

ЭКОЛОГИЯ/ECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.32>ОЦЕНКА ТОЛЕРАНТНОСТИ ГРИБОВ *P. FUSARIUM* И *P. PENICILLIUM* К ТЯЖЕЛЫМ МЕТАЛЛАМ (Pb, Cd)

Научная статья

Попова И.С.^{1,*}, Хижняк С.В.², Овсянкина С.В.³, Аболентцева П.А.⁴¹ ORCID : 0000-0002-9099-9537;² ORCID : 0000-0003-2583-8857;³ ORCID : 0000-0003-2184-6104;⁴ ORCID : 0000-0002-1831-5911;^{1, 2, 3, 4} Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kisaspi[at]mail.ru)

Аннотация

Одним из важнейших путей недопущения деградации почв является ранняя диагностика негативных изменений, поэтому актуален поиск адекватных тест-объектов для агроэкологического мониторинга. В данной работе проводилась оценка толерантности к различным концентрациям соли свинца (0,5, 0,25, 0,125, 0,0625, 0,0312 г/л), кадмия (0,25, 0,125, 0,0625, 0,0312, 0,0150 г/л) изолятов грибов *P. Fusarium*, выделенные с ризосферы сои (*Glycine max*) и *P. Penicillium*, выделенные с семян сои, выращенной в лесостепной зоне Красноярского края. Парный t-тест, тест Уилкоксона и тест знаков показали, что *Fusarium sp.* статистически значимо ($p < 0,05$) более чувствителен к присутствию кадмия, чем *Penicillium sp.*, в других вариантах исследования парные тесты не выявили статистически значимых различий. Это связано со сложным нелинейным характером соответствующих кривых «доза-эффект». Толерантность *P. Fusarium* и *P. Penicillium* к тяжелым металлам охарактеризована через уравнения зависимости дозы токсиканта и доли погибших конидий (в %). Обнаружено, что для биодиагностики загрязнения ионами свинца (0,25-1,0 мг/л) и кадмия (0,125-0,5 мг/л) возможно использование конидии *Penicillium sp.*, в данных диапазонах зависимость доли погибших конидий адекватно аппроксимируется экспоненциальной функцией.

Ключевые слова: биоиндикация, микромицеты, *P. Fusarium*, *P. Penicillium*, тяжелые металлы, толерантность.

ASSESSMENT OF TOLERANCE OF *P. FUSARIUM* AND *R. PENICILLIUM* FUNGI TO HEAVY METALS (Pb, Cd)

Research article

Popova I.S.^{1,*}, Khizhnyak S.V.², Ovsyankina S.V.³, Abolentseva P.A.⁴¹ ORCID : 0000-0002-9099-9537;² ORCID : 0000-0003-2583-8857;³ ORCID : 0000-0003-2184-6104;⁴ ORCID : 0000-0002-1831-5911;^{1, 2, 3, 4} Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russian Federation

* Corresponding author (kisaspi[at]mail.ru)

Abstract

One of the most important ways to prevent soil degradation is early diagnosis of negative changes, therefore, it is important to search for adequate test facilities for agroecological monitoring. In this work, tolerance to various concentrations of lead salt was assessed (0.5, 0.25, 0.125, 0.0625, 0.0312 g/l), cadmium (0.25, 0.125, 0.0625, 0.0312, 0.0150 g/l) isolates of *P. Fusarium* fungi isolated from the soybean rhizosphere (*Glycine max*) and *R. Penicillium* isolated from soybean seeds grown in the forest-steppe zone of the Krasnoyarsk Territory. The paired t-test, the Wilcoxon test and the sign test showed that *Fusarium sp.* It is statistically significantly ($p < 0.05$) more sensitive to the presence of cadmium than *Penicillium sp.*, in other variants of the study, paired tests did not reveal statistically significant differences. This is due to the complex nonlinear nature of the corresponding dose-effect curves. The tolerance of *R. Fusarium* and *R. Penicillium* to heavy metals is characterized through the equations of dependence of the dose of the toxicant and the proportion of dead conidia (in %). It was found that for the biodiagnosis of contamination with lead ions (0.25-1.0 mg/l) and cadmium (0.125-0.5 mg/l), it is possible to use conidium *Penicillium sp.*, in these ranges, the dependence of the proportion of dead conidia is adequately approximated by an exponential function.

Keywords: bioindication, micromycetes, *R. Fusarium*, *R. Penicillium*, heavy metals, tolerance.

Введение

Ингредиентное загрязнение – это одно из опасных антропогенных воздействий на агроэкосистемы, особенно на важный компонент – почвенную среду. Тяжелые металлы являются приоритетными загрязнителями, негативно влияющие на все биотические компоненты агроэкосистемы.

Основными источниками загрязнения тяжелыми металлами почв сельскохозяйственного назначения являются минеральные удобрения, пестициды, несанкционированные свалки отходов и другие.

Для оценки воздействия влияния антропогенной нагрузки на экосистемы широко используется метод биотестирования [3], в том числе и в наших работах с помощью стандартных тест-объектов дана оценка экологического состояния земель сельскохозяйственного назначения Красноярского края [2]. Преимущества биологических методов заключается в том, что живые организмы более чувствительны, чем используемые приборы,

улавливают более низкие концентрации веществ [7]. В качестве тест-видов для оценки токсичности почв, рекомендованных в стандартных методиках, в настоящее время используют в основном растения и животных (ракообразные, простейшие, кольчатые черви и др.) [4], [7].

Грибы являются интересным объектом для биомониторинга. В настоящее время накоплен большой материал о степени реагирования грибов на изменения окружающей среды [6], [9]. Известно, что грибы обладают сорбционной способностью по отношению к тяжелым металлам и относительно к ним устойчивы [5], [8], [9], [12], [14]. В небольших количествах многие металлы необходимы для жизнедеятельности грибов (Cu, Mn, Zn, Co, Sn, V, Ni, Cr и др.), однако в больших количествах становятся токсичными. Ряд металлов высокотоксичны и в малых количествах (Cd, Sb, As, Hg, Pb, Ag и др.) [1], [11]. По литературным данным влияние токсического эффекта тяжелых металлов на микромицеты разнообразно. При выращивании различных грибов на питательных средах в присутствии металлов наблюдалось подавление роста и развитие мицелия, роста колоний, уменьшение спорообразования и изменение морфологии спор, изменение состава продуцируемых экзотоксинов [1], [8], [11], [13].

Такая способность микромицетов дает возможность поиска новых видов биоиндикаторов для оценки почв загрязненными тяжелыми металлами. Подбор чувствительных тест-объектов, которые адекватно характеризовали бы техногенную нагрузку на природную окружающую среду, актуальна несколько десятилетий. Грибы р. *Fusarium* и р. *Penicillium* в качестве объектов исследования выбраны ввиду их широкого распространения в окружающей среде и апробации другими исследователями в отношении Ni, Co, Fe, Mg и Mn [12], [13], [14].

Целью настоящего исследования является изучение чувствительности грибов р. *Fusarium* и р. *Penicillium* к различным концентрациям солей свинца и кадмия.

Объекты и методы

В качестве тест-культур в работе использованы изоляты грибов р. *Fusarium*, выделенные с ризосферы сои (*Glycine max*) и р. *Penicillium*, выделенные с семян сои, выращенной в лесостепной зоне Красноярского края.

Для определения чувствительности конидий грибов к различным концентрациям металлов смешивали питательную среду в чашках Петри с маточным раствором соли кадмия (сульфат кадмия, безводный, 99+%) для получения следующих концентраций раствора в среде, г/л: 0,25, 0,125, 0,0625, 0,0312, 0,0150; соли свинца (свинца (II) сульфат, 99.5% (хч)), г/л: 0,5, 0,25, 0,125, 0,0625, 0,0312. Конидии наносили на поверхность агаризованной среды.

Питательную среду Чапека-Докса, в которую добавляли кадмий, готовили в соответствии с инструкцией производителя: сахароза – 20,0 г/л; нитрат натрия – 2,0 г/л; фосфат калия двузамещенный – 1,0 г/л; сульфат магния – 0,5 г/л; хлорид калия – 0,5 г/л; сульфат железа – 0,01 г/л; агар – 20,0 г/л; pH 7,3±0,2. Чтобы ионы свинца не вступали в ионообменную реакцию с компонентами среды Чапека-Докса и не выпадали в осадок, был подобран следующий состав среды: глюкоза - 20,0 г/л, пептон – 10 г/л, агар-агар микробиологический – 14 г/л.

Чашки инкубировали в течение 20 часов при температуре 26 °С. Учет жизнеспособности производили прямым методом, по количеству проросших и не проросших конидий грибов. Контролем служили конидии пророщенные на питательной среде без добавления металлов, прорастание конидий составляло 100%.

Для учета результатов эксперимента использовали микроскоп Микмед 6 вар. 7. с цифровой камерой DCM-130M. Анализ данных производили с использованием следующего программного обеспечения: пакет StatSoft STATISTICA 8.0. Статистическую значимость различий между вариантами с тяжелыми металлами и контролем по прорастанию конидий проверяли точным тестом Фишера для таблиц 2x2. Подбор уравнений регрессии, описывающих зависимость доли погибших конидий от концентрации тяжелых металлов, осуществляли с помощью модуля «Пользовательская регрессия» (User-specified regression) с использованием метода наименьших квадратов.

Результаты и их обсуждение

В контрольных вариантах прорастание конидий как *Fusarium sp.*, так и *Penicillium sp.* составило 100 %. Статистически значимое снижение прорастания конидий *Fusarium sp.* отмечено в присутствии 0,0625 мг/л Pb, 0,5 мг/л Pb, 1 мг/л Pb и 2 мг/л Pb, а также в присутствии 0,015 мг/л Cd, 0,0312 мг/л Cd, 0,125 мг/л Cd, 0,25 мг/л Cd и 0,5 мг/л Cd (табл. 1).

Таблица 1 - Влияние тяжёлых металлов на прорастание конидий *Fusarium sp.*
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.32.1>

Концентрация металла, мг/л	Прорастание конидий, %	Статистическая значимость различий с контролем, р*	
		двустороннее	одностороннее
контроль			
0	100,0	-	-
Pb			
0,0312	94,4	нет	нет
0,0625	73,7	<0,001	<0,001
0,125	98,1	нет	нет
0,25	100,0	нет	нет
0,5	0,0	<0,001	<0,001
1	0,0	<0,001	<0,001
2	0,0	<0,001	<0,001
Cd			
0,015	2,5	<0,001	<0,001
0,0312	65,3	<0,001	<0,001
0,0625	95,0	нет	нет
0,125	76,2	<0,01	<0,01
0,25	80,8	<0,01	<0,001
0,5	0,0	<0,001	<0,001

Примечание: «нет» означает отсутствие статистически значимых различий

Статистически значимое снижение прорастания конидий *Penicillium sp.* отмечено во всём диапазоне концентраций Pb, а также в присутствии 0,0312 мг/л Cd, 0,25 мг/л Cd и 0,5 мг/л Cd (табл. 2).

Таблица 2 - Влияние тяжёлых металлов на прорастание конидий *Penicillium sp.*
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.32.2>

Концентрация металла, мг/л	Прорастание конидий, %	Статистическая значимость различий с контролем, р*	
		двустороннее	одностороннее
контроль			
0	100,0	-	-
Pb			
0,0312	88,5	<0,001	<0,001
0,0625	80,5	<0,001	<0,001
0,125	83,8	<0,001	<0,001
0,25	89,9	<0,001	<0,001
0,5	75,5	<0,001	<0,001
1	0,0	<0,001	<0,001
2	0,0	<0,001	<0,001
Cd			
0,015	97,6	нет	нет
0,0312	93,4	<0,05	<0,05
0,0625	96,8	нет	нет
0,125	97,7	нет	нет
0,25	93,9	<0,05	<0,01
0,5	39,1	<0,001	<0,001

Примечание: «нет» означает отсутствие статистически значимых различий

Таким образом, исследуемые грибы показали видовую специфику толерантности к тяжелым металлам, наибольшую устойчивость показал *Penicillium sp.* (рис. 1).

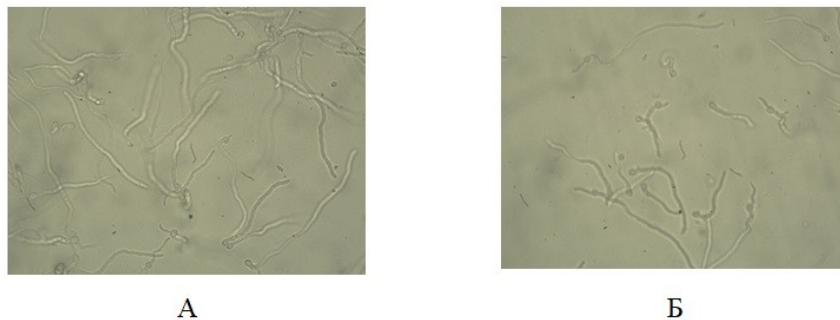


Рисунок 1 - Прорастание конидий *Penicillium sp.*
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.32.3>

Примечание: А – контроль; Б – ионы кадмия в дозе 0,5 мг/л

Парные двухвыборочные тесты (парный t-тест, тест Уилкоксона и тест знаков) показали, что *Fusarium sp.* статистически значимо ($p < 0,05$ согласно всем перечисленным тестам) более чувствителен к присутствию Cd, чем *Penicillium sp.* Во всех остальных случаях (сравнение чувствительности *Fusarium sp.* и *Penicillium sp.* к присутствию Pb, сравнение Pb и Cd по токсичности для *Fusarium sp.* и для *Penicillium sp.*) парные тесты не выявили статистически значимых различий. Это связано со сложным нелинейным характером соответствующих кривых «доза-эффект», для описания которых использовали сумму двух нелинейных функций, а в случае влияния Cd на *Fusarium sp.* – одной линейной и двух нелинейных функций. Как правило, одна из функций представляет собой разновидность уравнения Михаэлиса-Ментен с субстратным ингибированием, и описывает зависимость гибели конидий от содержания тяжёлого металла в области низких концентраций. Вторая функция в случае влияния Pb на *Fusarium sp.* и *Penicillium sp.* представляет собой логистическую функцию, а в случае влияния Cd на *Fusarium sp.* и *Penicillium sp.* – экспоненциальную функцию, и описывает зависимость гибели конидий от содержания тяжёлого металла в области высоких концентраций (1-4).

Уравнение, описывающее зависимость гибели конидий *Fusarium sp.* от концентрации Pb, имеет вид:

$$Y = (a_0X/a_1 + X + a_2X^2) + a_3/1 + e^{-a_4(x-x_0)} \quad (1)$$

Уравнение, описывающее зависимость гибели конидий *Fusarium sp.* от концентрации Cd, имеет вид:

$$Y = a_0X + (a_1X/a_2 + X_4) + a_3e^{a_4x} \quad (2)$$

Уравнение, описывающее зависимость гибели конидий *Penicillium sp.* от концентрации Pb, имеет вид:

$$Y = (a_0X/a_1 + X + a_2X^3) + (a_3/1 + e^{-a_4(x-x_0)}) \quad (3)$$

Уравнение, описывающее зависимость гибели конидий *Penicillium sp.* от концентрации Cd, имеет вид:

$$Y = (a_0(X + a_1)/a_2 + X + a_3(X + a_1)^4) + a_4e^{a_5x} \quad (4)$$

где:

X – концентрация тяжёлого металла (мг/мл),

Y – доля погибших конидий (%),

a_1 , a_2 , a_3 , a_4 и a_5 – коэффициенты.

Статистическая значимость всех регрессионных моделей $p < 0,001$. Коэффициент детерминации для модели (1) $R^2 = 0,99998$, для модели (2) $R^2 = 0,98290$, для модели (3) $R^2 = 0,99945$, для модели (4) $R^2 = 0,99958$. Экспериментальные и теоретические (рассчитанные по соответствующим уравнениям) значения доли погибших конидий при разных концентрациях тяжёлых металлов показаны на рисунках 2–5.

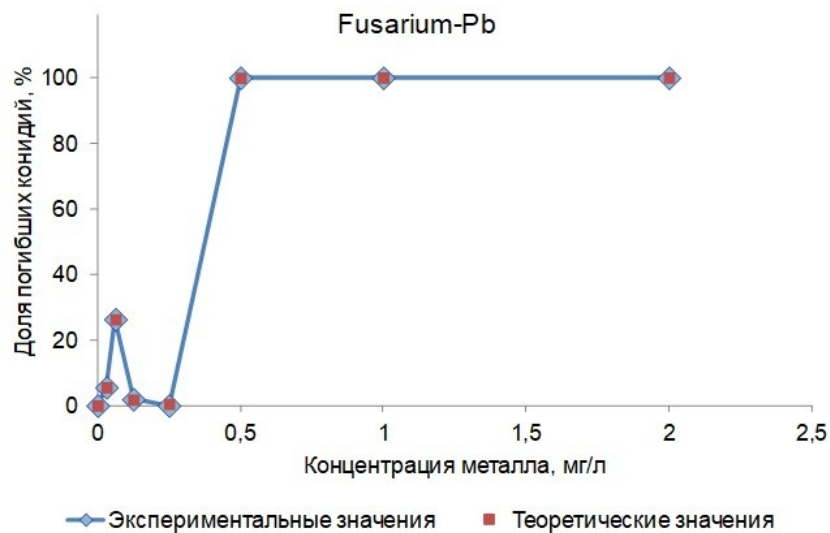


Рисунок 2 - Влияние Pb на жизнеспособность конидий *Fusarium sp.*
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.32.4>

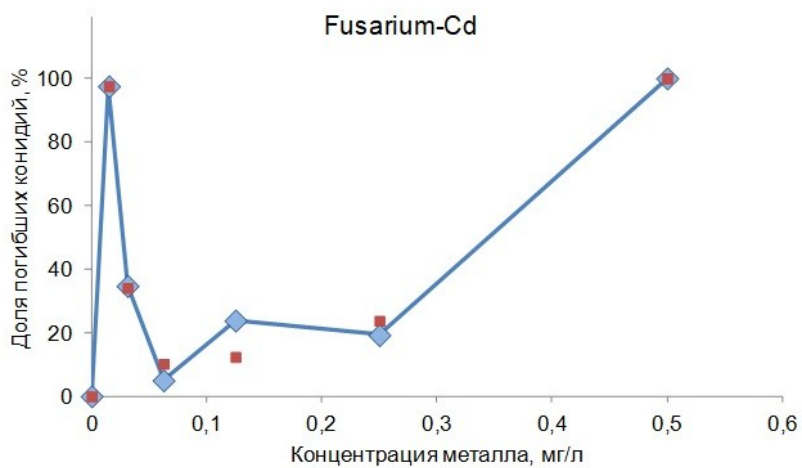


Рисунок 3 - Влияние Cd на жизнеспособность конидий *Fusarium sp.*
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.32.5>

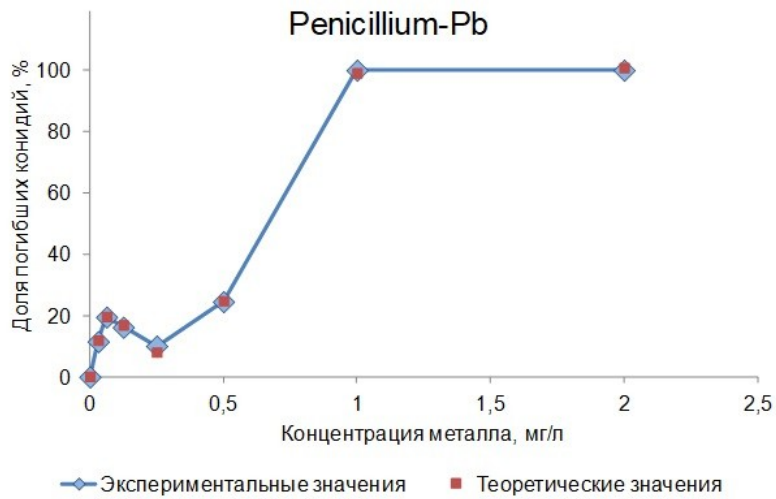


Рисунок 4 - Влияние Pb на жизнеспособность конидий *Penicillium sp.*
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.32.6>

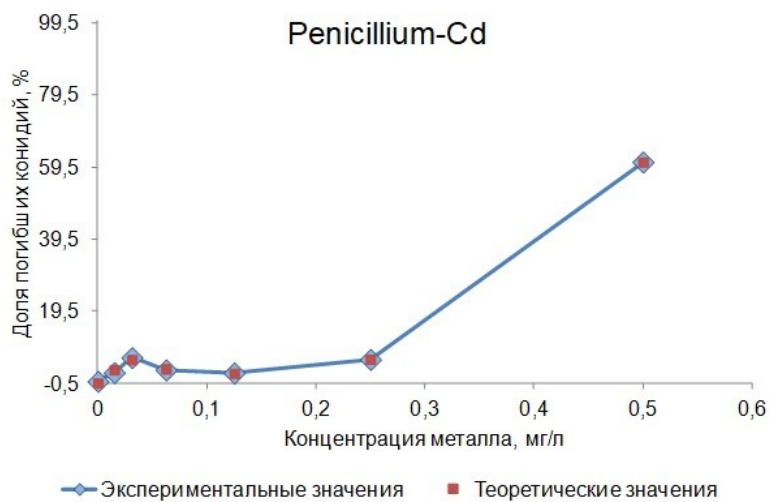


Рисунок 5 - Влияние Cd на жизнеспособность конидий *Penicillium sp.*
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.32.7>

Характер кривых «доза-эффект», а также тот факт, что эти кривые адекватно описываются суммой двух (в случае влияния Cd на *Fusarium sp.* – трёх) функций, позволяет предположить, что ингибирующий эффект тяжёлых металлов обусловлен двумя различными механизмами, для каждого из которых характерна своя дозовая кривая; результирующий эффект обусловлен суммой этих кривых (рис. 6).

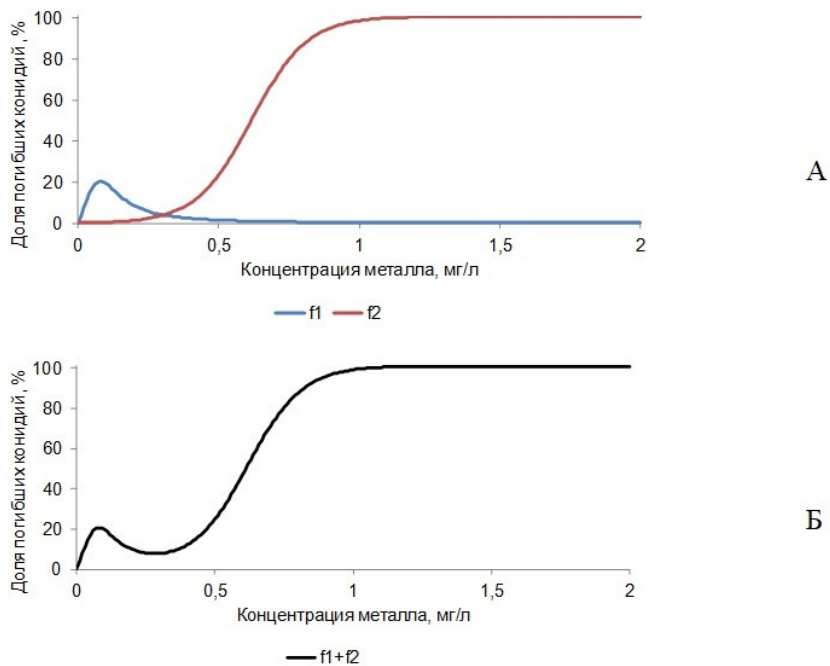


Рисунок 6 - Кривая «доза-эффект» как сумма двух дозовых кривых на примере влияния Pb на жизнеспособность конидий *Penicillium sp.*

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.32.8>

Примечание: f_1 – график первой функции в уравнении (3); f_2 – график второй функции в уравнении (3) (А); f_1+f_2 – сумма f_1 и f_2 (уравнение (3)) (Б)

Следует отметить, что сходные по форме кривые «доза-эффект» получены в работе [10] при изучении влияния тяжёлых металлов на мицелиальный рост грибов *Aspergillus niger*, *A. foetidus* и *Penicillium simplicissimum*. Так, аналогичная представленным на рис. 1-4 зависимости токсического эффекта от концентрации металла наблюдалась упомянутыми авторами для роста *P. simplicissimum* в присутствии Mo, Zn и Mn, а также для роста *A. foetidus* в присутствии Mn.

С практической точки зрения можно рекомендовать использование конидий *Penicillium sp.* для биотестирования Pb в диапазоне концентраций 0,25-1,0 мг/л и Cd в диапазоне концентраций 0,125-0,5 мг/л. В этом диапазоне зависимость доли погибших конидий адекватно аппроксимируется экспоненциальной функцией.

Заключение

В условиях лабораторного опыта, при модельном загрязнении среды ионами тяжёлых металлов выявлено токсическое воздействие на грибы р. *Fusarium* и р. *Penicillium* к различным концентрациям солей свинца и кадмия. Обнаружено, что к присутствию в среде ионов кадмия *Fusarium sp.* статистически значимо ($p < 0,05$) более чувствителен, чем *Penicillium sp.*

В качестве тест-объектов можно рекомендовать использование конидий *Penicillium sp.* для биотестирования токсичности: ионов свинца в диапазоне концентраций 0,25-1,0 мг/л, ионов кадмия в диапазоне концентраций 0,125-0,5 мг/л.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

- Горбунова Е.А. Тяжелые металлы как фактор стресса для грибов: проявление их действия на клеточном и организменном уровнях. / Е.А. Горбунова, В.А. Терехова // Микология и фитопатология. — 1995. — 4. — С. 63–69.
- Коротченко И.С. Биодиагностика состояния почв Емельяновского района Красноярского края в условиях транспортной нагрузки. / И.С. Коротченко, В.А. Медведева // Вестник Оренбургского государственного

педагогического университета. Электронный научный журнал. — 2022. — 3(43). — С. 18–26. — DOI: 10.32516/2303-9922.2022.43.2

3. Петрова Л.Н. Биотестирование агроландшафта путем оценки качества зерна. / Л.Н. Петрова, С.О. Ушкалова, В.Н. Черкашин и др. // Плодородие. — 2007. — 1. — С. 35–36.

4. Поляк Ю.М. Биодиагностика состояния окультуренной городской почвы, загрязненной тяжелыми металлами, методами биоиндикации и биотестирования. / Ю.М. Поляк, Л.Г. Бакина, Н.В. Маячкина и др. // Почвы и окружающая среда. — 2018. — 4. — С. 231–242.

5. Скугорева С.Г. Сорбция ионов свинца (и) мицелием гриба *Fusarium culmorum*. / С.Г. Скугорева, Г.Я. Кантор, Л.И. Домрачева и др. // Успехи медицинской микологии. — 2018. — 19. — С. 56–61.

6. Терехова В.А. Значение микологических исследований для контроля качества почв // По. 643-648. / В.А. Терехова // Почвоведение. — 2007. — 5. — С. 643–648.

7. Терехова В.А. Методология биодиагностики почв и особенности некоторых методов биоиндикации и биотестирования (обзор). / В.А. Терехова, С.А. Кулачкова, Е.В. Морачевская и др. // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. — 2023. — 2. — С. 35–45.

8. Фокина А.И. Тяжелые металлы как фактор изменения метаболизма у микроорганизмов (обзор). / А.И. Фокина, Т.Я. Ашихмина, Л.И. Домрачева и др. // Теоретическая и прикладная экология. — 2015. — 2. — С. 5–18.

9. Широких А.А. Грибы в биомониторинге наземных экосистем. / А.А. Широких, А.В. Колупаев // Теоретическая и прикладная экология. — 2009. — 3. — С. 4–14.

10. Anahid S. Heavy metal tolerance of fungi. / S. Anahid, S. Yaghmaei, Z. Ghobadinejad // Scientia Iranica. — 2011. — 3, Volume 18. — P. 502–508.

11. Baldrian P. Effect of heavy metals on the growth of selected wood-rotting basidiomycetes. / P. Baldrian, J. Gabriel // Folia Microbiologica. — 1997. — 42. — P. 521–523.

12. Liaquat F. Evaluation of metal tolerance of fungal strains isolated from contaminated mining soil of Nanjing, China. / F. Liaquat, M.F.H. Munis, U. Haroon et al. // Biology. — 2020. — 12. — P. 469.

13. Nazareth S. Effect of heavy metals on cultural and morphological growth characteristics of halotolerant *Penicillium* morphotypes. / S. Nazareth, T. Marbaniang // Journal of basic microbiology. — 2008. — 5. — P. 363–369.

14. Priya A.K. Biosorption of heavy metals by microorganisms: Evaluation of different underlying mechanisms. / A.K. Priya, L. Gnanasekaran, L. Dutta et al. // Chemosphere. — 2022. — 307. — DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135957

Список литературы на английском языке / References in English

1. Gorbunova E.A. Tyazhely'e metally' kak faktor stressa dlya gibrov: proyavlenie ix dejstviya na kletochnom i organizmennom urovnyax [Heavy metals as a stress factor for fungi: the manifestation of their effects at the cellular and organismic levels]. / E.A. Gorbunova, V.A. Terexova // Mycology and phytopathology. — 1995. — 4. — P. 63–69. [in Russian]

2. Korotchenko I.S. Biodiagnostika sostoyaniya pochv Emel'yanovskogo rajona Krasnoyarskogo kraja v usloviyax transportnoj nagruzki [Biodiagnostics of the soil condition of the Yemelyanovsky district of the Krasnoyarsk Territory under conditions of transport load]. / I.S. Korotchenko, V.A. Medvedeva // Bulletin of the Orenburg State Pedagogical University. Electronic scientific Journal. — 2022. — 3(43). — P. 18–26. — DOI: 10.32516/2303-9922.2022.43.2 [in Russian]

3. Petrova L.N. Biotestirovanie agrolandshafta putem ocenki kachestva zerna [Biotesting of the agricultural landscape by assessing grain quality]. / L.N. Petrova, S.O. Ushkalova, V.N. Cherkashin et al. // Fertility. — 2007. — 1. — P. 35–36. [in Russian]

4. Polyak Yu.M. Biodiagnostika sostoyaniya okul'turennoj gorodskoj pochvy', zagryaznennoj tyazhely'mi metallami, metodami bioindikacii i biotestirovaniya [Biodiagnostics of cultivated urban soil contaminated with heavy metals using bioindication and biotesting methods]. / Yu.M. Polyak, L.G. Bakina, N.V. Mayachkina et al. // Soils and the environment. — 2018. — 4. — P. 231–242. [in Russian]

5. Skugoreva S.G. Sorbcia ionov svincza (i) miceliem griba *Fusarium culmorum* [Sorption of lead ions by mycelium of *Fusarium culmorum* fungus]. / S.G. Skugoreva, G.Ya. Kantor, L.I. Domracheva et al. // Advances in medical mycology. — 2018. — 19. — P. 56–61. [in Russian]

6. Terexova V.A. Znachenie mikologicheskix issledovanij dlya kontrolya kachestva pochv // Po. 643-648. [The importance of mycological research for soil quality control]. / V.A. Terexova // Soil Science. — 2007. — 5. — P. 643–648. [in Russian]

7. Terexova V.A. Metodologiya biodiagnostiki pochv i osobennosti nekotory'x metodov bioindikacii i biotestirovaniya (obzor) [Methodology of soil biodiagnostics and features of some methods of bioindication and biotesting (review)]. / V.A. Terexova, S.A. Kulachkova, E.V. Morachevskaya et al. // Bulletin of the Moscow University. Episode 17. Soil Science. — 2023. — 2. — P. 35–45. [in Russian]

8. Fokina A.I. Tyazhyoly'e metally' kak faktor izmeneniya metabolizma u mikroorganizmov (obzor) [Heavy metals as a factor of metabolic changes in microorganisms (review)]. / A.I. Fokina, T.Ya. Ashixmina, L.I. Domracheva et al. // Theoretical and applied ecology. — 2015. — 2. — P. 5–18. [in Russian]

9. Shirokix A.A. Griby v biomonitoringe nazemny'x e'kosistem [Fungi in biomonitoring of terrestrial ecosystems]. / A.A. Shirokix, A.V. Kolupaev // Theoretical and applied ecology. — 2009. — 3. — P. 4–14. [in Russian]

10. Anahid S. Heavy metal tolerance of fungi. / S. Anahid, S. Yaghmaei, Z. Ghobadinejad // Scientia Iranica. — 2011. — 3, Volume 18. — P. 502–508.

11. Baldrian P. Effect of heavy metals on the growth of selected wood-rotting basidiomycetes. / P. Baldrian, J. Gabriel // Folia Microbiologica. — 1997. — 42. — P. 521–523.

12. Liaquat F. Evaluation of metal tolerance of fungal strains isolated from contaminated mining soil of Nanjing, China. / F. Liaquat, M.F.H. Munis, U. Haroon et al. // *Biology*. — 2020. — 12. — P. 469.
13. Nazareth S. Effect of heavy metals on cultural and morphological growth characteristics of halotolerant *Penicillium* morphotypes. / S. Nazareth, T. Marbaniang // *Journal of basic microbiology*. — 2008. — 5. — P. 363–369.
14. Priya A.K. Biosorption of heavy metals by microorganisms: Evaluation of different underlying mechanisms. / A.K. Priya, L. Gnanasekaran, L. Dutta et al. // *Chemosphere*. — 2022. — 307. — DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135957