



DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-240410>

EDN: <https://elibrary.ru/dvxkks>

УДК 581.19+581.4+632.12+633.161

Научная статья

Влияние марганца и кадмия на морфофизиологические и биохимические показатели проростков ячменя

Е.В. Товстик^{ID}, А.С. Олькова*^{ID}

Вятский государственный университет, Россия, 610000, г. Киров, ул. Московская, д. 36

*morgan-abend@mail.ru

Аннотация. В лабораторном опыте исследовали действие различных концентраций Mn^{2+} (100–800 мг/л) и Cd^{2+} (10–80 мг/л) на растения ярового ячменя *Hordeum vulgare* L., сорт 'Родник Прикамья'. Опыт проводили в рулонной культуре. Оценивали всхожесть семян, биомассу проростков, содержание свободных и связанных полифенолов в биомассе растений. Эффект марганца в низкой концентрации (100 мг/л) был стимулирующим: всхожесть семян и биомасса проростков ячменя увеличилась на 35 и 51% по сравнению с контролем. Повышенная концентрация Mn^{2+} (200–800 мг/л) ингибировала всхожесть семян и биомассу проростков ячменя (на 55–75% и 60–79%). Действие Cd^{2+} в пределах 10–80 мг/л было только угнетающим: всхожесть семян снизилась на 20–70%, биомасса проростков – на 23–78%. Биохимические реакции растений на стресс, вызванный марганцем и кадмием, различались. Марганец вызывал увеличение доли связанных полифенолов в общем полифенольном профиле проростков на 8, 12, 7 и 8% по сравнению с контролем. Кадмиевый стресс был компенсирован полифенолами только в наименьшей тестируемой концентрации (20 мг/л): доля связанных полифенолов возросла на 3.3% к контролю. При наиболее высоких концентрациях ионов исследуемых металлов (500–800 мг/л Mn^{2+} и 50–80 мг/л Cd^{2+}) происходило снижение содержания полифенолов до контрольных значений, что свидетельствует об истощении адаптационных резервов растений.

Ключевые слова: фитотестирование, *Hordeum vulgare*, биомасса, всхожесть, полифенолы, токсичность

ORCID:

Е.В. Товстик, <https://orcid.org/0000-0003-1861-6076>

А.С. Олькова, <https://orcid.org/0000-0002-5798-8211>

Для цитирования: Товстик, Е.В., Олькова, А.С., 2025. Влияние марганца и кадмия на морфофизиологические и биохимические показатели проростков ячменя. *Трансформация экосистем* 8 (3), 198–208. <https://doi.org/10.23859/estr-240410>

Поступила в редакцию: 10.04.2024

Принята к печати: 02.08.2024

Опубликована онлайн: 29.08.2025

DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-240410>EDN: <https://elibrary.ru/dvxkks>

UDC 581.19+581.4+632.12+633.161

Article

The effect of manganese and cadmium on morphological and biochemical parameters of barley seedlings

E.V. Tovstik , A.S. Olkova* 

Vyatka State University, Moskovskaya St. 36, Kirov, 10000 Russia

*morgan-abend@mail.ru

Abstract. The influence of various concentrations of Mn^{2+} (100–800 mg/l) and Cd^{2+} (10–80 mg/l) on spring barley *Hordeum vulgare* L., variety ‘Rodnik Prikamya’ was studied in the roll culture under laboratory conditions. Seed germination, seedling biomass, and the content of free and bound polyphenols in plant biomass were estimated. The effect of low-dose manganese (100 mg/l) turned out to be stimulating: seed germination and biomass of barley seedlings increased by 35 and 51% compared to the control. Elevated concentrations of Mn^{2+} (200–800 mg/l) suppressed seed germination and biomass (by 55–75% and 60–79%). Cadmium (10–80 mg/l) made solely inhibitory impact: seed germination decreased by 20–70% and seedling biomass by 23–78%. Biochemical responses of plants to stress caused by these elements differed. For instance, application of Mn^{2+} increased the proportion of bound polyphenols in the total polyphenol of seedlings by 8, 12, 7, and 8% compared to the control. Cadmium stress was compensated by polyphenols only at its lowest tested concentration (20 mg/L); the proportion of bound polyphenols increased by 3.3%, as compared to the control. In case with the highest concentrations of the studied metal ions (500–800 mg/L for Mn^{2+} and 50–80 mg/L for Cd^{2+}), the content of polyphenols dropped to control values thereby indicating the depletion of adaptive reserves of plants.

Keywords: phytotesting, *Hordeum vulgare*, biomass, germination, polyphenols, toxicity

ORCID:

E.V. Tovstik, <https://orcid.org/0000-0003-1861-6076>A.S. Olkova, <https://orcid.org/0000-0002-5798-8211>

To cite this article: Tovstik, E.V., Olkova, A.S., 2025. The effect of manganese and cadmium on morphological and biochemical parameters of barley seedlings. *Ecosystem Transformation* 8 (3), 198–208. <https://doi.org/10.23859/estr-240410>

Received: 10.04.2024

Accepted: 02.08.2024

Published online: 29.08.2025

Введение

В лабораторном биотестировании в качестве тест-организмов часто используются растения, что связано с их высокой чувствительностью к широкому диапазону условий окружающей среды (Agrawal and Agrawal, 1999; Qaderi et al., 2023). Исследования показывают, что растения быстро реагируют на изменение освещения, температуры, влажности, концентрации углекислого газа и других параметров (Driesen et al., 2020). В растениеводстве оценка особенностей прорастания семян и дальнейшего роста проростков является неотъемлемой частью диагностики устойчивости растений к различным стрессовым факторам (Алексейчук и Ламан, 2005).

В отечественной и зарубежной практике многие аттестованные методики фитотестирования основаны на учете изменения основных морфофизиологических показателей растений. Среди них чаще всего оцениваются всхожесть семян и длина корня растения (Терехова и др., 2016). Угнетение прорастания семян и уменьшение длины корней зафиксированы в ответ на нефтесолевое загрязнение (Арзамасова и др., 2020); ингибирование удлинения корней и побегов отмечено при попадании в почву антибиотиков (Космачева, 2020). С помощью комплекса показателей всхожести, энергии прорастания семян, длины корней и побегов растений установлена токсичность и доза-зависимый эффект фунгицидов (Санеева и др., 2022), тяжелых металлов (Алябышева, 2023), загрязненных иловых осадков (Bostubaeva and Nauanova, 2022), прочих токсикантов (Коваль и Огородникова, 2023). Следовательно, применение растений в экологическом мониторинге техногенно-нарушенных почв (Красноперева, 2015), урбаноземов (Зыкова и др., 2017), естественных экосистем и агроценозов (Морозова и др., 2020) является научно обоснованным.

Использование в качестве тест-функций морфофизиологических реакций растений на стресс-факторы представляет собой простой и надежный подход в биотестировании. Однако к снижению всхожести, замедлению роста корня и проростков, их внешним повреждениям и гибели растений в начале онтогенеза могут приводить стрессоры различной природы. В то же время биохимические ответные реакции являются первым этапом адаптации растений к изменяющейся среде и предваряют морфофизиологические изменения. Кроме того, при низком уровне стресса биохимические изменения могут наблюдаться и без внешних отклонений развития растений от нормы. В ряде случаев биохимические показатели формируют специфические сочетания, соответствующие определенному воздействию или его уровню. В этом заключается научная основа биомаркирования. Биомаркерами в растениях могут выступать радикалы (активные формы кислорода), ионы (Na^+ , Ca^{2+} , NO_3^- , NH_4^+ , H^+), неорганические (H_2O , CO_2) и органические молекулы (фитогормоны, летучие соединения, пигменты, молекулы РНК) (Tan et al., 2023).

Среди низкомолекулярных вторичных метаболитов, оказывающих защитное действие в ответ на биотические и абиотические стрессы, можно выделить полифенолы. Спектр полифенольных соединений в растениях достаточно широк. В растительных тканях они существуют как в форме гликозидов (связанная фракция), так и агликонов (свободная фракция).

Роль полифенолов в устойчивости растений до конца не раскрыта. С одной стороны, она связана с видо- и сортоспецифичностью растений. С другой стороны, недостаточно изучена неспецифическая горметическая активация различных защитных систем растений малыми концентрациями токсикантов (Егофеева, 2022). Практический интерес представляет также сравнение классических морфофизиологических реакций растения на химический стресс и биохимических изменений в растительных тест-организмах.

Несмотря на накопленные данные об особенностях и воздействии отдельных тяжелых металлов на живые организмы, выявление различий и сходства в поведении этих элементов все еще остается актуальной задачей в решении проблемы загрязнения окружающей среды.

Целью данной работы было сравнение морфофизиологических и биохимических реакций проростков ярового ячменя *Hordeum vulgare* L. на различные концентрации марганца и кадмия для дополнения сведений о механизмах защиты растений от химических воздействий.

Материалы и методы

Модельный эксперимент

В лабораторном опыте исследовали действие различных концентраций ионов марганца и кадмия на проростки ярового ячменя *Hordeum vulgare* L. Испытания проводили на семенах яч-

меня сорта 'Родник Прикамья' (оригинатор: ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока). Лабораторная всхожесть семян составляла 92%¹.

Фитотестирование проводили по методике, изложенной в ГОСТ 12038-84 с модификациями. Семена проращивали в рулонной культуре. Перед проведением исследований семена ячменя замачивали в дистиллированной воде на 16 ч. Набухшие семена (35 шт.) раскладывали на листы фильтровальной бумаги размером 15×50 см, предварительно прогретой в сушильном шкафу в течение 2 ч при температуре 105 °С. Семена ориентировали зародышами вниз, отступив 2–3 см от верхнего края. Затем семена накрывали листом фильтровальной бумаги размером 5×50 см, подготовленным аналогичным образом. Полосы бумаги с семенами неплотно закручивали в рулоны и помещали в вертикальном положении в стеклянные химические стаканы объемом 500 мл. Стаканы наполняли растворами солей марганца ($MnSO_4 \cdot 5 H_2O$) и кадмия ($CdSO_4 \cdot 2.7 H_2O$) различной концентрации (Табл. 1).

Выбор кадмия в качестве токсиканта был обусловлен его токсичностью и негативным влиянием на здоровье человека (Wang et al., 2021), марганца – распространенностью и высоким содержанием в почвах (от 221 до 1428 мг/кг) (Симонова и др., 2019). Моделирование повышенной концентрации марганца вызвано его более низким классом опасности (3 класс) по сравнению с кадмием (1 класс)².

В качестве лабораторного контроля использовали дистиллированную воду. Проращивание семян и последующее выращивание растений осуществляли при комнатной температуре 20 ± 2 °С с фотопериодом 16 ч освещения/8 ч темноты. Повторность опыта трехкратная, продолжительность эксперимента – 10 суток.

Оцениваемые показатели

По окончании экспозиции проростки извлекали из рулонов, учитывали число нормально проросших семян и сырую биомассу проростков.

После высушивания и измельчения проростков составляли объединенную пробу растительного сырья, проводили экстрагирование полифенолов. Общее содержание полифенолов определяли в щелочных извлечениях (2Н раствор NaOH, $t = 80$ °С, $\tau = 2$ ч), свободных полифенолов – в водно-спиртовых извлечениях (70 % раствор C_2H_5OH , $t = 5$ °С, $\tau = 16$ ч). Соотношение субстрат : экстрагент составляло 1 : 100. Содержание полифенолов определяли спектрофотометрическим методом³. В качестве стандарта использовали галловую кислоту. По разности между суммарным содержанием и содержанием свободной фракции полифенолов определяли массовую долю связанных (гликозидных) форм полифенолов.

Достоверность и математическая обработка результатов

Каждый опытный вариант был представлен тремя повторностями. Результат представляли в виде среднего значения и его стандартного отклонения.

Достоверность различий между массивами данных определяли методом однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) и отмечали на графиках латинскими буквами. Уровень значимости составлял 0.05.

Коэффициенты корреляции Пирсона (r) рассчитывали с использованием программы Microsoft Excel 2007.

Результаты

Всхожесть семян и биомасса проростков ячменя в условиях химического стресса

Отрицательное влияние Mn^{2+} и Cd^{2+} на растения ячменя определяли по уменьшению всхожести семян и биомассы проростков по сравнению с контролем (Рис. 1). При этом значения исследуемых показателей снижались с ростом концентрации ионов в растворе.

В варианте опыта с минимальной концентрацией Mn^{2+} (100 мг/л) отмечали эффект стимуляции, выраженный в увеличении всхожести семян и биомассы проростков на 35 и 51% соответственно. При более высоких концентрациях (200–800 мг/л) марганец, напротив, снижал значения

¹ ГОСТ 12038-84 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести.

² СанПиН 1.2.3685-21. Об утверждении санитарных правил и норм «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

³ ГОСТ Р 55488-2013. Прополис. Метод определения полифенолов.

Табл. 1. Варианты опыта. Прочерк означает отсутствие норматива.

| Ион | Расчетная концентрация, мг/л | | | | ПДК / ОДК в почве (валовая форма), мг/кг ⁴ |
|--------|------------------------------|-----|-----|-----|--|
| Mn(II) | 100 | 200 | 500 | 800 | 1500 / – |
| Cd(II) | 10 | 20 | 50 | 80 | – / 0.5–2.0 |

морфофизиологических показателей роста ячменя: всхожесть семян уменьшалась на 25–75%; биомасса проростков – на 21.4–79% соответственно.

Действие Cd²⁺ на тест-организм было сходным с Mn²⁺. Однако в опыте с кадмием все исследуемые концентрации оказывали ингибирующее действие на всхожесть семян (на 20–70%) и биомассу проростков (на 23–78%). Следует отметить, что полученные морфофизиологические показатели значительно отличались от контрольных значений во всех опытных вариантах, кроме варианта с наименьшей тестируемой концентрацией Cd²⁺ (10 мг/л).

Серия проведенных опытов позволила заключить, что выбранные диапазоны концентраций как Mn²⁺, так и Cd²⁺ являются действующими, то есть оказывающими эффект на тест-организм. Далее с использованием этих же биопроб выясняли, как изменяется фенольный статус фитообъекта.

Фенольный статус ячменя в условиях химического стресса

Известно, что торможение роста проростков ячменя в условиях воздействия тяжелых металлов в большей степени обусловлено неспецифическим окислительным стрессом (Juknys et al., 2012). В связи с этим среди исследуемых показателей особый интерес представляли полифенолы как маркеры химического стресса.

Марганец и кадмий в выбранных диапазонах концентраций оказывали сходное влияние на полифенольный профиль проростков ячменя (Рис. 2).

В вариантах опыта с наименьшими концентрациями (100 мг/л Mn²⁺ и 10 мг/л Cd²⁺) значимых отличий содержания полифенолов в биомассе ячменя зафиксировано не было. При увеличении концентрации в 2 раза относительно минимальной исследуемый показатель достоверно возрастал по сравнению с контролем (на 4 и 2.2 мг/г соответственно).

Более высокие концентрации Mn²⁺ в среде приводили к снижению содержания суммы полифенольных соединений до контрольного уровня в биомассе. В варианте с раствором, содержащим Cd²⁺ в максимальной концентрации (80 мг/л), наблюдалась тенденция к снижению значений исследуемого показателя относительно контроля.

Для выяснения механизма биохимической адаптации растений к химическому стрессу оценивали доленое соотношение свободных и связанных полифенолов в их общем пуле (Рис. 3).

В опыте с Mn²⁺ по мере роста концентрации доля свободных полифенолов от их общего содержания в проростках достоверно уменьшалась, а доля связанных, напротив, увеличивалась (на 8, 12, 7, 8% по сравнению с контролем).

Учитывая, что свободные полифенолы обладают более высоким комплексообразующим потенциалом, чем связанные (Eghbaliferiz and Iranshahi, 2016), избыточный для растения марганец мог связаться с агликонами и привести к возрастанию доли связанной фракции, а также общего содержания полифенолов в проростках (Рис. 2).

В отличие от марганца, кадмий не оказал достоверного воздействия на соотношение фракций полифенолов. Исключение составил опытный вариант с наиболее низкой концентрацией Cd²⁺ в растворе (10 мг/л), где доля свободных полифенолов в проростках ячменя увеличилась на 3.3% по сравнению с контролем.

Обсуждение результатов

Проведение фитотеста методом рулонной культуры в среде с растворами сульфата марганца и кадмия (100–800 и 10–80 мг/л в расчете на катионы металлов) показало, что всхожесть семян и биомасса проростков ячменя выражено и закономерно изменяются при возрастании концентра-

⁴ СанПиН 1.2.3685-21. Об утверждении санитарных правил и норм «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

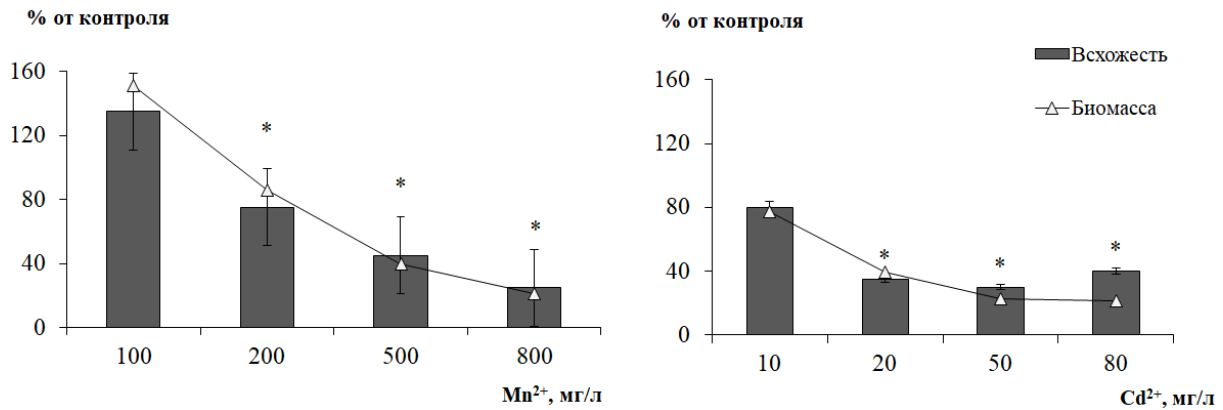


Рис. 1. Изменение морфофизиологических показателей роста проростков ячменя под действием различных концентраций марганца и кадмия. * – достоверный уровень различий показателей по сравнению с контролем ($p < 0/05$).

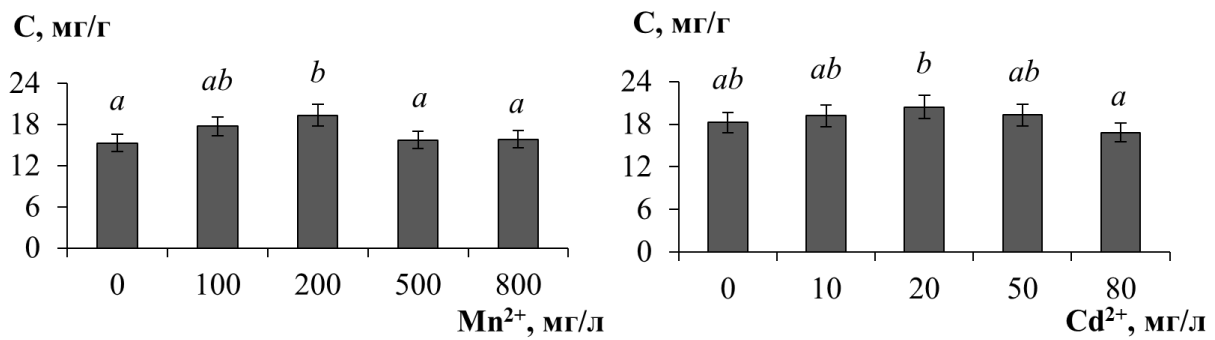


Рис. 2. Изменение суммарного содержания полифенолов в проростках ячменя под действием различных концентраций марганца и кадмия. Разноименные буквенные индексы указывают на достоверные различия ($p < 0.05$).

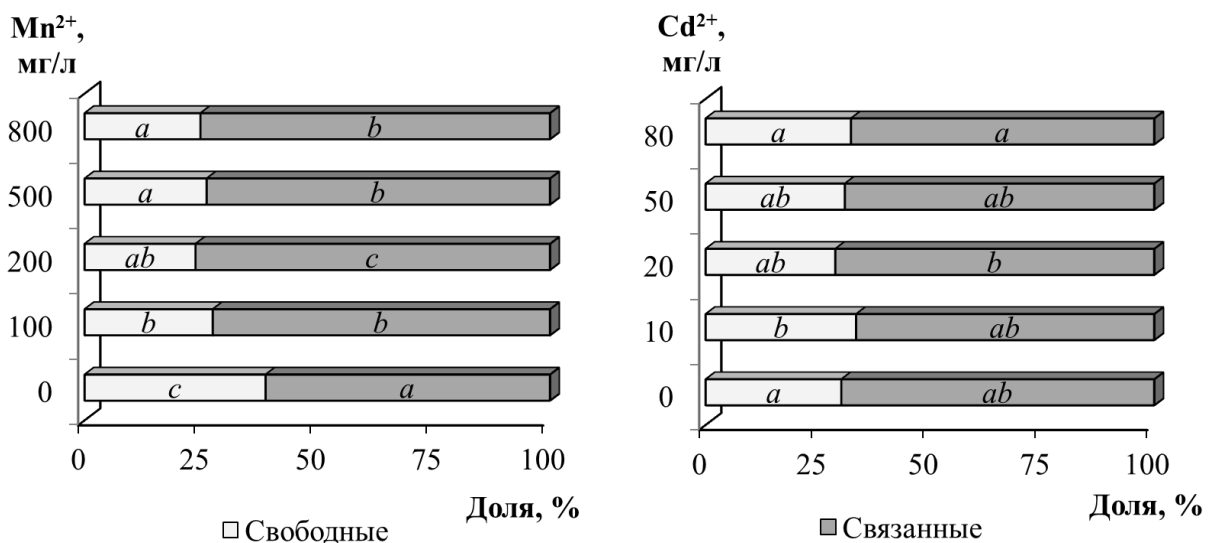


Рис. 3. Соотношение свободных и связанных фракций полифенолов в проростках ячменя под действием различных концентраций марганца и кадмия. Разноименные буквенные индексы указывают на достоверные различия ($p < 0.05$).

ции ионов исследуемых металлов. В ответ на воздействие Cd^{2+} и Mn^{2+} биомасса значительно снижалась ($r = -0.82$ и $r = -0.86$), как и всхожесть проростков ($r = -0.82$ и $r = -0.86$).

Биохимическая реакция ячменя по сумме полифенолов и ее составляющим была более сглаженной по сравнению с морфофизиологическими показателями. Это логично, поскольку норма реакции ростовых характеристик растений в рамках одного вида, конечно, шире, чем норма реакции биохимических показателей, которые обеспечивают внутренний гомеостаз. Однако этот факт делает крайне значимыми обнаруженные колебания фенольного статуса фитообъекта. При последовательном повышении концентрации Mn^{2+} до 200 мг/л и Cd^{2+} до 20 мг/л общее содержание полифенолов в проростках увеличивалось, что объясняется известным свойством растений повышать содержание полифенольных соединений в условиях стресса (Tuladhar et al., 2021). Исследователи объясняют это явление выраженными антиоксидантными свойствами полифенолов, обеспечивающими защиту клеток от окислительного повреждения металлами (Chen et al., 2020).

Последующее увеличение концентрации Mn^{2+} и Cd^{2+} (более 200 мг/л и 20 мг/л соответственно) в среде выращивания растений приводило к снижению суммы полифенолов в проростках до контрольного уровня. По-видимому, это связано с тем, что химическая нагрузка сверх адаптационных резервов растительных организмов приводит к комплексному нарушению системы антиоксидантов и замедлению биосинтеза полифенолов (Goncharuk and Zagoskina, 2023).

Показанный механизм биохимической реакции на химический стресс иллюстрируют невысокие коэффициенты корреляции с исследуемыми концентрациями металлов: $r = -0.023$ ($p = 0.93$) для вариантов опыта с Mn^{2+} и $r = -0.07$ ($p = 0.82$) для опыта с Cd^{2+} .

Распределение свободных и связанных форм полифенолов в их общем пуле отличалось в зависимости от действующего иона. Марганец как биогенный элемент нейтрализовался ячменем за счет комплексообразования с полифенолами, что привело к возрастанию связанных полифенолов по сравнению со свободными. В экспериментах с кадмием такой закономерности не отмечено. Этот факт и тенденция к снижению содержания в растениях суммы полифенолов (Рис. 2) на фоне значительного угнетения морфофизиологических показателей (Рис. 1) свидетельствует о том, что растения не могут нейтрализовать токсическое действие кадмия за счет его связывания с полифенолами. Таким образом, кадмий как ксенобиотик нарушал адаптационные возможности организма.

Известно, что индукция биосинтеза неферментативных антиоксидантов может зависеть как от вида металла, так и его концентрации. Ранее, на примере проростков пшеницы было показано усиление выработки антоцианов при умеренном стрессе, вызванном кадмием (25 мкмоль CdCl_2), а также подавление их антиоксидантных свойств и снижения защитного эффекта при сильном стрессе (50 мкмоль CdCl_2) (Shoeva and Khlestkina, 2018).

Заключение

В условной группе химических элементов, относимых к тяжелым металлам, имеются как эссенциальные, необходимые для живых организмов (Mn, Cu, Zn), так и высоко токсичные (Cd, Pb, Hg). Значение последних для биоты до конца не ясна. В данном исследовании предпринята попытка сравнить действие марганца, необходимого для живых организмов, и кадмия, потенциально токсичного для них даже в низких концентрациях.

При контакте с растворами, содержащими Mn^{2+} в концентрации от 100 до 800 мг/л и Cd^{2+} от 10 до 80 мг/л, у проростков ячменя зафиксировано снижение биомассы и изменение полифенольного профиля.

По изменению морфофизиологических показателей установлено, что проростки ячменя чувствительны к возрастающим концентрациям Mn^{2+} и Cd^{2+} в среде (коэффициенты корреляции параметров «всхожесть–концентрация» и «биомасса–концентрация» составили соответственно $r = -0.90$ и $r = -0.55$ для марганца, $r = -0.91$ и $r = -0.81$ для кадмия). Следовательно, избыток эссенциального элемента (марганца) вызывает у растений реакции, аналогичные последствию высокотоксичного элемента (кадмия).

Было показано различие биохимических реакций растений на стресс, вызванный Mn^{2+} и Cd^{2+} . Марганец способствовал увеличению доли связанных полифенолов в общем полифенольном профиле (на 8, 12, 7 и 8% для последовательно возрастающих концентраций) в проростках ячменя. Данный результат свидетельствует о действии антиоксидантной системы в отношении марганцевого стресса и о снижении ее работоспособности при повышении химической нагрузки. Кадмий вызывал повышение доли связанных полифенолов только в наименьшей тестируемой концентрации (на 3.3% к контролю). При максимальных концентрациях Mn^{2+} и Cd^{2+} (500–800 мг/л

и 50–80 мг/л соответственно) содержание полифенолов падает до контрольных значений, что свидетельствует об истощении адаптационных резервов растений.

Таким образом, морфофизиологические и биохимические реакции растений позволили раскрыть механизмы токсического действия повышенных концентраций Mn^{2+} и Cd^{2+} .

Список литературы

- Алексейчук, Г.Н., Ламан, Н.А., 2005. Физиологическое качество семян сельскохозяйственных культур и методы его оценки. Право и экономика, Минск, Беларусь, 48 с.
- Алябышева, Е.А., 2023. Влияние солей свинца на морфофизиологические показатели донника белого (*Melilotus albus* Medik.). *Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки»* 9 (2), 131–138. <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2023-9-2-131-138>
- Арзамазова, А.В., Кинжаев, Р.Р., Белецкая, Д.В., 2020. Оценка токсичности нефтезагрязненных почв по показателям всхожести семян и длины корней проростков пшеницы (*Triticum aestivum* L.). *Проблемы агрохимии и экологии* 4, 51–55. <https://doi.org/10.26178/AE.2020.51.76.007>
- Бостубаева, М.Б., Науанова, А.П., Науанова, А.Р., 2022. Оценка фитотоксичности и ростостимулирующих свойств различных концентрации иловых осадков сточных вод на проростки льна масличного. *Herald of Science of S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University* 2 (113), 170–178. [https://doi.org/10.51452/kazatu.2022.2\(113\).1030](https://doi.org/10.51452/kazatu.2022.2(113).1030)
- Зыкова, Ю.Н., Скугорева, С.Г., Товстик, Е.В., Ашихмина, Т.Я., 2017. Подходы к оценке состояния городских почв методами биотестирования с использованием организмов различной систематической принадлежности и данных химического анализа. *Теоретическая и прикладная экология* 3, 38–46. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2017-3-038-046>
- Коваль, Е.В., Огородникова, С.Ю., 2023. Обработка семян биопленками цианобактерий для повышения устойчивости растений в условиях химического загрязнения метилфосфонатами. *Трансформация экосистем* 6 (1), 3–11. <https://doi.org/10.23859/estr-220609>
- Космачева, А.Г., 2020. Исследование токсичности дерново-подзолистой почвы, загрязненной антибиотиками различных групп, методом лабораторного фитотестирования. *Сборник материалов V Международной научно-практической конференции "Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды."* Гомель, Беларусь, 290–296.
- Красноперова, С.А., 2015. Морфологический анализ и резистентность растений, рекомендуемых для фиторемедиации нефтезагрязненных почв. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение* 4 (44), 184–188.
- Морозова, Т.С., Ширяев, А.В., Тимофеев, Т.А., 2020. Агроэкологическая оценка фитотоксичности почв естественных ценозов и агроценоза. *Инновации в АПК: проблемы и перспективы* 2, 185–190.
- Санеева, Е.А., Зорькина, О.В., Нефедьева, Е.Э., 2022. Исследование фитотоксического действия тебуконазола, протиоконазола, флудиоксонила и препаратов на их основе на энергию прорастания и рост проростков пшеницы и горчицы белой. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture* 14 (5), 166–186. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-5-166-186>
- Симонова, О.А., Лисицын, Е.М., Товстик, Е.В., 2019. Сравнительное содержание марганца в верхних горизонтах почв Кировской области. *Естественные и технические науки* 10 (136), 127–131. <https://doi.org/10.25633/ETN.2019.10.23>

- Терехова, В.А., Воронина, Л.П., Николаева, О.В., Бардина, Т.В., Калмацкая, О.А. и др., 2016. Применение фитотестирования для решения задач экологического почвоведения. *Использование и охрана природных ресурсов в России* 3, 37–41.
- Agrawal, M., Agrawal, S.B., 1999. Effects of air pollution on plant diversity. In: S.B. Agrawal, M. Agrawal (eds.), *Environmental pollution and plant responses*. Lewis, New York, USA, 137–152.
- Chen, Y., Huang, L., Liang, X., Dai, P., Zhang, Y. et al., 2020. Enhancement of polyphenolic metabolism as an adaptive response of lettuce (*Lactuca sativa*) roots to aluminum stress. *Environmental Pollution* 261, 114230. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114230>
- Driesen, E., Van den Ende, W., De Proft, M., Saeys, W., 2020. Influence of environmental factors light, CO₂, temperature, and relative humidity on stomatal opening and development: a review. *Agronomy* 10 (12), 1975. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121975>
- Eghbaliferiz, S., Iranshahi, M., 2016. Prooxidant activity of polyphenols, flavonoids, anthocyanins and carotenoids: Updated review of mechanisms and catalyzing metals. *Phytotherapy Research* 30, 1379–1391.
- Erofeeva, E.A., 2022. Environmental hormesis of non-specific and specific adaptive mechanisms in plants. *Science of The Total Environment* 804, 150059. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150059>
- Goncharuk, E.A., Zagorskina, N.V., 2023. Heavy metals, their phytotoxicity, and the role of phenolic antioxidants in plant stress responses with focus on cadmium: review. *Molecules* 28, 3921. <https://doi.org/10.3390/molecules28093921>
- Juknys, R., Vitkauskaitė, G., Račaitė, M., Vencloviėnė, J., 2012. The impacts of heavy metals on oxidative stress and growth of spring barley. *Central European Journal of Biology* 7, 299–306. <https://doi.org/10.2478/s11535-012-0012-9>
- Qaderi, M.M., Martel, A.B., Strugnell, C.A., 2023. Environmental factors regulate plant secondary metabolites. *Plants* 12 (3), 447. <https://doi.org/10.3390/plants12030447>
- Shoeva, O.Y., Khlestkina, E.K., 2018. Anthocyanins participate in the protection of wheat seedlings against cadmium stress. *Cereal Research Communications* 46 (2), 242–252. <https://doi.org/10.1556/0806.45.2017.070>
- Tan, Y., Duan, Y., Chi, Q., Wang, R., Yin, Y. et al., 2023. The role of reactive oxygen species in plant response to rRadiation. *International Journal of Molecular Sciences* 24 (4), 3346. <https://doi.org/10.3390/ijms24043346>
- Tuladhar, P., Sasidharan, S., Saudagar, P., 2021. 17 – Role of phenols and polyphenols in plant defense response to biotic and abiotic stresses. In: Jogaiyah, S. (ed.), *Biocontrol Agents and Secondary Metabolites. Applications and Immunization for Plant Growth and Protection*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 419–441. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822919-4.00017-X>
- Wang, M., Chen, Z., Song, W., Hong, D., Huang, L., Li, Y., 2021. A review on cadmium exposure in the population and intervention strategies against toxicity. *Bulletin of Environmental Pollution and Toxicology* 106 (1), 65–74. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-03088-1>

References

- Agrawal, M., Agrawal, S.B., 1999. Effects of air pollution on plant diversity. In: S.B. Agrawal, M. Agrawal (eds.), *Environmental pollution and plant responses*. Lewis, New York, USA, 137–152.

- Alekseichuk, G.N., Laman, N.A., 2005. Fiziologicheskoe kachestvo semyan sel'skohozyaistvennykh kul'tur i metody ego otsenki [Physiological quality of seeds of agricultural crops and methods of its assessment]. Pravo i ekonomika, Minsk, Belarus', 48 p. (In Russian).
- Alyabysheva, E.A., 2023. Vliyanie solei svintsya na morfofiziologicheskie pokazateli donnika belogo (*Melilotus albus* Medik.) [The influence of lead salts on the morphophysiological parameters of white sweet clover (*Melilotus albus* Medik.)]. *Vestnik Mariiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Sel'skohozyajstvennyye nauki. Ekonomicheskie nauki"* [Bulletin of the Mari State University. Series "Agricultural sciences. Economic sciences"] **9** (2), 131–138. (In Russian). <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2023-9-2-131-138>
- Arzamazova, A.V., Kinzhaev, R.R., Beletskaya, D.V., 2020. Otsenka toksichnosti neftezagryaznennykh pochv po pokazatelyam vskhozhesti semyan i dliny kornei prorostkov pshenitsy (*Triticum aestivum* L.). [Evaluation of toxicity of oil-contaminated soils based on seed germination and root length of wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.)]. *Problemy agrohimii i ekologii* [Problems of Agrochemistry and Ecology] **4**, 51–55. (In Russian). <https://doi.org/10.26178/AE.2020.51.76.007>
- Bostubaeva, M.B., Nauanova, A.P., 2022. Otsenka fitotoksichnosti i rostostimuliruiushchikh svoystv razlichnykh kontsentratsii ilovykh osadkov stochnykh vod na prorostki l'na maslichnogo [Evaluation of phytotoxicity and growth-promoting properties of different concentrations of wastewater sludge on oil flax sprouts]. *Vestnik nauki Kazakhskogo agrotekhnicheskogo universiteta im. S. Seifullina* [Herald of Science of S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University] **2** (113), 170–178. (In Russian). [https://doi.org/10.51452/kazatu.2022.2\(113\).1030](https://doi.org/10.51452/kazatu.2022.2(113).1030)
- Chen, Y., Huang, L., Liang, X., Dai, P., Zhang, Y. et al., 2020. Enhancement of polyphenolic metabolism as an adaptive response of lettuce (*Lactuca sativa*) roots to aluminum stress. *Environmental Pollution* **261**, 114230. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114230>
- Driesen, E., Van den Ende, W., De Proft, M., Saeys, W., 2020. Influence of environmental factors light, CO₂, temperature, and relative humidity on stomatal opening and development: a review. *Agronomy* **10** (12), 1975. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121975>
- Eghbaliferiz, S., Iranshahi, M., 2016. Prooxidant activity of polyphenols, flavonoids, anthocyanins and carotenoids: Updated review of mechanisms and catalyzing metals. *Phytotherapy Research* **30**, 1379–1391.
- Erofeeva, E.A., 2022. Environmental hormesis of non-specific and specific adaptive mechanisms in plants. *Science of The Total Environment* **804**, 150059. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150059>
- Goncharuk, E.A., Zagorskina, N.V., 2023. Heavy metals, their phytotoxicity, and the role of phenolic antioxidants in plant stress responses with focus on cadmium: review. *Molecules* **28**, 3921. <https://doi.org/10.3390/molecules28093921>
- Juknys, R., Vitkauskaitė, G., Račaitė, M., Vencloviėnė, J., 2012. The impacts of heavy metals on oxidative stress and growth of spring barley. *Central European Journal of Biology* **7**, 299–306. <https://doi.org/10.2478/s11535-012-0012-9>
- Koval, E.V., Ogorodnikova, S.Yu., 2023. Treatment of seeds with cyanobacterial biofilm to increase plant resistance to methylphosphonate pollution. *Ecosystem Transformation* **6** (1), 3–11. <https://doi.org/10.23859/estr-220609>
- Kosmacheva, A.G., 2020. Issledovanie toksichnosti dernovo-podzolistoi pochvy, zagryaznennoi antibiotikami razlichnykh grupp, metodom laboratornogo fitotestirovaniya [Study of toxicity of sod-podzolic soil contaminated with antibiotics of various groups using laboratory phytotesting method]. *Sbornik materialov V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Transgranichnoe sotrudnichestvo v oblasti ekologicheskoi bezopasnosti i okhrany okruzhayushchei sredy"* [Collection

of materials of the V International scientific and practical conference "Cross-border cooperation in the field of environmental safety and protection". Gomel', Belarus', 290–296. (In Russian).

Krasnoperova, S.A., 2015. Morfologicheskii analiz i rezistentnost' rastenii, rekomenduemykh dlya fitoremediatsii neftezagryaznennykh pochv [Morphological analysis and resistance of plants recommended for phytoremediation of oil-contaminated soils]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie [Modern Science-Intensive Technologies. Regional Application]* **4** (44), 184–188. (In Russian).

Morozova, T.S., Shiryayev, A.V., Timofeev, T.A., 2020. Agroekologicheskaya otsenka fitotoksichnosti pochv estestvennykh tsenozov i agrotsenoza [Agroecological assessment of phytotoxicity of soils of natural cenoses and agrocenoses]. *Innovacii v APK: problemy i perspektivy [Innovations In the Agro-Industrial Complex: Problems and Prospects]* **2**, 185–190. (In Russian).

Qaderi, M.M., Martel, A.B., Strugnell, C.A., 2023. Environmental factors regulate plant secondary metabolites. *Plants* **12** (3), 447. <https://doi.org/10.3390/plants12030447>

Saneeva, E.A., Zor'kina, O.V., Nefed'eva, E.E., 2022. Issledovanie fitotoksicheskogo deistviya tebukonazola, protiokonazola, fludioksonila i preparatov na ikh osnove na energiyu prorastaniya i rost prorostkov pshenitsy i gorchitsy beloi [Study of phytotoxic effect of tebuconazole, prothioconazole, fludioxonil and preparations based on them on germination energy and growth of wheat and white mustard seedlings]. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture* **14** (5), 166–186. (In Russian). <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-5-166-186>

Shoeva, O.Y., Khlestkina, E.K., 2018. Anthocyanins participate in the protection of wheat seedlings against cadmium stress. *Cereal Research Communications* **46** (2), 242–252. <https://doi.org/10.1556/0806.45.2017.070>

Simonova, O.A., Lisitsyn, E.M., Tovstik, E.V., 2019. Sravnitel'noe sodержanie margantsa v verkhnikh gorizontakh pochv Kirovskoi oblasti [Comparative content of manganese in the upper soil horizons of the Kirov region]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and Technical Sciences]* **10** (136), 127–131. (In Russian). <https://doi.org/10.25633/ETN.2019.10.23>

Tan, Y., Duan, Y., Chi, Q., Wang, R., Yin, Y. et al., 2023. The role of reactive oxygen species in plant response to rRadiation. *International Journal of Molecular Sciences* **24** (4), 3346. <https://doi.org/10.3390/ijms24043346>

Terekhova, V.A., Voronina, L.P., Nikolaeva, O.V., Bardina, T.V., Kalmackaya, O.A. et al., 2016. Primenenie fitotestirovaniya dlya resheniya zadach ekologicheskogo pochvovedeniya [Application of phytotesting to solve problems of ecological soil science]. *Ispol'zovanie i ohrana prirodnih resursov v Rossii [Use and Protection of Natural Resources in Russia]* **3**, 37–41. (In Russian).

Tuladhar, P., Sasidharan, S., Saudagar, P., 2021. 17 – Role of phenols and polyphenols in plant defense response to biotic and abiotic stresses. In: Jogaiah, S. (ed.), *Biocontrol Agents and Secondary Metabolites. Applications and Immunization for Plant Growth and Protection*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 419–441. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822919-4.00017-X>

Wang, M., Chen, Z., Song, W., Hong, D., Huang, L., Li, Y., 2021. A review on cadmium exposure in the population and intervention strategies against toxicity. *Bulletin of Environmental Pollution and Toxicology* **106** (1), 65–74. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-03088-1>

Zykova, Yu.N., Skugoreva, S.G., Tovstik, E.V., Ashihmina, T.Ya., 2017. Podkhody k otsenke sostoyaniya gorodskikh pochv metodami biotestirovaniya s ispol'zovaniem organizmov razlichnoi sistemicheskoi prinadlezhnosti i dannykh khimicheskogo analiza [Approaches to assessing the state of urban soils by biotesting methods using organisms of different taxonomic affiliations and chemical analysis data]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]* **3**, 38–46. (In Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2017-3-038-046>