

УДК 632.15

Поступление Zn и Cd из почвы в травянистые растения семейств Астровые (Asteraceae) и Мятликовые (Poaceae)

¹Чаплыгин В.А., ^{1,2}Бауэр Т.В., ¹Барахов А.В., ¹Черникова Н.П.,
¹Манджиева С.С., ¹Минкина Т.М.

¹Академия биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, e-mail: tminkina@mail.ru

²Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: bauertatyana@mail.ru

Аннотация:

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами является одной из наиболее актуальных проблем современной экологии. Тяжелые металлы не подвержены биодegradации и имеют свойство перемещаться по пищевой цепочке, угрожая, тем самым, здоровью животных и человека. Цель работы – изучение аккумуляции Cd и Zn в различных видах дикорастущих травянистых растений семейств Астровые (Asteraceae) и Мятликовые (Poaceae) в условиях многолетнего техногенного загрязнения. Проведен экологический мониторинг импактной зоны г. Новочеркаска, подверженной многолетнему техногенному загрязнению. В растениях, произрастающих в 5 км зоне вокруг Новочеркасской ГРЭС, выявлено загрязнение изучаемыми элементами. Наибольшему загрязнению подвержены почвы площадок мониторинга, расположенных на векторе преобладающего северо-западного направления ветров. Установлена зависимость содержания Zn и Cd в травянистых растениях семейств Астровые (Asteraceae) и Мятликовые (Poaceae) от расстояния до источника техногенной нагрузки. Выявлена селективность накопления металлов изучаемыми видами травянистых растений при различных уровнях техногенного загрязнения. Растения семейства Астровые накапливают изучаемые элементы преимущественно в надземной части, Мятликовые характеризуются большей аккумуляцией металлов в корневой системе. Наименее устойчивым к поступлению поллютантов из почвы растением является тысячелистник благородный. Мятлик луговой обладает наибольшей устойчивостью к загрязнению Zn и Cd по совокупности показателей оценки. Cd обладает заметно большей подвижностью в почвах, чем Zn, что обуславливает более высокий уровень загрязнения растений данным элементом. Гранулометрический состав почвы также оказывает значительное влияние на доступность металлов растениям.

Ключевые слова: тяжелые металлы, техногенное загрязнение, растения, аккумуляция, максимальный допустимый уровень, барьерная функция.

Entry of Zn and Cd from soil into herbaceous plants of the Asteraceae and Poaceae families

¹Chaplygin V.A., ^{1,2}Bauer T.V., ¹Barakhov A.V., ¹Chernikova N.P., ¹Manjieva S.S., ¹Minkina T.M.

¹*Academy of biology and biotechnology. D.I. Ivanovsky Southern Federal University, Rostov-on-don, e-mail: tminkina@mail.ru*

²*Southern scientific center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-don, Russia, e-mail: bauertatyana@mail.ru*

Abstract:

Environmental heavy metals pollution is one of the most pressing problems of nowadays ecology. Heavy metals are not subject to biodegradation and tend to move along the food chain, thereby threatening the animals and humans health. The aim of the work was to study Cd and Zn accumulation in different wild-growing herbaceous plants species of the Asteraceae and Poaceae families under long-term technogenic pollution. Ecological monitoring of the impact zone of the city of Novocherkassk, subjected to many years of technogenic pollution, was carried out. In plants growing in a 5 km zone around Novocherkasskaya power station, contamination with the studied elements was revealed. The soils of monitoring sites located in the prevailing north-west direction of winds are subject to the greatest pollution. The dependence of the content of Zn and Cd in the herbaceous plants of the Asteraceae and Poaceae families on the distance to the source of the technogenic load was established. The selectivity of metal accumulation by the studied species of herbaceous plants at various levels of technogenic pollution was revealed. Plants of the Asteraceae family accumulate the studied elements mainly in the aboveground part, Poaceae are characterized by a greater accumulation of metals in the root system. The least resistant to the input of pollutants from the soil is the *Achillea nobilis*. *Poa pratensis* has the highest resistance to Zn and Cd pollution by the combination of assessment indicators. Cd has a higher mobility in soils than Zn, which leads to a higher level of plant pollution with this element. The particle size distribution of the soil also has a significant effect on the availability of metals to plants.

Keywords: heavy metals, technogenic pollution, plants, accumulation, maximum permissible level, barrier function.

Введение

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами (ТМ) является одной из актуальнейших проблем нашего времени. Данные поллютанты распространены всюду, где присутствуют промышленные предприятия или городская инфраструктура. Выбросы предприятий химической и энергетической промышленности являются наиболее значимыми источниками поступления ТМ в окружающую среду. Среди химических

Чаплыгин В. А., Бауэр Т. В., Барахов А. В., Черникова Н. П., Манджиева С. С., Минкина Т. М., Поступление Zn и Cd из почвы в травянистые растения семейств Астровые (Asteraceae) и Мятликовые (Poaceae) // «Живые и биокосные системы». – 2019. – № 29; URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-29/article-4>

элементов тяжелые металлы являются наиболее токсичными, многие из них проявляют высокую токсичность уже в следовых количествах [2, 19]. Опасность металлов усугубляется еще и тем, что они обладают кумулятивным действием и сохраняют токсические свойства в течение длительного времени. Основное воздействие техногенного загрязнения приходится на почву – основу любой наземной экосистемы. Следующим звеном в цепи биогенной миграции элементов являются растения. Отдельного внимания заслуживают травянистые растения. Во-первых, именно травянистыми растениями представлено большинство сельскохозяйственных культур и их загрязнение представляет реальную угрозу для здоровья человека. Во-вторых, дикорастущие травянистые растения служат кормом для скота и лекарственным сырьём, что также делает аккумуляцию в них поллютантов потенциально опасной для человека и животных. В-третьих, за счёт быстрой смены поколений, по сравнению с древесной растительностью, травянистые растения являются более удобным объектом для изучения адаптации фитоценозов к влиянию техногенного стресса.

Zn и Cd являются одними из наиболее распространенных в промышленных выбросах ТМ, относящимися к первому классу опасности. Cd принадлежит к наиболее токсичным элементам, оказывающим множественное токсическое действие на растения [11, 20]. Zn входит в число важнейших для физиологии растений микроэлементов, проблеме загрязнения которым также уделяют внимание многие исследователи [12, 17]. Кроме того, данные элементы имеют схожее геохимическое поведение и обладают аддитивными свойствами, замещая друг друга в физиологических процессах растений.

Результаты изучения взаимодействия Zn - Cd являются дискуссионными, поскольку имеются данные, как об антагонизме, так и о синергизме между этими элементами в процессе поглощения и переноса [11, 20]. Например, в литературе встречаются сведения о том, что Cd способен замещать Zn во многих жизненно важных ферментативных реакциях, приводя к их разрыву или торможению. Предполагают, что механизмы взаимодействия этих металлов контролируются отношением концентраций Cd и Zn в среде обитания растения, физико-химическими свойствами почвы и биологическими особенностями растений-поглощителей [4, 18]. Взаимообусловленные и взаимовлияющие физико-химические и биологические факторы оказывают воздействие на высвобождение ионов металла в почвенный раствор и, соответственно, на способность растений поглощать их из почвы.

Концентрация ТМ в природной среде имеет тенденцию к увеличению с течением времени, поскольку они не подвержены биодegradации. По этой причине, территории, подверженные многолетнему техногенному

загрязнению, являются важными объектами для исследований, направленных на изучение распределения микроэлементов в растительных сообществах [6, 9, 13].

Крупнейшим в Ростовской области предприятием, загрязняющим окружающую среду ТМ, является филиал ПАО «ОГК-2» «Новочеркасская» ГРЭС (НчГРЭС). На долю этого предприятия приходится 1% всех выбросов поллютантов в атмосферу в РФ, в Ростовской области – свыше 50%, в Новочеркасске – порядка 90% [10]. Негативные последствия выбросов НчГРЭС, ведущие к накоплению ТМ в почве и растениях, могут отчетливо проявиться со временем.

Цель работы – изучение аккумуляции Cd и Zn в различных видах дикорастущих травянистых растений семейств Астровые (Asteraceae) и Мятликовые (Poaceae) в условиях многолетнего техногенного загрязнения.

Объекты и методы

Площадки мониторинга были заложены на расстоянии 1—20 км от НчГРЭС и приурочены к точкам отбора проб воздуха, производимого в рамках проекта по организации и обустройству санитарно-защитной зоны северного промышленного узла г. Новочеркасска. Выбор представленных площадок мониторинга также обусловлен произрастанием на них всех изучаемых видов травянистых растений. Образцы растений отбирались по преобладающему северо-западному направлению ветров на площадках мониторинга № 4, № 8, № 9, № 10 и прилегающей к данному направлению площадке № 5. Точки № 1, № 2, № 3, № 7, № 11, № 12, № 16 и № 17 заложены на расстоянии 1—3 км от НчГРЭС в различных направлениях, для определения уровня загрязнения территорий, лежащих вне преобладающего направления ветров. Площадка № 10 расположена в 400 м от автомагистрали. За десятилетия выбросов автотранспорта в почву площадки № 10 поступило значительное количество ТМ, которые в настоящее время продолжают переходить из почвы в растения и служат дополнительным источником техногенной нагрузки. Площадка № 9 была выбрана в качестве фоновой за счёт своей большой удаленности (15 км) от НчГРЭС и отсутствия дополнительных источников загрязнения.

Почвы мониторинговых площадок (№ 1, № 4, № 5, № 7, № 9, № 10, № 16 и № 17) представлены черноземом обыкновенным (Чо) тяжелосуглинистым: содержание гумуса 3.6—4.2%, физической глины 50.6—56.3%, ила 40.4—44.6%, CaCO₃ – 0.5—1.1%, pH 7.4—7.7, ЕКО 31—36 смоль(+)/кг). А также лугово-черноземной (ЛЧ) легкоглинистой (площадки № 3, № 6, № 8, № 11): содержание гумуса 4.2—5.1%, физической глины – 65.3—67%, ила – 44.0—49.3%, CaCO₃ – 0.2—0.7%, pH 7.3—7.7, ЕКО – 31—45 смоль(+)/кг). Аллювиальная (Ал) почва поймы р. Тузлов (№ 2, № 12) Чаплыгин В. А., Бауэр Т. В., Барахов А. В., Черникова Н. П., Манджиева С. С., Минкина Т. М., Поступление Zn и Cd из почвы в травянистые растения семейств Астровые (Asteraceae) и Мятликовые (Poaceae) // «Живые и биокосные системы». – 2019. – № 29; URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-29/article-4>

характеризуется следующими свойствами: рН 7.5—7.9, содержание гумуса 1.3—3.1%, физической глины – 5.9—6.9%, ила – 0.9—2.9%, CaCO₃ – 0.4—0.5%, ЕКО – 12—21 смоль(+)/кг.

Объектами исследования были выбраны преобладающие на площадках мониторинга травянистые растения из семейства Астровые (*Asteraceae*): амброзия полыннолистная (*Ambrosia artemisiifolia* L.), полынь австрийская (*Artemisia austriaca* Pall. ex. Wild.), тысячелистник благородный (*Achillea nobilis* L.) и пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare* L.), а также семейства Мятликовые (*Poaceae*): мятлик луговой (*Poa pratensis* L.) и пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski). Отбор образцов растений проводился в трехкратной повторности во второй декаде июня в фазу массового цветения. Выбор периода отбора проб связан с тем, что к данной фазе приурочено максимальное поступление элементов в растения [3].

В образцах растений и почв определялись Cd и Zn – металлы первого класса опасности, присутствующие в выбросах НчГРЭС [10].

Минерализацию проб растений проводили методом сухого озоления согласно ГОСТ 26929-94. Экстракция ТМ из золы осуществлялась растворением в 20%-ном растворе HCl с последующим определением методом ААС [5].

Общее содержание Cd и Zn в почвах определено рентген-флюоресцентным методом. Подвижные соединения элементов переведены в раствор параллельными экстракциями с использованием следующих реагентов [8]:

1) 1 н. аммонийно-ацетатный буфер (NH₄Ac) рН 4.8 (соотношение почва : раствор = 1 : 5, время экстракции – 18 ч), способный переводить в раствор обменные формы металлов, характеризующие их актуальную подвижность;

2) 1%-ный раствор ЭДТА в NH₄Ac рН 4.8 (соотношение почва : раствор = 1 : 5, время экстракции – 18 ч), который предположительно наряду с обменными формами металлов переводит в раствор их относительно непрочные комплексные соединения. По разнице между содержанием металлов в вытяжках 2 и 1 было рассчитано содержание металлов, находящихся в составе комплексных соединений;

3) Кислоторастворимые соединения металлов, извлекаемые раствором 1 н. HCl (соотношение почва : раствор = 1 : 10, время экстракции – 1 ч), характеризуют потенциальный запас подвижных соединений металлов в почве. По разнице между содержанием металлов в вытяжках HCl и NH₄Ac рассчитано количество специфически сорбированных соединений металлов.

Содержание металлов в вытяжках из почв определено методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии (ААС).

Оценка загрязнения растений ТМ проводилась путем сравнения концентрации элементов в растениях с максимально допустимым уровнем (МДУ) содержания металлов в кормах сельскохозяйственных животных [1].

Реакция растений на содержание элементов в среде обуславливается барьерным и/или безбарьерным типом их поглощения. Барьерный тип накопления химических элементов и их соединений до определенных концентраций – широко распространенное явление [2]. Растения имеют барьеры по отношению к поглощению большинства элементов, обусловленные специфическими физиолого-биохимическими механизмами. Корни, как правило, характеризуются безбарьерным накоплением, а надземная часть – барьерным.

Для характеристики аккумулирующей способности растений и барьерной функции корней использован коэффициент накопления (КН), представленный как отношение содержания металла в корнях растения к содержанию его подвижных форм в почве. Данный показатель отражает корневое поступление ионов металла из почвы в подземные органы [6]. В случае активной работы корневого барьера – $КН < 1$. При беспрепятственном поступлении ионов металлов в органы растений – $КН \geq 1$. Для расчетов КН были использованы результаты определения группы непрочно связанных соединений ТМ в почве по методу Т.М. Минкиной [7]. Выбор данной группы соединений обусловлен тем, что для обменных, комплексных и специфически сорбированных форм элементов в почве установлена тесная корреляция с содержанием в растениях, тогда как для валового содержания она характеризуется как средняя и низкая [16].

Распределение металлов по органам растений будет оцениваться по величине акропетального коэффициента (АК) как отношение содержания ТМ в корневой системе и надземной части растения [4].

Результаты и обсуждение

Исследования почв площадок мониторинга выявили наличие многолетнего загрязнения ТМ. Участки, находящиеся на расстоянии 5 км от НчГРЭС на северо-западном направлении и близлежащие к ним, характеризуются содержанием, превышающим ОДК валовых и ПДК обменных форм Zn (в 1,1—1,4 и 1,2 раза соответственно) (табл. 1). Установлено превышение ПДК по обменным формам Cd (в 1,2—7 раз), в то время как по валовому содержанию загрязнение не наблюдается (ГН 2.1.7.2041-06, 2006), что, вероятно, связано с высокой подвижностью элемента в почве.

Обменные, комплексные и специфически сорбированные формы ТМ вместе образуют группу непрочно связанных соединений, которая составляет 12—57% от валового содержания по Zn и 22,5—59,5% по Cd (Рис. 1).

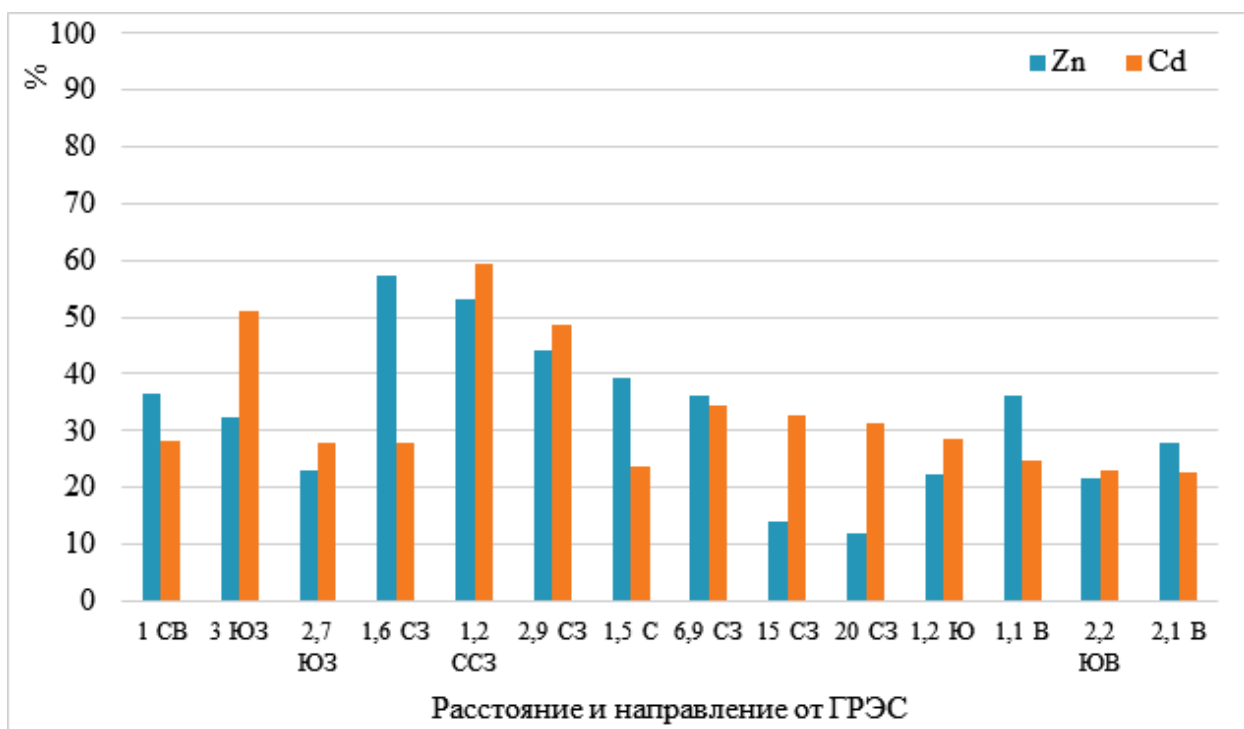


Рис. 1 – Доля непрочно связанных соединений Zn и Cd от валового содержания в почве, %.

На площадках мониторинга № 4, № 5, № 6 и № 7, наиболее близко расположенных к источнику выбросов в северо-западном, северо-северо-западном и северном направлениях, отмечается максимальное содержание непрочно связанных форм ТМ. Это указывает на рост подвижности элементов в почвах в условиях техногенной нагрузки. Содержание ТМ в почвах и растениях убывает в направлении от источника выбросов к периферии ореола. Концентрация ТМ на самых отдаленных от источника эмиссии площадках соответствует их фоновому уровню.

Отмечается зависимость содержания металлов в почвах от гранулометрического состава. Так, содержание элементов в аллювиальных песчаных почвах площадок № 2 и № 12 несколько ниже, чем на соседних площадках мониторинга, расположенных примерно на том же расстоянии от НчГРЭС, представленных чернозёмом и лугово-черноземной почвой тяжелосуглинистого и легкоглинистого гранулометрического состава (табл. 1).

Таблица 1 – Валовое содержание и непрочно связанные соединения тяжелых металлов в 0–20 см слое почв площадок мониторинга, мг/кг

№ площадки	Почва	Направление и расстояние от источника, км	Валовые		Обменные		Комплексные		Специфически сорбированные	
			Zn	Cd	Zn	Cd	Zn	Cd	Zn	Cd
1 (42)	Чо	1,0 СВ	113	0,60	10,7	0,03	3,9	0,02	26,8	0,12
2 (42)	Ал	3,0 ЮЗ	70	0,45	4,3	0,05	1,6	0,01	16,8	0,17
3 (42)	ЛЧ	2,7 ЮЗ	112	0,86	3,9	0,04	3,2	0,02	18,5	0,18
4 (42)	Чо	1,6 СЗ	157	1,85	28,1	0,35	8,5	0,14	53,1	0,67
5 (42)	Чо	1,2 ССЗ	134	1,58	18,1	0,24	7,7	0,10	45,6	0,60
6 (42)	ЛЧ	2,0 СЗ	127	1,25	15,1	0,20	6,6	0,07	34,5	0,34
7 (42)	Чо	1,5 С	117	0,55	15,8	0,05	5,5	0,01	24,7	0,07
8 (42)	ЛЧ	5,0 СЗ	115	0,58	9,7	0,04	3,8	0,03	28,0	0,13
9 (42)	Чо	15,0 СЗ	89	0,43	2,0	0,02	1,4	0,01	9,2	0,11
10 (42)	Чо	20,0 СЗ	81	0,35	1,9	0,03	0,7	0,02	7,0	0,06
11(42)	ЛЧ	1,0 ЮВ	93	0,42	2,8	0,03	1,5	0,01	16,4	0,08
12(42)	Ал	1,1 Ю	97	0,65	6,3	0,06	3,7	0,01	25,0	0,09
13(42)	Чо	2,2 ЮВ	103	0,91	3,7	0,07	2,0	0,01	16,4	0,13
14(42)	Чо	2,1 В	115	0,80	3,0	0,06	2,2	0,03	26,9	0,09
НСР _{0,95}			7	0,10	2,0	0,01	0,2	0,003	2,5	0,02
ПДК (ГН 2.1.7.2041-06, 2006)			110*	2,00	23,0	0,05	-	-	-	-

Примечание: полужирным шрифтом выделено превышение ПДК; в скобках указано число проб. * – для оценки валового содержания Zn использована ОДК с учётом фона.

Установлена также связь содержания ТМ в растениях с уровнем техногенной нагрузки. По мере удаления от НЧГРЭС, содержание элементов в растениях снижается до среднего содержания ТМ в травянистых растениях Ростовской области [8]. Разные виды растений накапливают в своих органах различные количества ТМ [6], в связи с селективностью аккумуляции элементов были изучены представители нескольких видов травянистых растений (табл. 2).

Таблица 2 – Содержание тяжелых металлов в различных видах дикорастущих травянистых растений на площадках мониторинга, мг/кг

№ площадки	Направление и расстояние от НЧГРЭС, км	Zn	Cd	Zn	Cd	Zn	Cd
		Полынь австрийская (<i>Artemisia austriaca</i> Pall. ex. Wild.)	Тысячелистник благородный (<i>Achillea nobilis</i> L.)	Мятлик луговой (<i>Poa pratensis</i> L.)			
1	1,0 СВ	47/40	0,21/0,19	38/34	0,19/0,15	9/23	0,07/0,11
2	3,0 ЮЗ	23/18	0,23/0,26	18/28	0,27/0,23	5/11	0,10/0,18
3	2,7 ЮЗ	13/22	0,09/0,15	20/20	0,14/0,15	3/10	0,06/0,14
4	1,6 СЗ	156/118	2,88/2,00	123/109	3,16/2,12	36/57	1,01/1,23
5	1,2 ССЗ	109/90	1,84/1,52	106/76	2,39/1,64	26/43	0,72/0,89
6	2,0 СЗ	74/67	1,05/0,94	60/53	1,44/1,06	18/33	0,39/0,55

Чаплыгин В. А., Бауэр Т. В., Барахов А. В., Черникова Н. П., Манджиева С. С., Минкина Т. М., Поступление Zn и Cd из почвы в травянистые растения семейств Астровые (Asteraceae) и Мятликовые (Poaceae) // «Живые и биокосные системы». – 2019. – № 29; URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-29/article-4>

7	1,5 С	22/20	0,14/0,13	43/42	0,15/0,13	8/25	0,07/0,09
8	5,0 СЗ	40/36	0,29/0,28	45/60	0,38/0,31	11/23	0,13/0,16
9	15,0 СЗ	10/9	0,04/0,06	6/12	0,04/0,09	1/4	0,02/0,06
10	20,0 СЗ	12/11	0,01/0,04	10/9	0,02/0,05	1/2	0,01/0,04
11	1,0 ЮВ	15/18	0,13/0,12	13/25	0,16/0,16	4/10	0,05/0,08
12	1,1 Ю	33/30	0,10/0,12	31/28	0,16/0,19	8/18	0,07/0,12
13	2,2 ЮВ	10/8	0,15/0,15	16/24	0,08/0,18	3/9	0,09/0,14
14	2,1 В	13/7	0,15/0,15	22/34	0,09/0,16	6/15	0,04/0,11
НСР _{0,95}		1,7/1,4	0,02/0,01	2,1/3,0	0,03/0,01	0,4/0,7	0,01/0,03
№ площа дки	Направление и расстояние от НЧГРЭС, км	Амброзия полыннолистная (<i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.)		Пижма обыкновенная (<i>Tanacetum vulgare</i> L.)		Пырей ползучий (<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski)	
1	1,0 СВ	47/39	0,10/0,08	21,0/18,0	0,18/0,13	33/46	0,09/0,15
2	3,0 ЮЗ	18/17	0,24/0,20	15,4/15,1	0,16/0,18	15/21	0,14/0,20
3	2,7 ЮЗ	16/18	0,15/0,14	10,5/11,6	0,09/0,11	8/15	0,10/0,16
4	1,6 СЗ	122/98	2,55/1,26	101,0/67,0	2,40/1,43	121/132	1,20/1,39
5	1,2 ССЗ	93/76	1,71/0,91	67,0/49,0	1,64/1,05	87/94	0,86/1,02
6	2,0 СЗ	69/57	1,05/0,58	52,0/38,0	1,05/0,70	57/68	0,50/0,63
7	1,5 С	40/35	0,10/0,08	15,0/20,0	0,13/0,12	26/37	0,08/0,12
8	5,0 СЗ	40/38	0,22/0,15	31,0/25,0	0,25/0,21	30/38	0,12/0,16
9	15,0 СЗ	13/12	0,11/0,09	8,0/7,0	0,08/0,10	8/12	0,03/0,05
10	20,0 СЗ	8/8	0,08/0,06	5,0/5,0	0,05/0,06	5/8	0,01/0,04
11	1,0 ЮВ	15/13	0,06/0,07	14,5/12,7	0,13/0,10	11/18	0,07/0,11
12	1,1 Ю	22/22	0,05/0,04	14,0/14,0	0,13/0,11	27/34	0,07/0,14
13	2,2 ЮВ	19/18	0,07/0,10	8,8/11,6	0,20/0,15	12/19	0,13/0,20
14	2,1 В	20/18	0,04/0,05	11,0/19,0	0,09/0,09	15/28	0,04/0,12
НСР _{0,95}		3,2/2,0	0,02/0,01	1,9/0,8	0,02/0,02	2,3/2,0	0,01/0,02
МДУ для кормовых трав		50	0,3	50	0,3	50	0,3

Примечание: надземная часть/корни, полужирным шрифтом выделено превышение МДУ для кормовых трав

На площадках мониторинга № 4, № 5 и № 6, испытывающих наибольшую техногенную нагрузку, установлено загрязнение Zn (от 1,2 до 3,1 МДУ) для всех изучаемых видов растений, за исключением мятлика лугового. Важно отметить, что превышение МДУ по данному элементу фиксируется только в условиях максимальной техногенной нагрузки, в то время как на остальных площадках мониторинга содержание Zn соответствует или не превышает фоновое содержание (табл. 2). У растений семейства Астровые отмечается более высокое содержание Zn, по сравнению с Мятликовыми. Zn аккумулируется преимущественно в надземной части растений семейства Астровые, в то время как для Мятликовых, характерно его большее накопление в корневой системе. Наибольшим содержанием

металла отличается полынью, минимальное содержание Zn установлено в мятлике.

Содержание Zn в растениях на два порядка превосходит концентрацию Cd, что связано с высокой потребностью растений в данном элементе, выполняющем ряд биологических функций.

Превышение МДУ для Cd отмечается для всех изучаемых видов растений и составляет 3,5—9,6 раз для полыни, 1,3—10,5 для тысячелистника, 3,5—8,5 для амброзии, 3,5—8,0 для пижмы, 2,7—4,0 для пырея и 1,3—3,4 для мятлика. При загрязнении растений Cd также наблюдается чёткая локализация на площадках мониторинга, испытывающих наибольшую техногенную нагрузку. У полыни и тысячелистника также наблюдаются небольшие превышения МДУ или близкие к пороговой концентрации Cd в пределах всей 5 километровой зоны исследования. Cd, также как и Zn, характеризуется преимущественной аккумуляцией в наземной части растений семейства Астровые и в корневой системе Мятликовых. Максимальная концентрация Cd установлена в тысячелистнике, минимальная – в мятлике.

Селективность аккумуляции ТМ растениями в зависимости от уровня техногенной нагрузки и видовой принадлежности растения во многом обусловлена действием биологических барьеров [4]. Барьеры создаются растениями для регулирования количества поступающих в организм элементов питания, дабы избежать накопления фитотоксичных концентраций ТМ, и характеризуют устойчивость растений к техногенному загрязнению. Первый из таких барьеров находится на границе почва-корневая система. Именно от действия этого барьера зависит то, какое количество ТМ попадает в растения, поскольку основным источником поступления элементов в растения является почва. По этой причине было изучено поступление Zn и Cd в растения из почвы.

Наиболее объективным из показателей, позволяющих оценить эффективность действия барьера «почва-корневая система», является КН. При расчете данного показателя учитывают непрочно связанные формы элементов в почве, поскольку именно они доступны растениям [7]. Исходя из полученных данных КН, максимальное поступление ТМ из почвы в растения приурочено к площадкам преобладающего направления ветров, расположенным в пределах 5 км от НчГРЭС (табл. 3).

Таблица 3 – Коэффициент накопления тяжелых металлов в различных видах дикорастущих травянистых растений на площадках мониторинга

№ площадки	Направление и расстояние от НчГРЭС, км	Zn	Cd	Zn	Cd	Zn	Cd
		Полынь австрийская (<i>Artemisia austriaca</i> Pall. ex. Wild.)		Тысячелистник благородный (<i>Achillea nobilis</i> L.)		Мятлик луговой (<i>Poa pratensis</i> L.)	
1	1,0 СВ	0,80	0,55	0,69	0,46	0,47	0,31
2	3,0 ЮЗ	0,73	1,27	1,13	1,11	0,45	0,88
3	2,7 ЮЗ	0,85	0,67	0,78	0,70	0,39	0,63
4	1,6 СЗ	1,50	2,30	1,39	2,44	0,73	1,41
5	1,2 ССЗ	1,53	2,04	1,30	2,19	0,73	1,20
6	2,0 СЗ	1,29	2,03	1,03	2,29	0,64	1,19
7	1,5 С	0,35	0,30	0,73	0,29	0,43	0,21
8	5,0 СЗ	1,06	1,78	1,76	1,97	0,68	0,99
9	15,0 СЗ	0,74	0,57	1,03	0,82	0,34	0,60
10	20,0 СЗ	1,05	0,43	0,90	0,49	0,19	0,43
11	1,0 ЮВ	0,87	0,99	1,22	1,35	0,48	0,70
12	1,1 Ю	0,76	0,82	0,71	1,29	0,45	0,81
13	2,2 ЮВ	0,38	0,72	1,08	0,88	0,41	0,66
14	2,1 В	0,67	1,06	1,01	1,16	0,45	0,80
№ площадки	Направление и расстояние от НчГРЭС, км	Амброзия полыннолистная (<i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.)		Пижма обыкновенная (<i>Tanacetum vulgare</i> L.)		Пырей ползучий (<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski)	
		Zn	Cd	Zn	Cd	Zn	Cd
1	1,0 СВ	0,79	0,22	0,36	0,39	0,93	0,44
2	3,0 ЮЗ	0,69	0,98	0,61	0,86	0,85	0,97
3	2,7 ЮЗ	0,71	0,62	0,45	0,50	0,59	0,71
4	1,6 СЗ	1,25	1,45	0,85	1,64	1,68	1,60
5	1,2 ССЗ	1,30	1,22	0,84	1,41	1,60	1,37
6	2,0 СЗ	1,10	1,25	0,73	1,51	1,31	1,36
7	1,5 С	0,60	0,19	0,35	0,27	0,65	0,29
8	5,0 СЗ	1,12	0,96	0,74	1,36	1,12	0,99
9	15,0 СЗ	1,03	0,81	0,60	0,91	1,03	0,50
10	20,0 СЗ	0,76	0,63	0,48	0,63	0,76	0,39
11	1,0 ЮВ	0,63	0,56	0,62	0,81	0,87	0,95
12	1,1 Ю	0,56	0,28	0,35	0,73	0,86	0,93
13	2,2 ЮВ	0,80	0,48	0,52	0,74	0,85	0,96
14	2,1 В	0,54	0,36	0,57	0,65	0,84	0,89

Для Zn КН>1 наблюдается у всех растений, за исключением пижмы и мятлика. Наибольшие значения коэффициента получены для пырея ползучего, в то время как мятлик характеризуется минимальной аккумуляцией Zn из почвы. Это указывает на то, что селективность накопления элементов растениями проявляется не только на уровне семейства, но и на видовом уровне. Возможной причиной установленной для

пижмы особенности может быть атмосферное поступление ТМ в растение, не учитываемое величиной КН.

Значения $KH > 1$ для Cd установлены у всех исследуемых растений, что указывает на активное поступление ТМ из почвы. Тысячелистник благородный отличается наибольшими значениями КН по Cd и имеет $KH > 1$ на большинстве площадок мониторинга. Наименьшие величины коэффициента определены для мятлика лугового, как и в случае с Zn. Полынь и тысячелистник обладают заметно большими значениями КН, по сравнению с остальными изучаемыми растениями. Пижма и амброзия имеют примерно одинаковый уровень значений КН с мятликом и пыреем. Данное наблюдение подтверждает сведения о том, что на поступление ТМ в растения влияет как уровень техногенной нагрузки и вид растения, так и свойства самого элемента.

Следует отметить, что еще одним важным фактором, оказывающим влиянием на аккумуляцию ТМ растением, является гранулометрический состав почвы [8]. На площадках № 2 и № 12, представленных аллювиальной почвой, наблюдается более высокая аккумуляция Zn и Cd в растениях по сравнению с соседними площадками. Более ярко эта закономерность выражена у Мятликовых, среди Астровых она наиболее чётко прослеживается у тысячелистника и пижмы. По-видимому, это связано с тем, что почвы лёгкого гранулометрического состава плохо удерживают поступающие в них ТМ, оставляя их в доступных растениям формах.

Второй барьер поступления ТМ в растения находится на границе «корневая система – надземная часть». Он обуславливает характер распределения элементов по органам растения и показывает уже внутреннюю устойчивость растения. Рассчитанные величины АК позволили оценить степень транслокации элементов из корневой системы в надземную часть изучаемых растений (Рис. 2).

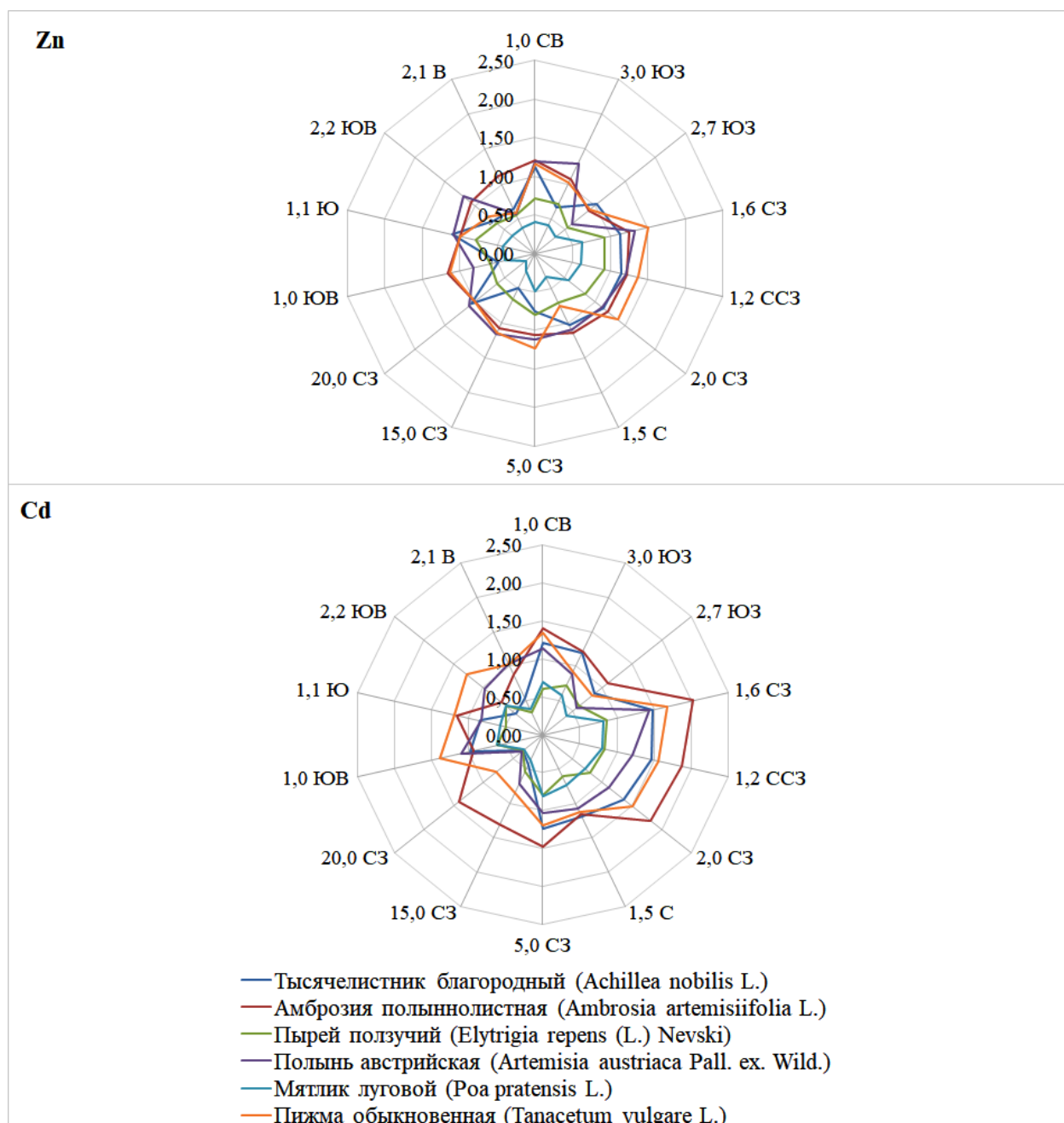


Рис. 2 – Акропетальный коэффициент Zn и Cd в различных видах дикорастущих травянистых растений на площадках мониторинга.

Установлено, что, хотя транслокация Zn из корней в надземные органы растений варьирует в зависимости от уровня техногенной нагрузки, общие её тенденции сохраняются для всех изучаемых видов растений. На площадках мониторинга, испытывающих наибольший техногенный стресс (№ 4, № 5 и № 6), максимальными значениями АК характеризуются пижма, полынь и амброзия, минимальными – мятлик. На площадке № 9, принятой за фоновую, наблюдается аналогичная ситуация с распределением максимальных и минимальных величин АК. В целом по площадкам: наиболее интенсивной

транслокацией Zn из корней обладают амброзия, пижма и полынь, наименьшей обладают мятлик и пырей. Следует отметить, что, хотя пижма наряду с полынью и амброзией, имеет высокое содержание Zn в надземной массе и один из самых высоких показателей АК, КН для данного растения значительно ниже, чем у других представителей семейства Астровые. Данная закономерность показывает более низкую устойчивость пижмы к техногенному загрязнению Zn.

В условиях техногенного загрязнения наибольшая транслокация Cd отмечается в амброзии, тысячелистнике и пижме, а наименьшая установлена для мятлика (Рис. 2). На площадке № 9 максимальные значения АК имеют амброзия, пижма и полынь, мятлик так же, как и в условиях техногенной нагрузки, характеризуется наименьшей транслокацией Cd из корней в надземную часть. В целом, наиболее высокая транслокация Cd, среди изучаемых видов, установлена для амброзии, а самая низкая – для мятлика.

Таким образом, для растений семейства Астровые отмечается значительно более высокое накопление Zn и Cd, а также транслокация данных ТМ из корней в надземные органы, по сравнению с Мятликовыми. Мятлик луговой (*Poa pratensis* L.) по данному показателю является наиболее устойчивым к загрязнению ТМ растением.

Заключение

Высокие уровни загрязнения почв приводят к избыточному накоплению тяжёлых металлов в растительном организме. Установлено многолетнее техногенное загрязнение дикорастущих травянистых растений, сосредоточенное в 5 километровой зоне, преимущественно в северо-западном направлении. Приоритетными загрязнителями почвы исследуемых территорий выступают Zn и Cd. Выявлена видовая специфичность растений по отношению к исследуемым поллютантам. Растения семейства Астровые аккумулируют большие количества ТМ, чем представители семейства Мятликовые. Для семейства Астровые наблюдается преимущественная аккумуляция Zn и Cd в надземной части, в то время как для Мятликовых – в корневой системе. Амброзия, полынь и пижма отличаются наибольшей транслокацией элементов из корней в надземную массу и, как следствие, низкой устойчивостью к загрязнению ТМ. Наименьшая устойчивость к поступлению ТМ из почвы установлена для тысячелистника благородного. Мятлик луговой является наиболее устойчивым к загрязнению Zn и Cd растением по совокупности показателей АК и КН. Лёгкий гранулометрический почвы способствует большей доступности ТМ растениям. Наряду с общими закономерностями, выявлены специфические особенности накопления исследуемых металлов растениями. Cd обладает заметно большей подвижностью в почвах, чем Zn, что обуславливает более высокий уровень загрязнения растений данным элементом и более высокие

Чаплыгин В. А., Бауэр Т. В., Барахов А. В., Черникова Н. П., Манджиева С. С., Минкина Т. М., Поступление Zn и Cd из почвы в травянистые растения семейств Астровые (Asteraceae) и Мятликовые (Poaceae) // «Живые и биокосные системы». – 2019. – № 29; URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-29/article-4>

значения КН. Комплексный подход к изучению особенностей аккумуляции элементов растениями и проявлению барьерных функций растений позволит в будущем успешно прогнозировать негативные последствия техногенного загрязнения окружающей среды.

Работа поддержана грантом президента РФ (№ МК-2818.2019.5), РФФИ (№ 19-34-60041 Перспектива), грантом в рамках Проектной части госзадания № 5.948.2017/ПЧ.

Литература

1. Временные максимально допустимые уровни (МДУ) некоторых химических элементов госсипола в кормах сельскохозяйственных животных. Утвержден Главным Управлением Ветеринарии министерства сельского хозяйства РФ, 1991.
2. Жуйкова Т.В., Зиннатова Э.Р. Аккумуляционная способность растений в условиях техногенного загрязнения почв тяжёлыми металлами // Поволжский экологический журнал. 2014. № 2. С. 196-207.
3. Ильин В.Б., Сысо А.И. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва-растение / РАН, Сибирское отделение, ин-т. Почвоведение и агрохимии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 220 с.
4. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 437 с.
5. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
6. Минкина Т.М., Манджиева С.С., Чаплыгин В.А., Назаренко О.Г., Максимов А.Ю., Замулина И.В., Бурачевская М.В., Сушкова С.Н. Аккумуляция тяжелых металлов разнотравной степной растительностью по данным многолетнего мониторинга // Аридные экосистемы, 2018. том 24, № 3 (76), С. 43-55.
7. Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Манджиева С.С. Барьерные функции системы почва-растение // Вест. Моск. Ун-та. Сер. Почвоведение. 2008. № 2. С. 3-8.
8. Минкина Т.М., Назаренко О.Г., Мотузова Г.В., Манджиева С.С., Бурачевская М.В. Групповой состав соединений тяжелых металлов в почвах агроценозов, загрязненных аэрозольными выбросами Новочеркасской ГРЭС // Агрохимия. 2011. № 6. С. 68–77.
9. Пляскина О.В., Ладонин Д.В. Соединения тяжелых металлов в гранулометрических фракциях некоторых типов почв // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2005. № 4. С. 36–43.
10. Экологический вестник Дона: О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2017 году. Ростов-на-Дону. 2018. С. 283.

Чаплыгин В. А., Бауэр Т. В., Барахов А. В., Черникова Н. П., Манджиева С. С., Минкина Т. М., Поступление Zn и Cd из почвы в травянистые растения семейств Астровые (Asteraceae) и Мятликовые (Poaceae) // «Живые и биокосные системы». – 2019. – № 29; URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-29/article-4>

11. Andresen E., Kupper H. Cadmium toxicity in plants // Cadmium: From Toxicity to Essentiality. Metal Ions in Life Sciences / Eds. Sigel A., Sigel H., Sigel R.C.O. Netherlands: Springer, 2013. V. 11. P. 395–413.
12. Baiseitova, N.M., Sartayeva, J.M. Phytotoxic action of heavy metals in technogenic pollution. Young Scientist. 2014. № 2. P. 382–384.
13. Chaplygin, V., Minkina, T., Mandzhieva, S., Burachevskaya, M., Sushkova, S., Poluektov, E., Antonenko, E., Kumacheva, V. The effect of technogenic emissions on the heavy metals accumulation by herbaceous plants (2018) Environmental Monitoring and Assessment, 190 (3), статья № 124. DOI: 10.1007/s10661-018-6489-6
14. Ghazaryan, K.A., Movsesyan, H.S., Minkina, T.M., Sushkova, S.N., Rajput, V.D. The identification of phytoextraction potential of *Melilotus officinalis* and *Amaranthus retroflexus* growing on copper- and molybdenum-polluted soils (2019) Environmental Geochemistry and Health, DOI: 10.1007/s10653-019-00338-y
15. Minkina, T. M., Motusova, G. V., Mandzhieva, S. S., & Nazarenko, O. G. (2012). Ecological resistance of the soilplant system to contamination by heavy metals. J Geochem Explorat., 123, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.08.021>
16. Nkongolo, K.K., G. Spiers, P. Beckett, R. Narendrula and G. Theriault et al., 2013. Long-term effects of liming on soil chemistry in stable and eroded upland areas in a mining region. Water Air Soil Pollut., 224: 1-14. DOI: 10.1007/s11270-013-1618-x
17. Shtangeeva I., Viksna A., Grebnevs V. Geochemical (soil) and phylogenetic (plant taxa) factors affecting accumulation of macro- and trace elements in three natural plant species // Environ Geochem Health (2019). <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00337-z>
18. Yermakov I., Maksimov N., Evmenyeva A., Breygina M. The role of reactive oxygen species in pollen germination in *Picea pungens* (blue spruce) / Plant Reproduction, Springer Verlag (Germany). V. 31, № 4. P. 357-365.
19. Zhao Z.J., Nan Z.R., Wang Z.W., Yang Y.M., Shimizu M. Interaction between Cd and Pb in the soil-plant system: a case study of an arid oasis soil-cole system // J Arid Land. 2014. № 6 (1). P. 59–68. Doi: 10.1007/s40333-013-0194-7

Literatura

1. Vremennye maksimal'no dopustimye urovni (MDU) nekotoryh himicheskikh jelementov gossipola v kormah sel'skohozjajstvennyh zhivotnyh. Utverzhden Glavnym Upravleniem Veterinarii ministerstva sel'skogo hozjajstva RF, 1991.
2. Zhujkova T.V., Zinnatova Je.R. Akkumulirujushhaja sposobnost' rastenij v uslovijah tehnogenogo zagrjaznenija pochv tjazhjolymi metallami // Povolzhskij jekologicheskij zhurnal. 2014. № 2. S. 196-207.

3. Il'in V.B., Syso A.I. Tjzhelye metally i nemetally v sisteme pochva-rastenie / RAN, Sibirskoe otделение, in-t. Pochvovedenie i agrohimii. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2012. 220 s.

4. Kabata-Pendias A., Pendias X. Mikrojelementy v pochvah i rastenijah. M.: Mir, 1989. 437 s.

5. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniju tjzhelyh metallov v pochvah sel'hozogodij i produkcii rastenievodstva. M.: CINAО, 1992. 61 s.

6. Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Chaplygin V.A., Nazarenko O.G., Maksimov A.Ju., Zamulina I.V., Burachevskaja M.V., Sushkova S.N. Akkumuljacija tjzhelyh metallov raznotravnoj stepnoj rastitel'nost'ju po dannym mnogoletnego monitoringa // Aridnye jekosistemy, 2018. tom 24, № 3 (76), S. 43-55.

7. Minkina T.M., Motuzova G.V., Mandzhieva S.S. Bar'ernye funkcii sistemy pochva-rastenie // Vest. Mosk. Un-ta. Ser. Pochvovedenie. 2008. № 2. S. 3-8.

8. Minkina T.M., Nazarenko O.G., Motuzova G.V., Mandzhieva S.S., Burachevskaja M.V. Gruppovoj sostav soedinenij tjzhelyh metallov v pochvah agrocenozov, zagryzannyyh ajerozol'nymi vybrosami Novoчерkasskoj GRJeS // Agrohimiya. 2011. № 6. S. 68–77.

9. Pljaskina O.V., Ladonin D.V. Soedineniya tjzhelyh metallov v granulometricheskikh frakcijah nekotoryh tipov pochv // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 17. Pochvovedenie. 2005. № 4. S. 36–43.

10. Jekologicheskij vestnik Dona: O sostojanii okruzhajushhej sredy i prirodnyh resursov Rostovskoj oblasti v 2017 godu. Rostov-na-Donu. 2018. S. 283.

11. Andresen E., Kupper H. Cadmium toxicity in plants // Cadmium: From Toxicity to Essentiality. Metal Ions in Life Sciences / Eds. Sigel A., Sigel H., Sigel R.C.O. Netherlands: Springer, 2013. V. 11. P. 395–413.

12. Baiseitova, N.M., Sartayeva, J.M. Phytotoxic action of heavy metals in technogenic pollution. Young Scientist. 2014. № 2. P. 382–384.

13. Chaplygin, V., Minkina, T., Mandzhieva, S., Burachevskaya, M., Sushkova, S., Poluektov, E., Antonenko, E., Kumacheva, V. The effect of technogenic emissions on the heavy metals accumulation by herbaceous plants (2018) Environmental Monitoring and Assessment, 190 (3), статья № 124. DOI: 10.1007/s10661-018-6489-6

14. Ghazaryan, K.A., Movsesyan, H.S., Minkina, T.M., Sushkova, S.N., Rajput, V.D. The identification of phytoextraction potential of *Melilotus officinalis* and *Amaranthus retroflexus* growing on copper- and molybdenum-polluted soils (2019) Environmental Geochemistry and Health, DOI: 10.1007/s10653-019-00338-y

15. Minkina, T. M., Motusova, G. V., Mandzhieva, S. S., & Nazarenko, O. G. (2012). Ecological resistance of the soilplant system to contamination by heavy metals. J Geochem Explorat., 123, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.08.021>

Чаплыгин В. А., Бауэр Т. В., Барахов А. В., Черникова Н. П., Манджиева С. С., Минкина Т. М., Поступление Zn и Cd из почвы в травянистые растения семейств Астровые (Asteraceae) и Мятликовые (Poaceae) // «Живые и биокосные системы». – 2019. – № 29; URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-29/article-4>

16. Nkongolo, K.K., G. Spiers, P. Beckett, R. Narendrula and G. Theriault et al., 2013. Long-term effects of liming on soil chemistry in stable and eroded upland areas in a mining region. *Water Air Soil Pollut.*, 224: 1-14. DOI: 10.1007/s11270-013-1618-x

17. Shtangeeva I., Viksna A., Grebnevs V. Geochemical (soil) and phylogenetic (plant taxa) factors affecting accumulation of macro- and trace elements in three natural plant species // *Environ Geochem Health* (2019).
<https://doi.org/10.1007/s10653-019-00337-z>

18. Yermakov I., Maksimov N., Evmenyeva A., Breygina M. The role of reactive oxygen species in pollen germination in *Picea pungens* (blue spruce) / *Plant Reproduction*, Springer Verlag (Germany). V. 31, № 4. P. 357-365.

19. Zhao Z.J., Nan Z.R., Wang Z.W., Yang Y.M., Shimizu M. Interaction between Cd and Pb in the soil-plant system: a case study of an arid oasis soil-cole system // *J Arid Land*. 2014. № 6 (1). P. 59–68. Doi: 10.1007/s40333-013-0194-7