



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 631.414.3: 58.071

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13290

Исследование некоторых биологических и сорбционных характеристик почвенных микотоксинов

Ирина Дмитриевна Свистова¹,

Лариса Дмитриевна Стакхурлова^{2✉}, Владимир Фёдорович Селеменев²

¹Воронежский государственный педагогический университет, Воронеж, Россия

²Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, stakhurlova@rambler.ru✉

Аннотация. Микроскопические грибы составляют до 50% суммарной микробной биомассы в черноземных почвах, некоторые виды проявляют токсические свойства. По структуре микотоксины относят к разным классам химических соединений, по спектру действия выделяют токсины-антибиотики, фитотоксины, зоотоксины. Вопрос о действии микромицетов на растения через образование ими в почве микотоксинов остается слабо исследованным. В связи с этим изучение синтеза почвенными микромицетами микотоксинов с фитотоксическим действием, сохранения токсинов в почве и их роли в системе почва – микромицеты – растения представляет значительный научный и практический интерес. Почва не является простым твердым сорбентом с определенной сорбционной емкостью, это динамическая система, ее сорбционные свойства определяются минеральными и органическими компонентами и могут претерпевать значительные изменения. Это не только накладывает определенные сложности при изучении закрепления токсинов в почвах, но и создает возможность снижения активности токсинов путем закрепления токсинов в гумусовой матрице.

Все исследованные типичные для черноземов виды микромицетов выделяют в среду микотоксины с фитотоксическим действием, активность которых проявлялась непосредственно в почве. По степени токсичности, спектру биологического действия, прочности сорбции почвой и скорости биодеградации микотоксинов микромицеты разделили на три группы. Микотоксины грибов первой группы *Gliocladium virens* и *Rhizopus stolonifer* оказывают слаботоксичное действие на узкий круг растений и быстро разрушаются в почве. Виды второй группы *Penicillium daleae*, *Aspergillus ustus*, *Trichoderma harzianum* могут значительно угнетать развитие ряда растений, но действуют кратковременно, их токсины слабо сорбируются почвенно-поглощающим комплексом (ППК) черноземов и быстро потребляются почвенной микрофлорой. Микромицеты третьей группы видов синтезируют высокотоксичные для широкого круга растений микотоксины, которые длительно сохраняются в почве и слабо подвергаются биодеградации. При этом механизмы взаимодействия с ППК оказались различными: микотоксины *P. rubrum* и *P. funiculosum* практически не связываются, а микотоксины *A. clavatus*, *Fusarium solani* и *Talaromyces flavus* сорбируются ППК с возрастанием активности.

Ключевые слова: микотоксины, спектр действия, активность и стабильность, сорбция почвой, биодеградация, фитотоксикоз почвы.

Для цитирования: Свистова И.Д., Стакхурлова Л.Д., Селеменев В.Ф. Исследование некоторых биологических и сорбционных характеристик почвенных микотоксинов // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2025. Т. 25, № 4. С. 625-633. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13290>

Original article

Investigation of some biological and sorption characteristics of soil mycotoxins

Irina D. Svistova¹, Larissa D. Stakhurlova^{2✉}, Vladimir F. Selemenev²

¹Voronezh State Pedagogical University, Voronezh, Russian Federation

²Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, stakhurlova@rambler.ru✉

© Свистова И. Д., Стакхурлова Л. Д., Селеменев В. Ф., 2025



Abstract. Microscopic fungi account for up to 50% of the total microbial biomass in chernozem soils, and some species exhibit toxic properties. According to their structure, mycotoxins belong to different classes of chemical compounds, and toxins such as antibiotics, phytotoxins, and zootoxins are distinguished by their spectrum of action. The question of the effect of micromycetes on plants through their formation of mycotoxins in the soil remains poorly understood. In this regard, the study of the synthesis of phytotoxic mycotoxins by soil micromycetes, the preservation of toxins in the soil and their role in the soil – micromycete – plant system is of considerable scientific and practical interest.

The soil is not a simple solid sorbent with a specific sorption capacity, it is a dynamic system. Its sorption properties are determined by mineral and organic components and can undergo significant changes. This not only imposes certain difficulties in studying the fixation of toxins in soils, but also creates the possibility of reducing the activity of toxins by fixing toxins in the humus matrix.

All the micromycete species typical of chernozems studied release mycotoxins with phytotoxic effects into the medium, the activity of which was manifested directly in the soil. According to the degree of toxicity, the spectrum of biological action, the strength of soil sorption and the rate of biodegradation of mycotoxins, micromycetes were divided into three groups. Mycotoxins of the fungi of the first group *Gliocladium virens* and *Rhizopus stolonifer* have a slightly toxic effect on a narrow range of plants and are rapidly destroyed in the soil. Species of the second group *Penicillium daleae*, *Aspergillus ustus*, *Trichoderma harzianum* can significantly inhibit the development of a number of plants, but they act for a short time, their toxins are poorly absorbed by the soil-absorbing complex (PPK) of chernozems and are quickly consumed by the soil microflora. Micromycetes of the third group of species synthesize mycotoxins that are highly toxic to a wide range of plants, which persist in the soil for a long time and are poorly biodegradable. At the same time, the mechanisms of interaction with PPK turned out to be different: mycotoxins *P. rubrum* and *P. funiculosum* practically does not bind, and the mycotoxins *A. clavatus*, *Fusarium solani* and *Talaromyces flavus* are sorbed by ACC with increasing activity.

Keywords: mycotoxins, spectrum of action, activity and stability, soil sorption, biodegradation, soil phytotoxicosis.

For citation: Svistova I.D., Stakhurlova L.D., Selemenev V.F. Investigation of some biological and sorption characteristics of soil mycotoxins. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2025. 25(4): 625-633. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13290>

Введение

Способность сорбировать соли и органические вещества почвами впервые была отмечена в 1845-1855 годах немецким учёным Юстусом фон Либихом и английским исследователем Томпсоном [1]. В настоящее время многие исследователи пришли к выводу, что почвы следует рассматривать не как обычные твёрдые адсорбенты, а как композиты, имеющую сложную химическую и структурную организацию [2-5,7]. В этом аспекте наибольший интерес представляют чернозёмы, твёрдая часть которых образована частицами различного размера, скреплёнными между собой почвенными гелями. Основой данных почвенных гелей является «гумусовая матрица», образованная частицами гумусовых веществ размером 2-10 нм. Два растворимых компонента гумусовых веществ – гуминовые кислоты и фульвокислоты – классифицируют по растворимости. Гуминовые кислоты нерастворимы в воде при pH менее

2, но растворимы при pH > 2. Фульвокислоты растворимы и при pH ниже 2 [1,3].

Чаще всего гуминовые и фульвокислоты содержат карбоксильные – COOH; фенольные – OH; спиртовые – OH; кетонные – C=O; хиноидные – O=O; метоксигруппы – OCH₃, а также в них имеются аминогруппы – NH₂ (включая азот аминокислот); гетероциклы с азотом NH₂; гетероциклы с серой; серу в аминокислотах (типа цистеина) ; сульфогруппы – SO₃H; лактамы O=C–CH₂–NH–C₆H₄–R [1-3]. Природные гумусовые вещества представляют, таким образом, сложную смесь, в которой трудно количественно вычленить соотношение алифатических и ароматических фрагментов на их свойства. Однако, Г.В. Славинской [1] удалось установить три типа функциональных групп в отдельных гуминовых фракциях, имеющих $pK_{a(1)}=4.3$; $pK_{a(2)}=8.0$; $pK_{a(3)}=9.5$. Эти результаты свидетельствуют о протолизе

карбоксильных, фенольных и амино-групп соответственно и о наличии аминокислотных фрагментов в гуматах, способных существовать в водных растворах в катионной, биполярной и анионной формах [1].

Гуминовые и фульвокислоты, содержащие гидрофильные функциональные группы и гидрофобные фрагменты в форме углеродного остова, являются амифильными соединениями. Если их концентрация в воде превышает несколько мг/дм³, то они проявляют поверхностную активность и способствуют образованию пены [3]. Исходя из вышесказанного следует, что гумусовые вещества следует рассматривать как природные сорбенты, способные поглощать неорганические и органические ионы, а также молекулы ряда биологически активных веществ (БАВ) [1,3,11,12]. Особый интерес представляют продуценты БАВ – микроскопические грибы (микромицеты) чернозёмных почв, которые составляют до 50% суммарной микробной биомассы и играют важную роль в минерализации органических остатков и поддержании почвенного плодородия [4,5]. Некоторые виды микромицетов проявляют токсические свойства. По структуре микотоксины относят к разным классам химических соединений, по спектру действия выделяют токсины-антибиотики, фитотоксины, зоотоксины [6]. Химическая природа токсинов весьма разнообразна. В настоящее время среди них выделяют 14 групп химических соединений [7]. Обнаружены простые водорастворимые органические кислоты; жирные длинноцепочечные кислоты; бензойная кислота и ее производные; спирты с неразветвленной цепью; алифатические альдегиды и кетоны; простые ненасыщенные лактоны; нафтохиноны и антрахиноны; терпеноиды и стероиды; простые фенолы; коричная кислота и ее производные; кумарины; флавоноиды; та-

нины; аминокислоты и полипептиды; алкалоиды; циангидриды; пурины; нуклеозиды [7].

Известно, что накопление в почве некоторых видов грибов вызывает почвенный фитотоксикоз – угнетение всхожести семян, роста и развития растений и является основной причиной развития «почвоутомления» [8]. Однако, вопрос о сохранении микотоксинов с фитотоксическим действием в почве, о снижении активности токсинов за счет «закрепления» в гумусовых матрицах (почвенно-поглощающем комплексе – ППК) и их биодеградации изучен недостаточно. В связи с этим целью исследований было установление способности микромицетов, типичных для черноземов, к синтезу микотоксинов, механизма их стабильности в почве и специфичности их действия на развитие растений.

Экспериментальная часть

Почва – чернозем выщелоченный среднемощный малогумусный среднесуглинистый. Его агрохимическая характеристика: гумус 4.4-5.2%, рН_{H2O} 6.0-6.2 (слабокислый), гидролитическая кислотность 2,4-3,1 ммоль/100 г почвы, сумма обменных оснований 27.1-29.4 ммоль/100 г почвы, степень насыщенности основаниями (V) 74-80%. Для оценки агрохимических свойств использовали общепринятые методы – метод И.В. Тюрина, потенциометрический, Каппена и комплексонометрический соответственно.

В работе использовали чистые культуры микромицетов, выделенные нами из почвы и входящие в комплекс типичных видов для данного типа почв. Грибы выращивали на жидкой среде Чапека рН 4.5 в течение 7 суток.

Для определения фитотоксической активности изолятов использовали фильтрат культуральной жидкости (КЖ) в разведении 1:10 для предупреждения осмотических эффектов. Фитотоксичность оценивали методом биотестов [8], в качестве тест-объектов использовали семена



двудольных (редис) и однодольных (пшеница) растений, в качестве параметров – всхожесть семян, рост подземной и надземной части проростков. Семена замачивали в течение суток, фитотоксичными считали виды грибов, ингибирующие всхожесть семян и рост проростков не менее, чем на 20%. Степень токсичности определяли как показатель наибольшего последовательного разведения КЖ вдвое, при котором сохраняется токсическое действие на рост корня редиса [8]. Для определения стабильности фитотоксина оценивали динамику их содержания в растворе и определяли время полуинактивации при разной температуре.

Фитотоксическую активность почвы определяли методом почвенных пластинок [8] по токсическому действию на рост корня редиса. КЖ грибов вносили в соотношении 1:10 (объем/вес) в воздушно-сухую нативную или стерилизованную прогреванием (105°C, в течение 5 час.) почву, влажность доводили до 60% полной влагоемкости. На поверхность почвенной пластиинки раскладывали семена редиса, через 2-е суток оценивали ростовые эффекты. При изучении сорбции фитотоксина через 2 часа после внесения КЖ в стерильную почву проводили экстракцию водой или растворами хлористого калия (KCl) различной молярности (отношение объем/вес 2:1), после этого почву отфильтровывали, высушивали и определяли остаточную фитотоксическую активность.

Биодеградацию фитотоксина почвенной микрофлорой оценивали по снижению времени полуинактивации в нативной почве по сравнению со стерильной почвой (при 25°C).

Обсуждение результатов

В комплекс типичных для черноземов выщелоченных видов микромицетов входят дейтеромицеты рода *Penicillium* (*P. daleae*, *P. rubrum*, *P. funiculosum*), *Aspergillus* (*A. ustus*, *A. clavatus*), *Fusarium solani*, *Trichoderma harzianum* и

Gliocladium virens; зигомицет *Rhizopus stolonifer*, аскомицет *Talaromyces flavus* [4,9,10]. Эти виды грибов описаны в литературе как продуценты ряда токсинов: *P. rubrum* и *P. funiculosum* синтезируют рубротоксин; *P. daleae* и *A. clavatus* – патулин и экспансин; род *Fusarium* – фузариевую кислоту, энниатин и ликомаразмин; *Trichoderma* – триходермин и виридин; *Gliocladium* – глиотоксин; некоторые грибы выделяют кислоты: *A. ustus* – устовую, *Rh. stolonifer* – койевую, *T. flavus* – пеницилловую, фумаровую и лимонную [6]. Однако остаются неясными фитотоксические свойства этих микотоксинов и их действие на растения непосредственно в почве. Для выяснения специфиности и органотропного действия микотоксинов изучали их влияние на рост подземных и надземных органов одно- и двудольных тест-культур (табл. 1).

Микотоксины *T. harzianum*, *P. daleae* и *F. solani* преимущественно подавляли рост корневой системы, в то время как *P. rubrum*, *P. funiculosum*, *A. clavatus* и *T. flavus* обладали системным ингибирующим действием на все ростовые процессы. Фитотоксическое действие остальных исследованных видов грибов не превышало установленного нами порогового значения.

Степень фитотоксичности микромицетов различалась в 125 раз (минимальная для *A. ustus* и *Rh. stolonifer*, максимальная для *A. clavatus*, *F. solani*, *P. rubrum* и *P. funiculosum*) и не коррелировала со стабильностью фитотоксина в растворе (табл. 2). Повышение температуры до 25°C приводило к падению стабильности фитотоксина в 2-3 раза.

Специальный вопрос представляет изучение накопления и сохранения активности токсинов грибов непосредственно в почве. Ряд авторов отмечают быструю инактивацию микотоксинов в почве в результате их потребления почвенной микрофлорой. Другие исследователи считают, что микробные токсины

Таблица 1. Органотропное действие фитотоксинов микромицетов на разных тест-растениях (ингибиение, %)

Table 1. Organotropic effect of micromycete phytotoxins on different test plants (inhibition, %)

Виды грибов	Редис			Пшеница		
	всход- жесть семян	рост корня	рост гипо-ко- тиля	всход- жесть семян	рост корня	рост коло- птиля
<i>Penicillium daleae</i>	16	36	7	22	48	4
<i>P. rubrum</i>	23	100	65	57	100	78
<i>P. funiculosum</i>	18	65	67	40	82	66
<i>Aspergillus ustus</i>	22	24	18	22	8	5
<i>A. clavatus</i>	100	100	96	96	98	100
<i>Fusarium solani</i>	20	36	9	79	98	12
<i>Talaromyces flavus</i>	84	100	91	94	100	100
<i>Trichoderma harzianum</i>	16	36	14	19	48	17
<i>Gliocladium virens</i>	7	17	10	12	8	3
<i>Rhizopus stolonifer</i>	4	14	4	5	10	2

Таблица 2. Степень токсичности и стабильность фитотоксинов микромицетов в растворе
 Table 2. The degree of toxicity and stability of micromycete phytotoxins in solution

Виды грибов	Степень фитотоксичности	Время полуинактивации в растворе, сутки	
		4°C	25°C
<i>Penicillium daleae</i>	5	27.5	10.8
<i>P. rubrum</i>	10	35.1	18.4
<i>P. funiculosum</i>	9	39.0	16.3
<i>Aspergillus ustus</i>	4	20.6	8.4
<i>A. clavatus</i>	11	28.3	13.2
<i>Fusarium solani</i>	11	27.2	10.5
<i>Talaromyces flavus</i>	7	16.4	6.9
<i>Trichoderma harzianum</i>	5	19.1	10.2
<i>Gliocladium virens</i>	6	15.2	8.9
<i>Rhizopus stolonifer</i>	3	7.4	3.0

сорбируются почвой с некоторой потерей активности [6]. Однако проблема закрепления токсинов в почве является достаточно сложной, поскольку почву нельзя рассматривать как обычные твердые сорбенты, она имеет значительно более сложную структурную организацию. Почвенно-поглощающий комплекс (ППК) представляет собой совокупность минеральных глинистых сорбентов (илистая фракция) и органических сорбентов (гумусовые вещества) [2]. Почва не является простым твердым сорбентом с определенной сорбционной емкостью, а представляет собой систему, образованную частицами различного размера, которые связаны почвенными гелями [7]. Основой

этих почвенных гелей служит гумусовая матрица, образованная частицами гумусовых веществ размером 2...10 нм [11]. В результате структурного перехода ее сорбционные свойства могут претерпевать значительные изменения. Это не только создает определенные сложности при изучении закрепления токсинов в почвах, но и создает возможность снижения активности токсинов и ингибирующей способности почв путем их закрепления в гумусовой матрице [7,11,12].

Результаты изменения активности микротоксинов изученных видов грибов в почве (при внесении в стерильную почву) по сравнению с раствором представлены в табл. 3.

Таблица 3. Сорбция фитотоксинов микромицетов почвой

Table 3. Sorption of micromycete phytotoxins by soil

Виды грибов	Фитотоксичность почвы			
	% от исходной	Осталось после экстракции, %		
		H ₂ O	0.5 М KCl	1.0 М KCl
<i>Rhizopus stolonifer</i>	97	2	0	0
<i>P. rubrum</i>	98	5	2	0
<i>P. funiculosum</i>	96	4	2	0
<i>Gliocladium virens</i>	81	85	3	0
<i>Aspergillus ustus</i>	92	60	24	0
<i>Penicillium daleae</i>	69	67	23	3
<i>Trichoderma harzianum</i>	98	75	32	0
<i>A. clavatus</i>	116	93	80	15
<i>Fusarium solani</i>	111	80	73	17
<i>Talaromyces flavus</i>	108	90	88	12

По нашим данным, активность фитотоксинов *P. daleae* и *G. virens* снижалась на 20-30% по сравнению с раствором. В то же время фитотоксичность метаболитов остальных видов грибов в почве практически не изменялась по сравнению с раствором, а для *A. clavatus*, *F. solani* и *T. flavus* отмечено даже возрастание активности микотоксинов в почве на 8-16% по сравнению с раствором. Следовательно, микотоксины исследованных видов микромицетов сохраняют активность непосредственно в почве.

Прочность связывания фитотоксинов ППК значительно варьировала. При экстракции почвы водой практически полностью вымывались фитотоксины *Rh. stolonifer*, *P. rubrum* и *P. funiculosum*, что указывает на отсутствие сорбции этих метаболитов ППК чернозёмов. Фитотоксины *Gliocladium virens* экстрагировали 0.5 М раствором KCl, повышение ионной силы раствора до 1М KCl приводило к десорбции фитотоксинов *A. ustus*, *P. daleae* и *T. harzianum*, что свидетельствует о роли ионообменной адсорбции в связывании ППК черноземов этих метаболитов.

Для видов *A. clavatus*, *F. solani* и *Tal. flavus* после экстракции раствором 1М KCl до 12-17% фитотоксической активности оставалось связанный с почвой. Вероятно, в сорбции этих микотоксинов ППК участвуют более прочные связи. Отметим,

что именно для этих видов грибов связывание микотоксинов с почвой приводило к росту фитотоксической активности.

Снижение времени полуинактивации в нативной почве по сравнению со стерильной может рассматриваться как показатель биодеградации фитотоксинов почвенной микрофлорой (табл. 4).

Наиболее быстро инактивировались микотоксины *Rh. stolonifer*, несколько медленнее – *P. daleae*, *A. ustus*, *T. harzianum*, *G. virens*. Фитотоксины *P. rubrum*, *P. funiculosum*, *F. solani*, *Tal. flavus* и особенно *A. clavatus* длительно сохраняли свою активность в нативной почве. Исходя из литературных данных [1-3,10], следует полагать, что сохранение активности фитотоксинов *Aspergillus clavatus*, *Fusarium solani*, и *Talaromyces flavus* в почвах будет связано с сорбцией их гумусовыми матрицами и формированием новых микро- и наноструктур. При этом прочное закрепление фитотоксинов осуществляется путём образования ион-ионных связей, а также Н-связей и Ван-дер-Ваальсовских взаимодействий [3,11-13]. Подобные процессы (согласно А.И. Коновалову) следует характеризовать как образование «супрамолекулярных ансамблей» [13]. На рисунках 1 и 2 представлены в качестве примера варианты образования композитов «Гумус +H₂O + пеницилловая кислота» и «Гумус +H₂O +

Таблица 4. Биодеградация фитотоксинов микромицетов в почве
Table 4. Biodegradation of micromycete phytotoxins in soil

Виды грибов	Время полуинактивации в почве, сутки		
	стерильной	нативной	снижение, %
<i>Penicillium daleae</i>	10.0	6.6	44
<i>P. rubrum</i>	18.7	14.3	23
<i>P. funiculosum</i>	16.8	12.4	26
<i>Aspergillus ustus</i>	8.4	3.6	57
<i>A. clavatus</i>	17.8	16.7	6
<i>Fusarium solani</i>	13.2	9.5	28
<i>Talaromyces flavus</i>	8.3	6.2	26
<i>Trichoderma harzianum</i>	10.9	5.4	50
<i>Gliocladium virens</i>	9.0	5.3	45
<i>Rhizopus stolonifer</i>	3.5	0.7	80

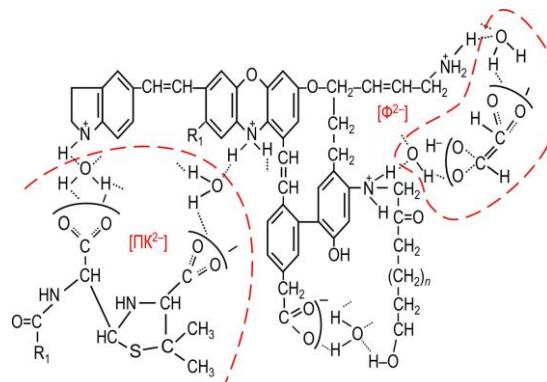


Рис.1. Один из возможных вариантов фиксации ионов пеницилловой $[\text{ПК}^{2-}]$ и фумаровой $[\text{Ф}^{2-}]$ кислот (продуктов синтеза *Talaromyces flavus*) гумусовой (по Орлову [2]) матрицей.
Fig.1. One of the possible variants of fixation of ions of penicillic $[\text{PK}^{2-}]$ and fumaric $[\text{F}^{2-}]$ acids (products of synthesis of *Talaromyces flavus*) by humic (according to Orlov [2]) matrix.

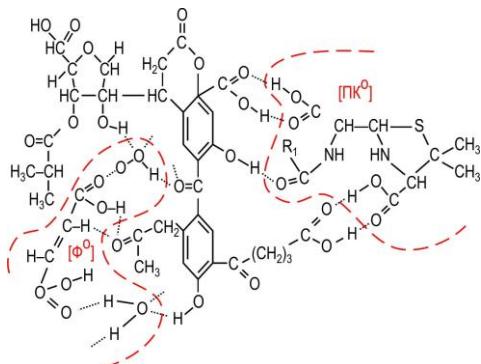


Рис. 2. Один из возможных вариантов закрепления молекул пеницилловой $[\text{ПК}^{2-}]$ и фумаровой $[\text{Ф}^{2-}]$ кислот (продуктов синтеза *Talaromyces flavus*) гумусовой (по Леенеру [3]) матрицей.
Fig. 2. One of the possible options for fixing penicillic $[\text{PK}^{2-}]$ and fumaric $[\text{F}^{2-}]$ acid molecules (products of the synthesis of *Talaromyces flavus*) with humic (according to Leener [3]) matrix.

фумаровая кислота». В качестве гумусовой матрицы выбраны структуры гуминовых кислот по Д.С. Орлову [2] и по Ле-

енеру [3]. Фитотоксины фумаровая и пеницилловая кислоты производятся грибом *Talaromyces flavus*.

Из приведённых на рисунках данных следует, что формирование клатратных



комплексов фитотоксинов в почве происходит с образованием ион-ионных, ион-дипольных пар, водородных связей и ориентационного эффекта [13].

Заключение

Все исследованные типичные для черноземов виды микромицетов выделяют в среду микотоксины с фитотоксическим действием, активность которых сохранялась непосредственно в почве. По степени токсичности, спектру биологического действия, прочности сорбции ППК и скорости биодеградации микотоксинов микромицеты можно разделить на три группы. Микотоксины грибов первой группы (*G. virens* и *Rh. stolonifer*) оказывают слаботоксичное действие на узкий круг растений и быстро разрушаются в почве. Грибы второй группы (*P. daleae*, *A. ustus*, *T. harzianum*) могут значительно угнетать развитие ряда растений, но действуют кратковременно, их токсины слабо сорбируются ППК черноземов и быстро потребляются почвенной микрофлорой. Микромицеты третьей группы видов синтезируют высокотоксичные для широкого круга растений микотоксины, которые длительно сохраняются в почве и слабо подвергаются биодеградации. При этом механизмы взаимодействия с

Список литературы/References

1. Selemenev V.F., Rudakov O.B., Slavinskaya G.V., Drozdova N.V. Pigments of food production, M., DeLiprint, 2008; 246. (In Russ.)
2. Orlov D.S. Humic acids of soils and the general theory of humification. M., Moscow State University, 1990; 323. (In Russ.)
3. Maurice P. Surface and interphase boundaries in the environment. From the nanoscale to the global scale. M., BINOM. Laboratory of knowledge. 2015; 540 p.
4. Svistova I.D. Biodynamics of the microbial community of chernozem in anthropogenic ecosystems of the forest-steppe. Dissertation of the Doctor of Biology. Petrozavodsk, 2005; 485 p.
5. Stakhurlova L.D., Svistova I.D. Rus. Agricultural Sci, 2019; 1, 35-38.
6. Tutelyan V.A., Kravchenko L.V. Mycotoxins (medical and biological aspects). M., Medicine, 1985; 320 p.
7. Fedotov G.N., Shalaev V.S., Batyrev Yu.P. J. Lesnoy vestnik, 2020; 24(9): 37-42.
8. Methods of experimental mycology. Kiev, Naukova Dumka, 1982; 233 p. (In Russ.)
9. Svistova I.D. Forestry J. 2019; 2 (34): 40-46.
10. Svistova I.D. Soil Sci. 2004; 10: 1220-1227.
11. Fedotov G.N., Dobrovolsky G.V. Soil Sci. 2012; 8: 908-920.
12. Fedotov G.N., Shoba S.A., Pozdnyakov A.I., Puzanova A.E.. Soil Sci. 2014; 9: 1056-1067.
13. Selemenev V.F., Kostin D.V., Artyukhov V.G., Rudakov O.B. Forms of motion of matter. Reflections on the unknown. Voronezh, Publishing House-Polygraphic Center. A scientific book. 2024; 196 p. (In Russ.)

ППК оказались различными: микотоксины *P. rubrum* и *P. funiculosum* практически не связываются, а микотоксины *A. clavatus*, *F. solani* и *Tal. flavus* сорбируются ППК с возрастанием активности.

На основании полученных нами данных можно выдвинуть в качестве основных индикаторов фитотоксикоза черноземов виды микромицетов *A. clavatus*, *F. solani*, *Tal. flavus*, *P. rubrum* и *P. funiculosum*.

Кардинально изменить источники поступления в почву и удаления токсинов из нее сложно, но можно попытаться воздействовать на прочность их связи с гумусовой матрицей почвенных гелей, активируя структурный переход в этой матрице, увеличивая энергию связи токсинов с гумусовой матрицей и снижая их действующую концентрацию в почвах. Подобный путь может оказаться достаточно эффективным, поскольку он основан на использовании ресурсов самих почв для закрепления токсинов [7].

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.



Информация об авторах / Information about the authors

И.Д. Свистова – д.б.н., профессор кафедры биологии растений и животных Воронежского государственного педагогического университета, Воронеж, Россия, e-mail: i.svistova55@mail.ru

Л.Д. Стакхурлова – к.б.н., доцент кафедры экологии и земельных ресурсов Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия, e-mail: stakhurlova@rambler.ru

В.Ф. Селеменев – д.х.н., профессор кафедры аналитической химии Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

I.D. Svistova – prof., grand Ph.D (biology), department of plant and animal biology, Voronezh State Pedagogical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: i.svistova55@mail.ru

L.D. Stakhurlova – candidate of biological sciences, associate professor of the department of ecology and land resources, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: stakhurlova@rambler.ru

V.F. Selemenev – prof., grand Ph.D. (chemistry) of the department of analytical chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

Статья поступила в редакцию 24.07.2025; одобрена после рецензирования 01.10.2025; принята к публикации 15.10.2025.

The article was submitted 24.07.2025; approved after reviewing 01.10.2025; accepted for publication 15.10.2025.