

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОВСА ПОСЕВНОГО К АККУМУЛЯЦИИ СВИНЦА И КАДМИЯ

А.С. Петухов*, Т.А. Кремлева, Н.А. Хритохин, Е.Д. Первухина

Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

*Эл. почта: a.s.petukhov@utmn.ru

Статья поступила в редакцию 19.09.2025; принята к печати 05.11.2025

Цель исследования: установить влияние модельного загрязнения органогенного и минерального субстрата различными концентрациями Pb и Cd на фотосинтетические пигменты, продукты перекисного окисления липидов, флавоноиды, пролин, активность катализы и пероксидазы овса посевного. Семена овса в течение 14 суток прорашивали в органогенном (торфосодержащая грунтовая смесь) и минеральном (речной песок) субстрате с различными уровнями Pb (0, 50, 100, 200, 500 мг/кг) и Cd (0, 2, 5, 10, 20 мг/кг) при раздельном внесении. Аккумуляция Pb и Cd более выражена в условиях минерального субстрата: до 20 и 430 раз соответственно относительно контроля в надземной части и до 110 и 470 раз в подземной части. Наиболее чувствительным показателем, реагирующем на накопление Pb, является пролин, в случае Cd – флавоноиды. Степени воздействия Pb и Cd на биохимические показатели в минеральном субстрате примерно одинаковые, в органогенном субстрате – выше у Cd. В целом, овес может адаптироваться к аккумуляции Pb и Cd до некоторой степени, что проявляется в снижении содержания продуктов перекисного окисления и активации антиоксидантных механизмов, отсутствии снижения всхожести. Это позволяет рекомендовать его для фиторемедиации песчаных и гумусовых почв с загрязнением свинцом и кадмием до 500 мг/кг и 20 мг/кг соответственно.

Ключевые слова: тяжелые металлы, растения, перекисное окисление липидов, фотосинтез, антиоксиданты

ASSESSMENT OF OAT RESISTANCE TO ACCUMULATION OF LEAD AND CADMIUM

A.S. Petukhov*, T.A. Kremleva, N.A. Khritokhin, E.D. Pervukhina

University of Tyumen, Tyumen, Russia

*Email: a.s.petukhov@utmn.ru

The objective of the present study was to determine the effect of modeled contamination of organogenic and mineral substrates with different concentrations of Pb and Cd on photosynthetic pigments, lipid peroxidation products, flavonoids, proline, and catalase and peroxidase activities in oat. Oat seeds were germinated for 14 days in organogenic (peat-containing soil mixture) and mineral (river sand) substrates with different levels of contamination with Pb (0; 50; 100; 200; and 500 mg/kg) and Cd (0; 2; 5; 10; and 20 mg/kg) applied separately. Accumulation of Pb and Cd is more pronounced under mineral substrate conditions, relative accumulation being up to 20 and 430 times, respectively, in the above-ground part and up to 110 and 470 times in the underground part. The most sensitive indicators of Pb and Cd are proline and flavonoids respectively. The degrees of Pb and Cd impact on biochemical parameters in the mineral substrate are comparable. In the organogenic substrate, the impact of Cd is higher. In general, oat can adapt to Pb and Cd accumulation to a certain extent, as follows from a decrease in the content of lipid peroxidation products and activation of antioxidant mechanisms, whereas germination does not decrease. This allows recommending oat for phytoremediation of sandy and humus soils contaminated with up to 500 mg/kg and 20 mg/kg Pb and Cd, respectively.

Keywords: heavy metals, plants, lipid peroxidation, photosynthesis, antioxidants

Введение

Загрязнение среды тяжелыми металлами (ТМ) остается одной из наиболее острых и распространенных экологических проблем. Выбросы предприятий горнодобывающей, металлургической, химической промышленности, теплоэлектростанций, автотранспорта, применение удобрений и пестицидов приводит к увеличению содержания ТМ в почвах [30]. В результате растения из районов, подверженных антропогенно-

му загрязнению, способны многократно накапливать ТМ относительно фоновых значений [12, 22].

Наиболее токсичными среди ТМ являются Pb и Cd. В отличие от других металлов (Cu, Zn, Fe, Mn), они не обладают установленными жизненно-важными функциями [12]. Соединения Pb и Cd широко используются в производстве химических источников тока, пигментов, пластмасс, полупроводниковых материалов, а также сопутствуют внесению удобрений [30].

Одним из основных механизмов токсичности ТМ является способность инициировать и поддерживать свободнорадикальное, в частности перекисное окисление липидов (ПОЛ) [20]. Накопление ТМ сопровождается увеличением концентрации активных форм кислорода (АФК), что приводит к повреждению биомолекул. Поэтому в условиях накопления ТМ в клетках растений может наблюдаться активация антиоксидантных систем неферментной (каротиноиды, флавоноиды, аскорбиновая кислота, глутатион, пролин) и ферментной природы (катализ, пероксидаза, супероксиддисмутаза) [25].

Овес посевной (*Avéna satíva* L.) является важной сельскохозяйственной культурой, незаменимым кормом для животных, широко применяется в медицине, что определяет значимость изучения устойчивости овса посевного к загрязнению почвы ТМ, включая выявление показателей, наиболее чувствительных к загрязнению. Влиянию ТМ на физиологические и биохимические показатели растений посвящено большое количество исследований, однако в полевых условиях выделить вклад загрязнения ТМ затруднительно [21], а в лабораторных условиях исследования часто проводятся в условиях гидропоники [1, 8-10], при этом используют ограниченный набор показателей [1, 8] и не учитывают влияние типа загрязняемого субстрата на поведение токсиканта [2].

Целью проведенного исследования стало установление влияния модельного загрязнения органогенного и минерального субстрата различными концентрациями Pb и Cd на биохимические показатели овса посевного.

Материал и методы исследования

Исследование проводили с использованием семян овса посевного как часто используемого объекта в биотестировании. Семена овса прорачивали в органогенном (торфосодержащая грунтовая смесь) и минеральном субстрате (речной песок) с различными уровнями загрязнения Pb и Cd при раздельном внесении. Свинец вносили в виде ацетата $Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$ в количествах (в расчете на металл) 0, 100, 200, 500, 1000 мг/кг субстрата. Кадмий вносили в виде сульфата $3CdSO_4 \cdot 8H_2O$ в количествах (в расчете на металл) 0, 2, 5, 10, 20 мг/кг. Выбор аниона соли обусловлен растворимостью солей, их доступностью и инертностью по отношению к росту растений.

Каждый вариант эксперимента состоял из 10 параллелей (вегетационных сосудов) по 30 семян. Эксперимент проводили в течение 14 суток, растения находились в условиях одинаковых и постоянных температуры ($23 \pm 1^\circ C$), увлажненности (влажность почвы $70 \pm 5\%$) и инсоляции (5000 ± 100 лк). Срок эксперимента обусловлен

ГОСТ Р ИСО 22030-2009¹, согласно которому первый сбор растений осуществляют на 14 сутки.

Воздушно-сухую массу растений озоляли при $500^\circ C$ в течение 3 часов. Извлечение Pb и Cd из золы подземной и надземной части овса проводили в 5 М HNO_3 . Пробоподготовку проводили в двух параллелях. Содержание металлов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии в центре коллективного пользования «Рациональное природопользование и физико-химические исследования» ТюмГУ. Концентрацию Pb и Cd рассчитывали в мг/кг сухой биомассы растений.

Биохимические показатели овса посевного изучали фотометрическим методом. Содержание пигментов фотосинтеза определяли в спиртовом экстракте [16]. Содержание продуктов ПОЛ (оснований Шиффа и диеновых коньюгатов) анализировали в гептановом экстракте [15]. Содержание флавоноидов оценивали проведением цветной реакцией с хлоридом алюминия [13]. Активность каталазы анализировали с помощью образования комплекса молибдата аммония с перекисью [6]. Активность пероксидазы изучали по продуктам окисления гваяколя перекисью водорода [4]. Содержание пролина определяли с помощью нингидриновой реакции [19]. Результаты анализа биохимических показателей приводили в расчете на сухую биомассу растений.

Полученные результаты были подвергнуты стандартной статистической обработке с расчетом доверительного интервала при $P = 0,95$, который откладывали в виде планок погрешности на гистограммах. Проводили корреляционный анализ с расчетом коэффициента корреляции Пирсона (R) и дисперсионный анализ в программе Statistica 12.

Результаты и их обсуждение

По истечении срока вегетационного эксперимента (14 суток) всхожесть семян овса посевного в условиях загрязнения органогенного субстрата Pb и Cd не отличалась от контроля, а в условиях минерального субстрата всхожесть была снижена на 13% только при внесении максимальной концентрации Cd (20 мг/кг). Полученный результат указывает на успешный рост овса посевного в почвах, загрязненных до 500 мг/кг Pb и до 20 мг/кг Cd, что является необходимым условием для проведения фиторемедиации.

Прорачивание овса посевного в загрязненном органогенном субстрате привело к аккумуляции Pb в надземной части 1,6–4,8 раза при сравнении с контролем (рис. 3). При сравнении с органогенным субстратом миграция Pb из минерального субстрата более выражена – до 5 раз, аккумуляция в надземной была выше

¹ ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая токсичность в отношении высших растений. М.: Стандартинформ, 2010.

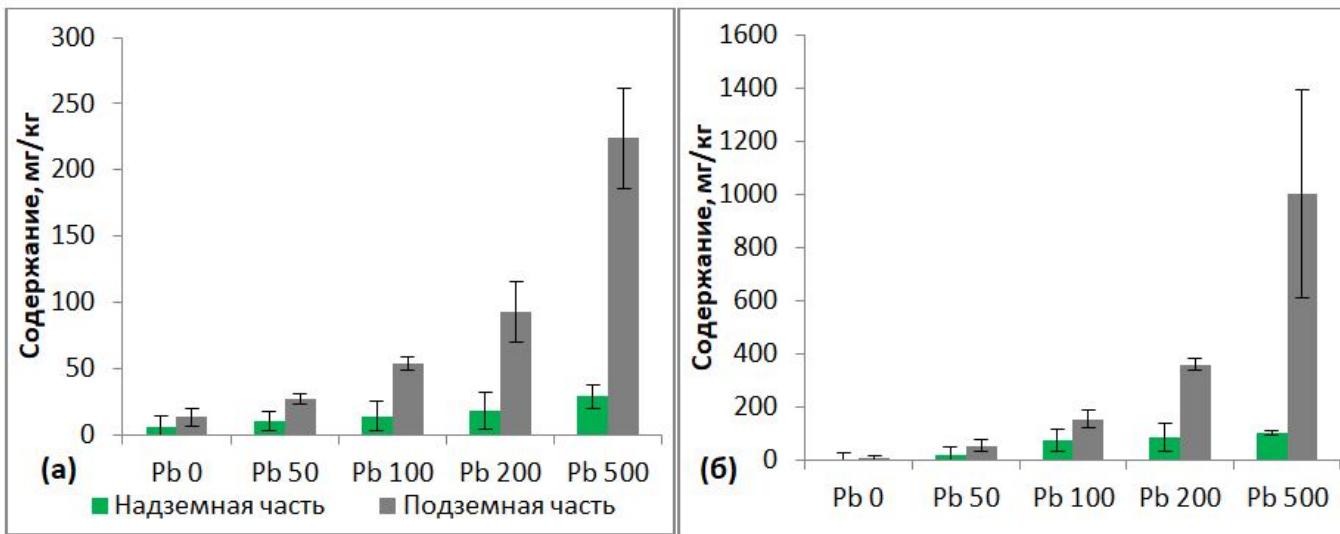


Рис. 1. Содержание Pb в овсе, выращенном в загрязненном органогенном (а) и минеральном (б) субстрате

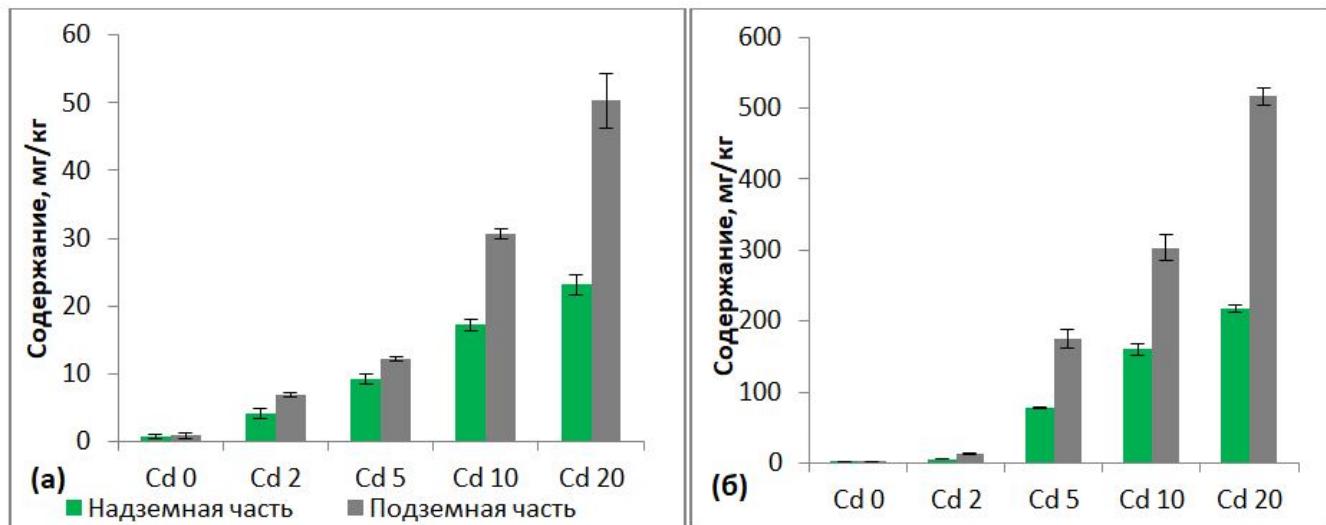


Рис. 2. Содержание Cd в овсе, выращенном в загрязненном органогенном (а) и минеральном (б) субстрате

в 3,8–20 раз. Аккумуляция Cd более выражена при сравнении с Pb: в 5–29 раз с органогенным субстратом и до 430 раз с минеральным субстратом по сравнению с контролем (рис. 4). Высокая степень аккумуляции позволяет считать возможным использование овса для фитоэкстракции металлов (особенно Cd из песчаных почв). Содержание Pb и Cd в овсе, выращенном в минеральном субстрате, оказалось выше при сравнении с органогенным субстратом. Это можно объяснить тем, что в органогенном субстрате ТМ связываются гумусом, что приводит к снижению их подвижности и меньшей транслокации в растения.

Ранее накопление Pb и Cd до 10-кратного раза было отмечено в хвое и листьях деревьев в г. Усть-Каменогорске (Казахстан) [5]. Содержание Pb в овсе соответствовало содержанию этого металла в овощах в районе Алавердского горно-металлургического комбината в Узбекистане [11], а также в травах вблизи полигона твердых бытовых отходов в ХМАО [27] и Среднеуральского медеплавильного завода [14].

В настоящее время в Российской Федерации отсутствуют общепринятые значения ПДК для ТМ в растениях, однако содержание Pb и Cd превышало максимально-допустимый уровень в кормах для

сельскохозяйственных животных в 2–20 и 14–720 раз соответственно². Допустимое содержание в растительном сырье и лекарственных препаратах было превышено в 1,7–17 раз для Pb и в 4–217 раз для Cd³. Превышение данных нормативов наблюдалось уже при внесении минимальных доз металлов (Pb – 50 мг/кг, Cd – 2 мг/кг).

Подземная часть овса посевного, выполняющая защитную функцию, задерживала в себе большую часть Pb и Cd. Накопление Pb подземной частью достигало 112-кратного относительно контроля, а Cd – 470-кратного. На основании полученных данных можно предположить, что у овса включаются адаптационные механизмы, ограничивающие миграцию Pb: по мере роста вносимой концентрации металла барьерная функция корней усиливается. Это проявлялось в увеличении отношения уровней Pb в подземной и надземной частях растения. Аналогичная картина наблюдалась и в эксперименте с загрязнением Cd органогенного субстрата. Однако в условиях большей аккумуляции Cd из минерального субстрата барьерная функция корней ослабевает: отношение уровней Cd в подземной и надземной части снижалось. Способность к миграции в зеленую часть растения у Cd оказалась до 4 раз выше, чем у Pb. В другом исследовании при внесении в почву 20 мг/кг Cd и 200 мг/кг Pb корни золотобородника накапливали Cd до 130-кратного уровня относительно контроля, Pb – до 8-кратного [26]. Однако значительные различия по распределению между надземной и подземной части растения между Pb и Cd не наблюдались [26], что свидетельствует о различном функционировании защитных систем в растениях разных видов.

Накопление Pb и Cd в овсе привело к статистически значимым отличиям от контроля во всех проведенных экспериментах практически по всем изученным показателям (Табл. 1, 2).

В эксперименте с загрязнением органогенного субстрата свинцом степень изменений исследованных показателей изменялась в ряду: пролин > хлорофилл *a* ≈ пероксидаза > хлорофилл *b* ≈ каротиноиды > основания Шиффа ≈ флавоноиды > каталаза > диеновые коньюгаты. Изменение содержания пролина достигало 2,6-кратного относительно контроля, в то время как статически значимое воздействие Pb на содержание диеновых коньюгатов не было выявлено. При за-

² Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и гossипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках 123-4/281-8-87. М.: Государственный агропромышленный комитет СССР, Главное управление ветеринарии; 1987.

³ Общая фармакопейная статья 1.5.3.0008.15. Определение содержания дубильных веществ в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах. М., 2015.

грязнении минерального субстрата свинцом чувствительность показателей изменялась в ряду: пролин > каталаза > флавоноиды > пероксидаза > диеновые коньюгаты > основания Шиффа > хлорофилл *b* ≈ хлорофилл *a* ≈ каротиноиды. Таким образом, наиболее чувствительным к накоплению Pb показателем оказался пролин, независимо от типа загрязняемого субстрата.

Загрязнение органогенного субстрата кадмием привело к такому ряду степени изменчивости показателей: флавоноиды > пролин > хлорофилл *b* ≈ основания Шиффа > хлорофилл *a* ≈ пероксидаза > каротиноиды ≈ диеновые коньюгаты > каталаза. С минеральным субстратом ряд был такой: диеновые коньюгаты > флавоноиды > каталаза > хлорофилл *b* ≈ пероксидаза ≈ хлорофилл *a* > каротиноиды > пролин > основания Шиффа. Наиболее чувствительным биохимическим показателем к накоплению Cd оказались флавоноиды, изменение содержания которых относительно контроля достигало 5,4-кратного.

Изменения активности каталазы и содержания диеновых коньюгатов оказалась выше в эксперименте с минеральным субстратом при сравнении с органогенным. Вероятно, это связано с большей аккумуляцией Pb и Cd и большим смещением окислительно-восстановительного баланса в клетках.

Воздействие Cd на биохимические показатели овса более выражено по сравнению с Pb в условиях органогенного субстрата. Вероятно, это свидетельствует о большей токсичности Cd, чему соответствуют меньшие значения ПДК в почвах. Однако в условиях облегченной транслокации металлов в минеральном субстрате степень влияния Pb и Cd на биохимические показатели оказались сопоставимыми. В целом, чувствительность изменения исследованных показателей в эксперименте с минеральным субстратом оказалась выше, что соответствует большей транслокации металлов.

Дисперсионный анализ (ANOVA) проводили с использованием всего массива полученных данных. В качестве независимых переменных использовали исследованные показатели и содержание Pb и Cd в овсе, а независимыми факторами являлись тип субстрата (органогенный и минеральный) и загрязнение субстрата металлом (Pb и Cd). Выявлено, что природа металла и тип субстрата значимо влияют на содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов (рис. 3а), оснований Шиффа и активность пероксидазы. На содержание пролина и диеновых коньюгатов влияет тип субстрата, но значимые различия между воздействиями разных металлов (Pb или Cd) не установлены. Изменения содержание флавоноидов зависели от природы металла, но не от типа субстрата (рис. 3б). Изменения активности каталазы не зависели от типа субстрата или природы металла. В целом, влияние

Табл. 1

Биохимические показатели овса посевного в условиях загрязнения субстрата свинцом

	Pb ₀	Pb ₅₀	Pb ₁₀₀	Pb ₂₀₀	Pb ₅₀₀
<i>Органогенный субстрат</i>					
Хлорофилл а, мг/100 г	126±7	80±11*	86±4*	137±7	128±3
Хлорофилл b, мг/100 г	72±3	62±6	52±2*	82±2*	88±4*
Каротиноиды, мг/100 г	108±6	85±1*	78±5*	114±4	114±6
Основания Шиффа, усл. ед/мг липидов	1,3±0,1	1,3±0,1	1,64±0,07*	1,60±0,03*	1,37±0,03
Диеновые коньюгаты, усл. ед/мг	4,0±0,3	3,7±0,3	3,6±0,3	3,8±0,3	3,6±0,3
Флавоноиды, %	0,22±0,02	0,26±0,01	0,25±0,01	0,20±0,01	0,27±0,01*
Пролин, мг/кг	1032±2	2395±20*	2699±20*	1526±20*	678±20*
Каталаза, нкат/г	116±50	75±14	157±35	82±18	199±59
Пероксидаза, отн. ед./г	1108±19	1144±10	708±20*	1030±10*	1022±15*
<i>Минеральный субстрат</i>					
Хлорофилл а, мг/100 г	463±5	530±20*	479±17	463±15	425±10*
Хлорофилл b, мг/100 г	215±2	252±16*	231±20	212±4	202±3*
Каротиноиды, мг/100 г	414±3	470±18*	429±19	407±12	377±11*
Основания Шиффа, усл. ед/мг липидов	0,54±0,02	0,60±0,01*	0,44±0,01*	0,50±0,02	0,60±0,02
Диеновые коньюгаты, усл. ед/мг	1,21±0,05	1,18±0,02	0,89±0,02*	1,00±0,04	1,16±0,04
Флавоноиды, %	0,08±0,02	0,27±0,02*	0,25±0,01*	0,13±0,01*	0,30±0,02*
Пролин, мг/кг	26±10	372±24*	45±2	24±3	59±2*
Каталаза, нкат/г	178±8	75±34*	116±6*	43±16*	109±20*
Пероксидаза, отн. ед./г	316±6	336±10	462±10*	317±8	294±8*

Примечание: *P < 0,05

Табл. 2

Биохимические показатели овса в условиях загрязнения субстрата кадмием

	Cd ₀	Cd ₅	Cd ₅	Cd ₁₀	Cd ₂₀
<i>Органогенный субстрат</i>					
Хлорофилл а, мг/100 г	196±2	220±13	215±8*	196±2	159±6*
Хлорофилл b, мг/100 г	149±8	205±2*	137±10	120±5*	108±8*
Каротиноиды, мг/100 г	197±8	203±13	218±16	188±3	167±4*
Основания Шиффа, усл. ед/мг липидов	1,04±0,01	0,82±0,08*	1,2±0,1	1,1±0,2	0,77±0,02*
Диеновые коньюгаты, усл. ед/мг липидов	4,0±0,2	4,4±0,3	3,4±0,1*	3,7±0,1	3,4±0,2*
Флавоноиды, %	0,03±0,01	0,13±0,01*	0,10±0,01*	0,10±0,01	0,03±0,01
Пролин, мг/кг	1354±30	1532±70*	3080±120*	1478±21*	1307±30
Каталаза, нкат/г	150±52	155±70	60±26	127±56	158±21
Пероксидаза, отн. ед./г	458±7	491±25	559±13*	431±33	444±12
<i>Минеральный субстрат</i>					
Хлорофилл а, мг/100 г	392±35	325±30	226±4*	248±14*	173±10*
Хлорофилл b, мг/100 г	204±21	160±20	117±2*	118±5*	88±8*
Каротиноиды, мг/100 г	345±29	297±29	206±4*	229±12*	158±2*
Основания Шиффа, усл. ед/мг липидов	0,37±0,01	0,30±0,08	0,31±0,03	0,24±0,03	0,25±0,01*
Диеновые коньюгаты, усл. ед/мг липидов	0,89±0,06	0,8±0,2	0,86±0,05	0,6±0,1	6,2±0,1*
Флавоноиды, %	0,27±0,01	0,29±0,01	0,28±0,01	0,05±0,01*	0,11±0,01*
Пролин, мг/кг	104±2	87±2*	67±2*	96±2*	142±5*
Каталаза, нкат/г	112±43	116±28	56±9	77±33	324±38*
Пероксидаза, отн. ед./г	192±7	437±20*	378±20*	240±15*	378±18*

Примечание: *P < 0,05

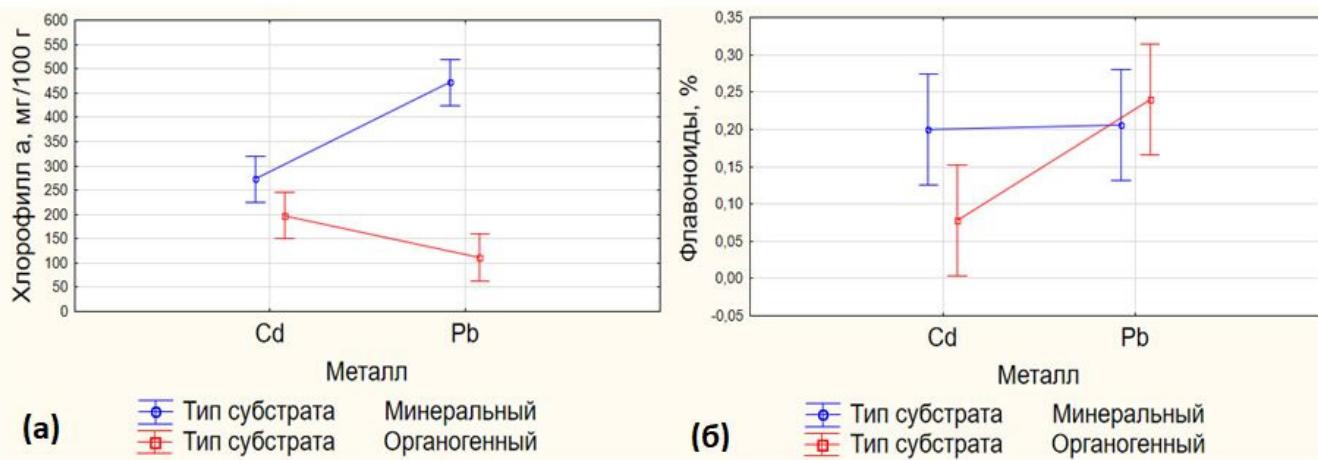


Рис. 3. Влияние металла и типа субстрата на содержание хлорофилла *a* (а) и флавоноидов (б) в овсе посевном

типа субстрата на биохимические показатели было сильнее в случае Pb, чем Cd. Различия в воздействиях Pb и Cd на исследованные показатели более выражены в условиях минерального субстрата.

Корреляционный анализ позволил выявить отрицательные корреляции между содержанием Pb в минеральном субстрате и содержанием фотосинтетических пигментов: $R = -(0,64-0,75)$. Аналогичная корреляция была отмечена для Cd (в органогенном и минеральном субстрате): $R = -(0,72-0,87)$. Отмечено увеличение содержания фотосинтетических пигментов на 6–38% при внесении небольших доз Pb (50 мг/кг) и Cd (2-5 мг/кг). Однако при внесении больших концентраций Pb и Cd наблюдалось снижение уровней хлорофилла *a* и каротиноидов до 2,3 раз. В другом исследовании показано, что внесение в почву 400 мг/кг Pb приводило к увеличению содержания хлорофилла *a* и *b* в растениях давидии покрывальнойной [29]. В литературе сообщалось об отрицательном воздействии Pb и Cd на фотосинтез [3, 7].

По данным литературы, накопление ТМ приводит к развитию процессов ПОЛ [18, 28]. Однако в нашем исследовании аккумуляция Cd вызывала снижение содержания оснований Шиффа и диеновых конъюгатов до полутора раз относительно контроля ($R = -0,85$ и $-0,70$ соответственно). Вероятно, это свидетельствует об устойчивости овса посевного к действию Cd в концентрации до 20 мг/кг в органогенном субстрате до 10 мг/кг в минеральном субстрате. Внесение 20 мг/кг Cd в минеральный субстрат преодолевает антиоксидантную защиту растений и приводит к накоплению диеновых конъюгатов до 6 раз ($R = 0,71$). Накопление Pb также приводит к снижению содержания диеновых конъюгатов до 18% ($R = -0,64$), однако содержание оснований Шиффа повышается до 26%. Вероятно,

это обусловлено тем, что для Pb, в отличие от Cd, характерны окислительно-восстановительные превращения Pb^{4+}/Pb^{2+} , приводящие к генерации свободных радикалов и активных форм кислорода.

Ответная антиоксидантная реакция овса посевного на накопление Pb и Cd заключалась в увеличении содержания флавоноидов до 4 раз относительно контроля. Это свидетельствует о том, что концентрации Pb и Cd до 100 и 80 мг/кг овса не подавляют синтез флавоноидов. В литературе сообщалось об увеличении содержания фенольных антиоксидантов в горчице при действии Cd [24], а также в пшенице при действии Pb [23]. Накопление Cd выше 160 мг/кг овса (при внесении 10-20 мг/кг Cd в субстрат) приводило к снижению содержания флавоноидов до 5 раз относительно контроля ($R = -0,86$).

В литературе сообщалось о накоплении пролина как о неспецифической ответной реакции растений на стресс [1, 10]. В проведенном исследовании выявлено накопление пролина до 14 раз относительно контроля в условиях аккумуляции Pb. Аналогичный эффект (до 2,3 раз) наблюдался при аккумуляции Cd ($R = 0,72$). Токсический эффект аккумуляции Pb и Cd может проявляться в уменьшении относительного объема воды в клетках [12, 22], поэтому накопление пролина, как осмопротектора может быть защитной реакцией растений. Однако при внесении 500 мг/кг Pb в органогенный субстрат и 2-10 мг/кг Cd в минеральный субстрат наблюдалось снижение содержания пролина до 1,5 раз. Вероятно, в этих условиях наблюдается подавление синтеза пролина.

Аккумуляция Cd приводила к увеличению активности пероксидазы до 1,2 раза в условиях органогенного субстрата и до 2,3 раз в минеральном субстрате. Активность другого антиоксидантного фермента, ка-

талазы, также увеличивалась до 2,9 раз при транслокации Cd из минерального субстрата ($R = 0,78$). Вероятно, усиление активности каталазы и пероксидазы обусловлено накоплением перекиси водорода из-за процессов свободнорадикального окисления, вызываемого аккумуляцией Cd. Содержание первичных продуктов ПОЛ, диеновых коньюгатов, положительно коррелировало с активностью каталазы в овсе при загрязнении минерального субстрата кадмием Cd ($R = 0,97$). Увеличение активности каталазы и пероксидазы в условиях воздействия Cd ранее наблюдалось у кукурузы и горчицы [17, 24]. Воздействие Pb на активность каталазы оказалось отрицательным: активность фермента в эксперименте с минеральным субстратом снижалась до 4 раз. Действие Pb на активность пероксидазы также оказалось скорее отрицательным: снижение до 1,6 раз в условиях органогенного и минерального субстрата (за исключением внесения 100 мг/кг в минеральный субстрат). Снижение активности каталазы и пероксидазы при действии нитрата свинца было отмечено в проростках пшеницы в условиях гидропоники [9].

Заключение

Проведенное исследование показало, что наиболее чувствительным показателем овса посевного к накоплению Pb является пролин, а к накоплению Cd – флавоноиды. Установлено влияние типа субстрата на большинство биохимических показателей: в минеральном субстрате влияние загрязнения Pb и Cd более выражено, особенно для Pb. В условиях органогенного субстрата воздействие Cd на все биохимические показатели сильнее, чем Pb, в минеральном субстрате воздействие металлов сопоставимо. Аккумуляция Pb и Cd до 20 и 400 раз соответственно относительно контроля привела к снижению содержания продуктов ПОЛ и активации антиоксидантных механизмов, что свидетельствует о способности овса посевного адаптироваться к загрязнению. Это позволяет рекомендовать его для фиторемедиации загрязненных песчаных и гумусовых почв при содержании Pb до 500 мг/кг и Cd до 20 мг/кг соответственно.

Исследование поддержано грантом Российской научного фонда № 25-77-00010

Литература

1. Абилова ГА. Влияние ионов кадмия и свинца на рост и содержание пролина в растениях тритикале (*Triticosecale Wittm.*). Труды Карельского научного центра РАН. 2016;11:27-32. DOI: 10.17076/eb424
2. Анисимов ВС, Санжарова НИ, Анисимова ЛН, Фригидова ЛМ, Круглов СВ, Дикарев ДВ и др. Использование морфометрических и биохимических показателей растений кормовых бобов для оценки фитотоксических концентраций Zn в различных почвах. Агрохимия. 2011;5:65-75.
3. Батова ЮВ, Казнина НМ, Лайдинен ГФ, Титов АФ. Влияние кадмия на некоторые физиологические процессы у растений тимофеевки луговой (*Phleum pratense L.*). Труды Карельского научного центра РАН. 2013;3:52-8
4. Ермаков АИ, Арасимович ВВ, Ярош НП, Перуанский ЮВ, Луковникова ГА, Иконникова МИ. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат; 1987.
5. Зайцев ВФ, Галямова ГК. Содержание и особенности распределения тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd, Pb) в системе «почва – хвоя и листья древесных пород» на различных участках г. Усть-Каменогорска. Юг России: экология, развитие. 2012;4:66-71
6. Королюк МА, Иванова ЛИ, Майорова НО, Токарев ВЕ. Метод определения активности каталазы. Лабораторное дело. 1988;1:16.
7. Лисицын ЕМ, Шихова ЛН. Модификация структуры пигментного комплекса ячменя ионами свинца и кадмия. Аграрный вестник верхневолжья. 2016;3:30-6.
8. Михайлова ИД, Лукаткин АС. Перекисное окисление липидов в растениях огурца и редиса при действии тяжелых металлов. Изв Саратовского ун-та нов сер Хим Биол Эколя. 2016;2:206-10. DOI: 10.18500/1816-9775-2016-16-2-206-210
9. Решетник ГВ, Задиранова НС, Серов АВ. Активность антиоксидантных ферментов прорастающих семян пшеницы (*Triticum aestivum L.*) в условиях воздействия нитрата свинца. Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского Биология Химия. 2017;69(2):37-46.
10. Сторчак ТВ, Крюкова ВА. Изменение некоторых физиологических показателей ряски малой (*Lemna minor L.*) при действии солей никеля и цинка. Бюллетень науки и практики. 2017;3:99-105. DOI: 10.5281/zenodo.399120
11. Сукиасян АР, Джангириян ТА, Унанян СА, и др. Транслокация тяжёлых металлов в растения из

- почв вблизи Алавердского горно-металлургического комбината. Теоретическая и прикладная экология. 2023;3:120-8. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-3-120-128
12. Титов АФ, Казнина НМ, Таланова ВВ. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН; 2014.
 13. Третьяков НН. Физиология и биохимия сельскохозяйственных растений. М.: Колос; 1998.
 14. Трубина МР, Воробейчик ЕЛ. Содержание тяжелых металлов в лекарственных растениях в зоне аэротехногенного воздействия Среднеуральского медеплавильного завода. Растительные ресурсы. 2013;49(2):203-22.
 15. Шведова АА, Полянский НБ. Метод определения конечных продуктов перекисного окисления липидов в тканях – флуоресцирующих шиффовых оснований. В кн.: Бурлакова ЕБ, ред. Исследование синтетических и природных антиоксидантов *in vitro* и *in vivo*. М.: Наука, 1992. С. 72-3.
 16. Шульгин ИА, Ничипорович АА. Расчет содержания пигментов с помощью номограмм. Хлорофилл. Минск: Наука и техника, 1974.
 17. Anjum SA, Tanveer M, Hussain S, Bao M, Wang L, Khan I. Cadmium toxicity in maize (*Zea mays* L.): consequences on antioxidant systems, reactive oxygen species and cadmium accumulation. Environmental Science and Pollution Research. 2015;21:17022-30. DOI: 10.1007/s11356-015-4882-z
 18. Aydin SS, Buyuk I, Gunduzer EG, Buyuk BP, Kandemir I, Cansaran-Duman D. et al. Effects of Lead (Pb) and Cadmium (Cd) Elements on Lipid Peroxidation, Catalase Enzyme Activity and Catalase Gene Expression Profile in Tomato Plants. Journal of agricultural sciences. 2016;22:539-47. DOI: 10.1501/Tarimbil_0000001412
 19. Bates, LS, Waldren RP, Teare, ID. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant Soil. 1973; 39:205-7. DOI: 10.1007/BF00018060
 20. Bharti KR, Sharma R. Effect of heavy metals: an overview. Materials Today: Proceedings. 2022;51:880-5 DOI: 10.1016/j.matpr.2021.06.278
 21. Boda RK, Majeti NVR, Suthari S. *Ricinus communis* L. (castor bean) as a potential candidate for revegetating industrial waste contaminated sites in peri-urban Greater Hyderabad: remarks on seed oil. Environ. Sci. Pollut. Res. 2017;24:19955-64. DOI: 10.1007/s11356-017-9654-5
 22. Elnabi MK, Elkaliny NE, Elyazied MM, Azab SH, Elkhalfi SA, Elmasry S. et al. Toxicity of Heavy Metals and Recent Advances in Their Removal: A Review. Toxics. 2023; 11(7):580-608. DOI: 10.3390/toxics11070580.
 23. Jańczak-Pieniążek M, Cichoński J, Michalik P, Chrzanowski G. Effect of Heavy Metal Stress on Phenolic Compounds Accumulation in Winter Wheat Plants. Molecules. 2023;28:241-55. DOI: 10.3390/molecules28010241
 24. Kapoor D, Rattan A, Bhardwaj R, Kaur S, Manoj AG. Antioxidative defense responses and activation of phenolic compounds in *Brassica juncea* plants exposed to cadmium stress. International journal of green pharmacy. 2016;10(4):228-34. DOI: 10.22377/ijgp.v10i04.760
 25. Maleki M, Ghorbanpour M, Kariman K. Physiological and antioxidative responses of medicinal plants exposed to heavy metals stress. Plant Gene. 2017;11:247-54. DOI: 10.1016/j.plgene.2017.04.006
 26. Ng CC, Boyce AN, Abas MR, et al. Evaluation of vetiver grass uptake efficiency in single and mixed heavy metal contaminated soil. Environmental Processes. 2020; 7:207-26. DOI: 10.1007/s40710-019-00418-2
 27. Popova E. Accumulation of heavy metals in soil and plants adjacent to municipal solid waste disposal facility. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2019;1145:58. DOI: 10.1088/1742-6596/1145/1/012021
 28. Xie P, Deng J, Zhang H, Ma Y, Cao D, Ma R. et al. Effects of cadmium on bioaccumulation and biochemical stress response in rice (*Oryza sativa* L.). Ecotoxicology and Environmental Safety. 2015;122:392-98. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.09.007
 29. Yang Y, Zhang L, Huang X, Zhou Y, Quan Q, Li Y. et al. Response of photosynthesis to different concentrations of heavy metals in *Davallia solida*. PLoS One. 2020;15(3). DOI: 10.1371/journal.pone.0228563
 30. Zwolak A, Sarzynska M, Szpyrka E, Stawarczyk K. Sources of soil pollution by heavy metals and their accumulation in vegetables: a review. Water Air Soil Pollut. 2019;230:164-75. DOI: 10.1007/s11270-019-4221-y