



УДК 502.55

НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ (Cu, Zn) В БИОМАССЕ *BRASSICA JUNCEA* (L.) И *HORDEUM VULGARE* (L.) ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ НА ЗАГРЯЗНЁННОЙ ПОЧВЕ^{1,2}

Н.П. Неведров¹, Е.П. Проценко¹,
Н.Ю. Неведрова², А.Л. Белоконов¹,
А.С. Анненков¹, С.Ю. Миронов¹

¹ Курский государственный университет, Россия, 305000, г. Курск, ул. Радищева, 33

² Средняя общеобразовательная школа № 47, Россия, 305045, г. Курск, 7-й Промышленный переулок, 9
E-mail: 9202635354@mail.ru

Представлены данные по аккумуляции меди и цинка органами культурных растений при выращивании их на загрязненном тяжелыми металлами черноземе типичном. Отмечено, что при полиэлементном загрязнении почвы цинком и медью аккумулирующая способность растений *Brassica juncea* (L.) и *Hordeum vulgare* (L.) выше, чем при моноэлементном загрязнении чернозема типичного этими металлами.

Ключевые слова: фиторемедиация, горчица сарептская, ячмень обыкновенный, тяжелые металлы, загрязнение почвы, транслокационный фактор, биологический вынос.

Введение

Мощная антропогенная нагрузка на урбоэкосистемы привела к тому, что почвы подавляющего большинства городов токсичны. Депонирование в почве различных антропогенных токсикантов является следствием выбросов загрязняющих веществ, различного рода промышленными предприятиями и автотранспортом. Приоритетными загрязнителями почв урбоэкотопов являются тяжелые металлы (ТМ) [1–4]. При высоких концентрациях в окружающей среде ТМ влекут за собой необратимые последствия, но в малых дозах являются необходимыми микроэлементами для жизнедеятельности живых организмов.

Одним из перспективных методов очистки почв от ТМ является фиторемедиация – детоксикация почв с использованием высших растений [2, 4–7]. Основой данного метода является способность некоторых растений к сверхаккумуляции ТМ в своей биомассе.

Поступают ТМ в растения, главным образом через корни в виде ионов, хелатов или комплексов и включаются в растительную массу или накапливаются в вакуолях [6, 8, 9]. Растения, обладающие способностью к поглощению большого количества ТМ и устойчивостью к высоким концентрациям ТМ в почве, называют гипераккумуляторами [10]. Одним из таких растений является горчица сарептская, которая способна накапливать в клетках и межклеточном пространстве, в расчете на сухую массу, до 1.7% Zn и до 0.6% Cu [5]. Аккумулирующая способность ТМ ячменем обыкновенным малоизучена, но в некоторых источниках отмечается высокая фитоэкстракционная способность ячменя в отношении к ТМ [11].

Объекты и методы исследования

В работе рассматривается способность растений горчицы сарептской *Brassica juncea* (L.) и ячменя обыкновенного *Hordeum vulgare* (L.) к аккумуляции цинка и меди при выращивании их на загрязненном этими металлами черноземе типичном. В ходе исследования использовалась модель мелкоделяночного полевого опыта. Были заложены экспериментальные площадки размером 25×25 см, защитная полоса между площадками составляла 50 см. Было смоделировано искусственное моно- и полиэлементное загрязнение почвы делянок медью и цинком, соответствующее низкому, среднему и высокому уровням загрязнения почв. В почву опытных делянок вносились тяжелые металлы медь и цинк одновременно и по отдельности, в виде CuSO₄*5H₂O и ZnSO₄ X 7H₂O в дозах 1, 2, и 10 ОДК (110, 220, 1100 мг/кг для цинка и 66, 132, 660 мг/кг для меди) (табл. 1) [12].

В качестве контроля использовали незагрязненную ТМ почву. Фоновое содержание в почве цинка составляло 29 мг/кг, меди – 9.2 мг/кг. В почвы контрольных делянок с фоновым содержанием цинка и меди (31 и 14 мг/кг) поллютанты не вносились. По истечению трех недель с момента загрязнения производили посадку семян горчицы сарептской и ячменя

¹ Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных (проект МК-2293.2013.4).

² НИР выполнена при поддержке гранта Фонда содействия развитию «УМНИК 1-05-2014» (договор №0005764).



обыкновенного (три повторения для каждого вида растения). Укос побегов горчицы проводился в период массового цветения растений, ячменя в период колошения.

Измерение массовых концентраций цинка в почвенных и растительных образцах про-

водилось методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторе ТА 4. Пробоподготовка и анализ проб выполнены в соответствии с методикой МУ 31-04/04, ФЗ.1.31.2004.00986 [13]. Статистическая обработка данных производилась средствами пакета STATGRAPHICS Plus for Windows 2.1.

Таблица 1
Модель закладки мелкоделяночного эксперимента

№ Варианта опыта	ТМ загрязнитель	Доза загрязнения, ОДК (валовое содержание)	Количество внесенного в почву металла, мг/кг	
			Zn	Cu
1	-	Контроль	Не вносили	
2	Zn	1	110	-
3	Zn	2	220	-
4	Zn	10	1 100	-
5	Cu	1	-	66
6	Cu	2	-	132
7	Cu	10	-	660
8	Zn + Cu	1	110	66
9	Zn + Cu	2	220	132
10	Zn + Cu	10	1 100	660

Результаты и их обсуждение

В ходе проведенного опыта отмечалось отсутствие всхожести семян горчицы и ячменя в вариантах опыта с моно- и полиэлементным загрязнением почвы ионами меди при дозе загрязнения 660 мг/кг. Данная концентрация ТМ в почве является фактором, ингибирующим прорастание семян.

При изучении влияния полиэлементного загрязнения цинком и медью на аккумуляцию этих металлов растениями горчицы и ячменя установлено, что при моноэлементном загрязнении почвы ионами меди содержание металла в корнях и побегах растений ячменя и горчицы возрастает с увеличением содержания поллютанта в почве от фонового, до 2 ОДК (табл. 2).

Таблица 2
Зависимость содержания цинка и меди в органах растений от степени загрязнения почвы при моноэлементном загрязнении, изменение транслокационного фактора (ТФ) у растений

Растение	ТМ	Органы растений	Доза внесенных загрязнителей, ОДК в.ф.				Корреляция	НСР ₀₅
			Контроль (фон)	1 ОДК	2 ОДК	10 ОДК		
Горчица сарептская	Cu	Корни	6.2±0.05	11.6±0.14	17.0±0.08	-	0.99	0.31
		Побеги	4.7±0.05	13.0±0.14	10.0±0.15	-	0.57	0.27
		ТФ	0.8	1.2	0.6	-		
	Zn	Корни	31.0±0.3	23.0±0.1	52.0±0.4	120.0±0.4	0.97	1.19
		Побеги	31.0±0.5	46.0±0.3	40.0±0.1	76.0±0.7	0.96	1.77
		ТФ	1.0	2.0	0.8	0.6		
Ячмень обыкновенный	Cu	Корни	4.1±0.03	10.1±0.15	8.6±0.12	-	0.68	0.49
		Побеги	2.7±0.05	7.9±0.03	5.7±0/12	-	0.52	0.36
		ТФ	0.7	0.8	0.7	-		
	Zn	Корни	13.1±0.6	40.0±0.3	58.0±0.3	390.0±0.3	0.99	1.67
		Побеги	10.0±0.6	31.0±0.1	63.0±0.4	121.0±0.4	0.95	1.78
		ТФ	0.8	0.8	1.1	0.3		

При моноэлементном загрязнении почвы цинком концентрация металла в побегах горчицы также возрастает с увеличением его содержания в почве, но в корнях наблюдается снижение содержания цинка в варианте опыта с дозой отдельно внесенного в почву цинка 1 ОДК. У ячменя при увеличении содержания цинка в почве отмечен рост содержания металла в корнях и побегах. В вариантах опыта с моноэлементным загрязнением почвы цинком (доза 1 ОДК) и медью (доза 1 ОДК) у горчицы сарептской выявлено увеличение скорости транспорта ТМ из корней в побеги. Транслокационный фактор больше единицы для обоих металлов. У растений ячменя транслокационный фактор не превышал единицы практически во всех вариантах опыта. Исключением является вариант опыта с загрязнением цинком дозой 2 ОДК, где ТФ равен 1.1.

При увеличении концентрации ТМ в почве от 1 ОДК до 2 ОДК у горчицы сарептской наблюдается снижение миграции ТМ из корней в побеги. Содержание и меди, и цинка в кор-



нях заметно выше, чем в побегах (см. табл. 2). У растений ячменя скорость транспорта цинка значительно падает при увеличении загрязнения почвы до 10 ОДК (1100 мг/кг). Интенсивность переноса меди снижается при дозе загрязнения почвы равной 2 ОДК. По-видимому, концентрации загрязнителей, при которых происходит торможение их транспорта в побеги растений, являются порогами токсичности. Данный эффект обусловлен активацией физиологических барьеров, находящихся на границе «корень-побег» [5].

Динамика аккумулирующей способности горчицы сарептской, по отношению к изучаемым металлам при полиэлементном загрязнении почвы схожа с таковой при моноэлементном загрязнении. Необходимо отметить, что содержание ТМ в побегах и корнях горчицы при полиэлементном загрязнении достоверно выше, чем при моноэлементном ($P=0.05$) (табл. 3).

Таблица 3
Зависимость содержания цинка и меди в органах растения от степени загрязнения почвы при полиэлементном загрязнении, изменение транслокационного фактора (ТФ) растений

Растение	ТМ	Орган растения	Доза загрязнения почв, ОДК			Корреляция	НСР ₀₅
			Фон	1 ОДК	2 ОДК		
Горчица сарептская	Cu	Корни	6.2±0.05	34.0±0.4	53.0±0.4	0.99	0.87
		Побеги	4.7±0.05	47.0±0.1	20.0±0.2	0.35	0.81
		ТФ	0.8	1.4	0.4		
	Zn	Корни	31.0±0.08	63.0±0.3	135.0±0.4	0.97	0.91
		Побеги	31.0±0.21	120.0±0.6	87.0±0.3	0.62	1.22
		ТФ	1.0	1.9	0.7		
Ячмень обыкновенный	Cu	Корни	4.1±0.03	12.4±0.2	9.4±0.1	0.62	0.83
		Побеги	2.7±0.05	7.9±0.1	6.5±0.08	0.70	0.36
		ТФ	0.6	0.6	0.7		
	Zn	Корни	13.1±0.21	89.3±0.1	67.1±0.4	0.68	1.14
		Побеги	10.0±0.17	66.0±0.2	46.2±0.4	0.63	1.28
		ТФ	0.8	0.7	0.7		

Максимальное содержание Zn в побегах горчицы установлено в варианте опыта с дозой 1 ОДК одновременного загрязнения цинком и медью (110 и 66 мг/кг). Оно составило 120 мг/кг, что в 3.9 раза выше данного показателя на контроле и в 2.6 раза выше, чем в варианте опыта при моноэлементном загрязнении почвы цинком дозой 1 ОДК. В этом же варианте опыта зафиксировано максимальное содержание Cu в побегах горчицы – 47 мг/кг, что в 10 раз выше данного показателя на контроле и в 3.6 раза выше, чем при моноэлементном загрязнении почвы медью дозой 1 ОДК. В варианте опыта с уровнем загрязнения 2 ОДК (Zn+Cu), наблюдался максимум содержания ТМ в корневой системе горчицы сарептской. Для цинка он составил 135 мг/кг, для меди – 53 мг/кг, что в 4.3 и 8.5 раза выше, чем на контроле и соответственно в 2.5 и 3.1 раза выше, чем в вариантах опыта с моноэлементным загрязнением почвы (2 ОДК Zn и 2 ОДК Cu – раздельное внесение).

Аккумуляция меди ячменем обыкновенным при полиэлементном загрязнении почвы аналогична таковой при моноэлементном загрязнении. Содержание меди в побегах и корнях ячменя выращенного на почве с полизагрязнениями ТМ имеют схожие значения с растениями ячменя, выращенными на почве с монозагрязнителем медью.

Содержание цинка в корнях и побегах ячменя при повышении уровня загрязнения почвы от 1 до 2 ОДК заметно снижается. Но в целом накопление металла органами ячменя при невысоком уровне полиэлементного загрязнения почвы выше, чем при аналогичном моноэлементном.

Максимум содержания цинка в корнях и побегах ячменя отмечен в варианте опыта с дозой отдельно внесенного цинка 1100 мг/кг. И равнялся – 390 и 121 мг/кг, что в 29.7 и 12.1 соответственно, выше, чем на контроле. Самая высокая концентрация меди в корнях ячменя – в 3.04 раза выше контрольных образцов и в 1.2 раза выше, чем при моноэлементном загрязнении медью, наблюдалась в варианте опыта при одновременном загрязнении цинком и медью дозами 10 ОДК. В этом же варианте опыта отмечена наивысшая концентрация Cu в побегах ячменя обыкновенного 7.9 мг/кг – в 2.9 раза выше, чем на контроле.

В результате статистической обработки экспериментальных данных мы получили эмпирические модели зависимости концентрации цинка и меди в корнях горчицы сарептской от их содержания в почве, которые описываются следующими уравнениями (рис. 1).

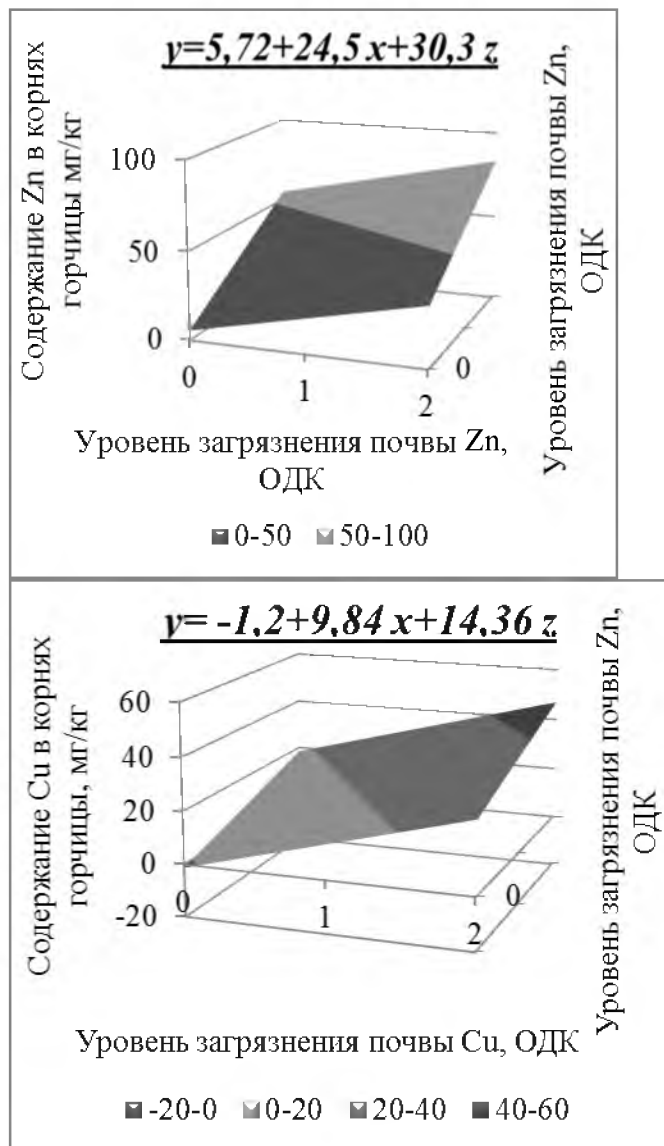


Рис. 1. Модели расчета концентраций цинка и меди в корнях горчицы сарептской

У горчицы сарептской наблюдалась обратная зависимость между длиной побегов и содержанием ТМ в почве. Самые высокие растения были на контроле. Самые низкие побеги наблюдались при моноэлементном загрязнении почвы медью. У ячменя динамика длины побегов схожа с таковой у горчицы лишь при полиэлементном загрязнении почвы. Самые высокие растения в варианте опыта с моноэлементным загрязнением почвы цинком дозой 2 ОДК, самые низкие в варианте опыта с моноэлементным загрязнением медью дозой 1 ОДК. В целом отмечено, что растения, выращенные на загрязненных цинком почвах, имеют большую длину, чем при выращивании их на почвах с медным загрязнением. Данное явление, как и рассмотренная выше урожайность побегов, свидетельствует о том, что медь для изучаемых нами растений, является более токсичным элементом, чем цинк [14] (рис. 3).

Показатели биологического выноса ТМ растениями так же указывают на то, что цинк обладает большей биологической доступностью для растений, чем медь. Вынос цинка ячменем обыкновенным и горчицей сарептской значительно превосходит результаты выноса меди данными растениями, независимо от характера и дозы загрязнения почвы (рис. 4, рис. 5).

Следует отметить, что при средних и высоких дозах моноэлементного загрязнения почвы ячмень обладает более интенсивной фиторемедиационной способностью, чем горчица, по отношению к цинку. При низких дозах загрязнения фиторемедиационная способность растений практически одинакова. Показатели выноса меди исследуемыми растениями имеют равные значения (см. рис. 4).

Наблюдение за абсолютно-сухой массой растений показало, что наибольшее накопление биомассы побегами исследуемых растений, отмечалось в почвах с фоновым содержанием металлов (контроль). При загрязнении почвы ТМ наблюдалось угнетение растений и падение урожая биомассы (рис. 2).

При полиэлементном загрязнении и при моноэлементном загрязнении почвы медью наблюдается резкое снижение биомассы при возрастании концентраций поллютантов от фонового значения до 1 ОДК, затем, при дальнейшем росте загрязнителя до 2 ОДК уменьшение биомассы имеет менее выраженный характер. При моноэлементном загрязнении чернозема цинком обратной зависимости на графике (см. рис. 2) не наблюдается. Отмечено скачкообразное увеличение биомассы при дозе 2 ОДК у горчицы и при дозе 10 ОДК у ячменя.

При полиэлементном загрязнении почвы оба растения имеют большую урожайность, чем при моноэлементном. Также стоит отметить, что на загрязненном цинком черноземе урожайность растений горчицы и ячменя выше, чем при загрязнении медью.

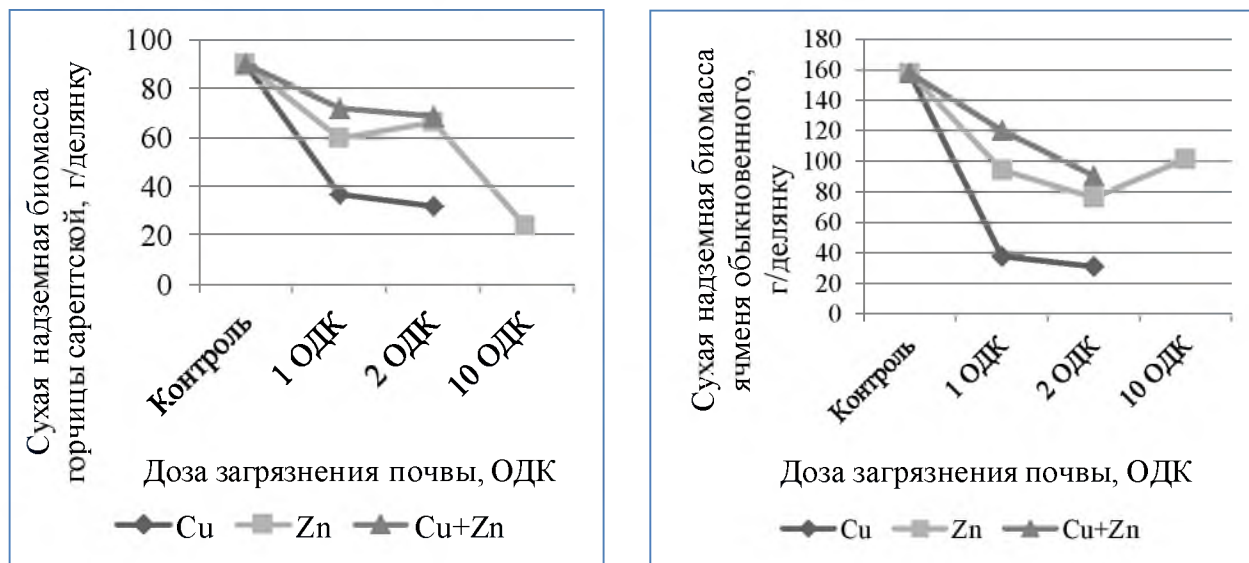


Рис. 2. Зависимость накопления надземной биомассы растениями от дозы и характера загрязнения почвы ТМ

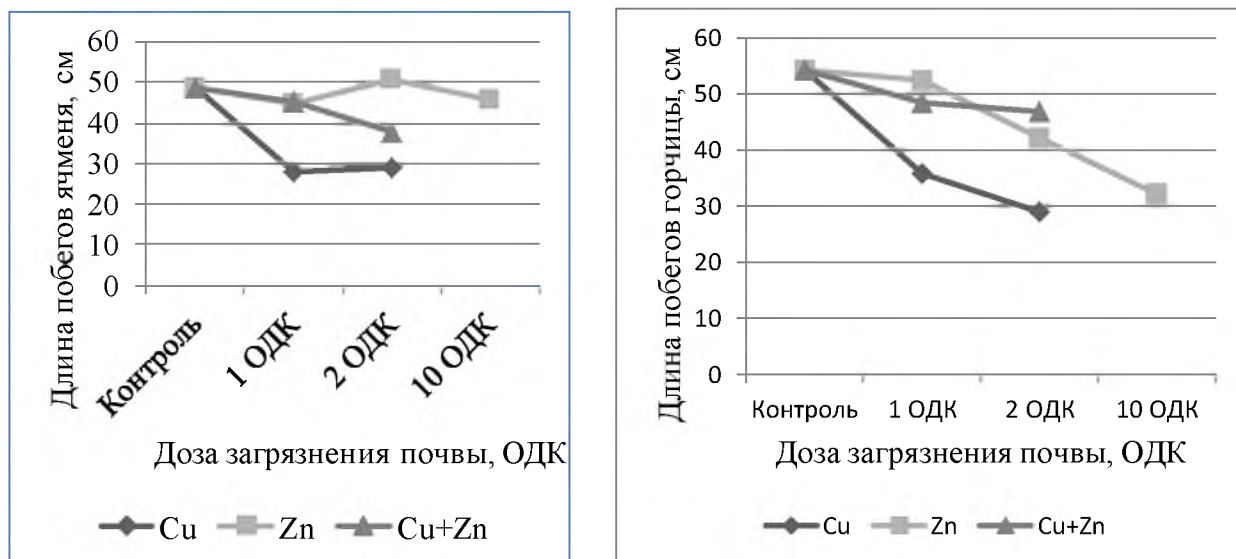


Рис. 3. Средняя длина побегов растений в зависимости от дозы и характера загрязнения почвы ТМ

Фиторемедиационная способность, проявленная горчицей по отношению к цинку и меди при полиэлементном загрязнении чернозема типичного значительно превосходит таковую у ячменя во всех вариантах опыта (см. рис 5).

Установлено, что при полиэлементном загрязнении чернозема типичного биологический вынос металлов растениями горчицы и ячменя достоверно выше, чем при моноэлементном загрязнении почвы. По-видимому, одновременное присутствие в почве высоких концентраций меди и цинка стимулирует накопление биомассы растений и поступление ТМ в органы растений.

Выводы

1. Горчица сарептская и ячмень обыкновенный являются перспективными фиторемедиаторами загрязненного цинком и медью чернозема типичного;
2. При полиэлементном загрязнении чернозема типичного цинком и медью горчица сарептская проявляет более высокую мелеоративную способность, чем ячмень обыкновенный;
3. При моноэлементном загрязнении чернозема типичного большим биологическим выносом металлов из почвы обладает культура ячменя.

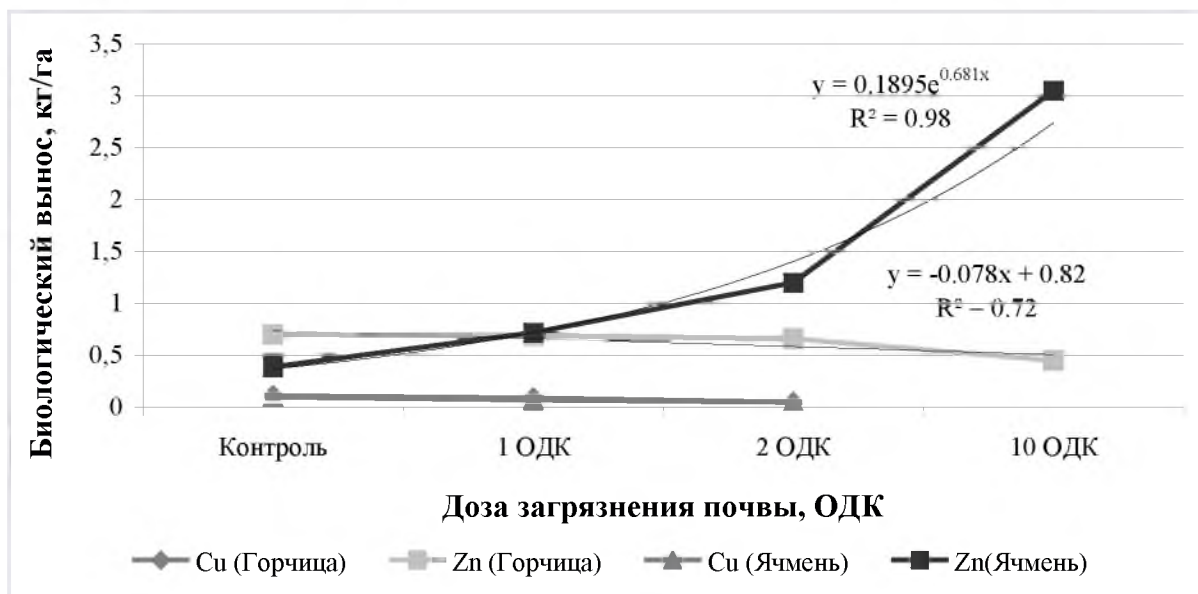


Рис. 4. Зависимость выноса ТМ побегами растений от дозы моноэлементного загрязнения почвы (примечание: графики ¹Cu (Горчица) и ²Cu (Ячмень) практически совпадают, различия данных недостоверны)

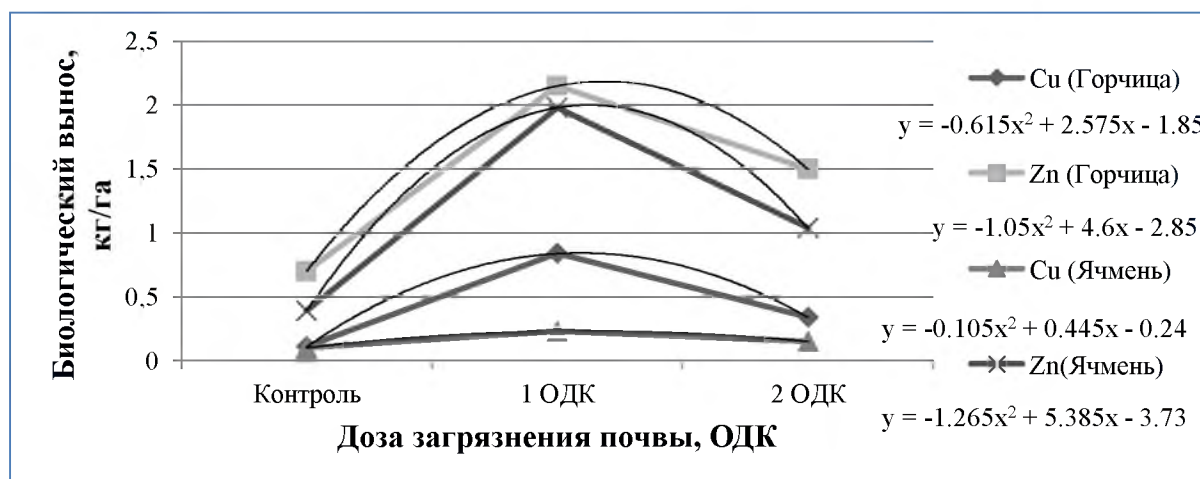


Рис. 5. Зависимость выноса ТМ побегами растений от дозы полиэлементного загрязнения почвы

Список литературы

1. Неведров Н.П., Проценко Е.П. Фитоэкстракция цинка растительностью урбоэкотопов города Курска в сравнении с культурными растениями [Электронный ресурс] // Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета. – 2013. – №4. – Режим доступа: <http://www.scientific-notes.ru/pdf/033-005.pdf>.
2. Неведров Н.П., Проценко Е.П., Кузнецов А.Е. Использование ячменя обыкновенного *Hordeum vulgare* (L.) в целях фиторемедиации // Теоретические и практические аспекты естественных и математических наук: материалы международной заочной научно-практической конференции (24 декабря 2012г.) – Новосибирск: Изд. «СибАК», 2012. – С. 115–120.
3. Регулирование ремедиационной способности горчицы сарептской *Brassica juncea* (L.) в отношении к цинку [Электронный ресурс] / Н.П. Неведров, Е.П. Проценко, П.Л. Медянцева, А.В. Пученкова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013б. – Т. 15. – № 3. – С. 108–111 – Режим доступа: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2013/2013_3_108_111.pdf.



4. Проценко Е.П., Неведров Н.П. Способность к фитоэкстракции цинка горчицей сарептской *Brassica juncea* (L.) при разных уровнях загрязнения черноземной и серой лесной почвы [Электронный ресурс] // Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета. – 2013. – №1 (25). – 5 с. – Режим доступа: <http://www.scientific-notes.ru/pdf/029-038.pdf>
5. Метаболизм антропогенных токсикантов в высших растениях / Г.И. Квеситадзе, Г.А. Хатисашвили, Т.А. Садунишвили, З.Г. Евстигнеева. – М.: Наука, 2005. – 199 с.
6. Маркарова Е.Н. Физиология корневого питания растений. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 103 с.
7. Устойчивость растений к тяжелым металлам / А.Ф. Титов, В.В. Таланова, Н.М. Казнина, Г.Ф. Лайндинен. – Институт биологии КарНЦ РАН, Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – 172 с.
8. Барбер С.А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. – М.: Агропромиздат, 1988. – 376 с.
9. Якушкина Н.И., Бахтенко Е.Ю. Физиология растений – М.: Владос, 2004. – 464с.
10. Прасад М.Н. Практическое использование растений для восстановления экосистем, загрязненных металлами // Физиология растений. – 2003. – Т. 50. – № 5. – С. 768–780.
11. Яковишина Т.Ф. Детоксикация загрязненных тяжелыми металлами черноземов обыкновенных северной Степи Украины : дис. ... канд. с.-х. наук: 03.00.16. – Днепропетровск, 2006. – 226 с.
12. ГН 2.1.7.020–94. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов и мышьяка в почвах. – М. Госкомсанэпиднадзор, 1995. – С. 5–6.
13. МУ 31–11/05 Количественный химический анализ проб почв, тепличных грунтов, илов, донных отложений, сапропелей, твердых отходов. Методика выполнения измерений массовых концентраций цинка, кадмия, свинца, меди, марганца, мышьяка, ртути методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторах типа ТА. ФР.1.34.2005.02119. ПНД Ф 16.1:2:2:3.48–06. – Томск : Изд-во ТПУ, 2005. – 43 с.
14. Водяницкий Ю.Н. Об опасных тяжелых металлах/металлоидах в почвах // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – М., 2011. – Вып. 68. – с. 56–81.

THE ACCUMULATION OF HEAVY METALS (CU, ZN) IN THE BIOMASS OF BRASSICA JUNCEA (L.) AND HORDEUM VULGARE (L.) WHEN GROWN ON CONTAMINATED SOIL

**N.P. Nevedrov¹, E.P. Protsenko¹,
N.Y. Nevedrova², A.L. Belokon¹,
A.S. Annenkov¹, S.Y. Mironov¹**

¹ *Kursk State University, 33 Radishchev St, Kursk, 305000, Russia*

² *The Municipal Educational Institution "Secondary school № 47", 9 7th Industrial lane, Kursk, 305045, Russia
E-mail: 9202635354@mail.ru*

Data on copper and zinc accumulation by bodies of cultural plants at their cultivation on the typical chernozem polluted with heavy metals are presented. It is noted that at polyelement pollution of the soil with zinc and copper heat-sink ability of plants of *Brassica juncea* (L.) and *Hordeum vulgare* (L.) is higher, than at monoelement pollution of the typical chernozem with these metals.

Key words: fitoremediation, *Brassica juncea*, *Hordeum vulgare*, heavy metals, soil pollution, translocational factor, biological carrying out.