

СТАТЬИ

УДК 577.32:544.431.7:58.04:633.13

**ВЛИЯНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ПЕРЕКИСНОЕ
ОКИСЛЕНИЕ ЛИПИДОВ В ВЕГЕТАТИВНЫХ ОРГАНАХ
И СЕМЕНАХ ОВСА ПОСЕВНОГО (*AVENA SATIVA* L.)****Джафарова С.А.***Институт биофизики, Национальная академия наук Азербайджана, Баку,
e-mail: scafarova@yahoo.com*

Изучение механизмов адаптации сельскохозяйственных растений к неблагоприятным условиям окружающей среды является актуальной задачей для широкого спектра биологов. Особую ценность представляют данные о клеточно-молекулярном механизме повреждающего эффекта таких распространенных загрязнителей, как тяжелые металлы и их соединения, на различные органы и ткани культурных растений, используемых человеком в повседневном рационе питания. В связи с этим в нашей работе исследовалось влияние солей тяжелых металлов Cd, Co, Mn, и Mo на накопление продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) в вегетативных органах и семенах овса посевного (*Avena sativa* L.). Интенсивность ПОЛ оценивалась по изменению содержания гидроперекисей (ГП) и малонового диальдегида (МДА). Из результатов, полученных в ходе лабораторных экспериментов и на открытом грунте, следует, что: 1) применение растворов солей тяжелых металлов кадмия, кобальта, марганца и молибдена в виде аэрозоля и внесением в почву увеличивало интенсивность ПОЛ во всех органах испытываемых растений; 2) соли кобальта и марганца имели более сильное влияние на окисление липидов в листьях овса; 3) соли кадмия более всего изменяли скорость накопления продуктов ПОЛ в корневой системе растения; 4) действие хлоратов тяжелых металлов на свободнорадикальные процессы в вегетативных органах и семенах оказалось менее токсичным, чем их сульфатов. Также было изучено влияние тяжелых металлов на репродуктивные функции растения овса посевного. Показано, что на продуктивность и прорастание семян заметное влияние оказывали ионы Co и Mn. Установлено, что в отличие от других исследованных металлов кадмий незначительно влиял на всхожесть и продуктивность семян овса.

Ключевые слова: тяжелые металлы, растения овса, перекисное окисление липидов, гидроперекиси, малоновый диальдегид, вегетативные органы, семена

**THE EFFECT OF HEAVY METALS ON LIPID PEROXIDATION IN THE
VEGETATIVE ORGANS AND SEEDS OF SOWING OATS (*AVENA SATIVA* L.)****Dzhafarova S.A.***Institute of Biophysics, national Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, e-mail: scafarova@yahoo.com*

Studying the mechanisms of adaptation of agricultural plants to adverse environmental conditions is a pressing task for a wide range of biologists. Of particular value are data on the cellular-molecular mechanism of the damaging effect of common pollutants such as heavy metals and their compounds on various organs and tissues of cultivated plants used by humans in everyday Diet. In this regard, our work investigated the effect of heavy metal salts Cd, Co, Mn, and Moe on the accumulation of lipid peroxide oxidation (POL) products in vegetative organs and sowing oat seeds (*Avena sativa* L.). The intensity of POL was assessed by changes in hydroperoxide (GP) and small-new dialdehyde (MDA). From the results of the results of the laboratory experiments and on the open ground it follows that: 1) The use of heavy metal salts cadmium, cobalt, manganese and molybdenum in the form of aerosol and introduction into the soil increased the intensity of POL in all organs of test plants; 2) Cobalt and manganese salts had a stronger effect on lipid oxidation in oat leaves; 3) Cadmium salts most of all altered the rate of accumulation of POL products in the root system of the plant; 4) the effect of heavy metal chlorates on free-radical processes in vegetative organs and seeds turned out to be less toxic than their sulfates. The effect of heavy metals on the reproductive functions of the plant of planting oats was also studied. It is shown that the productivity and the germination of seeds was significantly influenced by ions Co and Mn. It was established that unlike other metals studied cadmium had little effect on the germination and productivity of oat seeds.

Keywords: heavy metals, oat plants, lipid peroxidation, hydroperoxides, malondialdehyde, vegetative organs, seeds

При возрастающем уровне загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами вследствие быстрого развития различных отраслей химической промышленности, резкого увеличения числа автотранспортных средств, возрастания количества вносимых в почву минеральных удобрений [1] и т.д. изучение возможности приспособления растений к неблагоприятным экологическим факторам, в частности к действию

таких металлов, как кадмий, молибден, кобальт и марганец, становится актуальной задачей экологии [1-3]. Биохимические, биофизические и физиологические механизмы адаптации растений к высоким концентрациям тяжелых металлов в окружающей среде обеспечивают их рост и развитие даже в неблагоприятных внешних условиях. Повышение устойчивости липидов биологических мембран к повреждающему

действию свободных радикалов является одним из механизмов возникновения резистентности у растений [2; 4; 5]. Установление закономерности механизма усиления интенсивности перекисного окисления липидов мембран растений, подвергшихся токсическому действию металлов-поллютантов, и пути преодоления последствий их повреждающего эффекта является одним из перспективных направлений биофизической экологии [6; 7]. Перекисное окисление липидов, индуцированное токсическим действием тяжелых металлов, влияя на модификацию клеточных мембран, изменяя проницаемость мембран и мембранных транспортных систем, приводит к напряжению системы антиоксидантной защиты организма и вызывает оксидативный стресс, проявляющийся на молекулярном, клеточном и организменном уровне [2; 6; 8]. Становится понятным, что для защиты растений от окислительно-деструктивного стресса, вызванного действием тяжелых металлов, необходимо изучить особенность динамики накопления продуктов перекисного окисления липидов в разных органах растений под действием различных тяжелых металлов.

Цель исследования: изучить влияние тяжелых металлов на динамику накопления продуктов перекисного окисления липидов в вегетативных органах (корнях, стеблях и листьях) и семенах культурного злака – овса посевного (*Avena sativa* L.); сравнить действие высоких доз кадмия – как одного из широко распространенных металлов-токсикантов, и молибдена, марганца, кобальта – как микроэлементов, в низких концентрациях необходимых для роста и развития растения, но в высоких концентрациях проявляющих свое токсическое влияние на них; провести оценку устойчивости растения к их токсическому действию по уровню гидроперекисей и малонового диальдегида.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования были выбраны вегетативные органы и семена растения овса посевного (*Avena sativa* L.). Овёс посевной – однолетнее травянистое растение, широко используемый в сельском хозяйстве злак, со сравнительно коротким (75–120 дней) вегетационным периодом, что являлось удобным для проведения опытов. Исследования на семенах и проростках овса проводились в лабораторных условиях и на открытом грунте. Вначале семена обрабатывались 2% раствором перманганата калия ($KMnO_4$), затем раствором $CaCl_2 \times 10^{-5}$ M, после чего их выдерживали 3 дня при темпе-

ратуре 24 °С в дистиллированной воде. Затем проростки овса высаживали в полиэтиленовые мешки, содержащие по 5 кг черноземной почвы, куда добавлялись растворы солей тяжелых металлов в различных концентрациях. Агрохимические показатели почвы варьировали в следующих пределах: содержание гумуса – 1,1–1,9% (по Тюрину [9]); рН 4,2–5,7; степень насыщения основаниями 70–80%, абсорбированные основания 10,5 мг / 100 г земли, гидроэлектрическая кислотность 1,94 мг / 100 г земли, подвижный P_2O_5 15 мг / 100 г – 18 мг / 100 г земли, подвижный K_2O 12 мг / 100 г – 18 мг / 100 г земли (по Кирсанову [10]).

Для проведения исследования в условиях, приближенных к естественным, на зеленых растениях, выращенных в открытом грунте, ставили следующие опыты: добавление в почву и применение аэрозолей на поверхностные части растений солей тяжелых металлов с различными концентрациями их растворов. Соли тяжелых металлов добавлялись в почву в концентрациях: $CdSO_4$ – 10, 25, 50 мг/кг земли, $CdCl_2$ – 10, 25, 50 мг/кг земли, $CoSO_4 \times 7H_2O$ – 25, 50, 100 мг/кг земли, $CoCl_2 \times 6H_2O$ – 25, 50, 100 мг/кг земли, $MnSO_4 \times 5H_2O$ – 100, 500, 1000 мг/кг земли, $MnCl_2 \times 4H_2O$ – 100, 500, 1000 мг/кг земли, $Na_2MoO_4 \times 2H_2O$ – 100, 150, 200 мг/кг земли, $(NH_4)_2Mo_3O_7 \times 3H_2O$ – 100, 150, 200 мг/кг земли. Проростки растения опрыскивали аэрозолями солей в вышеуказанных концентрациях на 3, 7 и 14-й дни прорастания. Изучалось действие ионов тяжелых металлов (Co, Cd, Mo, Mn) на изменение интенсивности перекисного окисления липидов в корнях, стеблях, листьях и семенах исследуемого растения. Об интенсивности ПОЛ судили по изменению содержания гидроперекисей (ГП), малонового диальдегида (МДА). Определяли содержание ГП и МДА по методу Асакава, Матсушита [11].

Также было исследовано влияние солей тяжелых металлов на прорастание, продуктивность и массу растения овса. Для этого по 1000 зерен овса было посажено в 4 горшка, где в почву были добавлены растворы тяжелых металлов в опытных концентрациях, и 4 контрольных без добавления солей тяжелых металлов. Было подсчитано число появившихся ростков. После созревания были подсчитаны: количество семян полученного урожая, процент прорастания, степень плодородности (продуктивности) и масса 1000 зерен семян овса второго года, которые являлись урожаем первого года и были также под наблюдением. Полученные данные подверглись статистической обработке по критериям Фишера, Стьюдента.

Результаты исследования и их обсуждение

В работе изучали особенности изменения процесса ПОЛ при условиях опыта. Результаты этих исследований представлены в табл. 1–3. Как видно из анализа данных, представленных в таблицах, соли тяжелых металлов при использовании в качестве аэрозоля и при внесении почву, где культивировались растения овса, изменяют интенсивность ПОЛ в семенах и вегетативных органах растений. Из таблицы 1 следует, что соли кадмия (CdSO_4 , CdCl_2) в прямой зависимости от опытных концентраций увеличивали количество ГП и МДА в корне, стебле, листе и семенах. В этих опытах так же, как было выявлено в ранее проведенных исследованиях [8; 12], соли CdSO_4 оказывали более значительное влияние на процесс ПОЛ, чем соли CdCl_2 . Это связано тем, что CdSO_4 лучше всасывается корневой системой, чем CdCl_2 [13; 14]. Что касается влияния солей кадмия на различные органы растения, то наиболее сильному повреждающему эффекту подвергалась корневая система. Например, у опытного образца овса, подвергнутого влиянию CdSO_4 (50 мг/кг), количество ГП в корнях – в 1,65, в стеблях, листьях и семенах – в 1,4 раза увеличивалось по сравнению с контролем.

Такие же изменения наблюдались в количестве МДА. Так, у овса, подвергнутого влиянию CdSO_4 (50 мг/кг земли), по сравнению с контролем увеличение количество МДА в корнях – в 1,5 раза, а в листьях – в 1,3 раза, в стеблях, семенах было в 1,4 раза. Это можно объяснить нарушением ионами кадмия активности ферментов, участвующих в процессах транспирации и фиксации CO_2 , торможение фотосинтеза, ингибирования биологического восстановления NO_2 до NO , затруднением поступления и метаболизма в растениях ряда элементов [3]. Также необходимо отметить, что в отличие от опытов на этилированных растениях [8; 12], в полевых исследованиях отношение увеличения концентрации солей кадмия было пропорциональным увеличению интенсивности ПОЛ.

Соединения кобальта, как тяжелого металла, также оказывали влияние на интенсивность ПОЛ в различных органах растений овса. Причем влияние сульфата кобальта на интенсивность ПОЛ было более выражено, чем хлоратов. Также отличительным являлось то, что под влиянием солей кобальта накопление ГП в листьях достигло уровня в корнях. После экстракции в солях CoSO_4 в количестве 100 мг/кг земли в листьях овса накопление ГП было

даже выше, чем в корнях. При увеличении количества ГП в корнях в 2 раза, в стеблях – в 1,97, в листьях это составило в 2,9, в семенах – в 2,1 раза. В отношении в накоплении МДА такой порядок не наблюдался. Как видно из табл. 1, после применения CoSO_4 в количестве 100 мг/кг земли при возрастании количества МДА в корнях в 2,2 раза, в стеблях – в 2 раза, в листьях и семенах это было в 1,9 и 1,5 раза соответственно выше по сравнению с контролем.

Повышение уровня окислительных процессов в листьях под влиянием ионов кобальта, возможно, связано с тем, что высокие концентрации ионов кобальта препятствуют поглощению корнями ионов железа и марганца и ингибируют транспорт этих ионов в побеги, создавая у растения симптомы вторичного хлороза, которые, по всей вероятности, и являются провоцирующими окисление липидов мембран.

Результаты исследования выявили, что и соли Mn также усиливали ПОЛ у растения овса (табл. 1). Однако следует указать, что соединения Mn в исследованных нами органах растения только в высоких концентрациях оказывают влияние на процесс ПОЛ. Влияние соединения Mn в концентрации 100 мг/кг земли на окисление липидов было незначительным, граничащим с ошибкой опыта. Ощутимое влияние на изменение ПОЛ начинается с концентрации 1000 мг/кг земли. По результатам исследования после воздействия соединениями марганца на опытные растения уровень ГП и МДА был наиболее высок в семенах. После введения MnSO_4 в количестве 1000 мг/кг земли в корнях овса количество ГП выросло в 1,7 раза, а семенах – в 2 раза выше по сравнению с контролем. Из табл. 1 видно, что MnSO_4 влияет на интенсивность ПОЛ значительно, чем MnCl_2 . При сопоставлении результатов исследования нами различных вегетативных органов растения можно отметить, что наиболее чувствительным к высоким дозам солей марганца оказался корень овса. Передозировка этого элемента способствует уменьшению количества хлорофилла. Незначительное влияние марганца на интенсивность ПОЛ может быть объяснена значительным потреблением его растениями. Этот элемент, участвуя в регуляции водного режима и окислительно-восстановительных реакций, повышает устойчивость растений к неблагоприятным условиям среды, влияет на репродуктивность растений. В то же время токсичность этого микроэлемента проявляется в различных концентрациях.

Таблица 1

Влияние внесения в почву растворов солей тяжелых металлов на интенсивность перекисного окисления липидов в различных органах овса

Концентрация солей тяжелых металлов, мг/кг земли	Продукты перекисного окисления липидов							
	Гидроперекиси, нмоль/мг липид, $X \pm m$, n = 9				МДА, нмоль/мг белок, $X \pm m$, n = 9			
	корень	стебель	листья	семена	корень	стебель	листья	семена
Контроль	10,1 ± 0,61	8,2 ± 0,41	2,3 ± 0,4	0,9 ± 0,05	9,9 ± 0,61	6,3 ± 0,32	3,7 ± 0,23	0,6 ± 0,31
CdSO₄								
10	10,0 ± 0,52	7,9 ± 0,36	2,3 ± 0,11	0,9 ± 0,046	9,7 ± 0,55	6,6 ± 0,34	3,8 ± 0,28	0,6 ± 0,31
25	12,6 ± 0,48	9,1 ± 0,42	2,9 ± 0,18	1,0 ± 0,06	11,9 ± 0,61	7,1 ± 0,41	4,1 ± 0,28	0,7 ± 0,043
50	16,6 ± 0,81	11,48 ± 0,61	3,22 ± 0,12	1,26 ± 0,07	14,85 ± 0,87	8,82 ± 0,55	4,81 ± 0,25	0,84 ± 0,052
CdCl₂								
10	10,3 ± 0,45	8,1 ± 0,48	2,2 ± 0,13	0,9 ± 0,035	9,18 ± 0,53	6,5 ± 0,36	3,7 ± 0,28	0,6 ± 0,04
25	11,1 ± 0,51	8,4 ± 0,71	2,4 ± 0,15	0,9 ± 0,05	10,2 ± 0,42	6,8 ± 0,42	4,0 ± 0,25	0,6 ± 0,043
50	14,4 ± 0,68	10,2 ± 0,4	3,0 ± 0,18	1,0 ± 0,055	13,1 ± 0,77	7,5 ± 0,36	4,4 ± 0,26	0,73 ± 0,04
CoSO₄ × 7H₂O								
25	11,1 ± 0,42	9,4 ± 0,52	2,3 ± 0,13	0,9 ± 0,04	11,3 ± 0,43	6,6 ± 0,43	3,8 ± 0,25	0,6 ± 0,036
50	14,6 ± 0,73	13,6 ± 0,18	4,08 ± 0,19	0,98 ± 0,5	15,4 ± 0,81	8,7 ± 0,54	4,2 ± 0,27	0,7 ± 0,42
100	20,2 ± 1,09	16,2 ± 0,94	6,67 ± 0,21	1,9 ± 0,11	21,78 ± 1,12	12,6 ± 0,78	7,03 ± 0,41	0,96 ± 0,05
CoCl₂ × 6H₂O								
25	10,9 ± 0,48	8,4 ± 0,45	2,3 ± 0,14	0,9 ± 0,04	10,1 ± 0,61	6,3 ± 0,36	3,7 ± 0,21	0,6 ± 0,033
50	15,3 ± 0,79	11,1 ± 0,40	2,9 ± 0,40	0,9 ± 0,053	13,2 ± 0,82	7,1 ± 0,38	4,0 ± 0,24	0,7 ± 0,042
100	18,7 ± 0,95	13,2 ± 0,81	6,1 ± 0,19	1,2 ± 0,07	19,9 ± 1,14	10,9 ± 0,67	6,1 ± 0,36	0,86 ± 0,051
MnSO₄ × 5H₂O								
100	11,6 ± 0,64	9,6 ± 0,52	3,0 ± 0,16	0,9 ± 0,03	10,4 ± 0,64	7,5 ± 0,46	3,7 ± 0,22	0,6 ± 0,035
500	13,2 ± 0,68	10 ± 0,44	3,6 ± 0,17	1,0 ± 0,07	11,8 ± 0,73	9,1 ± 0,56	4,2 ± 0,29	0,8 ± 0,044
1000	18,18 ± 1,06	13,12 ± 0,77	5,52 ± 0,32	2,61 ± 0,16	16,83 ± 1,02	11,34 ± 0,71	5,92 ± 0,37	1,2 ± 0,07
MnCl₂ × 4H₂O								
100	10,8 ± 0,44	9 ± 0,52	2,3 ± 0,13	0,9 ± 0,05	9,9 ± 0,61	6,3 ± 0,36	3,7 ± 0,26	0,6 ± 0,03
500	12,4 ± 0,77	9,4 ± 0,43	3,0 ± 0,15	0,9 ± 0,057	10,8 ± 0,67	8,1 ± 0,73	3,9 ± 0,25	0,9 ± 0,052
1000	16,1 ± 1,1	11,2 ± 0,65	5,0 ± 0,3	1,61 ± 0,08	15,8 ± 1,1	9,9 ± 0,71	4,9 ± 0,31	1,0 ± 0,06
Na₂MoO₄ × 2H₂O								
100	11,0 ± 0,63	9,0 ± 0,05	2,3 ± 0,12	0,9 ± 0,045	9,9 ± 0,58	6,3 ± 0,39	3,7 ± 0,26	0,6 ± 0,02
150	11,4 ± 0,49	9,4 ± 0,46	3,0 ± 0,15	0,9 ± 0,16	10,1 ± 0,67	6,3 ± 0,39	3,4 ± 0,23	0,6 ± 0,024
200	15,6 ± 0,95	11,1 ± 0,65	4,7 ± 0,21	1,4 ± 0,08	14,1 ± 0,91	9,0 ± 0,52	5,4 ± 0,331	1,2 ± 0,06
(NH₄)₂Mo₃O₇ × 3 H₂O								
100	11,0 ± 0,55	9,1 ± 0,48	2,3 ± 0,15	0,9 ± 0,05	10,0 ± 0,67	7,0 ± 0,51	3,7 ± 0,28	0,6 ± 0,04
150	13,0 ± 0,7	10,1 ± 0,52	3,0 ± 0,16	0,9 ± 0,046	10,9 ± 0,61	8,0 ± 0,41	3,7 ± 0,21	0,6 ± 0,051
200	18,18 ± 1,15	12,3 ± 0,75	4,7 ± 0,29	1,62 ± 0,01	15,8 ± 0,98	9,45 ± 0,44	5,8 ± 0,35	1,86 ± 0,053

Влияние соединения Мо на интенсивность ПОЛ в вегетативных органах и семенах овса также зависело от концентрации. Экстракция в солях Na₂MoO₄ в количестве 100 мг/кг земли не оказывает влияние на интенсивность ПОЛ, и его уровень держится, как у контрольных растений (табл. 1). Начиная с концентрации 150 мг/кг в корнях, стеблях, листьях и семенах наблюдается увеличение содержания ГП и МДА. При этом влияние 4-валентного соединения Mo(NH₄)₂Mo₃O₇ на интенсивность ПОЛ значительно ниже, чем 6-валентного Na₂MoO₄. По полученным результатам можно сделать

заключение, что в листьях и семенах количество МДА и ГП выше, чем в корнях [12]. Например, после экстракции в 4-валентном соединении Мо в количестве 200 мг/кг земли в корнях количество ГП возросло в 1,5 раза, в листьях – в 1,8 и в семенах – в 3,1 раза по сравнению с контролем. Количество МДА в корнях в 2 раза, в листьях – в 2,3 и в семенах – в 1,8 раза возросло по сравнению с контролем. Скорее всего, это связано с тем, что молибден локализуется в молодых органах растений, а в конце вегетации сосредотачивается преимущественно в семенах.

Следующим шагом наших исследований было использование аэрозолей тяжелых металлов с целью выявить различие в действии тяжелых металлов, поглощенных растениями из почвы и воздуха, исследуя изменения содержания продуктов ПОЛ в испытываемых образцах растений. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 2. Было установлено усиление интенсивности ПОЛ после опрыскивания испытываемых растений аэрозолем солей кадмия в концентрации 10, 25 и 50 мг/кг земли в вегетативных органах овса.

Использование растворов солей кадмия в виде аэрозоля по-разному влияло на интен-

сивность ПОЛ в различных органах растений. Например, после применения аэрозоля соли кадмия $CdSO_4$ в концентрации 50 мг/кг земли количество ГП в корнях овса – в 1,5 раза, в стеблях – в 1,35 раза, в листьях – в 2,8 раза, а в семенах – в 3,1 раза возросло по сравнению с контролем. Таким образом, накопление тяжелых металлов в листьях и семенах было значительно выше, чем в корнях и стеблях. Такое же соотношение наблюдалось в накоплении МДА в органах растений после применения аэрозоля в той же дозировке соли кадмия. Так, количество МДА в корнях и стеблях возросло в 1,4 и 1,2 раза, в то время как в листьях и семенах это составило 2,1 и 2,1 раза.

Таблица 2

Влияние применения аэрозолей тяжелых металлов на интенсивность перекисного окисления липидов в различных органах растения овса

Концентрация растворов тяжелых металлов	Продукты перекисного окисления липидов							
	Гидроперекиси, нмоль/мг липид, $X \pm m, n = 9$				МДА, нмоль/мг белок, $X \pm m, n = 9$			
	корень	стебель	листья	семена	корень	стебель	листья	семена
Контроль	10,2 ± 0,63	8,2 ± 0,45	2,3 ± 0,12	0,9 ± 0,05	9,9 ± 0,51	6,3 ± 0,39	3,7 ± 0,14	0,6 ± 0,03
$CdSO_4$								
10	11,0 ± 0,61	8,2 ± 0,41	3,1 ± 0,19	0,9 ± 0,046	10,1 ± 0,53	6,3 ± 0,24	4,1 ± 0,12	0,6 ± 0,04
25	13,2 ± 0,73	10,1 ± 0,67	4,6 ± 0,17	1,7 ± 0,1	11,7 ± 0,61	7,1 ± 0,31	5,8 ± 0,21	1,0 ± 0,06
50	15,15 ± 0,94	11,07 ± 0,71	6,44 ± 0,35	2,79 ± 0,14	13,86 ± 0,70	7,56 ± 0,32	7,58 ± 0,45	1,26 ± 0,07
$CdCl_2$								
10	10,1 ± 0,51	8,0 ± 0,40	2,4 ± 0,11	0,9 ± 0,046	0,9 ± 0,05	6,3 ± 0,05	4,2 ± 0,14	0,6 ± 0,03
25	11,4 ± 0,56	8,7 ± 0,41	4,1 ± 0,14	1,3 ± 0,08	10,1 ± 0,67	6,5 ± 0,36	4,9 ± 0,15	0,9 ± 0,052
50	13,0 ± 0,48	9,5 ± 0,52	5,1 ± 0,28	1,8 ± 0,1	11,0 ± 0,68	7,0 ± 0,29	5,8 ± 0,18	1,1 ± 0,04
$CoSO_4 \times 7H_2O$								
25	13,4 ± 0,51	11,2 ± 0,55	3,8 ± 0,13	1,1 ± 0,04	12,4 ± 0,61	9,1 ± 0,55	5,0 ± 0,55	1,2 ± 0,07
50	19,8 ± 1,23	16 ± 0,91	4,7 ± 0,18	2,1 ± 0,12	16,9 ± 0,82	12,4 ± 0,61	8,3 ± 0,4	1,9 ± 0,08
100	24,26 ± 1,41	21,32 ± 0,13	7,82 ± 0,44	3,51 ± 0,13	22,77 ± 1,08	15,75 ± 0,8	11,1 ± 0,61	7,16 ± 0,44
$CoCl_2 \times 6H_2O$								
25	11,2 ± 0,56	9,4 ± 0,51	3,0 ± 0,15	1,1 ± 0,07	10,1 ± 0,51	8,1 ± 0,44	4,2 ± 0,16	1,1 ± 0,068
50	16 ± 0,7	14,1 ± 0,73	4,6 ± 0,17	1,6 ± 0,06	13,9 ± 0,78	10,1 ± 0,61	5,1 ± 0,31	1,6 ± 0,071
100	21,01 ± 0,95	17,8 ± 0,91	6,2 ± 0,41	2,7 ± 0,13	18,9 ± 1,08	13,2 ± 0,66	9,4 ± 0,51	2,7 ± 0,13
$MnSO_4 \times 5H_2O$								
100	11,4 ± 0,58	9,5 ± 0,04	3,8 ± 0,11	1,3 ± 0,07	11,1 ± 0,71	4,7 ± 0,29	4,8 ± 0,22	0,6 ± 0,02
500	13,6 ± 0,71	10,1 ± 0,64	4,1 ± 0,16	1,46 ± 0,0	12,9 ± 0,76	8,9 ± 0,56	5,9 ± 0,36	1,0 ± 0,05
1000	20,2 ± 0,25	13,2 ± 0,71	5,75 ± 0,24	2,16 ± 0,13	15,84 ± 0,81	10,08 ± 0,68	7,4 ± 0,44	1,26 ± 0,07
$MnCl_2 \times 4H_2O$								
100	11,0 ± 0,59	9,2 ± 0,50	3,8 ± 0,14	0,9 ± 0,05	10,6 ± 0,55	6,5 ± 0,4	4,0 ± 0,41	0,6 ± 0,03
500	12,6 ± 0,61	10 ± 0,58	4,0 ± 0,15	1,2 ± 0,04	11,4 ± 0,71	7,1 ± 0,44	5,1 ± 0,3	0,85 ± 0,053
1000	18,4 ± 0,01	11,7 ± 0,66	5,03 ± 0,36	2,0 ± 0,12	12,5 ± 0,66	8,2 ± 0,48	7,0 ± 0,41	1,0 ± 0,06
$Na_2MoO_4 \times 2H_2O$								
100	10,4 ± 0,75	9,2 ± 0,51	3,8 ± 0,2	1,3 ± 0,08	11,6 ± 0,61	7,9 ± 0,46	4,6 ± 0,17	0,6 ± 0,025
150	14,1 ± 0,8	11,5 ± 0,64	4,2 ± 0,22	2,0 ± 0,11	12,7 ± 0,69	8,8 ± 0,48	5,1 ± 0,14	1,0 ± 0,067
200	17,4 ± 0,86	12,76 ± 0,79	5,5 ± 0,31	2,2 ± 0,31	13,4 ± 0,71	9,7 ± 0,56	6,2 ± 0,21	1,2 ± 0,07
$(MH_4)Mo_3O_7 \times 3H_2O$								
100	11,7 ± 0,59	9,9 ± 0,6	4,0 ± 0,21	1,3 ± 0,08	12,1 ± 0,61	7,5 ± 0,42	4,7 ± 0,15	0,6 ± 0,02
150	14,3 ± 0,061	10,9 ± 0,67	4,6 ± 0,19	1,7 ± 0,1	13,5 ± 0,66	8,9 ± 0,51	5,6 ± 0,21	0,9 ± 0,05
200	18,18 ± 0,91	14,76 ± 0,92	5,75 ± 0,3	2,25 ± 0,14	14,85 ± 0,74	0,1 ± 0,64	6,66 ± 0,41	1,2 ± 0,065

Применение солей кобальта в виде аэрозоля резко увеличивало накопление ГП и МДА в испытуемых органах растений. Наибольшее значение ГП и МДА после применения солей кобальта в виде аэрозоля наблюдалось в листьях и семенах.

Как видно из табл. 2, после применения аэрозоля соли кобальта CoSO_4 в концентрации 25 мг/кг земли, аэрозоля соли кадмия CdSO_4 в концентрации 25 мг/кг земли и аэрозоля соли марганца в концентрации 100 мг/кг земли не было достоверных различий в количестве ГП и МДА. Кроме того, после применения аэрозоля соли марганца в концентрации 1000 мг/кг земли наибольшие изменения наблюдались в процессе ПОЛ в листьях. Что касается влияния солей молибдена на развитие ПОЛ у исследованного растения, то при использовании аэрозоля, так же как при внесении в почву его солей, 6-валентное соединение молибдена оказывало более слабое влияние на интенсивность ПОЛ, чем 4-валентное. По полученным данным можно судить о возрастании интенсивности ПОЛ в вегетативных органах и семенах растения и при опрыскивании солями тяжелых металлов. Однако при внесении растворов солей тяжелых металлов в почву перед посевом, она в корнях и стеблях была выше, чем при использовании аэрозолей солей тяжелых металлов. В отличие от корней и стеблей, в листьях и семенах процесс ПОЛ при опрыскивании растворами тяжелых металлов значительно активней. Следует отметить, что при применении аэрозолей сульфаты также имели больший токсический эффект на растения, чем хлораты.

Имеющиеся данные в литературе и полученные нами результаты поставили перед нами вопрос о том, какие биохимические и физиологические изменения происходят в семенах растений под влиянием солей тяжелых металлов? Чтобы ответить на этот вопрос, были проведены следующие

опыты. Образцы семян были посажены в 4 отдельных горшка с землей, содержащей CdSO_4 в концентрации 50 мг/кг земли, CoSO_4 в концентрации 100 мг/кг земли, MnSO_4 в концентрации 1 г/кг земли, Na_2MoO_4 в концентрации 200 мг/кг земли соответственно. 4 горшка с посаженными семенами без тяжелых металлов были взяты для контроля (табл. 3). В каждый горшок было посажено 1000 зерен овса и подсчитано число появившихся ростков. Количество семян полученного урожая, процент прорастания, степень плодородности (продуктивности) и масса 1000 зерен были подсчитаны после созревания. Семена второго года, являясь урожаем первого года, также были под наблюдением. Во время эксперимента были подсчитаны процент прорастания, продуктивность 1 горшка и масса 1000 семян овса первого и второго года урожая. В конце первого года результаты опыты показали, что в контрольных горшках не проросли 3–5 семени. Было установлено незначительное влияние Cd на процент прорастания, в то время как CoSO_4 снижал степень прорастания на $9 \pm 0,8\%$. По сравнению с контролем Cd снижал общую продуктивность, но не снижал общую массу 1000 семян. В отличие от Cd, Co снижал продуктивность на 17%, а массу семян на 8%. Mn и Mo снижали общую продуктивность соответственно на 8% и 9%, а массу 1000 семян на 7%. При посадке урожая первого года в землю с солями Cd прорастание на 7% уменьшилось. Прорастание под влиянием Co, Mn и Mo уменьшилось на 15, 11 и 11% соответственно. Под влиянием Cd общая продуктивность на 14%, масса 1000 семян на 8% уменьшились. Под влиянием Co общая продуктивность на 22%, масса 1000 семян на 20% уменьшились. Mo и Mn уменьшали общую продуктивность на 16% и 18%, массу 1000 семян на 16% и 18% соответственно.

Таблица 3

Физиологические и биохимические изменения у семян растения овса под действием тяжелых металлов

Условия опыта	Урожай 1-го года			Урожай 2-го года		
	Прорастание, %	Продуктивность, г/гор.	Масса 1000 семян, г	Прорастание, %	Продуктивность, г/гор.	Масса 1000 семян, г
Контроль	96	18,7	34,4	97	16,4	35,1
CdSO_4	95 P < 0,05	17,7 P < 0,05	34,1 p > 0,02	90 p > 0,01	14,1 P < 0,01	32,21 P = 0,02
$\text{CoSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$	88 P > 0,01	15,5 p > 0,02	31,64 p < 0,05	82 P < 0,02	12,8 p > 0,01	28,08 P < 0,02
$\text{MnSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$	96 P = 0,05	17,2 p < 0,05	31,99 P < 0,05	86 P < 0,02	13,77 P < 0,05	29,48 P < 0,05
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$	95 p > 0,05	17,01 P < 0,05	31,95 P < 0,02	86 p < 0,02	13,44 P < 0,05	28,7 P < 0,05

По результатам, изложенным в таблицах, видно, что внесение соединений тяжелых металлов в почву перед посевом в значительной степени усиливает ПОЛ в исследованных органах овса. Среди испытываемых тяжелых металлов наибольшей токсичностью обладали соединения Со и Мп.

Заключение

Результаты исследования указывают на то, что ионы всех испытываемых тяжелых металлов имели повреждающий эффект на рост и развитие растения овса посевного, несмотря на существенные различия в органах-мишенях. Так, ионы кадмия оказывали значительное действие на накопление продуктов ПОЛ в корнях, а ионы марганца – в листьях и стебле. Чтобы оценить повреждающее действие солей молибдена на вегетативные органы и семена растения, использовали достаточно высокие концентрации солей молибдена, однако такие концентрации при загрязнении почвы и воздуха соединениями молибдена встречаются редко. Что в общем свидетельствует о незначительной токсичности молибдена для злаковых растений в изученных концентрациях.

Представленные результаты позволяют сделать выводы, что наиболее токсичными для злаковых растений являются соединения кобальта. Соли кобальта, примененные как в виде аэрозоля, так и внесенные в почву, в значительной степени влияли на интенсивность перекисного окисления липидов во всех вегетативных органах и семенах овса посевного. Причем растворы хлоратов кобальта оказались менее токсичными, чем сульфатов. Также ионы кобальта накапливаясь в листьях и семенах, влияли на всхожесть семян и продуктивность растения овса, что делает его первостепенным токсикантом не только для культурных растений, но также опасным для здоровья человека.

Список литературы

1. Казнина Н.М. Физиолого-биохимические и молекулярно-генетические механизмы устойчивости растений семейства *Poaceae* к тяжелым металлам 03.01.05 – «Физиология и биохимия растений»: автореф. дис. докт. биол. наук. Санкт-Петербург, 2016. 38 с.

2. Симонова Н.В., Доровских В.А., Штарберг М.А. Влияние адаптогенов растительного происхождения на интенсивность процессов перекисного окисления ли-

пидов биомембран в условиях ультрафиолетового облучения // Дальневосточный Медицинский Журнал. 2010. № 2. С. 112–115.

3. Пряженникова О.Е., Тараканова А.С. Анализ содержания подвижных форм тяжелых металлов в снеговом и почвенном покровах г. Кемерово и возможные последствия воздействия на здоровье населения // Вестник Кемеровского Государственного Университета. 2009. Т. 4. № 40. С. 21–26.

4. Elloumi N., Zouari M., Chaari L., Jomni C., Marzouk B., Ben Abdallah F. Effects of cadmium on lipids of almond seedlings (*Prunus dulcis*). Bot Stud. 2014. Vol. 55 (1). P. 61. DOI: 10.1186/s40529-014-0061-7. Epub 2014 Aug 2. PMID: 28510983; PMCID: PMC5430368.

5. Amirjani M.R. Effects of cadmium on wheat growth and some physiological factors. Int. J. Forest Soil Erosion. 2012. Vol. 2. No. 1. P. 50–58.

6. Zong H., Liu S., Xing R., Chen X., Li P. Protective effect of chitosan on photosynthesis and antioxidative defense system in edible rape (*Brassica rapa* L.) in the presence of cadmium. Ecotoxicol Environ Saf. 2017. Vol. 138. P. 271–278. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.01.009.

7. Bhargava A., Carmona F.F., Bhargava M., Srivastava S. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. J. Environ Manage. 2012. Vol. 105. P. 103–120. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.04.002.

8. IV Съезд биофизиков России. Симпозиум II «Физические основы физиологических процессов». Материалы докладов / Отв. ред. член-корр. РАН А.Б. Рубин. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2012. 206 с.

9. Серeda Н.А., Валеев В.М., Баязитова Р.И., Алибаев А.А. Практикум по агрохимии: учебное пособие). Уфа: БГАУ, 2004. С. 115.

10. Державин Л.М., Самохвалов С.Г. (руководитель разработки), Соколова Н.В., Орлова А.Н., Хабарова К.А., Сухарева В.Н., Федотова М.И., Соколова Ю.В. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО 1996. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-26207-91> (дата обращения: 22.03.2020).

11. Asakawa T., Matsushita S. Coloring condition of TBA test for detecting lipid hydroperoxides. Lipids. 1980. Vol. 15. № 3. P. 137–140.

12. Джафарова С.А., Джафаров А.И. Свободнорадикальные аспекты загрязнения биосферы тяжелыми металлами // Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. 2013. № 6 (16). С. 98–105.

13. Андриенко Л.Н., Аксенова Ю.В. Влияние внесения кадмия, никеля, цинка на уровень содержания их в почве, урожайность и качество корнеплодов овощных культур // Земледелие. 2018. № 8. С. 23–25. DOI: 10.24411/0044-39132018-10807.

14. Nocito Fabio F., Espen Luca, Fedeli, Chiara Lancilli Clarissa, Musacchi Stefano, Serra Sara, Sansavini Silvano, Cocucci Maurizio, Sacchi Gian Attilio, Oxidative stress and senescence-like status of pear calli co-cultured on suspensions of incompatible quince microcalli. Tree Physiology. April 2010. Vol. 30. Issue 4. P. 450–458. DOI: 10.1093/treephys/tpq006.

15. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с.