

ИЗМЕНЕНИЕ БИОТОКСИЧНОСТИ ЧЕРНОЗЕМА, ЗАГРЯЗНЕННОГО ЦИНКОМ, ПРИ ВНЕСЕНИИ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ

Н.А. Терехова, Л.В. Галактионова, Т.И. Бурцева

ФГБОУ ВО Оренбургский государственный университет, Россия, Оренбург

e-mail: anilova.osu@mail.ru

Цель работы заключалась в изучении влияния гуминовых веществ на токсичность черноземов в условиях загрязнения цинком. На основе многофакторного дисперсионного анализа была установлена зависимость влияния гуминовых веществ на фоне внесения ацетата металла в диапазоне от 110 до 2200 мг/кг на всхожесть тест-объекта *Raphanus sativus*, активность окислительно-восстановительных и гидролитических ферментов. Установлено, что в вариантах опыта, где увеличение загрязнения сопровождалось ростом концентраций органического вещества, происходило стимулирование биологических процессов и нивелирование токсичности цинка.

Ключевые слова: биотоксичность, гуминовые вещества, ферментативная активность, цинк, чернозем.

Введение

Развитие горнодобывающих предприятий, металлообрабатывающей промышленности и транспорта, сжигание ископаемых видов топлива, использование пестицидов и удобрений, активная рекреация и урбанизация территорий приводит к загрязнению почвенного покрова тяжелыми металлами (ТМ). Поллютанты металлической природы являются стойкими загрязнителями педосферы, а также способны оказывать токсичное влияние на организмы, населяющие верхние горизонты почв.

Цинк является одним из необходимых микроэлементов для роста и развития растений, поэтому его присутствие в почве является важным фактором устойчивого сельскохозяйственного производства. Однако, при избыточном содержании металла в почве он снижает урожайность культурных растений и подавляет жизнедеятельность почвенной биоты. Загрязнение почв $ZnSO_4$ в концентрациях от 1 до 10 мМ замедление роста райграса (*Lolium perenne*), а полное ингибирование роста развивается при дозе металла равной 50 мМ, тогда как *Pisum sativum* подавляется после применения 1000 мкМ Zn. [1, 2]. Hooper H.L. с соавторами [3] показали 50 % снижение интенсивности размножения *Eisenia veneta* с помощью наночастиц ZnO по сравнению с полным ингибированием при обработке $ZnCl_2$ в концентрации металла 750 мкг/г почвы.

Растущие концентрации цинка оказывают ингибирующее влияние на биологическую активность почвы. Ферментативная активность является надежным индикатором экологического состояния почв, поскольку она отражает изменения условий роста растений, жизнедеятельности почвенных беспозвоночных и микроорганизмов [4-6].

Гуминовые вещества (ГВ) способны к снижению подвижности ионов металлов. Большой набор функциональных групп в составе гуминовых кислот позволяет связывать ионы ТМ в дозах, значительно превышающих предельно допустимые концентрации (ПДК) [7]. Валовое содержание металлических загрязнителей при отсутствии выраженной токсичности в высокогумусированных почвах выше, так как гумус выступает в роли сорбента. При увеличении количества органического вещества происходит инактивация ТМ за счет образования металлорганических комплексов. Однако, при недостатке гумуса видоизменяется характер сорбции элементов, металлы начинают адсорбироваться на поверхности минеральной фазы [8].

Подвижность, токсичность и биодоступность тяжелых металлов в основном контролируются процессами абсорбции, адсорбции и десорбции на поверхности коллоидных частиц. Гуминовые кислоты (ГК) является повсеместно распространенным гетерогенным комплексообразующим агентом в окружающей среде, который играет ключевую роль в регулировании геохимического поведения и процессов связывания многих химических элементов, в том числе и металлической природы. Знание особенностей взаимодействия ионов металлов и гуминовых веществ в различных геохимических условиях имеет важное значение для прогнозирования и оценки их влияния на почвенные экосистемы при загрязнении почв тяжелыми металлами [9].

Цель исследования заключается в изучении влияния гуминовых веществ на биотоксичность черноземов, загрязненных цинком в условиях модельного эксперимента.

Материалы и методы

С целью создания наиболее близких к естественным условиям в лабораторном эксперименте использовались почвенные колонки, позволяющие воспроизвести модель почвенного профиля. Объектом исследования послужил чернозем типичный, сформированный под разнотравно-злаковой растительностью. Образцы отобраны на территории Пономаревского района Оренбургской области (53.141111°N, 54.163333°E) послойно на глубину 60 см. Воздушно-сухие образцы, просеивались через сито 1,0-1,5 см и помещались в трубки диаметром 80 мм с различной насыпной плотностью, имитирующей плотность горизонтов в естественных условиях [10]. Определение содержания цинка в почвенной пробе было произведено с использованием вакуумного рентгенофлуоресцентного спектрометра «Спектроскан МАКС-GVM» по методике ПНД Ф 16.1.42-04 [11]. Измерение плотности произведено по методу Качинского Н.А. [12], содержание физической глины по ГОСТ 12536-2014 [13], содержание подвижных соединений фосфора и калия определялось по ГОСТ 26205-91 [14], азота по ГОСТ 26951-86 [15], гумуса по методу Тюрина в модификации ЦИНАО [16]. Основные свойства чернозема типичного представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства чернозема типичного

Показатели	Горизонт			
	A ₀	A	AB	B
Плотность, г/см ³	1,0	1,15	1,23	1,37
Содержание физической глины, %	49,6	42,7	59,6	69,6
C _{орг} , %	5,56	4,35	2,44	1,33
pH _{KCl}	7,2	7,0	8,3	8,5
N общий, %	0,59	0,34	0,28	0,11
Подвижный K ₂ O, мг/кг	409	276	211	134
Подвижный P ₂ O ₅ , мг/кг	19,2	14,1	13,1	0,4
Содержание Zn, мг/кг	154,5	79,3	10,0	7,0

Для моделирования монометалльного загрязнения в почвенные колонки вносили раствор ацетата цинка в концентрациях, соответствующих дозам ОДК 0,5 (110 мг/кг), 1 (220 мг/кг), 2,5 (550 мг/кг), 5 (1100 мг/кг) и 10 (2200 мг/кг) по валовой форме Zn. Контрольные образцы обрабатывались равным объемом дистиллированной воды. Для равномерного распределения металла по почвенным колонкам после высыхания почвы (через 10-14 дней) ее увлажняли водопроводной водой. Чередование процессов увлажнения и высушивания повторяли 5 раз с момента внесения соли цинка. Повторность каждого варианта опыта была 6-кратной.

В каждом варианте загрязнения в 3 из 6 колонок дополнительно вносили гуминовый препарат, представленный препаратом биогумуса «AgroVerm» (производитель ООО «БИОЭРА», Россия), в состав которого входили гуминовые кислоты (4 %), углерод общий

(15 %), Mg (100 мкг/г), аминокислоты (1,2 %) и другие соединения. Доза внесения определялась согласно инструкции и соответствовала 0,75 % C_{орг} в 1 л раствора препарата.

Анализ почвенных образцов производился послойно, через каждые 10 см. Точечные пробы каждого варианта опыта подвергались высушиванию до воздушно-сухого состояния и пробоподготовке. Фитотоксичность почв определяли на основании оценки всхожести семян редиса посевного (*Raphanus sativus* L.) сорта «Жара» согласно ГОСТ Р ИСО 22030-2009. В почве определяли активность гидролитических (фосфатазы и уреазы) и окислительно-восстановительных (дегидрогеназы и каталазы) ферментов общепринятыми в почвенной энзимологии методами [17].

Анализ полученных экспериментальных данных был проведен с использованием пакета программы «Statistica» V8 («StatSoft Inc.», США).

Результаты и обсуждение

Использование растений в качестве тест-объектов зарекомендовало себя как информативный показатель оценки влияния абиотических факторов на живые организмы. Подавление роста и развития растений проявляется даже при незначительных изменениях содержания элементов в почве. Фитотоксичность контрольного образца почв составила 1,9 %. В варианте опыта без загрязнения цинком, но с добавлением биогумуса фитотоксичность принимает отрицательное значение, что свидетельствует о стимулировании всхожести семян *Raphanus sativus* при внесении гуминовых кислот на 14 % относительно контроля (рис. 1).

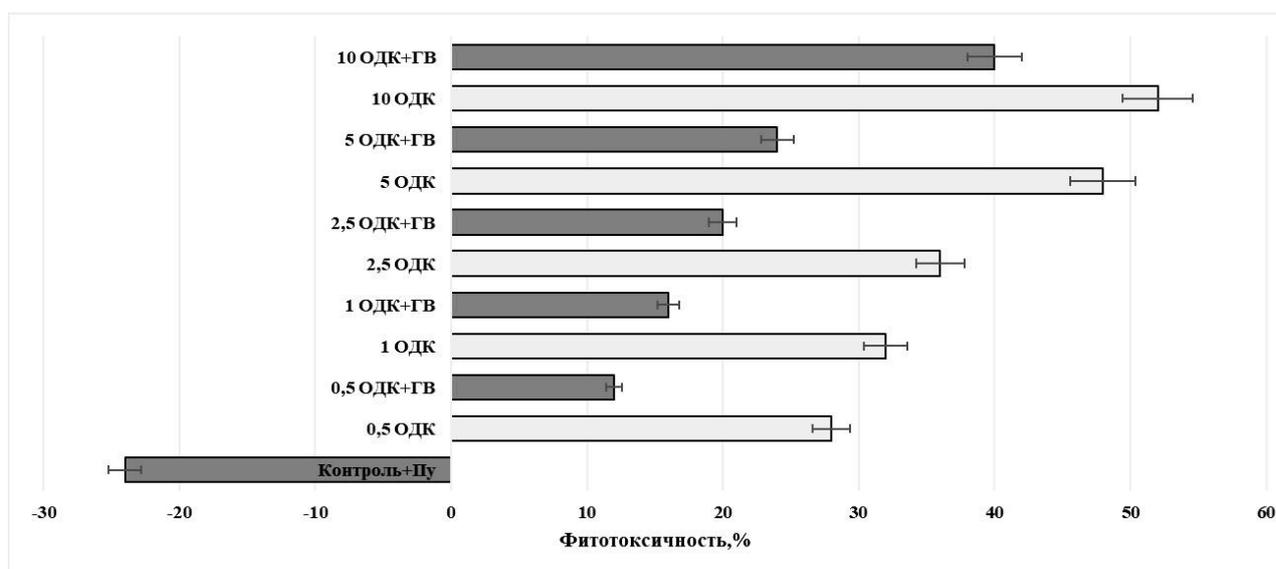


Рисунок 1 – Фитотоксичность почв по отношению к *Raphanus sativus*, % (разница с контролем)

Загрязнение почв различными концентрациями Zn спровоцировало прямо пропорциональный рост показателя в среднем на 5 % при увеличении его концентраций с максимальным значением 52 % в варианте загрязнения 10 ОДК. Однако, внесение в почву гуминового препарата вызвало снижение токсичности почв в каждом варианте загрязнения и увеличение всхожести редиса. На основе статистического анализа выявлена тесная корреляционная связь между фитотоксичностью и содержанием металла в почве ($r = 0,77$, при $p = 0,03$).

При движении вниз по профилю наблюдалось снижение показателей активности ферментов не зависимо от дозы загрязнения с максимальными значениями в горизонте А (0-20 см). На рисунке 2 показано изменение активности гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов чернозема типичного в зависимости от варианта опыта.

При изучении различных типов почв отмечена тесная корреляционная связь между концентрацией тяжелых металлов и активностью ферментов [18-20].

Результаты лабораторных исследований показали, что активность каталазы варьирует от 3,4 до 5,4 см³ O₂ на грамм почвы за 1 минуту. По шкале Звягинцева Д. Г. активность фермента в контрольном образце характеризовалась как средняя. Выявлено, что при внесении в почву растворов ацетата цинка в концентрациях до 2,5 ОДК наблюдается стимулирование активности каталазы относительно контрольного образца.

При дальнейшем увеличении содержания металла происходит снижение показателя на 1,5-3,5 %. Наблюдается стимулирующее влияние гуминовых веществ на показатель активности каталазы.

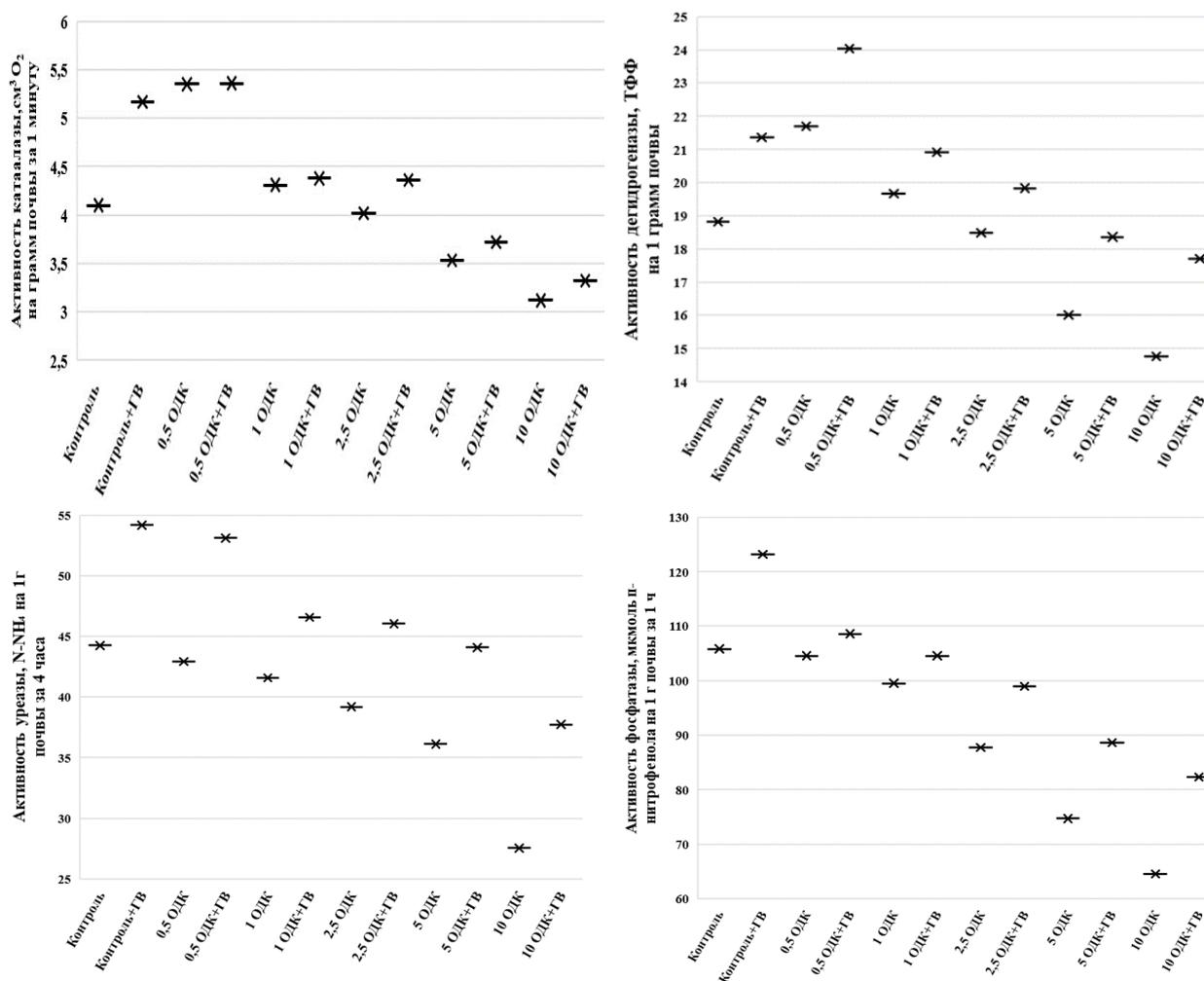


Рисунок 2 – Изменение показателей ферментативной активности черноземов в слое 0-20 см

Так в варианте опыта с одновременным внесением Zn (0,5 ОДК) и ГВ отмечено максимальное значение активности фермента (5,4 см³ O₂ на грамм почвы за 1 минуту), которое на 30,8 % выше контрольного значения. Присутствие в вариантах опыта гуминового препарата увеличивало каталазную активность на 5-7 %.

Показатель активности дегидрогеназы изменялся нелинейно, что проявилось в увеличении значений показателя в вариантах загрязнения 0,5 и 1 ОДК, а затем в достоверном его снижении показателя при увеличении концентрации цинка. Изменение активности фермента происходило в пределах от 14,76 до 24,04 трифенилформаза (ТФФ) на 1 грамм почвы. Наибольшее значение активности дегидрогеназы (24,04 ТФФ на 1 грамм почвы) наблюдалось в варианте опыта с загрязнением ацетатом цинка в дозе 0,5 ОДК и внесением

гуминового препарата, которое превысило значение контрольного образца более чем на 27 %. А дальнейшее повышение дозы контаминатора влечет снижение показателя в среднем на 13 %, а минимального значения (14,76 ТФФ на 1 грамм почвы) он достигает при загрязнении максимальной дозой металла.

Динамика изменения уреазной активности имела схожий с фосфатазой характер. Активность гидролитических ферментов имела обратно пропорциональную зависимость от концентрации цинка, что подтверждается обратной корреляционной зависимостью для уреазы ($r = -0,66$ при $p = 0,018$) и фосфатазы ($r = -0,52$, при $p = 0,04$). Показатель почвенной уреазы принимал наибольшие значения (54 мг N-NH₄ на 1 г почвы за 4 час) в верхнем горизонте контрольного образца с внесения ГВ, а при движении вниз по профилю наблюдалось снижение активности фермента. Аналогичная динамика показателя наблюдалась при увеличении экспозиционной дозы цинка, так максимальный ингибирующий эффект более чем на 37,7 % обнаружен в варианте его наибольшей концентрации.

В контрольном варианте опыта активность почвенной фосфатазы составила 105,8 мкмоль п-нитрофенола на 1 г почвы за 1 ч, а увеличение концентрации металла влечет за собой обратно пропорциональное снижение показателя. Даже при незначительном загрязнении почвы дозой цинка 0,5 ПДК наблюдается на 1,2 % относительно контрольного образца.

Результаты дисперсионного анализа подтверждают положительную корреляционную зависимость содержания гуминовых веществ и активности уреазы ($r = 0,59$ при $p = 0,039$) в черноземах типичных, что свидетельствует об увеличении интенсивности высвобождения неорганического азота (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты многофакторного дисперсионного анализа влияния цинка и гуминовых веществ на показатели биологической активности черноземов типичных

Показатели биологической активности почв	Статистические показатели			
	F - критерий		P	
	Цинк	ГВ	Цинк	ГВ
Подвижный P ₂ O ₅	3,799	0,010	0,079	0,922
Подвижный K ₂ O	0,001	0,074	0,977	0,791
N общий	7,978	0,205	0,018	0,660
Фитотоксичность	15,127	0,063	0,003	0,805
Каталаза	0,128	1,802	0,727	0,209
Дегидрогеназа	0,214	2,352	0,653	0,156
Уреазы	2,059	5,608	0,011	0,039
Фосфатаза	4,4044	1,603	0,042	0,234

Примечание: жирным выделены статистически достоверные результаты.

Отрицательная корреляционная связь азота с содержанием в почве цинка ($r = -0,66$ при $p = 0,018$), свидетельствует о том, что металл подавляет активность микроорганизмов, отвечающих за аммонификацию и нитрификацию. Аналогично подавляются ферменты, отвечающие за иммобилизацию соединений фосфора в почве. Показатель активности фосфатазы как фермента, наиболее обусловленного деятельностью микроорганизмов, участвующих в круговороте фосфора, достоверно снижается в условиях загрязнения цинком.

При дозе загрязнения 0,5 и 1 ОДК наблюдается повышение активности окислительно-восстановительных ферментов и снижения гидролитических, что свидетельствует об их большей чувствительности к загрязнению цинком.

Выводы

Анализ полученных данных показал, что загрязнение чернозема типичного ацетатом цинка в концентрациях выше 1 ОДК приводит к увеличению фитотоксичности по отношению к тест-культуре *Raphanus sativus* и снижению активности гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов.

Внесение препарата на основе гуминовых кислот достоверно снижает негативное влияние повышенных концентраций цинка на растения и энзиматическую активность лесостепных черноземов. Полученные результаты позволяют сделать предположение о том, что почвы со средним и высоким содержанием гумуса будут проявлять большую устойчивость в условиях активного техногенеза.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-10079, <https://rscf.ru/project/23-26-10079/>.

Список литературы

1. Soares C.R.F.S., Graziotti P.H., Siqueira J.O., De Carvalho J.G., Moreira F.M.S. Toxidez de zinco no crescimento e nutrição de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva // *Pesq. Agropec. Bras.* 2001. Vol. 36 (2). P. 339-348.
2. Bonnet M., Camares O., Veisseire P. Effect of zinc and influence of *Acremonium lolii* on growth parameters, chlorophyll a fluorescence and antioxidant enzyme activities of ryegrass (*Lolium perenne* L // *J. Exp. Bot.* 2000. Vol. 51 (346). P. 945-953.
3. Hooper H.L., Jurkschat K., Morgan A.J., Bailey J., Lawlor A.J., Spurgeon D.J., Svendsen C. Comparative chronic toxicity of nanoparticulate and ionic zinc to the earthworm *Eisenia veneta* in a soil matrix // *Environment International.* 2011. T. 37. No. 6. P. 1111-1117.
4. Rashid A., Schutte B.J., Ulery A., Deyholos M.K., Sanogo S., Lehnhoff E.A., Beck L. Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health // *Agronomy.* 2023. 13(6). 1521. DOI: 10.3390/agronomy13061521.
5. Haihan L.V., Chenchen Ji., Ding Ji., Yu L., Cai H. High levels of zinc affect nitrogen and phosphorus transformation in rice rhizosphere soil by modifying microbial communities // *Plants.* 2022. 11. 2271. DOI: 10.3390/plants11172271.
6. Haroun M.D., Xie S., Awadelkareem W., Wang J., Qian X. Influence of biofertilizer on heavy metal bioremediation and enzyme activities in the soil to revealing the potential for sustainable soil restoration // *Scientific Reports.* 2023. Vol. 13. DOI: 10.1038 / s41598-023-44986-8.
7. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 325 с.
8. Селюкова С.В. Тяжелые металлы в агроценозах // *Достижения науки и техники АПК.* 2020. № 8. С. 85-93.
9. Ren J., Fan W., Wang X., Ma Q., Li X., Xu Z., & Wei C. Influences of size-fractionated humic acids on arsenite and arsenate complexation and toxicity to *Daphnia magna* // *Water research.* 2017. No. 108. P. 68-77. DOI: 10.1016/j.watres.2016.10.052.
10. Sun J., Cui L., Quan G., Yan J., Wang H., Wu L. Effects of biochar on heavy metals migration and fractions changes with different soil types in column experiments // *Bio Resources.* 2020. Vol. 15(2). P. 4388-4406.
11. ПНД Ф 16.1.42-04. Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа. Введ. 2010-01-01. Москва: Изд-во стандартов, 2010. 13 с.
12. Теории и методы физики почв: коллектив. монография / Под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.

13. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава: дата введения 2015.01.07. Москва: СТАНДАРТИНФОРМ, 2019. 19 с.
14. ГОСТ 26205-91 Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО: дата введения 1993-07-01. Москва: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1993. 8 с.
15. ГОСТ 26951-86 Почвы. Определение нитратов ионометрическим методом: дата введения 1987-07-01. Москва: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1987. 7 с.
16. ГОСТ 26213-91 Почвы. Методы определения органического вещества: дата введения 1991-12-29. Москва: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1992. 6 с.
17. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
18. Зинченко М.К., Зинченко С.И., Борин А.А., Камнева О.П. Ферментативная активность аграрных почв Верхневолжья // Современные проблемы науки и образования. 2017. № 3. С. 143-154.
19. Самусик Е.А., Головатый С.Е. Ферментативная активность дерново-подзолистых почв в условиях воздействия выбросов предприятия по производству строительных материалов // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2022. № 1. С. 104-113.
20. Тазетдинова Д.И., Антонов В.В., Газизов И.С., Алимова Ф.К. Ферментативная активность выщелоченных черноземов Восточного Закамья Волжско-Камской степи при синергетическом загрязнении тяжелыми металлами и углеводородами // Фундаментальные исследования. 2013. № 8-2. С. 364-369.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию 07.12.2023
Принята к публикации 12.03.2024

CHANGES IN THE PHYTOTOXICITY OF ZINC-CONTAMINATED CHERNOZEM IN THE INTRODUCTION OF HUMIC ACIDS

N. Terekhova, L. Galaktionova, T. Burtseva
Orenburg State University, Russia, Orenburg
e-mail: anilova.osu@mail.ru

The aim of the work was to study the effect of humic substances on the toxicity of chernozems in conditions of zinc contamination. Based on multifactorial dispersion analysis, the dependence of the effect of humic substances on the background of metal acetate application in the range from 110 to 2200 mg/kg on the germination of the *Raphanus sativus* test object, the activity of redox and hydrolytic enzymes was established. It was found that in the experimental variants, where an increase in pollution was accompanied by an increase in concentrations of organic matter, biological processes were stimulated and zinc toxicity was leveled.

Key words: biotoxicity, humic substances, enzymatic activity, zinc, chernozem.

References

1. Soares C.R.F.S., Graziotti P.H., Siqueira J.O., De Carvalho J.G., Moreira F.M.S. Toxidez de zinco no crescimento e nutrição de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva. *Pesq. Agropec. Bras.* 2001. Vol. 36 (2). P. 339-348.

2. Bonnet M., Camares O., Veisseire P. Effect of zinc and influence of *Acremonium lolii* on growth parameters, chlorophyll a fluorescence and antioxidant enzyme activities of ryegrass (*Lolium perenne* L. J. Exp. Bot. 2000. Vol. 51 (346). P. 945-953.
3. Hooper H.L., Jurkschat K., Morgan A.J., Bailey J., Lawlor A.J., Spurgeon D.J., Svendsen C. Comparative chronic toxicity of nanoparticulate and ionic zinc to the earthworm *Eisenia veneta* in a soil matrix. *Environment International*. 2011. T. 37. No. 6. P. 1111-1117.
4. Rashid A., Schutte B.J., Ulery A., Deyholos M.K., Sanogo S., Lehnhoff E.A., Beck L. Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. *Agronomy*. 2023. 13(6). 1521. DOI: 10.3390/agronomy13061521.
5. Haihan L.V., Chenchen Ji., Ding Ji., Yu L., Cai H. High levels of zinc affect nitrogen and phosphorus transformation in rice rhizosphere soil by modifying microbial communities. *Plants*. 2022. 11. 2271. DOI: 10.3390/plants11172271.
6. Haroun M.D., Xie S., Awadelkareem W., Wang J., Qian X. Influence of biofertilizer on heavy metal bioremediation and enzyme activities in the soil to revealing the potential for sustainable soil restoration. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. DOI: 10.1038 / s41598-023-44986-8.
7. Orlov D.S. *Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii*. M.: Izd-vo MGU, 1990. 325 s.
8. Selyukova S.V. Tyazhelye metally v agrotsenozakh. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2020. N 8. S. 85-93.
9. Ren J., Fan W., Wang X., Ma Q., Li X., Xu Z., & Wei C. Influences of size-fractionated humic acids on arsenite and arsenate complexation and toxicity to *Daphnia magna*. *Water research*. 2017. No. 108. P. 68-77. DOI: 10.1016/j.watres.2016.10.052.
10. Sun J., Cui L., Quan G., Yan J., Wang H., Wu L. Effects of biochar on heavy metals migration and fractions changes with different soil types in column experiments. *Bio Resources*. 2020. Vol. 15(2). P. 4388-4406.
11. PND F 16.1.42-04. *Metodika vypolneniya izmerenii massovoi doli metallov i oksidov metallov v poroshkovykh probakh pochv metodom rentgenofluorestsennogo analiza*. Vved. 2010-01-01. Moskva: Izd-vo standartov, 2010. 13 s.
12. *Teorii i metody fiziki pochv: kollektiv. Monografiya*. Pod red. E.V. Sheina, L.O. Karpachevskogo. M.: Grif i K, 2007. 616 s.
13. GOST 12536-2014 *Grunt. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava: data vvedeniya 2015.01.07*. Moskva: STANDARTINFORM, 2019. 19 s.
14. GOST 26205-91 *Pochvy. Opredelenie podvizhnykh soedinenii fosfora i kaliya po metodu Machigina v modifikatsii TsINAO: data vvedeniya 1993-07-01*. Moskva: Komitet standartizatsii i metrologii SSSR, 1993. 8 s.
15. GOST 26951-86 *Pochvy. Opredelenie nitratov ionometricheskim metodom: data vvedeniya 1987-07-01*. Moskva: Komitet standartizatsii i metrologii SSSR, 1987. 7 s.
16. GOST 26213-91 *Pochvy. Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva: data vvedeniya 1991-12-29*. Moskva: Komitet standartizatsii i metrologii SSSR, 1992. 6 s.
17. Khaziev F.Kh. *Metody pochvennoi enzimologii*. M.: Nauka, 2005. 252 s.
18. Zinchenko M.K., Zinchenko S.I., Borin A.A., Kamneva O.P. *Fermentativnaya aktivnost' agrarnykh pochv Verkhnevolzh'ya. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2017. N 3. S. 143-154.
19. Samusik E.A., Golovaty S.E. *Fermentativnaya aktivnost' dornovo-podzolistykh pochv v usloviyakh vozdeistviya vybrosov predpriyatiya po proizvodstvu stroitel'nykh materialov*. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya*. 2022. N 1. S. 104-113.
20. Tazetdinova D.I., Antonov V.V., Gazizov I.S., Alimova F.K. *Fermentativnaya aktivnost' vyshchelochennykh chernozemov Vostochnogo Zakam'ya Volzhsko-Kamskoi stepi pri sinergeticheskom zagryaznenii tyazhelymi metallami i uglevodorodami*. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013. N 8-2. S. 364-369.

Сведения об авторах:

Терехова Надежда Алексеевна

Аспирант кафедры экологии и природопользования, ФГБОУ ВО Оренбургский государственный университет

ORCID 0000-0002-0766-2600

Terekhova Nadezhda

Postgraduate student, Department of Ecology and Environmental Management, Orenburg State University

Галактионова Людмила Вячеславовна

К.б.н., доцент, заведующий кафедрой биологии и почвоведения, ФГБОУ ВО Оренбургский государственный университет

ORCID 0000-0003-0781-3752

Galaktionova Lyudmila

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Biology and Soil Science, Orenburg State University

Бурцева Татьяна Ивановна

Д.б.н., профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, ФГБОУ ВО Оренбургский государственный университет

ORCID 0000-0001-7415-4545

Burtseva Tatyana

Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Life Safety, Orenburg State University

Для цитирования: Терехова Н.А., Галактионова Л.В., Бурцева Т.И. Изменение биотоксичности чернозема, загрязненного цинком, при внесении гуминовых кислот // Вопросы степеведения. 2024. № 1. С. 92-100. DOI: 10.24412/2712-8628-2024-1-92-100