшую активность проявляли 5 штаммов, 3 из которых являлись биосовместимыми: *Leclercia* sp., *Sphingomonas paucimobilis* и *Lactobacillus plantarum*. На основании данных микроорганизмов составлено 4 консорциума. Установлено, что совместное применение микроорганизмов повышает их антагонистическую активность: площадь, не занятая фитопатогеном, увеличивалась на 4,2 % по отношению к среднему значению отдельных микроорганизмов, входящих в состав консорциума. Наиболее эффективным являлся консорциум с соотношением штаммов *Leclercia* sp., *S. paucimobilis* и *L. plantarum* 2:1:1 соответственно. Консорциум оказывал фитостимулирующее действие на проростки пшеницы (всхожесть варьировалась в пределах 73,2–99,6 %) и позволял избежать морфометрических изменений при обработке семян, зараженных фитопатогенами.

Разработанный консорциум обладает высокой эффективностью защиты пшеницы от патогенов рода *Alternaria* и *Fusarium* и может использоваться в качестве пестицида биологической природы.

Ключевые слова. *Triticum aestivum* L., продуктивность сельского хозяйства, фитопатогены, биопестициды, экстремофильные бактерии, консорциум микроорганизмов, экологическая безопасность

Финансирование. Работа была выполнена в рамках государственного задания по теме «Фундаментальные исследования по разработке биопестицидов, состоящих из экстремофильных и эндофитных микроорганизмов, для преодоления абиотического и биотического стресса сельскохозяйственными культурами в условиях Кемеровской области – Кузбасса» (шифр FZSR-2023-0003).

Для цитирования: Антагонистическая активность экстремофильных микроорганизмов в отношении фитопатогенов сельскохозяйственных культур / Л. К. Асякина [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 3. С. 565–575. (На англ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2457>

Antagonistic Activity of Extremophilic Bacteria Against Phytopathogens in Agricultural Crops



Lyudmila K. Asyakina^{1,*}, Yuliya R. Serazetdinova¹,
Anna S. Frolova¹, Natalya V. Fotina¹,
Olga A. Neverova¹, Andrey N. Petrov²

¹ Kemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, Russia

² Russian Biotechnological University^{ROR}, Moscow, Russia

Received: 20.03.2023
Revised: 19.04.2023
Accepted: 02.05.2023

*Lyudmila K. Asyakina: alk_kem@kemsu.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-4988-8197>
Yuliya R. Serazetdinova: <https://orcid.org/0000-0002-3044-3529>
Anna S. Frolova: <https://orcid.org/0000-0003-3988-8521>
Natalya V. Fotina: <https://orcid.org/0000-0002-7655-0258>
Olga A. Neverova: <https://orcid.org/0000-0002-0309-5709>
Andrey N. Petrov: <https://orcid.org/0000-0001-9879-482X>

© L.K. Asyakina, Yu.R. Serazetdinova, A.S. Frolova,
N.V. Fotina, O.A. Neverova, A.N. Petrov, 2023



Abstract.

Wheat is a vital agricultural crop whose phytopathogens include fungi of the genera *Fusarium* and *Alternaria*. Synthetic pesticides, which are used to combat them, have a negative impact on the environment. Therefore, there is a need for developing safe and effective biopesticides. We aimed to create a consortium of extremophilic microorganisms isolated from natural sources to protect wheat from the diseases caused by *Alternaria* and *Fusarium* fungi.

Ten isolates of extremophilic microorganisms were tested for their antimicrobial activity against *Escherichia coli* and their antagonistic activity against phytopathogens. Based on the results, we developed microbial consortia and evaluated their effectiveness in protecting wheat from phytopathogens.

Five of the strains under study showed the highest activity, three of which were biocompatible, namely *Leclercia* sp., *Sphingomonas paucimobilis*, and *Lactobacillus plantarum*. Four consortia were created from these microorganisms, of which consortium B (with a 2:1:1 ratio of the strains, respectively) proved the most effective. In particular, it increased the area free from the phytopathogen by 4.2% compared to the average values of its individual microorganisms. Also, the consortium had a phytostimulating effect on wheat seedlings (germination of 73.2–99.6%) and protected the seeds infected with phytopathogens from morphometric changes.

The resulting consortium can be used as a biopesticide since it is highly effective in protecting wheat from *Alternaria* and *Fusarium* pathogens.

Keywords. *Triticum aestivum* L., agricultural productivity, phytopathogens, biopesticides, extremophilic bacteria, consortium of microorganisms, environmental safety

Funding. This study was part of the state assignment entitled “Basic research on the development of biopesticides from extremophilic and endophytic microorganisms to help agricultural crops overcome abiotic and biotic stress in Kemerovo Oblast – Kuzbass” (code FZSR-2023-0003).

For citation: Asyakina LK, Serazetdinova YuR, Frolova AS, Fotina NV, Neverova OA, Petrov AN. Antagonistic Activity of Extremophilic Bacteria Against Phytopathogens in Agricultural Crops. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(3):565–575. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2457>

Введение

Пшеница (*Triticum aestivum* L.) является одной из важнейших сельскохозяйственных культур, которые вносят вклад в обеспечение продовольственной безопасности страны. Однако различные

заболевания, вызванные фитопатогенными микроорганизмами, снижают урожайность и питательную ценность зерна [1, 2].

К наиболее распространенным заболеваниям пшеницы относят фузариоз. Это патологическое сос-

тояние культурных и дикорастущих растений, вызываемое микроскопическими грибами рода *Fusarium*. Колосья пшеницы, поврежденные данным фитопатогеном, деформируются и теряют пигментацию, а зерно сморщивается и становится хрупким, его всхожесть снижается [3–5]. Под действием *Fusarium* в зерне накапливаются микотоксины, представляющие угрозу для здоровья человека и животных, и снижающие устойчивость пшеницы к другим фитопатогенам [6–8].

Еще одним распространенным заболеванием пшеницы является альтернариоз, возбудителем которого являются представители рода *Alternaria*. Под воздействием данных микроскопических грибов на колосьях образуются черные пятна мицелия, и нарушается нормальное развитие сельскохозяйственной культуры [9]. В некоторых случаях *Alternaria* поражает зерна, вызывая потемнение их оболочек, что не оказывает влияние на способность к прорастанию, но повышает его аллергенность [10].

Для борьбы с фитопатогенами и другими инфекционными заболеваниями пшеницы применяют синтетические пестициды, но их использование сопряжено с рядом экологических проблем [11]. Пестициды являются устойчивыми соединениями, способными длительное время сохраняться в окружающей среде, вызывая загрязнение почв, подземных и поверхностных вод, атмосферы [12–14]. При длительном использовании они накапливаются в почвах сельскохозяйственных угодий, вызывая качественные и количественные изменения в микробиоме ризосферы и филосферы: отмечено снижение разнообразия бактерий и грибов, азотфиксирующей способности и колонизирующей способности ризобактерий [15, 16]. Это негативно сказывается на выращиваемых культурах, в частности пшенице. Кроме того, опасение вызывает способность синтетических пестицидов к биоаккумуляции, т. е. они накапливаются в съедобных частях обрабатываемых культур, нанося вред здоровью человека при употреблении [17].

Таким образом, для обеспечения экологически безопасной защиты пшеницы от фитопатогенов необходимо разработать альтернативные методы, исключающие применение синтетических пестицидов. Согласно литературным данным к таким методам можно отнести применение биологических средств защиты. Например, биопестицидов – препаратов, которые получили путем микробного синтеза [18]. Микроорганизмы, входящие в состав таких препаратов, способны синтезировать широкий спектр вторичных метаболитов, ограничивающих развитие инфекционных заболеваний растений [19].

Для разработки биологических средств защиты – биопестицидов – актуальным является применение экстремофильных микроорганизмов. Их стратегии выживания в неблагоприятных условиях окружающей среды обусловлены наличием уникальных качеств, не встречающихся или менее выраженных у других микроорганизмов [20]. Например, некоторые

экстремофилы способны выделять антибиотические вещества для снижения количества конкурирующих видов [21]. Антагонистическая активность экстремофильных микроорганизмов связана не только с синтезом антибиотиков, но и наличием некоторых ферментов. *Pseudomonas* sp., выделенный из морских отложений, продуцировал фермент хитиназу, который ингибировал развитие фитопатогенных грибов [22]. Высокая антагонистическая активность экстремофилов делает их эффективными агентами биоконтроля.

Целью данной работы являлась разработка консорциума на основе экстремофильных микроорганизмов, выделенных из природных источников, для защиты пшеницы *T. aestivum* L. от заболеваний, вызванных *Alternaria alternata* (F-525), *Fusarium graminearum* PH-1 (F-877), *Fusarium graminearum* (F-892) и *Fusarium sporotrichioides* T11 (F-902).

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись 10 бактериальных изолятов-экстремофилов, выделенных из природных источников на предыдущем этапе исследования [23].

Ранее осуществили идентификацию 4-х изолятов. Идентификацию оставшихся 6-ти изолятов осуществили с использованием автоматического микробиологического анализатора Vitek 2 Compact (Biomeérieux, Франция), для чего микроорганизмы культивировали на колумбийском агаре с кровью (Himedia, Индия). Продолжительность культивирования составила 48 ч при температуре 28 °С. Из полученных культур готовили суспензии с плотностью по Мак-Фарланду в пределах 2,70–3,30 [24].

Антагонистическую активность штаммов в отношении бактериальных культур проводили на модельном микроорганизме *Escherichia coli*. Изоляты выращивали в среде МПБ при температуре 28 °С в течение 48 ч. Затем 1 мл культуральной жидкости центрифугировали при 5000 об/мин в течение 5 мин и отбирали супернатант. В предварительно подготовленные чашки Петри со стерильной средой МПА равномерным ковром высевали *E. coli*, после чего вырезали лунки диаметром 6 мм, в которые помещали 50 мкл подготовленного супернатанта. Чашки с лунками помещали в термостат и выдерживали 24 ч при температуре 28 °С. Интерпретацию полученных результатов осуществляли измерением диаметра зоны ингибирования [25].

Антагонистическую активность изолятов в отношении фитопатогенных грибов оценивали методом встречных культур [26]. В чашки Петри с картофельно-глюкозным агаром (Himedia, Индия) с одной стороны наносили суточные культуры изолятов, а с другой стороны размещали агаровый блок с культурой фитопатогенного гриба. Чашки Петри выдерживали в термостате при температуре 28 °С, контроль зоны ингибирования производили через 3, 5, 7 суток. В качестве контроля использовали

чашки Петри с фитопатогеном без культуры антагониста. Ингибирование радиального роста вычисляли по формуле:

$$\text{Ингибирование радиального роста} = \left(1 - \left(\frac{dr}{ds}\right)\right) \times 100 \quad (1)$$

где dr – диаметр мицелия гриба в чашке Петри с культурой-антагонистом, мм; ds – диаметр мицелия гриба в контрольном варианте, мм.

Для конструирования консорциума оценивали биосовместимость наиболее перспективных штаммов микроорганизмов методом совместного культивирования. Для этого чистые культуры изолятов культивировали на среде МПБ при 28 °С в течение 48 ч. Затем культуральную жидкость центрифугировали 5 мин при 500 об/мин. В чашку Петри со средой МПА ровным слоем наносили изолят № 1, в лунки диаметром 6 мм вносили супернатант изолята № 2. Культивировали при температуре 28 °С в течение 24 ч, после чего отмечали наличие зоны ингибирования. Аналогичную операцию повторяли для всех изолятов [27].

Антагонистическую активность консорциумов оценивали аналогично методике, описанной выше.

Для оценки способности консорциумов снижать токсичное воздействие фитопатогенов на пшеницу (*Triticum aestivum* L.) семена обрабатывали смесью консорциума и фитопатогена в соотношении 1:1. Для этого семена предварительно стерилизовали 5 % раствором гипохлорита натрия в течение 10 мин, 5-кратно промывали стерильной дистиллированной водой и сушили в течение 2 ч в стерильных условиях ламинарного бокса («Ламинарные системы», Россия).

Семена инфицировали путем обработки суспензией фитопатогена (готовили путем смыва мицелия и спор гриба, выращенного на скошенном агаре при температуре 28 °С в течение 48 ч). Титр суспензии грибных фитопатогенов составлял не менее $2,5 \times 10^5$. Семена замачивали в суспензии в течение 2 ч, после чего высушивали в стерильных условиях. Консорциум микроорганизмов для обработки семян готовили аналогично, но культивирование изолятов осуществляли при температуре 28 °С. После обработки семена просушивали и помещали на чашки Петри с увлажненными дисками фильтровальной бумаги (25 семян на одну чашку). Семена инкубировали в климатической камере (Binder, Германия) при температуре 25 °С и влажности 40 %. Контролем служили семена необработанные фитопатогенами и консорциумом [28].

Каждый эксперимент проводили с трехкратной повторности. Математическую обработку проводили с помощью пакета программ Microsoft Office.

Результаты и их обсуждение

Биохимическую идентификацию проводили для 6-ти микроорганизмов. Результаты представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Результаты исследования биохимических особенностей грамотрицательных микроорганизмов

Table 1. Biochemical characteristics of gram-negative microorganisms

№	Субстрат	№ инокулята			
		1	4	5	7
1	Ala-Phe-Pro-arylamidase	–	–	–	+
2	Adonitol	–	+	–	–
3	L-pyrrolydonyl arylamidase	–	+	–	–
4	L-Arabitol	–	–	–	–
5	D-Cellobiose	+	+	+	–
6	Beta-galactosidase	+	+	+	–
7	H2S	–	–	–	–
8	Beta-N-acetyl-glucosaminidase	–	+	–	+
9	Glutamyl arylamidase pNA	–	–	–	–
10	D-glucose	+	+	+	–
11	Gamma-glutamyl-transferase	+	–	–	+
12	Fermentation/glucose	+	+	–	–
13	Beta-glucosidase	–	+	+	+
14	D-maltose	+	+	–	–
15	D-mannitol	+	+	+	–
16	D-mannose	+	+	+	–
17	Beta-xylosidase	+	+	+	–
18	Beta-alanine arylamidase pNA	–	–	–	–
19	L-proline arylamidase	–	–	–	+
20	Lipase	–	–	–	+
21	Palatinose	–	–	–	–
22	Tyrosine arylamidase	–	–	+	+
23	Urease	–	–	–	–
24	D-sorbitol	+	–	–	–
25	Saccharose/sucrose	+	+	+	–
26	D-tagatose	–	–	+	–
27	D-trehalose	+	+	+	–
28	Citrate (sodium)	+	–	–	+
29	Malonate	–	–	–	+
30	5-keto-D-gluconate	–	–	–	–
31	L-Lactate alkalisation	+	+	+	+
32	Alpha-glucosidase	–	–	–	+
33	Succinate alkalisation	–	–	–	+
34	Beta-N-acetyl-galactosaminidase	–	+	–	–
35	Alpha-galactosidase	–	–	–	–
36	Phosphatase	+	–	–	+
37	Glycine arylamidase	–	–	+	–
38	Ornithine decarboxylase	–	–	–	–
39	Lysine decarboxylase	–	–	–	+
40	L-histidine assimilation	–	–	–	–
41	Coumarate	–	+	+	–
42	Beta-glucoronidase	–	–	–	–
43	O/129 resistance (comp. vibrio)	+	–	–	–
44	Glu-Gly-Arg-arylamidase	–	–	–	+
45	L-malate assimilation	+	–	–	–
46	ELLMAN	+	+	–	–
47	L-Lactate assimilation	–	–	–	–

Таблица 2. Результаты исследования биохимических особенностей грамположительных микроорганизмов

Table 2. Biochemical characteristics of gram-positive microorganisms

№	Субстрат	№ инокулята	
		9	10
1	D-amygdalin	+	–
2	Phosphatidylinositol phospholipase C	–	–
3	D-xylose	–	+
4	Arginine dihydrolase 1	–	+
5	Beta-galactosidase	–	–
6	Alpha-glucosidase	+	+
7	Ala-Phe-Pro Arylamidase	–	–
8	Cyclodextrin	–	–
9	L-Aspartate arylamidase	–	–
10	Beta galactopyranosidase	+	–
11	Alpha-mannosidase	–	–
12	Phosphatase	–	+
13	Leucine arylamidase	+	–
14	L-Proline arylamidase	–	+
15	Beta glucuronidase	–	–
16	Alpha-galactosidase	–	–
17	L-Pyrrolydonyl-arylamidase	–	–
18	Beta-glucuronidase	–	–
19	Alanine arylamidase	+	–
20	Tyrosine arylamidase	–	+
21	D-sorbitol	+	–
22	Urease	–	+
23	Polymixin b resistance	+	+
24	D-galactose	+	+
25	D-ribose	+	+
26	L-Lactate alkalization	–	+
27	Lactose	+	+
28	N-Acetyl-D-Glucosamine	+	+
29	D-maltose	+	+
30	Bacitracin resistance	+	+
31	Novobiocin resistance	+	–
32	Growth in 6.5% NaCl	+	–
33	D-mannitol	+	+
34	D-mannose	+	+
35	Methyl-B-D-Glucopyranoside	+	–
36	Pullulan	–	–
37	D-raffinose	+	–
38	O/129 Resistance (comp.vibrio.)	+	+
39	Salicin	+	–
40	Saccharose/sucrose	+	+
41	D-trehalose	+	+
42	Arginine dihydrolase 2	–	–
43	Optochin resistance	+	+

Проведенные исследования позволили установить, что изолят № 1 – *Pantoea* sp. (с вероятностью 95 %), изолят № 4 – *Leclercia* sp. (с вероятностью 88 %), изолят № 5 – *Sphingomonas paucimobilis* (с вероятностью 87 %), изолят № 7 – *Stenotrophomonas maltophilia* (с вероятностью 86 %),

изолят № 9 – *Lactobacillus plantarum* (с вероятностью 99 %), изолят № 10 – *Staphylococcus aureus* (с вероятностью 85 %).

В предыдущих работах получили следующие результаты: изолят № 2 – *Klebsiella oxytoca* (с вероятностью 98 %), изолят № 3 – *Enterobacter aerogenes* (с вероятностью 86 %), изолят № 6 – *Pseudomonas putida* (с вероятностью 87 %), изолят № 8 – *Bacillus megaterium* (с вероятностью 88 %).

Для изучения антимикробной активности изолятов в отношении бактериальных культур выбрали модельный микроорганизм *Escherichia coli*. Антимикробная активность заключается в способности микроорганизмов продуцировать вещества, угнетающие развитие других микроорганизмов. Данные свойства могут использоваться для предотвращения развития на территории патогенной микрофлоры. Особенно актуально применение таких микроорганизмов в сельскохозяйственном направлении рекультивации (отсутствие фитопатогенов повысит приживаемость растений) [29, 30]. Результаты приведены на рисунке 1.

По данным рисунка 1, 5 штаммов не проявили антимикробной активности по отношению к модельному микроорганизму *E. coli*. К таким микроорганизмам относятся *K. oxytoca*, *S. paucimobilis*, *S. maltophilia*, *B. megaterium* и *L. plantarum*. Для остальных штаммов зона ингибирования варьировалась в пределах от 1,0 до 3,0 мм. Результаты исследования антимикробной активности свидетельствуют о том, что большинство изученных микроорганизмов не обладает бактерицидными свойствами. В связи с этим дальнейшее изучение изолятов сосредоточено на исследовании антагонистической активности в отношении фитопатогенов грибковой природы. Результаты исследования антагонистической активности микроорганизмов по отношению к фитопатогенным грибам представлены в таблице 3.

Из полученных данных видно, что наиболее перспективными являлись штаммы-антагонисты *E. aerogenes*, *Leclercia* sp., *S. paucimobilis*, *B. megaterium* и *L. plantarum*. Наибольшую активность по отношению к фитопатогенным грибам *Alternaria alternata* на седьмые сутки культивирования проявили *Leclercia* sp. – 31,3 %, *S. paucimobilis* – 33,7 %, *L. plantarum* – 27,6 %. *B. megaterium* проявил на седьмые сутки культивирования антагонистическую активность к грибам рода *Fusarium*, особенно к *Fusarium graminearum* – 26,8–28,0 %. *E. aerogenes* на седьмые сутки культивирования подавлял рост грибов *F. graminearum* – 31,2–32,3 %. Наибольшую антагонистическую активность по отношению к фитопатогенным грибам *F. graminearum* и *Fusarium sporotrichioides* проявили на седьмые сутки культивирования *Leclercia* sp. – 51,–54,8 и 63,0 %, *S. paucimobilis* – 68,4–70,8 и 58,5 %, *L. plantarum* – 80,1–82,4 и 80,3 % соответственно. Антагонистическая активность к грибам вида *A. alternata*

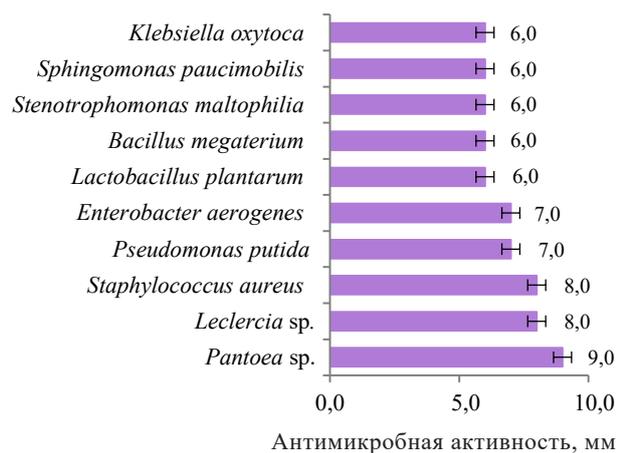


Рисунок 1. Результаты антимикробной активности выделенных микроорганизмов

Figure 1. Antimicrobial activity of the isolated microorganisms

на седьмые сутки отсутствовала у *K. oxytoca* – 3,5 %, *Pantoea* sp. – 7,3 %, *S. aureus* – 9,4 %. Зону ингибирования у *S. maltophilia* не наблюдали. К грибам вида *F. sporotrichioides* не устойчив штамм *Pantoea* sp. Микроорганизмы *K. oxytoca* и *S. maltophilia* показали низкую активность на седьмые сутки культивирования по отношению к *F. graminearum* – от 9,6 до 10,5 %.

Большинство штаммов-антагонистов проявляли максимальную активность в отношении фитопатогенов на седьмые сутки культивирования. Однако пик активности некоторых штаммов приходился на пятые сутки культивирования и не изменялся. Например, на пятые сутки культивирования штаммы *Pantoea* sp. и *P. putida* проявили антагонистичность к *A. alternata* – 7,3 и 8,2 % соответственно, а микроорганизм *K. oxytoca* к фитопатогенному грибу *F. graminearum* PH-1 (F-877) – 9,9 %.

Таблица 3. Результаты антагонистической активности выделенных микроорганизмов по отношению к фитопатогенным грибам

Table 3. Antagonistic activity of the isolated microorganisms against phytopathogenic fungi

Штамм-антагонист	Время инкубации, сутки	Штамм-фитопатоген, %			
		<i>Alternaria alternata</i> (F-525)	<i>Fusarium graminearum</i> PH-1 (F-877)	<i>Fusarium graminearum</i> (F-892)	<i>Fusarium sporotrichioides</i> T11 (F-902)
<i>Pantoea</i> sp.	3	3,8 ± 0,1	10,0 ± 0,5	10,4 ± 0,5	0
	5	7,3 ± 0,2	12,1 ± 0,6	12,6 ± 0,6	0
	7	7,3 ± 0,2	14,6 ± 0,7	15,0 ± 0,8	0
<i>Klebsiella oxytoca</i>	3	0	8,4 ± 0,4	7,2 ± 0,4	11,4 ± 0,4
	5	2,8 ± 0,1	9,9 ± 0,5	9,1 ± 0,5	14,8 ± 0,5
	7	3,5 ± 0,1	9,9 ± 0,5	10,5 ± 0,5	15,3 ± 0,5
<i>Enterobacter aerogenes</i>	3	4,5 ± 0,1	6,4 ± 0,3	10,0 ± 0,5	9,7 ± 0,3
	5	12,6 ± 0,4	18,4 ± 0,9	16,1 ± 0,8	16,2 ± 0,5
	7	16,2 ± 0,5	32,3 ± 1,6	31,2 ± 1,6	21,0 ± 0,6
<i>Leclercia</i> sp.	3	14,2 ± 0,5	30,4 ± 1,5	33,0 ± 1,7	29,7 ± 0,9
	5	18,6 ± 0,6	42,1 ± 2,1	39,6 ± 2,0	43,8 ± 1,3
	7	31,3 ± 1,0	54,8 ± 2,7	51,7 ± 2,6	63,0 ± 1,9
<i>Sphingomonas paucimobilis</i>	3	12,9 ± 0,4	36,0 ± 1,5	35,1 ± 1,1	27,6 ± 1,1
	5	21,5 ± 0,7	44,2 ± 1,9	53,9 ± 1,6	46,3 ± 1,8
	7	33,7 ± 1,1	68,4 ± 2,9	70,8 ± 2,2	58,5 ± 2,3
<i>Pseudomonas putida</i>	3	3,0 ± 0,1	15,7 ± 0,7	14,3 ± 0,4	0
	5	8,2 ± 0,3	17,0 ± 0,7	15,8 ± 0,5	3,8 ± 0,1
	7	8,2 ± 0,3	17,8 ± 0,8	16,1 ± 0,5	6,7 ± 0,2
<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	3	0	0	5,8 ± 0,2	15,0 ± 0,4
	5	0	2,7 ± 0,1	7,4 ± 0,2	17,2 ± 0,4
	7	0	10,2 ± 0,4	9,6 ± 0,3	21,4 ± 0,5
<i>Bacillus megaterium</i>	3	5,2 ± 0,2	7,6 ± 0,4	8,9 ± 0,3	2,5 ± 0,1
	5	8,6 ± 0,3	13,2 ± 0,6	17,3 ± 0,5	11,4 ± 0,4
	7	17,8 ± 0,6	26,8 ± 1,2	28,0 ± 0,9	15,9 ± 0,6
<i>Lactobacillus plantarum</i>	3	12,7 ± 0,4	48,3 ± 2,2	52,1 ± 3,1	50,0 ± 2,8
	5	20,4 ± 0,7	75,1 ± 3,5	74,9 ± 4,5	71,8 ± 4,0
	7	27,6 ± 0,9	82,4 ± 3,8	80,1 ± 4,9	80,3 ± 4,4
<i>Staphylococcus aureus</i>	3	2,8 ± 0,1	11,3 ± 0,5	11,9 ± 0,2	0
	5	5,0 ± 0,2	15,8 ± 0,7	14,7 ± 0,3	6,4 ± 0,2
	7	9,4 ± 0,3	18,1 ± 0,8	19,0 ± 0,4	13,1 ± 0,5

Полученные в настоящем исследовании данные согласуются с результатами, представленными в современной научной литературе. Сообщается, что антагонистической активностью в отношении грибов рода *Alternaria* обладают различные представители рода *Bacillus*. В исследовании *S. Panebianco* и др. отмечена способность эпифитов *Bacillus cereus* 6С, *Bacillus licheniformis* 4L, *Bacillus thuringiensis* 18D и *Bacillus velezensis* 23A, выделенных из плодов томатов PGI Pachino, угнетать развитие *A. alternata* в условиях искусственного инфицирования [31]. Способность ингибировать процесс спорообразования и роста мицелия данного фитопатогена отмечена у штамма L2 *B. megaterium*. Данный микроорганизм способен снижать спорообразование на 96,02 % [32].

Отмечена способность к подавлению *Alternaria* у представителей рода *Pseudomonas*. Согласно данным, представленным в работе *S. Gupta* и др., *Pseudomonas fluorescens* проявлял антимикробные свойства в отношении *Alternaria brassicae*. Кроме того, отмечена способность изолята к стимулированию роста сельскохозяйственных культур [33].

Антимикробная активность *S. maltophilia* в отношении *Alternaria* отмечена в работе *U. Jankiewicz* и соавторов [34]. Сообщается, что высокая активность штамма обусловлена выделением в субстрат активного хитинолитического фермента, относящегося к семейству 18 гликозилгидролаз. Следует отметить, что антагонистическая активность *S. maltophilia* проявлялась в отношении грибковых фитопатогенов *Rhizoctonia* и *Fusarium*.

В качестве антагонистов фитопатогенов рода *Fusarium* выделяют представителей *Pseudomonas*. В работе *Chavéz-Díaz* и др. описана способность 3-х изолятов *Pseudomonas*, выделенных из ризосферы мексиканских сортов кукурузы, ограничивать рост мицелия фитопатогена и повышать скорость прорастания семян. У саженцев, обработанных изолятами, наблюдалась более развитая корневая система, а также надземная часть [35]. В литературных данных представлена информация об успешном ингибировании фузариоза штаммом *L. plantarum*. Данный микроорганизм способен колонизировать колосья пшеницы, успешно подавлять грибковые заболевания и повышать питательные свойства зер-

на [36]. Способностью снижать воздействие фитопатогенов рода *Fusarium* на корневую систему культурных растений характеризуются *Pantoea* sp. и *Enterobacter* sp. Эффективность данных микроорганизмов сохраняется как в тепличных, так и полевых условиях [37].

Таким образом, выделенные в настоящей работе микроорганизмы обладают широкими перспективами в борьбе с фитопатогенами культурных растений.

Для составления консорциумов микроорганизмов изучали биосовместимость изолятов. Результаты представлены в таблице 4.

Согласно полученным данным штамм *E. aerogenes* не совместим с *Leclercia* sp., *S. paucimobilis* и *L. plantarum*, т. к. происходит подавление их роста. Штамм *Leclercia* sp. положительно влияет на рост *S. paucimobilis* и *L. plantarum*. Метаболиты *S. paucimobilis* подавляют рост *E. aerogenes* и *B. megaterium*, но с *Leclercia* sp. и *L. plantarum* активно растут. Микроорганизм *B. megaterium* проявил совместимость только с *S. paucimobilis*. Метаболиты штамма *L. plantarum* отрицательно влияют на рост *E. aerogenes* и *B. megaterium*.

По результатам проведенного исследования для составления консорциума отобрали штаммы, не проявляющие антагонистические свойства по отношению друг к другу. К данным микроорганизмам относятся *Leclercia* sp., *S. paucimobilis* и *L. plantarum*. Дальнейшие исследования проводили для четырех вариантов консорциумов на основе выбранных штаммов (табл. 5).

Результаты антагонистической активности консорциумов микроорганизмов в отношении фитопатогенных грибов рода *Alternaria* и *Fusarium* приведены в таблице 6.

Согласно полученным данным консорциум В проявил высокую антагонистическую активность к фитопатогенным грибам. Эксперимент с *A. alternata* показал, что площадь, не занятая фитопатогеном, возросла на 4,2 % по отношению к среднему значению отдельных микроорганизмов, входящих в состав. Антимикробная активность консорциума в отношении грибов рода *Fusarium* увеличилась в среднем на 20,2 % на седьмые сутки культивирования. Консорциум А проявил низкую антагонистическую актив-

Таблица 4. Результаты исследования биосовместимости выделенных микроорганизмов

Table 4. Biocompatibility of the isolated microorganisms

Штамм	<i>Enterobacter aerogenes</i>	<i>Leclercia</i> sp.	<i>Sphingomonas paucimobilis</i>	<i>Bacillus megaterium</i>	<i>Lactobacillus plantarum</i>
<i>Enterobacter aerogenes</i>	–	–	–	+	–
<i>Leclercia</i> sp.	–	+	+	–	+
<i>Sphingomonas paucimobilis</i>	–	+	–	–	+
<i>Bacillus megaterium</i>	–	–	+	–	–
<i>Lactobacillus plantarum</i>	–	+	+	–	–

Таблица 5. Состав консорциумов микроорганизмов

Table 5. Composition of consortia

Варианты консорциумов	Состав консорциума
Консорциум А	<i>Leclercia</i> sp., <i>Sphingomonas paucimobilis</i> и <i>Lactobacillus plantarum</i> , соотношение концентраций микроорганизмов 1:1:1
Консорциум В	<i>Leclercia</i> sp., <i>Sphingomonas paucimobilis</i> и <i>Lactobacillus plantarum</i> , соотношение концентраций микроорганизмов 2:1:1
Консорциум С	<i>Leclercia</i> sp., <i>Sphingomonas paucimobilis</i> и <i>Lactobacillus plantarum</i> , соотношение концентраций микроорганизмов 1:2:1
Консорциум D	<i>Leclercia</i> sp., <i>Sphingomonas paucimobilis</i> и <i>Lactobacillus plantarum</i> , соотношение концентраций микроорганизмов 1:1:2

Таблица 6. Результаты антагонистической активности выделенных микроорганизмов по отношению к фитопатогенным грибам

Table 6. Antagonistic activity of the isolated microorganisms against phytopathogenic fungi

Варианты консорциумов	Время инкубации, сутки	Штамм-фитопатоген, %			
		<i>Alternaria alternata</i> (F-525)	<i>Fusarium graminearum</i> PH-1 (F-877)	<i>Fusarium graminearum</i> (F-892)	<i>Fusarium sporotrichioides</i> T11 (F-902)
Консорциум А	3	12,9 ± 0,4	42,2 ± 1,4	42,8 ± 1,4	40,1 ± 1,3
	5	17,0 ± 0,5	60,8 ± 2,0	59,3 ± 2,0	49,1 ± 1,6
	7	21,5 ± 0,7	69,0 ± 2,3	62,3 ± 2,1	70,2 ± 2,3
Консорциум В	3	15,2 ± 0,5	50,9 ± 1,5	53,1 ± 1,8	55,3 ± 1,9
	5	26,4 ± 0,8	76,9 ± 2,3	75,6 ± 2,6	73,2 ± 2,5
	7	35,1 ± 1,1	90,2 ± 2,7	87,6 ± 3,0	86,2 ± 3,0
Консорциум С	3	13,4 ± 0,4	37,2 ± 1,2	36,5 ± 1,1	34,6 ± 1,0
	5	19,9 ± 0,6	55,4 ± 1,7	50,0 ± 1,5	41,5 ± 1,3
	7	28,7 ± 0,8	60,9 ± 1,9	67,8 ± 2,1	48,0 ± 1,5
Консорциум D	3	10,8 ± 0,4	35,0 ± 1,2	32,4 ± 1,0	38,1 ± 1,2
	5	18,3 ± 0,6	48,2 ± 1,7	48,0 ± 1,6	55,7 ± 1,8
	7	31,2 ± 1,0	52,3 ± 1,9	52,9 ± 1,7	60,3 ± 1,9

ность на седьмые сутки культивирования в отношении *A. alternata* – на 9,4 % ниже среднего значения, *F. graminearum* (F-892) – на 5,2 % ниже среднего значения. При сравнении результатов среднего значения отдельных микроорганизмов и консорциума С отмечено, что в отношении *A. alternata* активность снизилась на 2,2 %, *F. graminearum* PH-1 (F-877) – на 7,6 %, а с *F. sporotrichioides* активность оказалась наименьшей среди остальных консорциумов – 48,0 %, что на 19,3 % меньше среднего значения. Консорциум D проявил низкую антагонистическую активность по отношению к грибам рода *Fusarium*. По сравнению со средним значением активности отдельных микроорганизмов по отношению к *F. graminearum* PH-1 (F-877) площадь, не занятая фитопатогеном, снизилась на 16,2 %, к *F. graminearum* (F-892) – на 14,6 %. Все консорциумы проявляли максимальную активность в отношении фитопатогена на седьмые сутки культивирования.

Результаты исследования способности разработанных консорциумов ингибировать фитопатогенное воздействие на пшеницу представлены в

таблице 7. Согласно полученным данным при совместной обработке семян консорциумом и фитопатогенами всхожесть семян варьировалась в пределах 73,2–99,6 %. Наибольший эффект консорциумы проявляли в отношении *F. graminearum* PH-1 (F-877).

Высокая всхожесть семян при воздействии фитопатогенных грибов наблюдалась при обработке консорциумом В. Среднее количество проросших семян при обработке консорциумом В составило 24,8 шт. Наименьшим фитостимулирующим эффектом обладал консорциум А – в среднем 21 шт проросших семян. Средняя длина coleoptilia при обработке консорциумом В на 10,5 % выше, чем в контрольных образцах. При инокуляции семян консорциумом А средняя длина coleoptilia составила 39,1 мм, что на 1,5 % меньше, чем в контроле. Обработка семян консорциумом В привела к увеличению суммарной длины корней – в среднем на 7,2 % больше, чем при обработке водой, при применении консорциума D – 185,9 мм (на 1,9 % меньше, чем в контроле). Наименьшее количество корешков на

Таблица 7. Показатели роста пшеницы, обработанной консорциумами и фитопатогенными грибами

Table 7. Growth of wheat treated with consortia and phytopathogenic fungi

Вариант обработки	Среднее количество проросших семян, шт	Средняя длина coleoptиля, мм	Суммарная длина корней проростков, мм	Среднее количество корешков на одно растение, шт
<i>Alternaria alternata</i> (F-525)				
Консорциум А	19,2 ± 1,4	39,1 ± 1,8	187,4 ± 9,5	3,8 ± 0,3
Консорциум В	24,8 ± 1,9	48,3 ± 2,6	190,1 ± 10,2	3,9 ± 0,4
Консорциум С	22,0 ± 1,6	40,8 ± 2,1	197,1 ± 10,1	3,5 ± 0,2
Консорциум D	24,2 ± 1,5	45,6 ± 2,2	201,3 ± 10,9	3,3 ± 0,2
<i>Fusarium graminearum</i> (F-877) PH-1				
Консорциум А	24,2 ± 1,3	46,7 ± 2,3	206,2 ± 10,2	4,1 ± 0,3
Консорциум В	24,9 ± 2,0	45,1 ± 2,5	215,6 ± 10,5	4,0 ± 0,2
Консорциум С	23,9 ± 1,2	41,2 ± 2,1	186,2 ± 10,3	3,0 ± 0,1
Консорциум D	21,4 ± 2,1	43,3 ± 2,2	179,7 ± 9,6	3,4 ± 0,1
<i>Fusarium graminearum</i> (F-892)				
Консорциум А	20,1 ± 1,8	36,4 ± 1,9	179,2 ± 9,6	3,9 ± 0,4
Консорциум В	24,6 ± 2,3	37,2 ± 2,4	210,6 ± 10,2	4,3 ± 0,5
Консорциум С	23,1 ± 1,2	41,3 ± 2,3	201,4 ± 9,5	3,4 ± 0,4
Консорциум D	20,2 ± 1,6	38,3 ± 2,1	195,1 ± 10,2	3,2 ± 0,2
<i>Fusarium sporotrichioides</i> (F-902) T11				
Консорциум А	20,5 ± 1,6	34,2 ± 1,9	195,7 ± 9,7	4,1 ± 0,3
Консорциум В	24,9 ± 2,1	44,9 ± 2,1	200,2 ± 9,4	5,1 ± 0,2
Консорциум С	21,8 ± 1,8	40,1 ± 1,9	210,4 ± 10,3	3,3 ± 0,1
Консорциум D	18,3 ± 1,7	35,1 ± 1,8	167,3 ± 9,4	3,2 ± 0,1
Контроль				
Без обработки	24,7 ± 2,1	39,7 ± 2,5	189,4 ± 10,17	3,8 ± 0,1

одно растение в среднем наблюдали при обработке консорциумами С и D – меньше на 1,15 и 1,16 % соответственно, чем при обработке водой. Среднее количество корешков на одно растение увеличилось в 1,13 раза при обработке консорциумом В по сравнению с контролем.

Проростки, обработанные консорциумом В и фитопатогенном *F. graminearum* (F-892), и контрольный образец, необработанный консорциумом и фитопатогеном, представлены на рисунке 2.

Во всех обработанных консорциумами вариантах не отмечено визуальных дефектов в морфометрических показателях пшеницы. Ростки обладали равномерным цветом, не отличающимся от контрольных образцов (без обработки консорциумами и фитопатогенами).

Выводы

В ходе исследования идентифицировали 6 экстремофильных микроорганизмов и изучили антагонистическую активность 10 изолятов по отношению к модельной бактерии *Escherichia coli*. Образцы демонстрировали низкие бактерицидные свойства. Дальнейшие исследования штаммов проводили в отношении фитопатогенных грибов *Alternaria alternata* (F-525), *Fusarium graminearum* PH-1 (F-877), *Fusarium graminearum* (F-892) и *Fusarium sporotrichioides* T11 (F-902). Результаты показали, что наиболее перспективными штаммами-антагонистами выступали *Enterobacter aerogenes*, *Leclercia* sp., *Sphingomonas paucimobilis*, *Bacillus megaterium* и *Lactobacillus plantarum*. Установлено, что большинство штаммов-антагонистов проявляли максимальную активность в отношении фитопатогенов на седьмые сутки культивирования. Для составления консорциумов отобранные изоляты проверяли на биосовместимость. По результатам опыта выбраны штаммы,



Контрольный образец (обработка семян водой без фитопатогена)

Обработка семян консорциумом В и *Fusarium graminearum* (F-892)

Рисунок 2. Внешний вид проростков пшеницы, обработанных консорциумом В и *Fusarium graminearum* (F-892)

Figure 2. Wheat seedlings treated with consortium B and *Fusarium graminearum* (F-892)

не проявляющие антагонистические свойства в отношении друг друга, а именно *Leclercia* sp., *S. paucimobilis* и *L. plantarum*. Соотношение культур составило 1:1:1, 2:1:1, 1:2:1, 1:1:2 – консорциум А, В, С и D соответственно. Сконструированные консорциумы изучали на антагонистическую активность в отношении фитопатогенных грибов. Установлено, что совместное использование *Leclercia* sp., *S. paucimobilis* и *L. plantarum* в соотношении 2:1:1 (консорциум В) позволило увеличить антагонистические свойства, по сравнению со средними значениями, для отдельных микроорганизмов. Данное соотношение оказывало фитостимулирующий эффект на семена пшеницы (средняя длина coleoptила на 10,5 % выше, чем в контрольных образцах, всхожесть семян в среднем 24,8 шт). Кроме того, при совместной обработке семян консорциумом и фитопатогенами не отмечено визуальных дефектов в морфометрических показателях пшеницы. Таким образом,

разработанный консорциум обладает высокой эффективностью защиты пшеницы от патогенов рода *Alternaria* и *Fusarium*.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в данной публикации.

Contribution

The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest regarding this publication.

References/Список литературы

1. Sabouri H, Kazerani B, Fallahi HA, Dehghan MA, Alegh SM, Dadras AR, et al. Association analysis of yellow rust, fusarium head blight, tan spot, powdery mildew, and brown rust horizontal resistance genes in wheat. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2022;118. <https://doi.org/10.1016/j.pmp.2022.101808>
2. Drakopoulos D, Kägi A, Six J, Zorn A, Wettstein FE, Bucheli TD, et al. The agronomic and economic viability of innovative cropping systems to reduce Fusarium head blight and related mycotoxins in wheat. *Agricultural Systems*. 2021;192. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103198>
3. Shude SPN, Mbili NC, Yobo KS. Epiphytic yeasts as potential antagonists against Fusarium head blight of wheat (*Triticum aestivum* L.) caused by *Fusarium graminearum sensu stricto*. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2022;21(6):404–411. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.11.001>
4. Zhang D, Chen G, Zhang H, Jin N, Gu C, Weng S, et al. Integration of spectroscopy and image for identifying fusarium damage in wheat kernels. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2020;236. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118344>
5. Martínez M, Biganzoli F, Arata A, Dinolfo MI, Rojas D, Cristos D, et al. Warm nights increase Fusarium Head Blight negative impact on barley and wheat grains. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2022;318. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108909>
6. Gagkaeva TYu, Gavrilova OP, Orina AS. First detection of *Fusarium globosum* in small grain cereals on Ural and Siberian territory. *Plant Protection News*. 2019;99(1):10–18. (In Russ.). [https://doi.org/10.31993/2308-6459-2019-1\(99\)-10-18](https://doi.org/10.31993/2308-6459-2019-1(99)-10-18)
7. Asan-Ozusaglam M, Celik I. White pitahaya as a natural additive: potential usage in cosmetic industry. *Foods and Raw Materials*. 2023;11(1):57–63. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-552>
8. Wegulo SN, Baenziger PS, Nopsa JH, Bockus WW, Hallen-Adams H. Management of Fusarium head blight of wheat and barley. *Crop Protection*. 2015;73:100–107. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.025>
9. da Cruz Cabral L, Delgado J, Patriarca A, Rodríguez A. Differential response to synthetic and natural antifungals by *Alternaria tenuissima* in wheat simulating media: Growth, mycotoxin production and expression of a gene related to cell wall integrity. *International Journal of Food Microbiology*. 2019;292:48–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.12.005>
10. Somma S, Amatulli MT, Masiello M, Moretti A, Logrieco AF. *Alternaria* species associated to wheat black point identified through a multilocus sequence approach. *International Journal of Food Microbiology*. 2019;293:34–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2019.01.001>
11. Guler GO, Cakmak YS, Dagli Z, Aktumsek A, Ozparlak H. Organochlorine pesticide residues in wheat from Konya region, Turkey. *Food and Chemical Toxicology*. 2010;48(5):1218–1221. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2010.02.013>
12. Syed-Ab-Rahman SF, Singh E, Pieterse CMJ, Schenk PM. Emerging microbial biocontrol strategies for plant pathogens. *Plant Science*. 2018;262:102–111. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.11.012>

13. Choe SG, Maeng HR, Pak SJ, U SN. Production of *Bacillus thuringiensis* biopesticide using penicillin fermentation waste matter and application in agriculture. *Journal of Natural Pesticide Research*. 2022;2. <https://doi.org/10.1016/j.napere.2022.100012>
14. Ajayi FF, Ogori AF, Orede VO, Peter E. Synergistic effect of *Balanites aegyptiaca* essential oil and storage materials on cowpea seeds. *Foods and Raw Materials*. 2022;10(2):353–364. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-2-545>
15. Lu C, Yang Z, Liu J, Liao Q, Ling W, Waigi MG, *et al.* Chlorpyrifos inhibits nitrogen fixation in rice-vegetated soil containing *Pseudomonas stutzeri* A1501. *Chemosphere*. 2020;256. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127098>
16. Walder F, Schmid MW, Riedo J, Valzano-Held AY, Banerjee S, Büchi L, *et al.* Soil microbiome signatures are associated with pesticide residues in arable landscapes. *Soil Biology and Biochemistry*. 2022;174. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108830>
17. Tao Y, Jia C, Jing J, Zhang J, Yu P, He M, *et al.* Occurrence and dietary risk assessment of 37 pesticides in wheat fields in the suburbs of Beijing, China. *Food Chemistry*. 2021;350. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129245>
18. Mrid RB, Benmrid B, Hafsa J, Boukcim H, Sobeh M, Yasri A. Secondary metabolites as biostimulant and bioprotectant agents: A review. *Science of the Total Environment*. 2021;777. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146204>
19. Nysanth NS, Divya S, Nair CB, Anju AB, Praveena R, Anith KN. Biological control of foot rot (*Phytophthora capsici* Leonian) disease in black pepper (*Piper nigrum* L.) with rhizospheric microorganisms. *Rhizosphere*. 2022;23. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100578>
20. Santos AP, Muratore LN, Solé-Gil A, Fariás ME, Ferrando A, Blázquez MA, *et al.* Extremophilic bacteria restrict the growth of *Macrophomina phaseolina* by combined secretion of polyamines and lytic enzymes. *Biotechnology Reports*. 2021;32. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00674>
21. Giudice AL, Fani R. Antimicrobial potential of cold-adapted bacteria and fungi from Polar Regions. In: Rampelotto PH, editor. *Biotechnology of extremophiles: Advances and challenges*. Cham: Springer; 2016. pp. 83–115. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13521-2_3
22. Liu K, Ding H, Yu Y, Chen B. A cold-adapted chitinase-producing bacterium from Antarctica and its potential in biocontrol of plant pathogenic fungi. *Marine Drugs*. 2019;17(12). <https://doi.org/10.3390/md17120695>
23. Milentyeva IS, Fotina NV, Zharko MYu, Proskuryakova LA. Microbial treatment and oxidative stress in agricultural plants. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(4):750–761. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2403>
24. Voitenkova EV, Matveeva ZN, Makarova MA, Egorova SA, Zabrovskaya AV, Suzhaeva LV, *et al.* Difficulties in identification of *Comamonas kerstersii* strains isolated from intestinal microbiota of residents of Republic of Guinea and Russian Federation. *Russian Journal of Infection and Immunity*. 2018;8(2):164–168. <https://doi.org/10.15789/2220-7619-2018-2-163-168>
25. Khalil T, Oklab MK, Al-Qahtanic WH, Alia F, Zahrad M, Shakeela Q, *et al.* Tracing probiotic producing bacterial species from gut of buffalo (*Bubalus bubalis*), South-East-Asia. *Brazilian Journal of Biology*. 2022;84. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.259094>
26. Sornakili A, Thankappan S, Sridharan AP, Nithya P, Uthandi S. Antagonistic fungal endophytes and their metabolite-mediated interactions against phytopathogens in rice. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2020;112. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2020.101525>
27. Mahar A, Wang P, Ali A, Awasthi MK, Lahori AH, Wang Q, *et al.* Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016;126:111–121. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023>
28. Goswami M, Deka S. Isolation of a novel rhizobacteria having multiple plant growth promoting traits and antifungal activity against certain phytopathogens. *Microbiological Research*. 2020;240. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126516>
29. Gorbunov MYu, Mrachkovskaya AN. The use of growth stimulants to increase the commercial yield of petunia seedlings. *Trends in the Development of Science and Education*. 2018;(35–4):60–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.18411/lj-28-02-2018-70>
30. Asyakina LK, Dyshlyuk LS, Prosekov AYu. Reclamation of post-technological landscapes: International experience. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(4):805–818. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-805-818>
31. Panebianco S, Lombardo MF, Anzalone A, Musumarra A, Pellegriti MG, Catara V, *et al.* Epiphytic and endophytic microorganisms associated to different cultivar of tomato fruits in greenhouse environment and characterization of beneficial bacterial strains for the control of post-harvest tomato pathogens. *International Journal of Food Microbiology*. 2022;379. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109861>

32. Xie Z, Li M, Wang D, Wang F, Shen H, Sun G, et al. Biocontrol efficacy of *Bacillus siamensis* LZ88 against brown spot disease of tobacco caused by *Alternaria alternata*. *Biological Control*. 2021;154. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104508>
33. Gupta S, Didwania N, Singh D. Biological control of mustard blight caused by *Alternaria brassicae* using plant growth promoting bacteria. *Current Plant Biology*. 2020;23. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2020.100166>
34. Jankiewicz U, Brzezinska MS, Saks E. Identification and characterization of a chitinase of *Stenotrophomonas maltophilia*, a bacterium that is antagonistic towards fungal phytopathogens. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2012;113(1): 30–35. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2011.08.023>
35. Chavéz-Díaz IF, Cruz-Cárdenas CI, Sandoval-Cancino G, Calvillo-Aguilar FF, Ruíz-Ramírez S, Blanco-Camarillo M, et al. Seedling growth promotion and potential biocontrol against phytopathogenic *Fusarium* by native rhizospheric *Pseudomonas* spp. strains from Amarillo Zamorano maize landrace. *Rhizosphere*. 2022;24. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100601>
36. Baffoni L, Gaggia F, Dalanaj N, Prodi A, Nipoti P, Pisi A, et al. Microbial inoculants for the biocontrol of *Fusarium* spp. in durum wheat. *BMC Microbiology*. 2015;15. <https://doi.org/10.1186/s12866-015-0573-7>
37. Wang L-Y, Xie Y-S, Cui Y-Y, Xu J, He W, Chen H-G, et al. Conjunctively screening of biocontrol agents (BCAs) against fusarium root rot and fusarium head blight caused by *Fusarium graminearum*. *Microbiological Research*. 2015;177:34–42. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.05.005>