УДК 57.044

Влияние тяжелых металлов (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) на всхожесть и морфометрические показатели овса посевного (*Avena sativa*)

<sup>1</sup>Петухов А.С., <sup>1</sup>Хритохин Н.А., <sup>1</sup>Петухова Г.А.

 $^{1}$ ФГАОУ BO «Тюменский государственный университет», Тюмень, e-mail: revo251@mail.ru

Накопление тяжелых металлов в растениях приводит к угнетению их жизнедеятельности, нарушению роста и развития проростков. Работа посвящена изучению влияния транслокации тяжелых металлов (Сu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) в ткани овса посевного (Avena sativa) на всхожесть и морфометрические показатели растений. Для постановки эксперимента два вида почвы: органогенная и минеральная равномерно загрязнялись сульфатами Cu, Zn, Fe, Mn и Cd, а также ацетатом Pb. Загрязнение почвы Cu, Zn и Mn осуществлялось в количестве двух предельно допустимых концентраций, Fe – в количестве 3000 мг/кг, а Pb и Cd – в количестве двух ориентировочно допустимых концентраций. Было обнаружено, что всхожесть семян овса на загрязненной тяжелыми металлами органогенной почве снижается до 50%, в то время как на загрязненной минеральной почве снижения всхожести практически не наблюдалось. Взаимное действие Cu и Zn на всхожесть является антагонистическим, а Pb и Cd – синергическим. Среди морфометрических показателей наибольшее влияние все изученные тяжелые металлы оказывают на подземную часть растений, надземная часть также подвергалась угнетению, но в меньшей степени. Влияние тяжелых металлов на морфометрические показатели в эксперименте с минеральной почвой было менее выраженным, по сравнению с органогенной почвой.

Ключевые слова: тяжелые металлы, овес посевной, всхожесть, морфометрические показатели, загрязнение окружающей среды

Impact of heavy metal (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) on germination and morphometric indexes of the cultivated oat (*Avena sativa*)

<sup>1</sup>Petukhov A.S., <sup>1</sup>Khritokhin N.A., <sup>1</sup>Petukhova G.A.

<sup>1</sup>University of Tyumen, Tyumen, e-mail: revo251@mail.ru

Accumulation of heavy metals in plants leads to oppression of their vital activity, malfunction of growth and development of germs. This study was devoted to the research of heavy metals translocation effect on germination and morphometric indexes of the cultivated oat. For the experiment two types of soils: organogenic and mineral soil were evenly polluted by Cu, Zn, Fe, Mn and Cd sulfates as well as Pb acetate. Soil contamination by Cu, Zn and Mn was carried out in quantity of two maximum permissible concentration, Fe – in concentration 3000 mg/kg, Pb and Cd – in quantity of two approximate permissible concentration. It was found out that germination of the oat in organogenic soil polluted by heavy metals decreased by 50%, while in polluted mineral soil oppression of germination practically was not observed. Mutual effect of Cu and Zn on germination is antagonistic, while Pb and Cd combination was synergetic. Among morphometric indexes heavy metals impact the underground part of plants the most. Overground part was also oppressed, but in a less degree. Influence of heavy metals on morphometric indexes in the experiment with mineral soil was less expressed compared to organogenic soil.

Keywords: heavy metals, cultivated oat, germination, morphometric indexes, environmental pollution

### Введение

Одними из самых опасных загрязнителей окружающей среды являются тяжелые металлы (ТМ). Пути миграции поллютантов в биосфере многочисленны. Однако они всегда проходят через уровень продуцентов. Несмотря на то, что многие тяжелые металлы не являются необходимыми для растений, они могут ими активно поглощаться, накапливаться и по пищевым цепям поступать в организм человека [3]. Опасность металлов усугубляется еще и тем, что они обладают кумулятивным действием и сохраняют токсические свойства в течение длительного времени.

Тяжелые металлы оказывают самое различное пагубное действие на жизнедеятельность растений. Известно, что они подавляют рост растений путем снижения интенсивности клеточных делений, а также нарушением растяжения клеток вследствие связывания металлов с -SH группами белков клеточных стенок. Накопление тяжелых металлов приводит к угнетению развития растений, задержке их фенологических фаз [4].

Целью работы стало изучение влияния тяжелых металлов (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) на всхожесть и морфометрические показатели овса посевного (*Avena sativa*)

### Материал и методы исследования

Материалом для исследований стали проростки овса посевного, как часто используемый в биотестировании объект. Среди тяжелых металлов было решено выбрать пары элементов: медь, цинк; железо, марганец; свинец и кадмий. Приведенные металлы взяли в виде кристаллогидратов сульфатов Cu, Zn, Fe, Mn, Cd: CuSO4\*5H2O, ZnSO4\*7H2O, FeSO4\*7H2O, MnSO4\*5H2O, 3CdSO4\*8H2O и ацетата свинца: Pb(CH3COO)2\*3H2O. Выбор ацетата свинца связан с его растворимостью в воде, в отличие от сульфата, поэтому его использование должно гарантировать переход металла в ткани растений. Сульфат ионы, в отличие от хлоридов и нитратов являются более инертными, и не вызывают существенных пагубных или стимулирующих эффектов.

Для выращивания растений использовалась органогенная почва (торфосодержащий грунт) и минеральная почва (отмытый речной песок). Такой выбор был обусловлен различными механизмами удерживания ионов металлов в толще грунта. Уровень загрязнения почв Сu, Zn и Mn был выбран на отметке в 2 предельно допустимые концентрации (ПДК) по валовому содержанию этих элементов в почве [1]. Для Fe, в силу отсутствия такого норматива, было принято вносить его в количестве, равном количеству Mn. Вносимые количества Pb и Cd были установлены на уровне в 2 ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) по валовому содержанию этого металла в почве (260 мг/кг для Pb и 4 мг/кг для Cd) [2]. Выбор ориентировочно допустимой концентрации обусловлен тем, что фоновые содержания свинца в почвах часто превышают установленное значение ПДК в 30 мг/кг [1], а значение ПДК для Cd не установлено. Навески сульфатов (в пересчете на количество элемента) в виде порошка тщательно перемешивали с почвой, а затем помещали в нее семена овса.

В таблице отображены концентрации вносимых загрязнителей и варианты эксперимента.

В каждом из III экспериментов были поставлены контрольный вариант без внесения поллютантов в почву, моноопыт (O1, O2) – где вносился только 1 исследуемый металл и

вариант комбинированного действия металлов (O3) – где вносились попарно Cu+Zn, Fe+Mn и Pb+Cd в I, II и III эксперименте соответственно

Таблица 1 Концентрации вносимых загрязнителей в модельных экспериментах

Тип почвы	Вариант	Модельное загрязнение, мг/кг					
	опыта	Эксперимент І		Эксперимент II		Эксперимент III	
		Cu	Zn	Mn	Fe	Pb	Cd
Органогенная	К	-	-	-	-	-	-
	O1	110	-	3000	-	260	-
	O2	-	200	-	3000	-	4
	О3	110	200	3000	3000	260	4
Минеральная	К	-	-	-	-	-	-
	O1	110	-	3000	-	260	-
	O2	-	200	-	3000	-	4
	О3	110	200	3000	3000	260	4

Каждый вариант опыта ставился в 10 параллелях, в каждой параллели использовалось для посева 30 семян овса. Объем емкости для выращивания растений составлял около 0,4 дм<sup>3</sup>. Растения росли в равных условиях по освещенности и температуре. Эксперимент длился две недели. Каждые два дня проростки поливали отстоянной водой. Полученные результаты были подвергнуты статистической обработке с использованием программного обеспечения Statistica 10.

## Результаты исследования и их обсуждение

В эксперименте I на всхожесть семян овса в органогенной почве большое влияние оказывало присутствие ионов  $Cu^{2+}$ : в варианте O1 она была снижена почти на 50% по сравнению с контрольным вариантом (рис. 1, а). Действие цинка (O2) оказалось менее выраженным по сравнению с медью, но относительно контроля всхожесть была тоже значительно снижена. В случае комбинированного действия двух металлов наблюдался отрицательный синергетический эффект (антагонизм) по сравнению с моноопытами: всхожесть семян угнеталась в меньшей степени.

В аналогичном опыте с минеральной почвой наблюдалась другая картина (рис. 1, б). На первых сроках эксперимента (3 и 5 день) совместное действие Си и Zn повышало всхожесть семян по сравнению с контролем. Однако к концу эксперимента данный эффект исчез. Как известно из литературы, Си и Zn являются важными микроэлементами для растений. Поэтому можно предположить, что на первых этапах эксперимента содержание

металлов в растениях было небольшим, и оно стимулировало жизнедеятельность растений. Однако к концу эксперимента содержание тяжелых металлов в растениях увеличилось, и стимуляция исчезла.

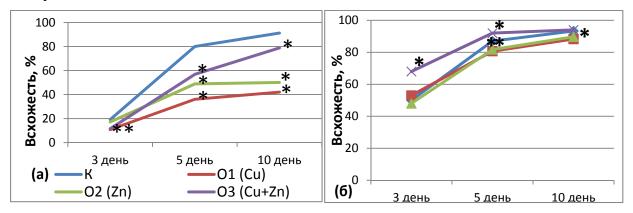


Рис. 1. Всхожесть семян овса в загрязненной Cu и Zn органогенной (а) и минеральной (б) почве

\*- статистически достоверные различия между контролем и вариантом опыта (при Р  $\leq 0.05$ )

Для эксперимента II отмечалось негативное воздействие Fe на всхожесть: наблюдалось снижение всхожести на 15%, по сравнению с контрольным вариантом. Негативного действия Мn в моноопыте на всхожесть семян в органогенной почве выявлено не было (рис .2, а).

В аналогичном опыте с минеральной почвой с Fe и Mn снижение всхожести к концу эксперимента также не наблюдалось (рис. 2, б).

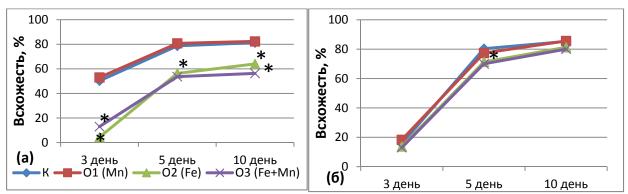


Рис. 2. Всхожесть семян овса, выращенного на загрязненной Fe и Mn органогенной (а) и минеральной (б) почве, %

В эксперименте III на третий день эксперимента было обнаружено небольшое повышение всхожести в органогенной почве в вариантах О1 и О2 на 5-6%, что является проявлением стресса для проростков овса (рис. 3). К концу эксперимента всхожесть в этих вариантах не отличалась от контрольного значения. В варианте О3 она была снижена на

20%, что, вероятно, связано со взаимодействием Pb и Cd. В минеральной почве снижения всхожести не наблюдалось (рис. 3, б).

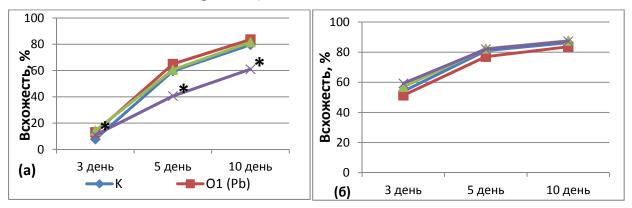


Рис. 3. Всхожесть семян овса, выращенного на загрязненной Рb и Cd органогенной почве (а) и минеральной почве (б), %

Полученная картина коррелирует с результатами, полученными ранее по Cu, Zn, Fe и Mn и объясняется тем, что в органогенной почве металлы вступают в комплексообразование с гумусовыми кислотами, при недостатке минерального питания всхожесть снижается, а в минеральной почве металлы могут переходить в ткани овса практически беспрепятственно, блокирования питания не происходит.

Взаимное влияние металлов в органогенной почве показало, что взаимное действие Cu и Zn на всхожесть является антагонистическим, Pb и Cd – синергическим, а во взаимном влиянии Fe и Mn преобладает эффект воздействия Fe, несмотря на одинаковые вносимые количества. Полученный результат, вероятно, связан с механизмами взаимодействия транслокации металлов:  $Cu^{2+}$  и  $Zn^{2+}$  совместно вступают в процессы комплексообразования, что приводит к уменьшению связанной доли металлов. Для  $Pb^{2+}$  и  $Fe^{2+}$  это также характерно, в то время как для  $Cd^{2+}$  и  $Mn^{2+}$  реакции комплексообразования не столь значимы, соответственно конкуренция в химических процессах почвы выражена слабее, как следствие, регистрируется синергический эффект.

Анализ морфометрических показателей овса показывает, что наибольшее влияние тяжелые металлы оказывают на корневую систему растений: количество корней и их длина была значительно снижена (до 30% и 50% соответственно) при действии Си и Zn по сравнению с контрольным вариантом (рис. 4). В варианте с совместным действием двух металлов наблюдается синергизм по сравнению с моноопытами. Более выраженное токсическое воздействие металлов на корневую систему легко объясняется тем, что корни находятся в непосредственном контакте с поллютантом и обладают высокой аккумулятивной способностью. Известно, что корни блокируют поступление токсичных веществ в растение путем хелатирования металлов в клетках [18]. О высокой чувствительности корней в ответ на антропогенное загрязнение сообщается в работе [5].

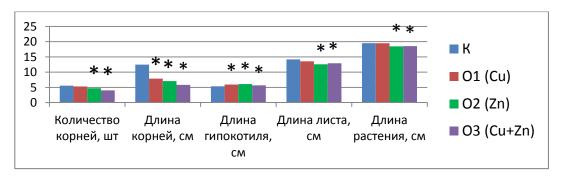


Рис. 4. Морфометрические показатели овса, выращенного на загрязненной Сu и Zn органогенной почве

В меньшей степени воздействие тяжелых металлов сказывается на длине листа и длине растения: в вариантах О2 (Zn) и О3 (Zn) она уменьшается по сравнению с контролем на 5-15%. В случае с вариантом О1 статистически достоверных различий с контролем выявить не удалось. Меньшее токсическое воздействие тяжелых металлов на надземную часть растений может быть связано с двумя факторами: с меньшим транслокационым переносом токсикантов из подземной части растения, а также с различной активностью антиоксидантных систем в разных частях растения.

Увеличение длины гипокотиля, как в проведенном эксперименте, обычно происходит при недостатке света, но в ходе опыта свет между растениями был распределен равномерно, что говорит о способности тяжелых металлов усиливать рост гипокотиля и вытягивать проростки овса.

В эксперименте с использованием минеральной почвы токсический эффект от присутствия тяжелых металлов в целом выражен слабее (рис. 5). Корневая система растений также претерпевает угнетение, но в меньшей степени. Длина надземной части растений при действии тяжелых металлов практически не отличалась от контрольного варианта и находилась в пределах погрешности опыта.

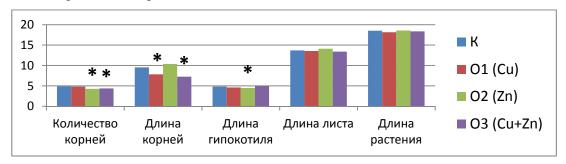


Рис. 5. Морфометрические показатели овса, выращенного на загрязненной Сu и Zn минеральной почве

Анализ морфометрических показателей овса, выращенного в органогенной почве в эксперименте II, показал, что наибольшее влияние Fe и Mn оказывают на корневую систему

растений: количество корней и их длина была значительно снижена, как и в эксперименте I до 30% и 50% соотвественно (рис. 6, 7).

Несмотря на то, что длина корней при загрязнении минеральной почвы Fe и Mn была снижена в 3 раза и более, их количество увеличивалось по сравнению с контролем на 10-15%, что говорит о попытке растений компенсировать качественную деградацию корневой системы количественным путем.

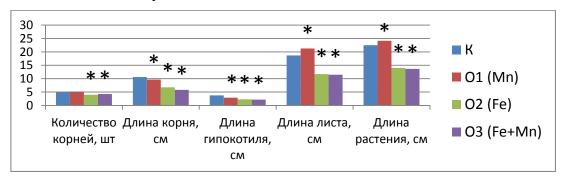


Рис. 6. Морфометрические показатели овса, выращенного на загрязненной Fe и Mn органогенной почве

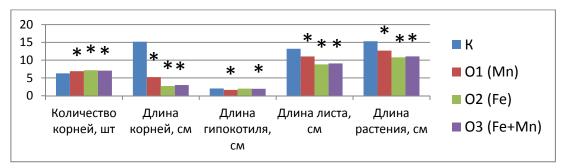


Рис. 7. Морфометрические показатели овса, выращенного на загрязненной Fe и Mn минеральной почве

Действие Fe и Mn на надземную часть растений также было выражено: длина гипокотиля, листа и растений снижались на 30-60%,. Однако стоит отметить, что внесение Mn в органогенную почву в моноопыте O1 стимулировал рост листа и растения на 10-15%, что свидетельствует о том, что Mn является биогенным элементом и может выполнять ряд важных функций в жизнедеятельности растений.

Также обращает на себя внимание, что действие металлов в комбинированном варианте ОЗ (Fe+Mn) отличалось только от моноопыта О1 (Mn) и практически не отличалось от моноопыта О2 (Fe). Это явно указывает на большее негативное воздействие Fe, по сравнению с Mn на морфометрические показатели растений.

В целом, в эксперименте с минеральной почвой подземная часть растений была угнетена в большей степени, по сравнению с органогенной почвой, а надземная часть, наоборот, в меньшей степени, что может указывать на более неравномерное распределение металлов по органам растений.

Ниже представлена картина по всем морфометрическим показателям в эксперименте III (рис. 8, 9). Как и в ранее проведенных исследованиях, наибольшее влияние отмечается на корневую систему: количество корней и длина корней снижались в диапазоне от 5 до 45%. В варианте ОЗ в эксперименте с органогенной почвой наблюдалось увеличение длины корней, вероятно, для компенсации уменьшения их количества.

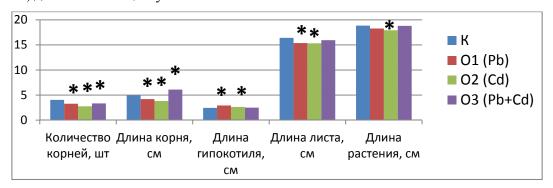


Рис. 8. Морфометрические показатели овса, выращенного на загрязненной Рb и Cd органогенной почве

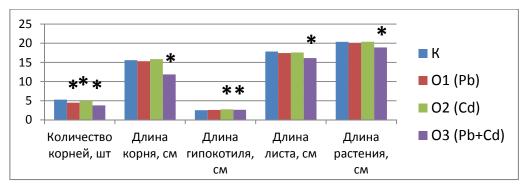


Рис. 9. Морфометрические показатели овса, выращенного на загрязненной Рb и Cd минеральной почве

Длина листа и растения также снижалась, но только на 7-10%. Под действием Рb и Cd проростки овса вытягивались, возможно, для образования новых придаточных корней, что зафиксировано по возросшей на 5 - 20% длине гипокотиля.

### Заключение

Таким образом, тяжелые металлы (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) снижают всхожесть семян овса в органогенной почве до 50% по сравнению с контролем, в минеральной почве такого эффекта зарегистрировано не было в связи с отсутствием блокирования питания проростков. Изучение морфометрических показателей растений показало, что тяжелые металлы подавляют морфофизиологическое развитие растений. Наибольшее влияние они оказывают на корневую систему растений, надземная часть растений была угнетена в меньшей степени. Была обнаружена способность металлов влиять на рост гипокотиля – подавлять его (Fe, Mn) или вытягивать проростки (Cu, Zn, Pb, Cd). В эксперименте с минеральной почвой изменение морфометрических показателей было менее выраженным, что коррелирует с

вышеописанными результатами по всхожести семян и, вероятно, связано с питанием проростков. Наиболее сильное среди изученных металлов действие на морфометрические показатели было обнаружено у Fe, что также может быть связано с высоким сродством этого элемента к комплексообразованию.

# Список литературы

- 1. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почвах. Постановление главного санитарного врача РФ от 23.01.2006 №1. М., 2006. 8 с.
- 2. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2511-09. Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. Постановление главного санитарного врача РФ от 18.05.2009 №32. М. 2009. 7 с.
- 3. Каббата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 440 с.
- 4. Петухова Г.А. Механизмы устойчивости организмов к нефтяному загрязнению среды. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2008. 172 с.
- 5. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с.