

ВЛИЯНИЕ БОРЬБЫ С ФИТОПАТОГЕНАМИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОРБЦИОННО-СТИМУЛИРУЮЩИХ ПРЕПАРАТОВ НА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУРАХ

Г.Н.Федотов¹✉, Т.А. Грачева¹, И.В. Горепекин^{1, 2}, Ю.П. Батырев³

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, факультет почвоведения МГУ

²Евразийский центр по продовольственной безопасности (Аграрный центр МГУ), Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

³МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

gennadiy.fedotov@gmail.com

Проведено изучение эффективности одного из классов стимуляторов — сорбционно-стимулирующих препаратов, а также разработаны подходы к созданию эффективных препаратов-стимуляторов. Объектами исследования выступали семена сортов яровой и озимой пшениц, ярового ячменя и озимой ржи. Испытания проводили на дерново-подзолистой почве, изменяя ее аллелотоксичность за счет пробоподготовки. Фиксируемым показателем при оценке аллелотоксичности, а также эффективности действия препарата выступала суммарная длина проростков семян. Определение микробиологического состава почв проводилось при помощи прямой люминесцентной микроскопии и посева на питательные среды. В ходе экспериментов установлено, что повышение аллелотоксичности почвенных образцов приводило к заметному снижению эффектов стимуляции препаратом для семян яровой пшеницы. При добавлении в состав препарата сахарозы, способствующей развитию микроорганизмов, и увеличении дозы использования состава в 1,5 раза эффекты стимуляции продолжили убывать, достигая значений ингибирования для некоторых сортов. На яровом ячмене повышение дозы препарата, напротив, приводило к росту его эффективности. Однако увеличение значений агрофона до избыточного уровня, при котором развиваются грибы-фитопатогены, показало, что состав с сахарозой более не стимулирует, а угнетает прорастание семян и развитие проростков ячменя. На основе полученных данных сделан вывод о том, что аллелотоксины могут поступать в семена и развивающиеся растения не только из почв, но и из фитопатогенов, поэтому использование стимуляторов без ограничения развития фитопатогенов не позволяет решить проблему защиты семян от аллелотоксинов. Для этого предложено использовать препарат совместно с фунгицидами. Лабораторные эксперименты подтвердили правильность такого подхода — применение состава совместно с фунгицидами во всех случаях оказывает стимулирующее действие на изученных нами сортах и культурах зерновых.

Ключевые слова: аллелотоксичность почв, стимуляция семян, предпосевная обработка семян, фунгициды, ретардантный эффект фунгицидов

Ссылка для цитирования: Федотов Г.Н., Грачева Т.А., Горепекин И.В., Батырев Ю.П. Влияние борьбы с фитопатогенами на эффективность использования сорбционно-стимулирующих препаратов на зерновых культурах // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 70–81.
DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-70-81

Многократные попытки стимуляции прорастания семян путем их предпосевной обработки широко освещены в литературе [1, 2]. Известны сотни химических соединений и препаратов, ускоряющих прорастание семян или защищающих их от болезней и вредителей [3–5]. Эти соединения отличаются по химическому составу и природе биологического действия, поэтому до сих пор нет единой теоретической базы, с помощью которой можно было бы объяснить их влияние на семена. Среди такого типа

соединений есть протравители — вещества, обеспечивающие защиту семян от патогенной микрофлоры и вредителей [3, 6].

Химические соединения и препараты применяют также для ускорения прорастания семян. Например, в литературе [4] описан нанопрепарат на основе железа, повысивший урожайность кукурузы на 14,3 % при обработке этим препаратом ее семян. Кроме того, в зернах кукурузы по сравнению с контрольным образцом содержание витамина А возросло на 137 % [4]. Другой пример описывает использование составов на основе кремния для обработки семян

ярового ячменя [5], что позволяет усилить устойчивость этого растения к действию засухи и повысить его продуктивность на 17...21 %. Кроме того, благодаря применению этих соединений в семенах также возросло среднее содержание фосфора [5].

Основной недостаток многих подобных химических составов заключается в разработке стимулирующих составов с помощью эмпирических методов, а механизм действия носит предположительный характер. В частности, в приведенных выше исследованиях стимуляцию семян рассматривали не как систему во всем ее многообразии, включающую почву, почвенные микроорганизмы (эндофиты, микоризу, патогенны), семена или растения и препарат стимулятор, а пытались подобрать вещества, которые в отрыве от почвы оказывают активирующее воздействие на биохимические процессы, протекающие в семенах. По этой причине из рассмотрения полностью исключалось такое важнейшее почвенное свойство, как аллелотоксичность [7–15], угнетающее воздействующее на прорастание семян и развитие из них растений и возможно, влияющее на развитие эндофитов [16, 17], микориз зерновых [18–20] и активизирующее фитопатогены [11]. Фитопатогены к тому же способны производить аллелотоксины, ослабляющие защитную реакцию растения-хозяина и ассоциированных с ним видов микроорганизмов. К идентифицированным родам, производящим аллелотоксины, относят грибы следующих родов: *Microcyclospora*, *Fusarium*, *Sclerotinia*, *Myrothecium*, *Trichothecium*, *Peltaster*, *Spicellum*, *Alternaria*, *Stachybotrys*, *Isaria*, *Trichoderma* [21–24].

При этом для рода *Alternaria* известно не менее 70 видов токсинов, 20 из которых являются специфическими для растения-хозяина [23]. Отметим, что грибы не только выделяют микотоксины, но и обладают способностью к детоксикации фитотоксинов, формирующих защитную систему растения. Так, семейство Brassicaceae для защиты от патогенов и травоядных насекомых производит изотиоцианаты. Однако эти защитные вещества метаболизируются грибом *Sclerotinia sclerotiorum* путем конъюгации с глутатионом и гидролизом до аминов [22]. В результате защитные вещества оказывают противоположный эффект: вирулентность гриба *Sclerotinia sclerotiorum* повышается.

Из изложенного выше следует, что препараты для обработки семян должны оказывать прежде всего положительное действие на растения на фоне влияния мощного ингибирующего

фактора — аллелотоксичности почв, что не могло не отразиться на получаемых исследователями результатах. Также не учитывали возможность взаимодействия микроорганизмов почв с используемыми для стимуляции составами, равно как и возможность уменьшения концентрации аллелотоксинов микроорганизмами, которые, как отмечено в литературе [25–27], используют токсины в качестве источников углерода.

Кроме того, при разработке стимуляторов следует учитывать различный баланс гормонов в семенах растений, поскольку при их недостатке семена могут поглощать биологически активные вещества (БАВ) из почвы.

Таким образом, разработка стимуляторов семян представляет собой очень сложный процесс, в котором достаточно трудно выделить главный фактор.

В некоторых работах [28–30] для повышения эффективности предпосевной обработки семян предлагается использовать сорбционно-стимулирующие препараты, которые совместно с БАВ содержат сорбенты, способные поглощать аллелотоксины и снижать их негативное воздействие на семена и вырастающие из них растения, на эндофиты, микоризу и на активизацию фитопатогенов [11].

Цель работы

Цель работы — изучение эффективности сорбционно-стимулирующих препаратов на культурах зерновых и разработка подходов, позволяющих создать универсальный препарат, способный оказывать стимулирующее действие на семена различных зерновых культур при их предпосевной обработке.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на следующих культурах зерновых:

- яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сортов Злата, Любава, Агата, Лиза, Эстер, Гранни;
- яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сортов Яромир, Златояр, Владимир, Эльф, Московский-86;
- озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сортов Стрелецкая-12, Московская 56, Немчиновская-17, Немчиновская-85, Ермак;
- озимая рожь (*Secale cereale* L.) сортов Московская-12 и Татьяна.

Были также использованы образцы (согласно Классификации почв СССР 1977 года)

агродерново-глубокоподзолистой легкосуглинистой на водно-ледниковых (древнеозерных) отложениях почвы, подстилаемой с глубины 92 см бескарбонатными лёссовидными (покровными) суглинками (окрестности поймы р. Яхромы, Московская обл.), с содержанием азота — 0,14 %, калия — 194 мг/кг, фосфора — 290 мг/кг.

Для приготовления образцов почвы с избыточным агрофоном, соответствующим зоне стресса почвенных микроорганизмов [31], в исходную почву вносили раствор кристаллона универсального, повышая содержание питательных веществ в ~1,5 раза (азота — до 0,15 %, калия — до 310 мг/кг, фосфора — до 380 мг/кг).

Для защиты семян от аллелотоксинов применили сорбционный препарат, характеризующийся следующим соотношением компонентов:

- гумат калия из бурого угля — 10 г/л;
- бентонит кальция в концентрации — 40 г/л;
- автолизат пивных дрожжей — 12 г/л.

К сорбционному препарату добавляли следующие средства:

- гиббереллин 90%-й — 300 мг/л (производство Китай);
- полиэтиленгликоль с молекулярной массой 400 у. е. — 300 мг/л.

Этот 5-компонентный препарат назвали ССП-5 — сорбционно-стимулирующий препарат пятикомпонентный. При изготовлении 6-компонентного препарата (ССП-6) в препарат ССП-5 добавляли сахарозу в концентрации 8 г/л.

Также применяли фунгициды Фитоспорин-М и Ламадор в жидких формах в рекомендуемых для обработки семян концентрациях.

Семена обрабатывали из расчета 40 и 60 л рабочего раствора на 1 т семян.

Оценку аллелотоксичности почв проводили в результате химического анализа и биотестирования.

Определение аллелотоксичности почв с использованием химических методов анализа направлено на сбор данных о составе веществ в почве — как качественных, так и количественных. Несмотря на обширный объем информации, полученной в результате анализа, ее интерпретация была затруднена по некоторым причинам.

Во-первых, количество БАВ исчисляется тысячами [32]. Информацию о составе соединений в большинстве случаев можно получить при изучении вытяжек из растений или анализе выделений микроорганизмов [7, 11, 27]. Иден-

тификация всего разнообразия БАВ, выделяемых обитающими в почвах видами, затруднена вследствие ограничений приборно-инструментальной базы. Более того, предел обнаружения вещества и его действующая концентрация не всегда эквиваленты. В результате при наличии ингибирования выявить ответственные за него соединения не представляется возможным.

Во-вторых, аллелотоксины часто действуют в виде смеси веществ, которые могут усиливать или ослаблять взаимный суммарный эффект [33–35]. В некоторых случаях концентрация отдельных компонентов смеси бывает ниже порога ингибирования, при этом их совместное негативное воздействие может быть значительным [11, 35].

В-третьих, такие нетоксичные вещества, как сахара или нитрат-ионы способны усиливать отрицательное воздействие аллелотоксинов [11].

В-четвертых, в зависимости от концентрации одни и те же БАВ могут проявлять как ингибирующие (аллелотоксичные), так и стимулирующие эффекты [36].

Таким образом, даже если установлены концентрации всех известных в почвах веществ: аллелотоксинов, стимулирующих БАВ и нейтральных соединений, установить корреляцию между этими данными и аллелотоксичностью не представляется возможным вследствие их непрогнозируемого синергетического взаимодействия. В связи с этим для оценки суммарного эффекта смеси аллелотоксинов рекомендуется использовать методы биотестирования.

Оценку аллелотоксичности проводили путем сравнения длины проростков 7,5 г семян (~200 шт.) в песке с размером частиц 0,5...0,8 мм и в почве. Оценку развития семян в песке принимали за 100 %, относительно которых рассчитывали замедление или ускорение развития проростков. Длину проростков оценивали в соответствии с методом, описанным в работе [37].

Влияние стимулирующих препаратов на развитие семян изучали, сравнивая обработанные семена с необработанными.

Во всех экспериментах по биотестированию применяли шестикратную повторность и рассчитывали доверительные интервалы для 95%-го уровня значимости.

Для определения общей численности бактерий в почвенных образцах использовали метод прямой люминисцентной микроскопии после окрашивания препаратов суспензии почвы акридином оранжевым. Численность спор грибов и длину грибного мицелия также определяли после окрашивания почвенной суспензии акридином оранжевым [38].

Т а б л и ц а 1

Влияние обработки семян зерновых стимуляторами и фунгицидами на их прорастание
Effect of grain seeds treatment with stimulants and fungicides on their germination

Культура	Сорт	Аллелотоксичность (+23 %) ССП-5 (40 л/т)	Аллелотоксичность (–27 %) ССП-5 (40 л/т)	Аллелотоксичность (–27 %) ССП-6 (60 л/т)	Аллелотоксичность (–27 %) Фунгицид	Аллелотоксичность (–27 %) Фунгицид + ССП-5
Яровая пшеница	Лиза	56 ± 5	30 ± 3	80 ± 7	0 ± 2	33 ± 3
	Любава	32 ± 3	20 ± 2	–15 ± 2	–37 ± 4	37 ± 4
	Злата	33 ± 4	–	5 ± 2	–31 ± 3	33 ± 4
	Агата	4 ± 2	–	–23 ± 3	–25 ± 3	33 ± 4
	Эстер	3 ± 2	–	–10 ± 2	–5 ± 2	13 ± 2
	Гранни	–	–	–	8 ± 2	72 ± 6
Озимая пшеница	Московская-56	21 ± 2	–	19 ± 3	0 ± 2	17 ± 2
	Немчиновская-17	24 ± 3	–	26 ± 3	9 ± 2	26 ± 3
	Стрелецкая-12	–	–	–	19 ± 3	40 ± 4
	Ермак	–	–	–	–35 ± 4	111 ± 11
	Немчиновская-85	–	–	–	30 ± 5	100 ± 10
Яровой ячмень	Златояр	17 ± 2	–	19 ± 3	–49 ± 6	50 ± 6
	Эльф	–4 ± 2	–	31 ± 4	–58 ± 7	87 ± 10
	Яромир	25 ± 3	–	53 ± 5	–63 ± 8	92 ± 10
	Московский-86	31 ± 4	2 ± 2	24 ± 3	–50 ± 6	39 ± 4
	Владимир	28 ± 3	25 ± 3	27 ± 3	–43 ± 5	45 ± 5
Озимая рожь	Московская-12	15 ± 2	–	15 ± 2	–48 ± 5	71 ± 7
	Татьяна	15 ± 2	–	19 ± 2	–38 ± 4	53 ± 5

Примечание. Для пшеницы применяли биологический фунгицид «Фитоспорин-М» в жидкой форме, для ячменя и ржи использовали фунгицид «Ламадор», так как «Фитоспорин-М» не рекомендован для применения на этих культурах. Все средства защиты растений применяли при рекомендуемых концентрациях и нормах расходах.

Классическим методом посева на глюкозо-пептонно-дрожжевую среду определяли численность сапротрофных культивируемых бактерий. Таксономическую принадлежность бактерий определяли на основании фенотипических признаков: микроморфологии, особенностей жизненного цикла, наличия спор и плодовых тел, а также окраски по Граму (с дальнейшим тестом с 3%-м раствором КОН) [38, 39]. Характеристику структуры бактериального комплекса проводили, используя подходы, описанные в работе [39].

Результаты и обсуждение

Изучено влияние стимуляторов и фунгицидов на прорастание семян зерновых культур на дерново-подзолистой почве различной аллелотоксичности (табл. 1). Большая часть сортов положительно реагирует на обработку препаратом. Исключение составляет яровая пшеница сортов Агата и Эстер, а также яровой ячмень сорта Эльф. На этих вариантах опыта стимуляция не обнаружена. Однако повышение аллелотоксичности почвы (с +23 % до –27 %),

наблюдающееся при высушивании почвенных образцов до воздушно-сухого состояния с их последующим увлажнением до влажности, близкой к влажности исходной почвы приводило к уменьшению стимуляции яровой пшеницы, а иногда и ячменя (см. табл. 1).

Введение сахарозы в состав препарата и повышение его расхода в 1,5 раза: с 40 до 60 л на 1 т семян — позволило на яровой пшенице сорта Лиза увеличить эффективность применения состава с 30 до 80 %.

Использование ССП-6 для обработки яровой пшеницы (см. табл. 1) не дало результат, так как им стимулируются только семена сорта Лиза. При этом семена ярового ячменя всех сортов этим препаратом стимулируются достаточно хорошо (от 19 до 53 %). Также заметная стимуляция наблюдается для семян озимых пшеницы и ржи (см. табл. 1).

В результате проведенных исследований получены данные, по которым невозможно выделить главную причину складывающейся ситуации. По-видимому, изменение любого параметра непрогнозируемо изменяет эффект стимуляции семян. При этом получение положительных результатов для семян одного сорта

не гарантирует успешное применение препарата к семенам других сортов и культур.

Для уточнения природы происходящих процессов провели исследование действия стимуляторов на образцах почв с избыточным агрофоном, в которых аллелотоксичность выражалась сильнее [31]. Установлено, что стимуляция ярового ячменя составом ССП-6 обернулась угнетением прорастания семян (сорт Златояр с +19 до –24 %; сорт Яромир с +53 до –40 %; сорт Московский-86 с +24 до –15 %), т. е. избыточный уровень агрофона резко изменяет действие стимуляторов по ячменю. Отсюда возникла необходимость понять причину происходящего.

Предположительно, в основе всех наблюдаемых от действия стимуляторов эффектов лежат изменения состава микроорганизмов как почв, так и семян. Из ранее выполненных исследований [31] вытекает, что после избыточного внесения удобрений в почву начинается борьба между развивающимися микроорганизмами за органические питательные вещества, сопровождающаяся выделением в почву аллелотоксинов. Аллелотоксичность дерново-подзолистой почвы с избыточным агрофоном повышается на 17 % по сравнению с дерново-подзолистой почвой с высоким агрофоном. Увеличение аллелотоксичности при избыточном внесении удобрений в почву уже наблюдали ранее на дерново-подзолистых [31] и серых лесных почвах [40]. В этой борьбе побеждают и начинают доминировать фитопатогены [31]. В результате их количество в почвах с избыточным агрофоном становится большим по сравнению с почвой, характеризующейся высоким агрофоном. Использование сахарозы в ССП-6, по-видимому, активизирует развитие фитопатогенов, численность которых уже повышена, что и объясняет усиление замедления прорастания семян.

Для проверки данного предположения было проведено сравнительное микробиологическое исследование образцов дерново-подзолистой почвы с избыточным и высокими агрофоном (табл. 2–4).

Из полученных данных следует, что длина мицелия в образцах с высоким агрофоном снижается с 320 до 110 м/г, т. е. практически в 3 раза. Выявленная методом посева численность культивируемых грибов незначительно повышается в образцах дерново-подзолистой почвы с избыточным агрофоном. Численность бактерий в обоих образцах высокая: 2,9...3,1 млрд клеток/г.

Численность актиномицетов в данных образцах почвы невелика и изменяется от $0,8 \times 10^5$ в образце с избыточным агрофоном до $3,0 \times 10^5$ в образце

Т а б л и ц а 2
Общая численность бактерий и длина
грибного мицелия в образцах дерново-
подзолистой почвы

Total bacterial amount and floccus length
in sod-podzolic soil samples

Агрофон почвы	Численность бактерий, млрд/г	Грибы (мицелий), м/г
Избыточный	$2,9 \pm 0,3$	110 ± 11
Высокий	$3,1 \pm 0,3$	320 ± 30

Т а б л и ц а 3
Численность грибов в образцах
дерново-подзолистой почвы

Amount of fungi
in sod-podzolic soil samples

Агрофон почвы	KOE $\times 10^4$ на 1 г
Избыточный	$5,4 \pm 0,5$
Высокий	$3,6 \pm 0,3$

Примечание. КОЕ — колониеобразующая единица.

Т а б л и ц а 4
Численность сапротрофных бактерий,
культивируемых на глюкозо-пептонно-
дрожжевой среде, в образцах дерново-
подзолистой почвы

Amount of saprotrophic bacteria cultured
on glucose-peptone-yeast medium
in sod-podzol soil samples

Агрофон почвы	Бактерии, млн КОЕ/г	Актиноми- цеты $\times 10^5$, КОЕ/г	Содержание актиноми- цетов от- носительно бактерий, %
Избыточный	$0,7 \pm 0,07$	$0,8 \pm 0,1$	10,9
Высокий	$2,5 \pm 0,3$	$3,0 \pm 0,3$	11,9

с высоким агрофоном. Таким образом, внесение избыточных доз минеральных удобрений ведет к снижению численности мицелиальных актинобактерий. При этом таксономическое разнообразие актиномицетов невелико, и они представлены родом *Streptomyces* секций *Imperfectus* и *Albus*.

Установлено, что в образцах с высоким агрофоном доминанты грибов представлены видами р. *Chaetomium*, *Trichoderma*, *Clonostachis*, *Acremonium murorum*. В образцах почв с избы-

Т а б л и ц а 5

**Оптимизация составов, используемых для стимулирующей
предпосевной обработки семян препаратов**

Optimisation of compositions used for stimulating pre-sowing seed treatment of preparations

Препараты и их компоненты	Возможные направления влияния	Управление влиянием	Примечания
Фунгициды	Ингибирование эндофитов, микоризы, фитопатогенов	Выбор фунгицидов	Фунгициды не должны влиять на микоризу и эндофиты
Сорбенты	Закрепление аллелотоксинов и биологически активных веществ	Выбор вида и концентрации сорбентов	Сорбенты не должны закреп- лять биологически активные вещества
Питательные вещества	Активизация эндофитов, микоризы, фитопатогенов	Выбор питательных веществ	Питательные вещества не должны стимулировать фитопатогены
Гормоны	Стимуляция семян растений	Выбор гормонов и их концентрация	Комплекс гормонов должен стимулировать семена

точным уровнем внесения минеральных удобрений идет сокращение разнообразия видов. Большую часть комплекса микромицетов составляют токсинообразующие грибы р. *Fusarium*, *Talaromyces flavus*, *Penicillium funiculosum*.

Эксперименты подтвердили выдвинутое нами предположение об увеличении содержания потенциальных фитопатогенов в почве с избыточным агрофоном. В этом случае добавление сахарозы к ССП-5 способно увеличивать активность фитопатогенов. Этим можно объяснить изменения эффекта для семян ярового ячменя со стимуляцией препаратом ССП-6 на образцах почв с высоким агрофоном на угнетение прорастания в образцах почв с избыточным агрофоном, т. е. аллелотоксины могут поступать в семена (растения) из почв и, что не учитывалось ранее — от фитопатогенов.

Аллелотоксины из почв, по-видимому, поступают в семена путем обменных реакций между выделениями растений и закрепленными в почвах веществами. В такой ситуации аллелотоксины могут поступать в растения (семена) только из почвы. Это поясняет следующий проведенный нами расчет. На обработку 7,5 г (~200 шт.) семян мы расходуем в виде суспензии 18 мг сухого препарата. Эти семена при проведении вегетационных опытов высевались в 20 кг почвы. Почвенные растворы, угнетающие растения, в пересчете на кумарин содержат 500...1000 мг/л аллелотоксинов [7]. Поскольку влажность почв составляла около 20 %, то в 20 кг почвы только в почвенном растворе должно содержаться 1500...4000 мг аллелотоксинов. Предположить, что 18 мг сорбционного состава смогут связать такое количество аллелотоксинов, достаточно сложно.

При свободном движении аллелотоксинов по почве необходимое количество сорбента должно быть увеличено на 3–4 порядка. Тем не менее применение 18 мг сорбционно-стимулирующего препарата показало свою эффективность.

Перекрытие канала поступления аллелотоксинов из почв путем обработки семян сорбционно-стимулирующими препаратами задачу защиты семян от аллелотоксинов полностью не решает. Без учета микробиологического фактора и контроля фитопатогенов разработать стимулятор и применять его для обработки семян в условиях сельскохозяйственного производства не удастся. Сорбционные стимуляторы смогут эффективно действовать только при их совместном использовании с фунгицидами, которые будут предотвращать развитие фитопатогенов и поступление из них аллелотоксинов в семена (растения). В связи с этим состав препарата-стимулятора тоже должен быть комплексным, а его компоненты должны удовлетворять определенным требованиям (табл. 5).

При разработке препарата-стимулятора следует принять во внимание, что аллелотоксины и фунгициды одновременно действуют на семена, эндофиты и микоризу [41–43], а также на фитопатогены. Как следствие, действие фунгицидов, которое повышает устойчивость растений к болезням, на начальном этапе после применения может оказывать как стимулирующее, так и ингибирующее действие. Это будет зависеть от того, что они будут в большей степени угнетать — семена и их симбионты или фитопатогены. Сложность происходящих в почвах с обработанными ССП и фунгицидами семенами процессов представлена в виде схемы (рисунок).

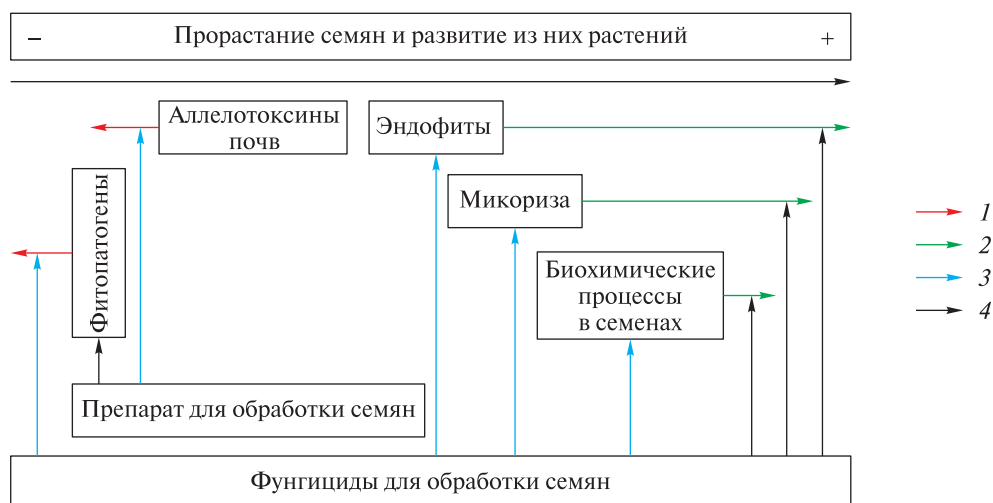


Схема взаимовлияния компонентов системы при прорастании семян в почвах: 1 — угнетающие воздействия на семена (растения); 2 — стимулирующие воздействия; 3 — воздействия, снижающие негативное влияние компонентов системы; 4 — воздействия, прямо или опосредованно усиливающие негативное влияние этих компонентов

Scheme of mutual influence of the system components during seed germination in soils: 1 — depressing effects on seeds (plants); 2 — stimulating effects; 3 — effects reducing the negative influence of the system components; 4 — effects directly or indirectly increasing the negative influence of these components

Нами были выделены положительные и отрицательные факторы, которые могут влиять на семена при их прорастании в почвах и оценена возможность воздействия на них. Направление поисков при разработке препаратов для предпосевной обработки семян должно состоять в нахождении возможности обеспечения стимуляции положительных факторов и снижения действия отрицательных факторов, в чем и состоит его сложность, поскольку любые действия одновременно влияют на все факторы.

Трудно подобрать компоненты препарата-стимулятора, которые будут активизировать развитие эндифитов и микоризы, но не будут стимулировать фитопатогенные микроорганизмы. Также сложно подобрать фунгициды, которые будут оказывать стимулирующее влияние на прорастание семян, но не будут угнетать эндифиты, микоризу, замедлять биохимические реакции в семенах. Однако без использования фунгицидов аллелотоксины, выделяемые фитопатогенами, как было указано выше, не позволят контролировать ситуацию, поэтому, несмотря на замедление развития растений на начальном этапе при применении фунгицидов, их необходимо использовать.

Поскольку эффективность рекомендованных для растений фунгицидов основана на экспериментально проверенном преобладании их положительного влияния на эндифиты, микоризу

и биохимические процессы в семенах вследствие подавления воздействия фитопатогенов по сравнению с отрицательным воздействием фунгицидов, для конкретных культур следует использовать только рекомендуемые для них фунгициды, которые уже прошли экспериментальную проверку.

Таким образом, задача эффективного использования ССП состоит не только в стимуляции биохимических процессов в семенах, активизации развития эндифитов и микоризы, но и в снижении влияния ингибирующего воздействия на семена, эндифиты и микоризу, оказываемого аллелотоксинами почв, аллелотоксинами фитопатогенов и фунгицидами.

Следовательно, нами дана оценка эффективности действия препарата ССП-5 на яровую и озимую пшеницу, произрастающую на дерново-подзолистой почве с высоким агрофоном при его совместном применении с биологическим фунгицидом, рекомендуемым для этих видов пшеницы, — «Фитоспорином-М». Результаты экспериментов (см. табл. 1) свидетельствуют, о том, что даже рекомендованные для конкретных культур фунгициды могут оказывать стимулирующее (сорта Гранны и Немчиновская-17) или угнетающее (сорта Агата, Злата, Любава и Эстер) воздействия на разные сорта. Для сортов Любава, Злата, Агата применение ССП-5 лишь снижает угнетаю-

щее действие фунгицида (см. табл. 1), однако для сортов Лиза и Гранни ССП-5 стимулирует прорастание семян. Подобным образом ведут себя семена ярового ячменя и озимой ржи в вариантах опыта с обработкой семян фунгицидом «Ламадор» и препаратом ССП-5 с фунгицидом «Ламадор» (см. табл. 1). У всех сортов при использовании одного фунгицида «Ламадор» наблюдается угнетение развития семян, но при добавлении в раствор препарата ССП-5 угнетение резко снижается. По лабораторным данным, стимулирующее влияние обработки семян фунгицидом «Фитоспорин-М» с ССП-5 по сравнению с обработкой одним фунгицидом превысило 60 % (см. табл. 1).

Таким образом, лабораторные исследования показали, что использование препарата-стимулятора ССП-5 совместно с фунгицидами на всех изученных культурах ускоряет прорастание семян по сравнению с предпосевной обработкой семян только фунгицидами.

Выводы

1. Корректная оценка эффективности препаратов-стимуляторов для предпосевной обработки семян возможна только при их совместном использовании с протравителями, подавляющими развитие патогенных микроорганизмов.

2. Сорбционные препараты для предпосевной обработки семян зерновых культур способны смягчать ретардантный эффект протравителей.

3. Внесение избыточных доз минеральных удобрений ведет к снижению численности микелиальных актинобактерий и к увеличению доли токсинообразующих грибов в структуре микробиологического сообщества почв.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания МГУ № 121040800147-0.

Список литературы

- [1] Николаева М.Г., Разумова М.В., Гладкова В.Н. Справочник по проращиванию покоящихся семян. Л.: Наука, 1985. 506 с.
- [2] Сечняк Л.К., Киндрук Н.А., Слюсаренко О.К., Иващенко В.Г., Кузнецов Е.Д. Экология семян пшеницы. М.: Колос, 1983. 349 с.
- [3] Глинушкин А.П., Кудин С.М. Влияние протравителей на развитие болезней и формирование урожайности в агрофитоценозе яровой пшеницы // Нива Поволжья, 2010. № 2. С. 11–14.
- [4] Назарова А.А., Полишук С.Д. Особенности роста и развития кукурузы гибрида «Обский 140» при обработке семян препаратами на основе наночастиц железа, кобальта и их сочетания // Плодоводство и ягодоводство России, 2017. Т. 48. № 1. С. 174–177.
- [5] Сластя И.В. Использование соединений кремния для повышения продуктивности сортов ярового ячменя в условиях водного стресса // Сельскохозяйственная биология, 2013. № 2. С. 109–119.
- [6] Торопова Е.Ю., Стецов Г.Я. Предпосевное протравливание семян (методические аспекты) // Защита и карантин растений, 2018. № 2. С. 3–7.
- [7] Гродзинский А.М., Богдан Г.П., Головкин Э.А., Дзюбенко Н.Н., Мороз П.А., Прутенская Н.И. Аллелопатическое почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1979. 248 с.
- [8] Коношина С.Н. Влияние различных способов использования почвы на ее аллелопатическую активность: дис. ... канд. с.-х. наук. Орел, Орловский государственный аграрный университет, 2000. 145 с.
- [9] Красильников Н.А. Микроорганизмы почвы и высшие растения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 464 с.
- [10] Лобков В.Т. Использование почвенно-биологического фактора в земледелии: монография. Орел: Изд-во ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 2017. 166 с.
- [11] Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications / Reigosa M.J., Pedrol N., Gonzalez L., editors. Netherlands: Springer Publ., 2006. 637 p.
- [12] Cheng F., Cheng Z. Research Progress on the use of Plant Allelopathy in Agriculture and the Physiological and Ecological Mechanisms of Allelopathy // Frontiers in Plant Science, 2015, v. 6, article 1020.
- [13] Ghulam J., Shaukat M., Arshad N.C., Imran H., Muhammad A. Allelochemicals: sources, toxicity and microbial transformation in soil — a review // Annals of Microbiology, 2008, v. 58, no. 3, pp. 351–357.
- [14] McCalla T.M., Haskins F.A. Phytotoxic Substances from Soil Microorganisms and Crop Residues // Bacteriological Reviews, 1964, v. 28, no. 2, pp. 181–207.
- [15] Rice E.L. Allelopathy. New York: Academic Press, 1984, 422 p.
- [16] Благовещенская Е.Ю. Эндифитные грибы злаков: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 2006. 26 с.
- [17] Ryan R.P., Germaine K., Franks A., Ryan D.J., Dowling D.N. Bacterial endophytes: recent developments and applications // FEMS Microbiol Lett., 2008, v. 278, pp. 1–9.
- [18] Gollner M.J., Wagentristl H., Liebhard P., Friedel J.K. Yield and arbuscular mycorrhiza of winter rye in a 40-year fertilisation trial // Agronomy for sustainable development, 2011, v. 31, no. 2, pp. 373–378.
- [19] Berruti A., Bianciotto V., Lumini E. Seasonal variation in winter wheat field soil arbuscular mycorrhizal fungus communities after non-mycorrhizal crop cultivation // Mycorrhiza, 2018, v. 28, no. 5, pp. 535–548.
- [20] Kaidzu T., Suzuki K., Sugiyama H., Onur Akca M., Ergül A., Can Turgay O., Nonaka M., Harada N. The composition characteristics of arbuscular mycorrhizal fungal communities associated with barley in saline-alkaline soils in Central Anatolia // Soil Science and Plant Nutrition, 2020, v. 66, no. 2, pp. 268–274.
- [21] Соколова Т.А. Низкомолекулярные органические кислоты в почвах: источники, состав, содержание, функции в почвах (обзор) // Почвоведение, 2020. № 5. С. 559–575.
- [22] Chen J., Ullah C., Reichelt M. et al. The phytopathogenic fungus *Sclerotinia sclerotiorum* detoxifies plant glucosinolate hydrolysis products via an isothiocyanate hydrolase // Nature communication, 2020, v. 11, no. 1, pp. 1–12.

- [23] Meena M., Samal S. Alternaria host-specific (HSTs) toxins: An overview of chemical characterization, target sites, regulation and their toxic effects // *Toxicology reports*, 2019, v. 6, pp. 745–758.
- [24] Proctor R. H., McCormick S. P., Kim H. S. et al. Evolution of structural diversity of trichothecenes, a family of toxins produced by plant pathogenic and entomopathogenic fungi // *PLoS pathogens*, 2018, v. 14, no. 4, p. e1006946.
- [25] Inderjit. Plant phenolics in allelopathy // *The Botanical Review*, 1996, v. 62, pp. 186–202.
- [26] Kong C.H., Xuan T.D., Khanh T.D., Tran H.D., Trung N.T. Allelochemicals and signaling chemicals in plants // *Molecules*, 2019, v. 24, no. 15, p. 2737.
- [27] Weir T.L., Park S., Vivanco J.M. Biochemical and physiological mechanisms mediated by allelochemicals // *Curr. Opin. Plant Biol.*, 2004, v. 7, no. 4, pp. 472–479.
- [28] Федотов Г.Н., Шоба С.А., Горепекин И.В. Аллелотоксичность почв и способы уменьшения ее негативного влияния на начальную стадию развития растений // *Почвоведение*, 2020. № 8. С. 1007–1015.
- [29] Горепекин И.В., Федотов Г.Н., Потапов Д.И., Батырев Ю.П., Шалаев В.С. Снижение аллелотоксичности почв и почвенных субстратов // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2022. Т. 26. № 4. С. 46–52. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-46-52
- [30] Шоба С.А., Горепекин И.В., Федотов Г.Н., Грачева Т.А., Салигареева О.А. Природа повышения эффективности применения сорбционно-стимулирующих препаратов для предпосевной обработки семян при введении в их состав неионогенных ПАВ // *Доклады Российской академии наук. Науки о жизни*, 2020. № 494(1). С. 513–516.
- [31] Мирчинк Т.Г. Почвенная микология: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 1988. 220 с.
- [32] Fomsgaard I.S., Mortensen A.G., Carlsen S.C.K. Microbial transformation products of benzoxazolinone and benzoxazinone allelochemicals—a review // *Chemosphere*, 2004, v. 54, no. 8, pp. 1025–1038.
- [33] Einhellig F.A. Interactions involving allelopathy in cropping systems // *Agronomy J.*, 1996, v. 88, no. 6, pp. 886–893.
- [34] Latif S., Chiapusio G., Weston L.A. Allelopathy and the role of allelochemicals in plant defence // *Advances in botanical research*. Academic Press, 2017, v. 82, pp. 19–54.
- [35] Tharayil N., Bhowmik P.C., Xing B. Bioavailability of allelochemicals as affected by companion compounds in soil matrices // *J. Agricultural Food Chem.*, 2008, v. 56, no. 10, pp. 3706–3713.
- [36] Weston L.A., Mathesius U. Flavonoids: their structure, biosynthesis and role in the rhizosphere, including allelopathy // *J. Chem. Ecology*, 2013, v. 39, no. 2, pp. 283–297.
- [37] Федотов Г.Н., Шоба С.А., Федотова М.Ф., Горепекин И.В. Влияние аллелотоксичности почв на прорастание семян зерновых культур // *Почвоведение*, 2019. № 4. С. 489–496.
- [38] Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
- [39] Лысак Л.В., Добровольская Т.Г., Скворцова И.Н. Методы оценки бактериального разнообразия почв и идентификации почвенных бактерий. М.: МАКС Пресс, 2003. 120 с.
- [40] Зинченко М.К., Селицкая О.В. Биологическая токсичность серой лесной почвы в зависимости от систем удобрений // *Агрохимический вестник*, 2011. № 5. С. 38–40.
- [41] Kjoller R., Rosendahl S. Effects of fungicides on arbuscular mycorrhizal fungi: differential responses in alkaline phosphatase activity of external and internal hyphae // *Biology and Fertility of Soils*, 2000, v. 31, no. 5, pp. 361–365.
- [42] Nettles R., Watkins J., Ricks K., Boyer M., Licht M., Atwood L.W., Peoples M., Smith R.G., Mortensen D.A., Koide R.T. Influence of pesticide seed treatments on rhizosphere fungal and bacterial communities and leaf fungal endophyte communities in maize and soybean // *Applied Soil Ecology*, 2016, v. 102, pp. 61–69.
- [43] Prior R., Mittelbach M., Begerow D. Impact of three different fungicides on fungal epi- and endophytic communities of common bean (*Phaseolus vulgaris*) and broad bean (*Vicia faba*) // *J. of Environmental Science and Health, Part B*, 2017, v. 52, no. 6, pp. 376–386.

Сведения об авторах

Федотов Геннадий Николаевич — д-р биол. наук, вед. науч. сотр. факультета почвоведения, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», gennadiy.fedotov@gmail.com

Грачева Татьяна Александровна — канд. биол. наук, ст. преподаватель факультета почвоведения, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», fedotov@gmail.com

Горепекин Иван Владимирович — науч. сотр., ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»; Евразийский центр по продовольственной безопасности (Аграрный центр МГУ), decembrist96@yandex.ru

Батырев Юрий Павлович — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), batyrev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 20.03.2024.

Одобрено после рецензирования 29.11.2024.

Принята к публикации 04.02.2025.

EFFECT OF PHYTOPATHOGEN CONTROL ON EFFICIENCY OF SORBENT-STIMULATING PREPARATIONS ON GRAIN CROPS

G.N. Fedotov¹✉, T.A. Gracheva¹, I.V. Gorepekin^{1,2}, Yu.P. Batyrev³

¹M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, GSP-1, 1, p. 12, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

²Eurasian Center for Food Security of Lomonosov Moscow State University, GSP-1, 1, p. 12, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

³BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

gennadiy.fedotov@gmail.com

Pre-sowing seed treatment is one of the most developed practices in agriculture. Despite this, reproducible positive effects have not yet been obtained with the use of stimulating preparations. One explanation may be that the consideration of seed stimulation was carried out in isolation from the soils and the microorganisms in them. To take into account these factors, the study of the efficiency for one of the stimulant classes — sorption-stimulating preparations (SSP), and also the development of approaches to the creation of effective stimulant preparations was carried out. The objects of the study were seeds of cultivars of spring and winter wheat, spring barley and winter rye. The tests were performed on sod-podzolic soil, changing its allelotoxicity due to sample preparation. The fixed indicator in assessing allelotoxicity, as well as the efficiency of SSP, was the total length of seed seedlings. Determination of the microbiological composition of soils was carried out using direct luminescent microscopy and seeding on nutrient media. During the experiments, it was found that an increase in the allelotoxicity of soil samples led to a noticeable decrease in the effects of SSP stimulation for spring wheat seeds. With the addition to the composition of the preparation of sucrose, which promotes the development of microorganisms, and an increase in the dose of the composition by 1.5 times, the effects of stimulation continued to decrease, reaching inhibition values for some varieties. On spring barley, an increase in the dose of the preparation, on the contrary, led to an increase in the efficiency of the SSP use. However, an increase in the values of the nutrients provision to an excessive level at which phytopathogenic fungi develop, showed that SSP with sucrose no longer stimulates, but inhibits the germination of seeds and the development of barley seedlings. Based on the data obtained, it is concluded that allelotoxins can enter seeds and developing plants not only from soils, but also from phytopathogens, therefore, the use of stimulants without limiting the development of phytopathogens does not solve the problem of protecting seeds from allelotoxins. To do this, it is proposed to use SSP together with fungicides. Laboratory experiments have confirmed the correctness of this approach — the use of SSP in conjunction with fungicides in all cases has a stimulating effect on the varieties and crops of cereals studied by us.

Keywords soil allelotoxicity, seed stimulation, pre-sowing seed treatment, fungicides, the retardant effect of fungicides

Suggested citation: Fedotov G.N., Gracheva T.A., Gorepekin I.V., Batyrev Yu.P. *Vliyaniye bor'by s fitopatogenami na effektivnost' ispol'zovaniya sorbtsionno-stimuliruyushchikh preparatov na zernovykh kul'turakh* [Effect of phytopathogen control on efficiency of sorbent-stimulating preparations on grain crops]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 70–81. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-70-81

References

- [1] Nikolaeva M.G., Razumova M.V., Gladkova V.N. *Spravochnik po prorashchivaniyu pokoyashchikhsya semyan* [Handbook of germination of dormant seeds]. Leningrad: Nauka, 1985, 506 p.
- [2] Sechnyak L.K., Kindruk N.A., Slyusarenko O.K., Ivashchenko V.G., Kuznetsov E.D. *Ekologiya semyan pshenitsy* [Ecology of wheat seeds]. Moscow: Kolos, 1983, 349 p.
- [3] Glinushkin A.P., Kudin S.M. *Vliyaniye protraviteley na razvitie bolezney i formirovaniye urozhaynosti v agrofytotsenoze yarovoy pshenitsy* [The effect of mordants on the development of diseases and the formation of yields in the agrophytocenosis of spring wheat]. *Niva Povolzh'ya*, 2010, no. 2, pp. 11–14.
- [4] Nazarova A.A., Polishchuk S.D. *Osobennosti rosta i razvitiya kukuruzy gibrida «Obskiy 140» pri obrabotke semyan preparatami na osnove nanochastits zheleza, kobal'ta i ikh sochetaniya* [Features of the growth and development of corn hybrid «Ob 140» in the treatment of seeds with preparations based on iron, cobalt nanoparticles and their combination]. *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii* [Fruit growing and berry growing of Russia], 2017, v. 48, no. 1, pp. 174–177.
- [5] Slasty I.V. *Ispol'zovanie soedineniy kremniya dlya povysheniya produktivnosti sortov yarovogo yachmenya v usloviyakh vodnogo stressa* [The use of silicon compounds to increase the productivity of spring barley varieties under conditions of water stress]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*, 2013, no. 2, pp. 109–119.
- [6] Toropova E.Yu., Stetsov G.Ya. *Predposevnoye protravlivaniye semyan (metodicheskie aspekty)* [Pre-sowing seed treatment (methodological aspects)]. *Zashchita i karantin rasteniy* [Plant protection and quarantine], 2018, no. 2, pp. 3–7.
- [7] Grodzinskiy A.M., Bogdan G.P., Golovko E.A., Dzyubenko N.N., Moroz P.A., Prutenskaya N.I. *Allelopatischeskoe pochvoutomlenie* [Allelopathic soil fatigue]. Kiev: Naukova dumka, 1979, 248 p.

- [8] Konoshina S.N. *Vliyaniye razlichnykh sposobov ispol'zovaniya pochvy na ee allelopaticeskuyu aktivnost'* [The influence of different ways of using soil on its allelopathic activity]. Dis. Cand. Sci. (Agric.). Orel, Orel State Agricultural University, 2000, 145 p.
- [9] Krasil'nikov N.A. *Mikroorganizmy pochvy i vysshie rasteniya* [Soil microorganisms and higher plants]. Moscow: USSR Academy of Science Publ., 1958, 464 p.
- [10] Lobkov V.T. *Ispol'zovanie pochvenno-biologicheskogo faktora v zemledelii* [The use of the soil-biological factor in agriculture]. Orel: Orlovskiy GAU Publ., 2017, 166 p.
- [11] Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications / Reigosa M.J., Pedrol N., Gonzalez L, editors. Netherlands: Springer Publ., 2006, 637 p.
- [12] Cheng F., Cheng Z. Research Progress on the use of Plant Allelopathy in Agriculture and the Physiological and Ecological Mechanisms of Allelopathy. *Frontiers in Plant Science*, 2015, v. 6, article 1020.
- [13] Ghulam J., Shaukat M., Arshad N.C., Imran H., Muhammad A. Allelochemicals: sources, toxicity and microbial transformation in soil — a review. *Annals of Microbiology*, 2008, v. 58, no. 3, pp. 351–357.
- [14] McCalla T.M., Haskins F.A. Phytotoxic Substances from Soil Microorganisms and Crop Residues // *Bacteriological Reviews*, 1964, v. 28, no. 2, pp. 181–207.
- [15] Rice E.L. *Allelopathy*. New York: Academic Press, 1984, 422 p.
- [16] Blagoveshchenskaya E.Yu. *Endofitnye griby zlakov* [Endophytic fungi of cereals]. Dis. Cand. Sci. (Biology). Moscow, Moscow State University, 2006, 26 p.
- [17] Ryan R.P., Germaine K., Franks A., Ryan D.J., Dowling D.N. Bacterial endophytes: recent developments and applications. *FEMS Microbiol Lett.*, 2008, v. 278, pp. 1–9.
- [18] Gollner M.J., Wagentristl H., Liebhard P., Friedel J.K. Yield and arbuscular mycorrhiza of winter rye in a 40-year fertilisation trial. *Agronomy for sustainable development*, 2011, v. 31, no. 2, pp. 373–378.
- [19] Berruti A., Bianciotto V., Lumini E. Seasonal variation in winter wheat field soil arbuscular mycorrhizal fungus communities after non-mycorrhizal crop cultivation. *Mycorrhiza*, 2018, v. 28, no. 5, pp. 535–548.
- [20] Kaidzu T., Suzuki K., Sugiyama H., Onur Akca M., Ergül A., Can Turgay O., Nonaka M., Harada N. The composition characteristics of arbuscular mycorrhizal fungal communities associated with barley in saline-alkaline soils in Central Anatolia. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, v. 66, no. 2, pp. 268–274.
- [21] Sokolova T.A. *Nizkomolekulyarnye organicheskie kisloty v pochvakh: istochniki, sostav, sodержanie, funktsii v pochvakh (obzor)* [Low-molecular-weight organic acids in soils: sources, composition, concentrations, and functions: a review]. *Pochvovedenie [Eurasian Soil Science]*, 2020, v. 53, pp. 580–594.
- [22] Chen J., Ullah C., Reichelt M. et al. The phytopathogenic fungus *Sclerotinia sclerotiorum* detoxifies plant glucosinolate hydrolysis products via an isothiocyanate hydrolase. *Nature communication*, 2020, v. 11, no. 1, pp. 1–12.
- [23] Meena M., Samal S. *Alternaria* host-specific (HSTs) toxins: An overview of chemical characterization, target sites, regulation and their toxic effects. *Toxicology reports*, 2019, v. 6, pp. 745–758.
- [24] Proctor R. H., McCormick S. P., Kim H. S. et al. Evolution of structural diversity of trichothecenes, a family of toxins produced by plant pathogenic and entomopathogenic fungi. *PLoS pathogens*, 2018, v. 14, no. 4, p. e1006946.
- [25] Inderjit. Plant phenolics in allelopathy. *The Botanical Review*, 1996, v. 62, pp. 186–202.
- [26] Kong C.H., Xuan T.D., Khanh T.D., Tran H.D., Trung N.T. Allelochemicals and signaling chemicals in plants. *Molecules*, 2019, v. 24, no. 15, p. 2737.
- [27] Weir T.L., Park S., Vivanco. J.M. Biochemical and physiological mechanisms mediated by allelochemicals. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 2004, v. 7, no. 4, pp. 472–479.
- [28] Fedotov G.N., Shoba S.A., Gorepekin I.V. *Allelotoksichnost' pochv i sposoby umen'sheniya ee negativnogo vliyaniya na nachal'nyuyu stadiyu razvitiya rasteniy* [Soil Allelotoxicity and Methods to Reduce Its Adverse Influence at the Initial Stage of Plant Development]. *Pochvovedenie [Eurasian Soil Science]*, 2020, v. 53, no. 8, pp. 1165–1172.
- [29] Gorepekin I.V., Fedotov G.N., Potapov D.I., Batyrev Yu.P., Shalaev V.S. *Snizhenie allelotoksichnosti pochv i pochvennykh substratov* [Allelotoxicity of soils and soil substrates reduction] // *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 4, pp. 46–52. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-46-52
- [30] Shoba S.A., Gorepekin I.V., Fedotov G.N., Gracheva T.A., Saligareeva O.A. *Priroda povysheniya effektivnosti primeneniya sorbtsionno-stimuliruyushchikh preparatov dlya predposevnoy obrabotki semyan pri vvedenii v ikh sostav neionogennykh PAV* [The Nature of the Increased Efficiency of Sorption-Stimulating Preparations Containing Non-Ionic Surfactants for Pre-Sowing Seed Treatment]. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o zhizni [Doklady Biological Sciences]*, 2020, v. 494, no. 1, pp. 248–250.
- [31] Mirchink T.G. *Pochvennaya mikologiya* [Soil mycology]. Moscow: Moscow State University Publ., 1988, 220 p.
- [32] Fomsgaard I.S., Mortensen A.G., Carlsen S.C.K. Microbial transformation products of benzoxazolinone and benzoxazinone allelochemicals—a review // *Chemosphere*, 2004, v. 54, no. 8, pp. 1025–1038.
- [33] Einhellig F.A. Interactions involving allelopathy in cropping systems // *Agronomy J.*, 1996, v. 88, no. 6, pp. 886–893.
- [34] Latif S., Chiapusio G., Weston L.A. Allelopathy and the role of allelochemicals in plant defence // *Advances in botanical research*. Academic Press, 2017, v. 82, pp. 19–54.
- [35] Tharayil N., Bhowmik P.C., Xing B. Bioavailability of allelochemicals as affected by companion compounds in soil matrices // *J. Agricultural Food Chem.*, 2008, v. 56, no. 10, pp. 3706–3713.
- [36] Weston L.A., Mathesius U. Flavonoids: their structure, biosynthesis and role in the rhizosphere, including allelopathy // *J. Chem. Ecology*, 2013, v. 39, no. 2, pp. 283–297.
- [37] Fedotov G.N., Shoba S.A., Fedotova M.F., Gorepekin I.V. *Vliyaniye allelotoksichnosti pochv na prorastanie semyan zernovykh kul'tur* [The influence of soil allelotoxicity on the germination of grain crop seeds]. *Pochvovedenie [Soil Science]*, 2019, no. 4, pp. 489–496.

- [38] *Metody pochvennoy mikrobiologii i biokhimii* [Methods of soil microbiology and biochemistry]. Ed. D.G. Zvyagintsev. Moscow: Moscow State University Publ., 1991, 304 p.
- [39] Lysak L.V., Dobrovol'skaya T.G., Skvortsova I.N. *Metody otsenki bacterial'nogo raznoobraziya pochv i identifikatsii pochvennykh bakteriy* [Methods for assessing bacterial diversity of soils and identification of soil bacteria]. Moscow: MAK Press Publ., 2003, 120 p.
- [40] Zinchenko M.K., Selitskaya O.V. *Biologicheskaya toksichnost' seroy lesnoy pochvy v zavisimosti ot sistem udobreniy* [Biological toxicity of grey forest soil depending on fertilizer systems]. *Agrokhimicheskiy vestnik* [Agrochemical Bulletin], 2011, v. 5, pp. 38–40.
- [41] Kjoller R., Rosendahl S. Effects of fungicides on arbuscular mycorrhizal fungi: differential responses in alkaline phosphatase activity of external and internal hyphae. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, v. 31, no. 5, pp. 361–365.
- [42] Nettles R., Watkins J., Ricks K., Boyer M., Licht M., Atwood L.W., Peoples M., Smith R.G., Mortensen D.A., Koide R.T. Influence of pesticide seed treatments on rhizosphere fungal and bacterial communities and leaf fungal endophyte communities in maize and soybean. *Applied Soil Ecology*, 2016, v. 102, pp. 61–69.
- [43] Prior R., Mittelbach M., Begerow D. Impact of three different fungicides on fungal epi- and endophytic communities of common bean (*Phaseolus vulgaris*) and broad bean (*Vicia faba*). *J. of Environmental Science and Health, Part B*, 2017, v. 52, no. 6, pp. 376–386.

The work was carried out within the framework of the MSU state assignment theme № 121040800147-0.

Authors' information

Fedotov Gennadiy Nikolaevich ✉ — Dr. Sci. (Biology), Senior Researcher of the Faculty of Soil Science of the Lomonosov Moscow State University, gennadiy.fedotov@gmail.com

Gracheva Tat'yana Aleksandrovna — Cand. Sci. (Biology), Senior Lecturer of the Faculty of Soil Science of the Lomonosov Moscow State University, gennadiy.fedotov@gmail.com

Gorepekin Ivan Vladimirovich — Researcher of the Lomonosov Moscow State University; Eurasian Center for Food Security of Lomonosov Moscow State University, decembrist96@yandex.ru

Batyrev Yuriy Pavlovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), batyrev@bmstu.ru

Received 20.03.2024.

Approved after review 29.11.2024.

Accepted for publication 04.02.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest