

УДК 632.112.1(470.345)

ОСОБЕННОСТИ АККУМУЛЯЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПРОДУКТИВНОЙ ЧАСТЬЮ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ¹

© 2020 г. С. В. Пугаев

Мордовский научно-исследовательский институт сельского хозяйства –
филиал Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
430904 Саранск, р.п. Ялга, ул. Мичурина, 5, Россия

E-mail: niish-mordovia@mail.ru

Поступила в редакцию 11.10.2019 г.

После доработки 09.06.2020 г.

Принята к публикации 11.09.2020 г.

Изучено биологическое поглощение тяжелых металлов (ТМ) семенами сельскохозяйственных растений в разных почвах Республики Мордовия, которые по общим признакам и генезису объединены в агропочвенные районы: дерновоподзолистые почвы супесчаного гранулометрического состава – район I, район III – серые лесные почвы тяжелого гранулометрического состава; район IV – тяжелосуглинистые черноземы. Показан диапазон содержания ТМ в почвах районов, их вариабельность и достоверность различий. Характер аккумуляции металлов семенами был видоспецифичным, но имел и общие закономерности. На дерново-подзолистых почвах (район I) горох выделялся наибольшим содержанием Cu, озимая пшеница и ячмень – Ni, содержание всех ТМ в овсе было больше на серых лесных почвах (район III), на черноземах (район IV) было больше всего Pb в семенах гороха, в зерне озимой пшеницы – всех ТМ, кроме Pb. Содержание Co в семенах было низким и только в редких случаях, Sr – на уровне Co, но в семенах всех культур и во всех районах. Интенсивность поглощения ТМ из почв снижалась в зависимости от величины коэффициентов биологического поглощения (КБП) в ряду: серые лесные почвы > черноземы > дерново-подзолистые почвы. Наибольшие КБП были у Cu и Zn. Поглощение Ni было средним среди культур и интенсивнее Mn, растения минимально поглощали Pb, Fe, Sr и Co. Приведены ряды металлов по величине КБП в зависимости от почвы района и культуры.

Ключевые слова: тяжелые металлы, сельскохозяйственные растения, семена, почва, коэффициент биологического поглощения.

DOI: 10.31857/S000218812012008X

ВВЕДЕНИЕ

Агроэкологические особенности региона способствуют произрастанию многих дикорастущих и культурных растений, которые аккумулируют тяжелые металлы (ТМ) под влиянием эндогенных (особенности видов растений) и экзогенных факторов природного и антропогенного характера (свойств почв, агрохимических средств и металлов, климата, выбросов и др.) [1–3].

В соответствии с протяженностью Республики Мордовия (РМ) с запада на восток возрастает континентальность ее климата, который оказал влияние на растительность, почвообразователь-

ные процессы. Почвенный покров представлен почти 300 почвенными разновидностями, которые по одинаковым и близким по генезису характеристикам объединены в агропочвенные районы I, II, III, IV и V [4].

Было показано, что почвы агропочвенных районов значимо различаются по содержанию и уровню сопряженности ТМ, коэффициентам сходства количества сопряженных металлов, эколого-токсикологическим и санитарно-гигиеническим условиям. На основании этого было предложено распределение ТМ по почвам районов считать как геохимическое [5].

Поведение микроэлементов в биогеосистемах тесно связано с химическими процессами и процессами трансформации ТМ в почвах, их содер-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Мордовского НИИСХ – филиала ФАНЦ Северо-Востока по теме № 0744-2014-00053.

жание в окружающей среде постоянно увеличивается [6, 7], происходит постепенное изменение свойств почв из-за их загрязнения ТМ [8]. Металлы в почве находятся в разных формах, валовое содержание и степень подвижности которых не всегда определяют уровень ТМ в растениях [9, 10]. По мере роста и развития растений в них формируются пороги защиты от избытка ТМ на барьерах корня/стебель и стебель/зерно, и накопление ТМ происходит под генетическим контролем [11]. Механизмы, участвующие в процессах ограничения, намного слабее, чем те, что выработаны корнями для поглощения дефицитных микроэлементов [6]. Тем не менее, интегрированные реакции растений на стресс от ТМ усиливают действие защитных механизмов [12–14]. Передвижение ТМ происходит при синергическом и антагонистическом взаимодействиях [15].

Сформировавшийся в результате сложных процессов пул ТМ в органах растений, особенно в генеративных органах, определяет их функциональное состояние в вегетационном периоде и предопределяет прорастание и развитие зародыша семени [16]. Снижение накопления ТМ в посевах сельскохозяйственных культур обеспечивает качество растениеводческой продукции [17].

Содержание ряда ТМ было определено ранее в продукции растениеводства на отдельных почвах республики [18, 19], однако систематического изучения поведения ТМ в системе почва–семена разных культурных растений в сопоставимых условиях не проводили. Цель работы – изучение особенностей аккумуляции ТМ семенами сельскохозяйственных растений в разных агроэкологических условиях Мордовии.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали районы I, III и IV с разной площадью и контрастными почвами, а также сельскохозяйственные виды растений, произраставшие в этих условиях. Район I характеризуется в основном серыми лесными и дерново-подзолистыми почвами супесчаного и легкосуглинистого гранулометрического составов. Район III охватывает серые лесные почвы тяжелого гранулометрического состава. В районе IV преобладают выщелоченные и оподзоленные черноземы в сочетании с темно-серыми лесными тяжелосуглинистыми почвами [4].

Перечень исследованных сельскохозяйственных растений: рожь посевная озимая (*Secale cereale* L.), пшеницы озимая и яровая (*Triticum vulgare* L.), ячмень обыкновенный яровой (*Hordeum sativum* var. *distichon* Asch. et. Graebn.), овес посев-

ной (*Avena sativa* L.) и горох посевной (*Pisum sativum* L.).

Отбор проб почв на анализ проводили в репрезентативных точках агропочвенных районов I (13 площадок), III (7 площадок) и IV (17 площадок) по методике ЦИНАО [20]. Семена растений отбирали в послеуборочный период по методике [21]. Итого проанализировано 423 растительных и 1985 почвенных образцов на содержание ТМ, используя методики [22, 23].

Экспериментальные данные обработаны статистически с использованием программы STAT 3 по стандартным методикам при $P = 0.05$ в соответствии с [24], расчет коэффициентов биологического поглощения (КБП) – по [11]. Рисунки выполнены в Microsoft Office Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Свинец. В семенах, отобранных на дерново-подзолистых почвах района I, количественное содержание металла выявлено только у ячменя. Пшеница яровая в этом районе не представлена из-за малых объемов выращивания. Зерно озимых культур из района III с серыми лесными почвами содержало Pb в 3 раза больше, чем из района IV с черноземами (рис. 1), что связано с промышленным насыщением района, но различия были недостоверными. Содержание свинца различалось в зерне овса и ячменя из этих районов достоверно. В горохе он был найден только в образцах, выращенных на черноземах района IV, и количественно больше, чем в семенах других культур из этого района. Коэффициент варибельности содержания (C_V) Pb был $>100\%$, в том числе и у ячменя при его самой большой выборке, вероятно, из-за неравномерного загрязнения почв точечными источниками.

Таким образом, в зерне озимых культур и почвах районов отсутствовали достоверные отличия в содержании Pb, но они были получены для ячменя и овса из районов III и IV при очень высоких показателях C_V (табл. 1, 2).

Цинк. Zn был вторым среди ТМ по величине содержания в семенах изученных растений. Зерно озимых культур и овса имело значимые различия между районом I с дерново-подзолистыми почвами и районами III с серыми лесными и IV с черноземами, гороха – между районами III и IV. У гороха C_V Zn оказался минимальным в районе III и максимальным у овса в районе I, где все культуры выделялись высокими показателями C_V .

Таким образом, достоверность различий содержания Zn выявлена в семенах озимых и овса

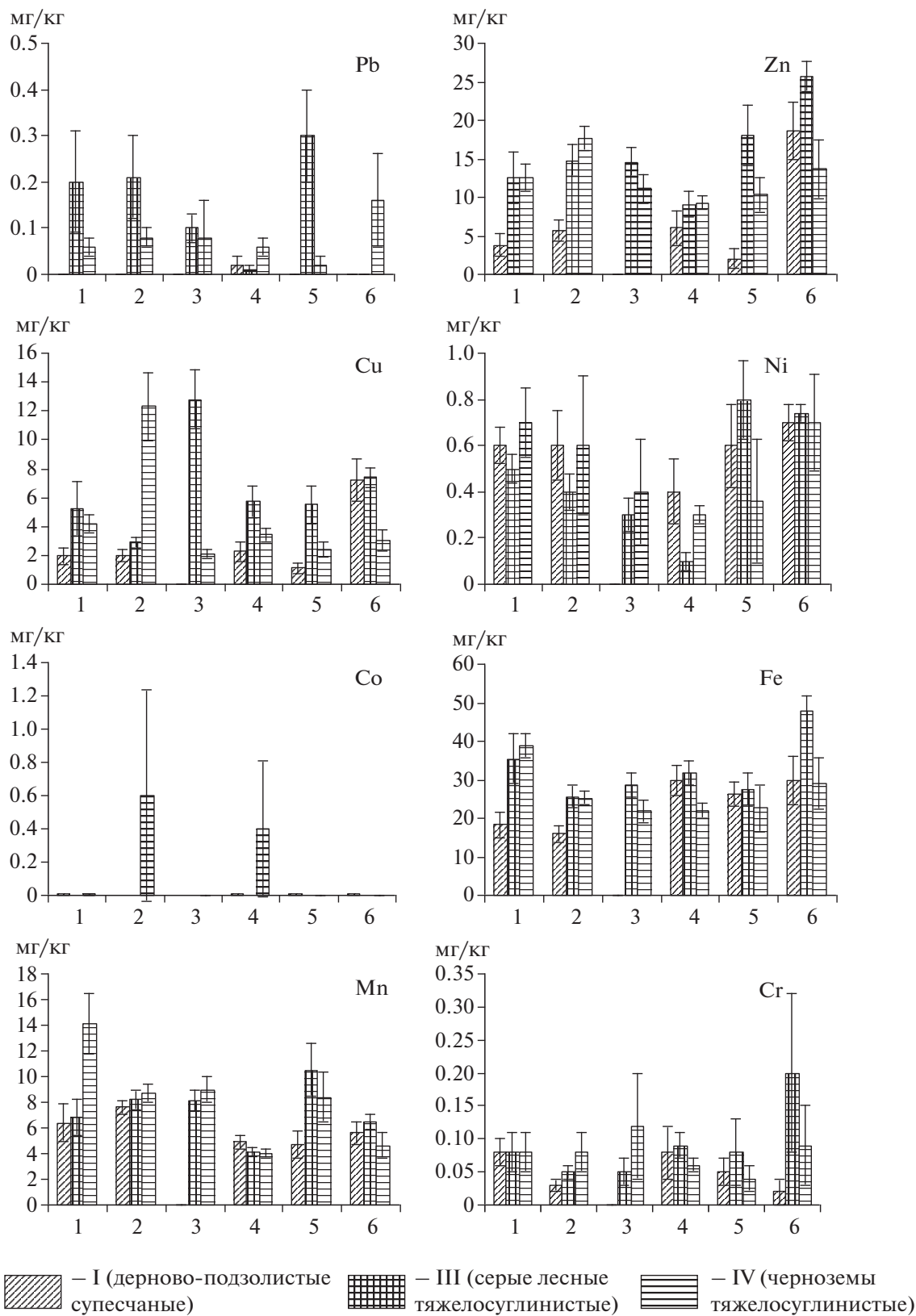


Рис. 1. Содержание ТМ в семенах культурных растений при выращивании на разных почвах, мг/кг: 1 – рожь озимая, 2 – пшеница озимая, 3 – пшеница яровая, 4 – ячмень, 5 – овес, 6 – горох. То же на рис. 2.

Таблица 1. Статистические характеристики содержания ТМ в почвах агропочвенных районов

Район	Количество проб, шт.	Показатель	Металлы							
			Pb	Zn	Cu	Ni	Co	Fe ($\times 10^2$)	Mn	Cr
I	576	lim, мг/кг	0.0–115	7.0–170	1.0–188	1.0–93.0	1.0–76.0	37–990	324–5800	5.0–184
		C_V	72.1	42.5	104	52.8	90.3	34.7	38.2	32.2
III	467	lim, мг/кг	0.0–68.0	1.0–120	0.0–95	0.0–420	0.0–64.0	220–660	86.0–1010	26.0–157
		C_V	74.5	41.2	80.3	82.1	61.7	16.1	57.1	30.0
IV	942	lim, мг/кг	0–199	0–215	0–210	0–472	0–85.0	260–910	106–2530	11.0–154
		C_V	88.7	58.9	107	68.8	47.9	12.8	53.2	37.3
td			I/III, I/IV, III/IV	I/III, I/IV, III/IV	I/III, I/IV	I/III, I/IV	I/III, I/IV, III/IV	I/III, I/IV, III/IV	I/III, I/IV	I/III, I/IV, III/IV

Примечания. 1. I, III, IV – районы. 2. C_V – коэффициент вариации. 3. I/IV достоверные различия между районами (при $P = 0.05$).

на дерново-подзолистых почвах района I и почвах других районов, в семенах гороха – из районов III и IV, что было обусловлено, вероятно, максимальным содержанием металла в дерново-подзолистых почвах района I и значимыми различиями в его содержании между почвами районов (табл. 1).

Медь. Содержание Cu оказалось наиболее высоким в семенах растений, выращенных на серых лесных почвах района III, кроме озимой пшеницы. Ее зерно на черноземах района IV содержало металла достоверно больше, чем в районе I с дерново-подзолистыми почвами и в районе III с серыми лесными почвами. Район III отличался высоким содержанием Cu в зерне следующих культур: озимой ржи, в котором ее было в 3 раза больше, чем на дерново-подзолистых почвах района I, а также в зерне яровой пшеницы, значимо отличавшимся от зерна из черноземного района IV. Концентрации этого металла в ячмене и овсе из разных районов были очень близкими, но достоверно различались между районами, где вариабельность у ячменя была наименьшей: I и III, III и IV. Эту же закономерность выявили и для овса (табл. 2). Содержание Cu в горохе было одинаковым в районах I и III с дерново-подзолистыми и серыми лесными почвами соответственно, и достоверно различалось по сравнению с образцами, выращенными на черноземах района IV с высоким плодородием, мощным гумусным слоем большой буферности.

Таким образом, содержание Cu оказалось практически одинаковым (2.1–4.2 мг/кг) в семенах культур, отобранных на черноземных почвах района IV, кроме озимой пшеницы. Однако содержание металла достоверно различалось у ози-

мых культур и гороха черноземов района IV, дерново-подзолистых почв района I и серых лесных почв района III почти у всех яровых. Следует отметить одинаковые различия, но противоположной направленности: в сторону увеличения (озимая пшеница) и снижения (яровая пшеница) между серыми лесными (район III) и черноземными почвами (район IV). Для Cu были схожим характер накопления металла и равновеликим его содержание в зерне озимой ржи, ячменя и овса, которое достоверно различалось для некоторых районов произрастания (табл. 2).

Никель. Содержание Ni различалось, но не достоверно, в зерне озимых культур и яровой пшеницы из районов с разными типами почв. Пшеница, ячмень и озимая рожь являются низкими Ni-накопителями, горох и овес – высокими [25]. Уровень содержания металла в зерне овса и ячменя, как у видов, противоположных по его поглощению, сильно различался в зависимости от района произрастания культур, но достоверно – у ячменя из районов I и III.

Таким образом, содержание Ni варьировало в семенах изученных культур в узком диапазоне (0.1–0.8 мг/кг) и достоверно различалось только у ячменя при высоких C_V семян и на дерново-подзолистых почвах из района I и серых лесных почвах района III.

Кобальт. Анализ показал, что содержание Co в семенах многих культур было меньше предела обнаружения методом анализа (**нпо**), в районе III – в семенах всех изученных культур. Кобальт обнаружен в семенах из района I с дерново-подзолистыми почвами, кроме озимой пшеницы, а также в зерне озимых и ячменя на черноземах района IV.

Таблица 2. Коэффициент вариации и достоверность различий содержания ТМ в семенах сельскохозяйственных растений агропочвенных районов

Район	Количество проб, шт.	Металлы, мг/кг							
		Pb	Zn	Cu	Ni	Co	Fe	Mn	Cr
Рожь озимая									
I	17	–	159	121	57.9	282	75.2	93.2	107
III	12	178	92.5	125	37.7	–	62.7	69.4	134
IV	43	192	91.8	103	133	458	53.6	110	232
<i>td</i>		I/IV	I/III, I/IV	I/IV	0	0	I/III, I/IV	III/IV, I/III	0
Пшеница озимая									
I	26	–	115	100	135	–	70.7	33.1	162
III	21	194	63.5	54.8	99.2	–	52.9	44.4	93.4
IV	66	240	70.5	156	378	812	54.0	63.7	303
<i>td</i>		I/IV	I/III, I/IV	I/IV, III/IV	0	0	I/III, I/IV	0	0
Пшеница яровая									
III	20	157	59.8	71.1	95.5	–	50.3	438	172
IV	18	424	70.0	67.5	230	–	55.9	46.8	291
<i>td</i>		0	0	III/IV	0	0	0	0	0
Ячмень яровой									
I	17	412	156	129	129	412	53.8	44.4	188
III	28	529	100	103	154	–	53.1	49.5	113
IV	85	315	90.7	142	137	917	79.4	78.8	205
<i>td</i>		III/IV	0	I/III	I/III	0	III/IV	0	0
Овес									
I	16	–	265	148	128	400	46.7	89.9	163
III	13	134	77.6	86.6	71.5	–	57.4	69.7	142
IV	11	332	72.7	71.7	249	–	88.5	78.0	223
<i>td</i>		I/III, III/IV	I/III, I/IV	I/III, III/IV	0	0	0	I/III	0
Горох									
I	14	0	76.3	74.4	40.6	374	78.4	60.6	270
III	5	0	16.9	19.8	12.1	–	18.9	19.7	112
IV	11	209	92.4	81.6	93.1	–	76.3	73.2	222
<i>td</i>		0	III/IV	I/IV; III/IV	0	0	0	0	0

Примечания. 1. Прочерк – нет выборки. 2. I, III, IV – почвенные районы. 3. I/IV и 0 – достоверные и недостоверные различия между районами (при $P = 0.05$).

Величины концентраций имели самые большие C_V и недостоверные различия (табл. 2). Вероятно, это обусловлено легким гранулометрическим составом дерново-подзолистых почв района I, что повлияло на достаточно высокую миграцию Co в растения, а его накопление в семенах на черноземах района IV было связано с самым высоким содержанием в почве. Содержание Co в семенах оказалось одним из самых низких среди металлов, так же как и в почвах.

Железо. Содержание Fe в семенах культур было наиболее высоким, а показатель C_V – одним из

низких. Концентрации металла в зерне озимой пшеницы в районах произрастания были одинаковыми, но до 50% меньше, чем озимой ржи. Накопление металла в зерне озимых культур достоверно различались между районом I с дерново-подзолистыми почвами и районами III с серыми лесными и IV с черноземами. Концентрации Fe в зерне яровых зерновых и гороха были близкими: 21.8–31.6 мг/кг, а достоверно различались эти показатели у ячменя между районами III и IV.

Очень высокое содержание Fe в почвах, вероятно, и обусловило максимальное содержание в

семенах, которое достоверно различалось у озимых и ячменя в разных районах (табл. 2).

Марганец. Максимальное содержание Mn нашли в зерне озимой ржи на черноземах района IV (подвижность металла 6%) и овса в районе III с серыми лесными почвами (подвижность Mn 14%) [9]. Оно достоверно различалось в зерне озимой ржи на черноземах района IV, дерново-подзолистых почвах района I и серых лесных почвах района III, а также у овса из районов I и III. В зерне ячменя оно было везде самым низким и практически одинаковым.

Хром. Содержание Cr выявлено в семенах всех культур из всех районов, но оно оказалось самым низким из изученных ТМ, вероятно, из-за очень низкой подвижности металла ($\approx 2\%$). Достоверных различий не было обнаружено, вероятно из-за весьма высоких C_p , но в почвах они отмечены для всех районов (табл. 1, 2). Показано, что содержание Cr в зерне озимой ржи было одинаковым для всех районов.

Содержание ТМ в семенах сельскохозяйственных культур соответствовало, кроме единичных случаев, требованиям безопасности [26, 27]. Семян, достоверно различавшихся во всех районах содержанием каких-либо изученных ТМ, не отмечено. Не имело достоверных различий содержание Co и Cr в семенах всех культур, тогда как содержание этих металлов в почвах различалось во всех районах.

Содержание Ni в семенах ячменя и Mn в семенах овса, а также их содержание в почвах достоверно различалось в районах I и III.

В семенах ряда культур различия содержания ТМ отмечено только в образцах из районов III и IV: Pb – у овса и ячменя, Zn – у гороха, Fe – у ячменя, Cu – у яровой пшеницы (в почвах таких различий не выявлено). Достоверность различий содержания ТМ выявлена в основном в семенах озимых культур в большем количестве районов: I и III, I и IV, Zn – озимых и овса, Fe – озимых, содержания Pb, Zn и Fe в почвах – для всех районов. Районы I и IV, III и IV различались содержанием Cu в семенах озимой пшеницы, гороха и Mn – озимой ржи. Содержание этих элементов в почвах различалось только в районах I и IV.

Следовательно, аккумуляция металлов семенами не всегда была пропорциональна их содержанию в почве. Свинец активнее мигрировал в сопредельные системы в районах III и IV с более плодородными серыми лесными и черноземными почвами соответственно. Внутрипрофильная миграция Cu и Mn преобладала над их переходом в

растения в районе I с дерново-подзолистыми почвами [9].

По содержанию ТМ в семенах сельскохозяйственных растений и почве рассчитывали интенсивность их биопоглощения (КПБ) в разных агроэкологических условиях районов произрастания (рис. 2).

Наибольшие величины КПБ на дерново-подзолистых почвах района I для семян гороха выявлены для Zn и Cu, минимальные – для Cr. Рожь озимая отличалась максимальным поглощением Ni, Co и Cr, ячмень – Fe и Pb (наличие металла выявлено только у этой культуры). Аккумуляция Zn и Cu семенами растений была одинакового порядка с максимальным поглощением элемента горохом, поглощение Ni было полностью одинаковым (кроме минимального у ячменя). Установлен убывающий ряд величин КПБ металлов в районе I: Zn – горох > > пшеница озимая = ячмень > рожь озимая > овес; Cu – горох > пшеница озимая = ячмень > рожь озимая > овес; Ni – рожь озимая = пшеница озимая = овес = горох > ячмень; Co – рожь озимая > горох > > ячмень = овес > пшеница озимая; Fe – ячмень = горох > овес > рожь озимая = пшеница озимая; Mn – пшеница озимая > рожь озимая = горох > ячмень = овес; Cr – рожь озимая = ячмень > овес > > пшеница озимая > горох.

Семена озимых культур одинаково аккумулялировали Ni и Fe и максимально различались накоплением Co. Для семян овса и озимой пшеницы установлены минимальные КПБ.

В районе III с серыми лесными почвами максимальные КПБ были выявлены у яровой пшеницы для Cu и Fe, у гороха – для Zn, у ячменя – для Cr, у овса – для Pb, Ni, Mn, и ряд биоаккумуляции выглядел следующим образом:

Pb – овес > пшеница озимая > рожь озимая > > пшеница яровая > ячмень > горох; Zn – горох > > овес > пшеница озимая > пшеница яровая > > рожь озимая > ячмень; Cu – пшеница яровая > > горох > ячмень > овес > рожь озимая > пшеница озимая; Ni – овес > рожь озимая = горох > пшеница озимая > пшеница яровая > ячмень; Fe – пшеница яровая = овес > горох > рожь озимая > > ячмень > пшеница озимая; по Mn – овес > > пшеница озимая = пшеница яровая > рожь озимая > горох > ячмень; Cr – ячмень > горох > > рожь озимая = овес > пшеница озимая = пшеница яровая.

У обеих форм пшеницы было одинаковым аккумулялирование Mn и Cr, а противоположной направленности – Cu и Fe, причем у яровой – в большую сторону. Аккумуляция остальных металлов (Pb, Zn, Ni) озимой пшеницей была боль-

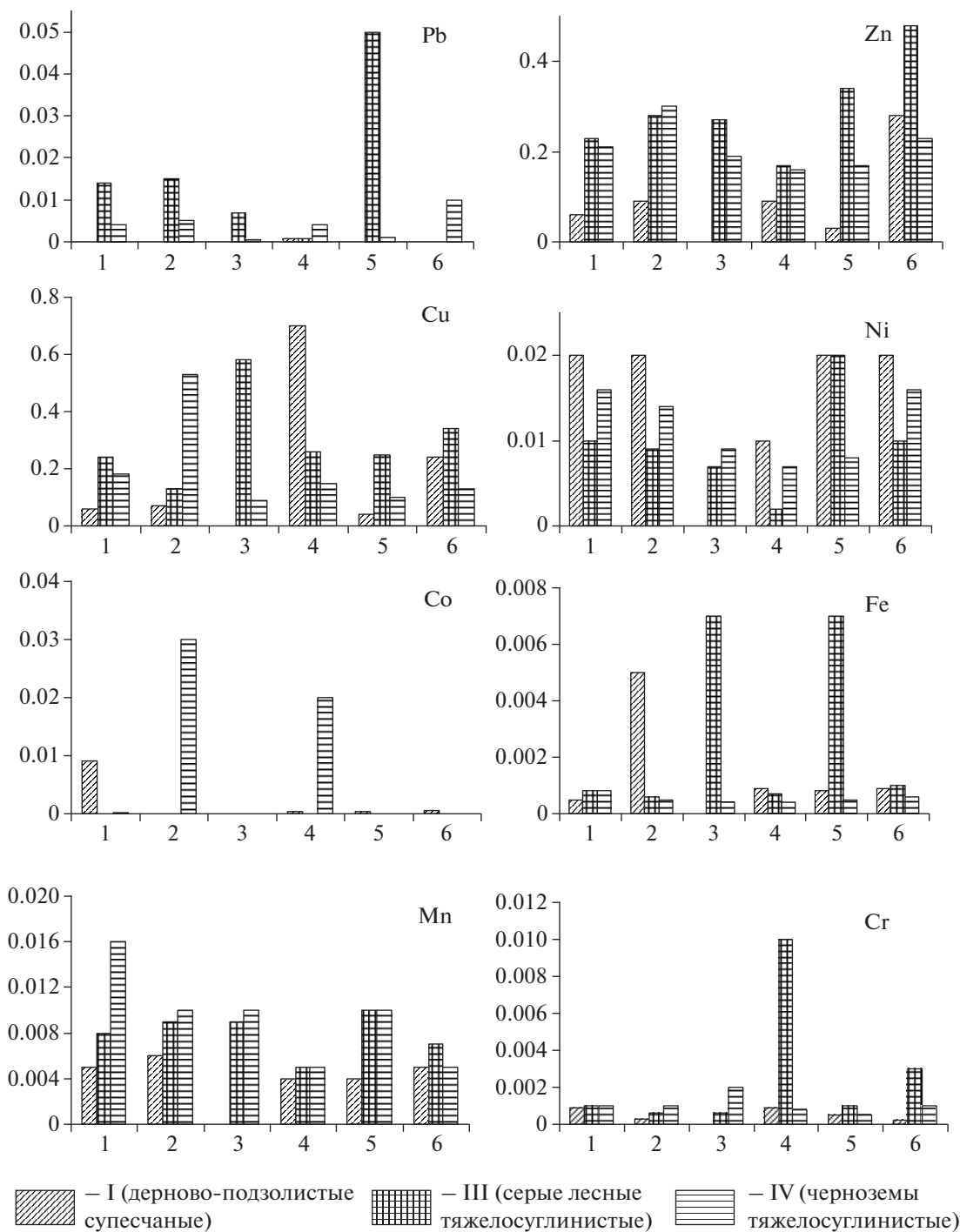


Рис. 2. Коэффициенты биологического поглощения (КБП) ТМ семенами культурных растений на разных почвах.

ше, чем яровой. У ячменя часто отмечено минимальное биопоглощение ТМ (Zn, Ni и Mn).

Семена гороха, выращенного на черноземах района IV интенсивно аккумулировали Pb, пшеницы озимой – Zn, Cu, Co, яровой – Cr, семена озимой ржи повышено поглощали Ni, Fe и Mn. В наименьшей степени семенами яровой пшени-

цы накапливались Pb, Cu, Co, Fe, ячменя – Zn, Ni, Fe и Mn, гороха – Co и Mn; овса – Co и Cr. Интенсивность поглощения Mn различалась среди семян культур района IV меньше других металлов в ряду убывающих величин КБП: Pb – горох > > пшеница озимая > рожь озимая = ячмень > овес > > пшеница яровая; Zn – пшеница озимая > горох >

Таблица 3. Соотношение коэффициентов биологического поглощения ТМ семенами сельскохозяйственных культур в агроэкологических условиях агропочвенных районов

Агропочвенные районы		
I	III	IV
Озимая рожь		
Zn = Cu > Ni > Co > Mn > Cr > Fe > Pb	Cu > Zn > Pb > Ni > Mn > Cr > Fe > Co	Zn > Cu > Ni = Mn > Pb > Cr > Fe > Co
Озимая пшеница		
Zn > Cu > Ni > Mn > Fe > Cr > Pb = Co	Zn > Cu > Pb > Ni = Mn > Fe = Cr > Co	Cu > Zn > Co > Ni > Mn > Pb > Cr > Fe
Яровая пшеница		
–	Cu > Zn > Mn > Pb = Ni = Fe = Cr > Co	Zn > Cu > Mn > Ni > Cr > Pb > Fe > Co
Ячмень		
Zn > Cu > Ni > Mn > Fe = Cr > Pb > Co	Cu > Zn > Cr > Mn > Ni > Pb = Fe > Co	Zn > Cu > Co > Ni > Mn > Pb > Cr > Fe
Овес		
Cu > Zn > Ni > Mn > Fe > Cr > Co > Pb	Zn > Cu > Pb > Ni > Mn > Fe > Cr > Co	Zn > Cu > Mn > Ni > Pb > Fe = Cr > Co
Горох		
Zn > Cu > Ni > Mn > Fe > Co > Cr > Pb	Zn > Cu > Ni > Mn > Cr > Fe > Pb = Co	Zn > Cu > Ni > Pb > Mn > Cr > Fe > Co

> рожь озимая > пшеница яровая > овес > ячмень; Cu – пшеница озимая > рожь озимая > ячмень > горох > овес > пшеница яровая; Ni – рожь озимая = горох > пшеница озимая > пшеница яровая > овес > ячмень; Co – пшеница озимая > ячмень > рожь озимая > пшеница яровая = овес = горох; Fe – рожь озимая > горох > пшеница озимая = овес > пшеница яровая = ячмень; Mn – рожь озимая > пшеница озимая = пшеница яровая = овес > ячмень = горох; Cr – пшеница яровая > рожь озимая = пшеница озимая = горох > ячмень > овес.

При сравнении двух форм одной культуры отмечено, что зерно озимой пшеницы характеризовалось максимальным аккумулярованием Cu, яровой – минимальным, но одинаковым – Mn.

Обобщенные ряды величин КБП представлены в табл. 3. Первые два места принадлежали Zn и Cu у всех культур, Ni был на третьем месте: в районе I с дерново-подзолистыми почвами, а также в районе III с серыми лесными – у семян гороха, в районе IV с черноземами – у озимой ржи и гороха. Степень поглощения Mn была средней величины. Семена всех культур имели минимальный КБП в районе I с дерново-подзолистыми почвами для Co и Pb, в районе III с серыми лесными – для Co и Cr, в районе IV с черноземами – для Fe и Co. Повышенное накопление Cu и Zn семенами культурных растений отмечали в работах [28, 29].

Содержание Mn, Zn, Cu, Ni и Co в почве районов было в 1.5–2.0 раза меньше ОДК [30], поэтому, вероятно, может быть перспективным их использование в качестве микроудобрений, т.к. они

являются биофильными металлами, важность которых для растений [16] подтверждена их высокой степенью поглощения (кроме Co) и исследованиями некоторых из этих микроэлементов [31, 32]. Кроме прибавки урожая, Zn, являясь антагонистом Cd, токсиканта I-й группы опасности [26], препятствует его поглощению семенами культурных растений [33]. Содержание Cd в продукции растениеводства можно снижать при помощи некоторых других из упомянутых микроэлементов [34–36].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, семена сельскохозяйственных растений различались по накоплению тяжелых металлов (ТМ), вариабельности содержания и интенсивности поглощения в разных агроэкологических условиях и почвах агропочвенных районов. ТМ группируются по величинам содержания в семенах следующим образом: группа I – 30–60 мг/кг (Fe); группа II – от 4.0–8.0 до 12.0–25.0 мг/кг (Zn, Cu и Mn); группа III – 0–0.8 мг/кг (Pb, Co, Ni и Cr). На дерново-подзолистых почвах с легким гранулометрическим составом (район I) семена культур не выделялись среди других районов по содержанию ТМ, но в районе горох выделялся содержанием Cu, озимая пшеница и ячмень – Ni, на серых лесных почвах тяжелосуглинистого гранулометрического состава (район III) в семенах овса содержание всех ТМ и некоторых яровых культур ряда металлов было максимальным. В районе IV с черноземами семена озимых зерновых опережали по накоплению ТМ другие

культуры (пшеница – всех ТМ, кроме Pb, рожь – Mn и Ni), горох – Pb.

Выявленная изменчивость семян культурных растений по составу ТМ свидетельствовала о существенном влиянии агроэкологических факторов, в частности типов почв агропочвенных районов, влияние которых было сильнее генетически обусловленного контроля накопления ТМ. В результате механизмы ограничения поглощения ТМ оказывались слабее механизмов поглощения дефицитных микроэлементов.

Коэффициенты вариации содержания Pb, Co и Cr всегда были >100%, при этом достоверно не различалось содержание Co и Cr в семенах культур из всех районов, содержание Pb – в 2/3 случаев сравнений между районами. Основные различия концентраций выявлены у озимых культур, у яровых – из районов III и IV с более плодородными почвами.

По интенсивности поглощения семена растений различались как по видам, так и в пределах одной культуры из разных почвенных районов. Наибольшей степенью поглощения отличались во всех районах Zn и Cu, средней интенсивностью – Ni и Mn, минимально семена накапливали Pb, Fe, Cr и особенно Co. Величины КБП ТМ можно использовать как дополнительный элемент прогнозирования потребности растений в микроэлементах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Силаева Т.Б.* Состояние растительного мира Мордовии // Интеграция образования. 2000. № 2. С. 48–52.
2. *Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.Н., Лайдинен Г.Ф.* Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Карел. науч. центр, 2007. 170 с.
3. *Бармаков Д.И., Лукаткин А.С.* Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжелых металлов у высших растений. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. 236 с.
4. *Осичкин А.Ю., Ахметов Ш.И., Кононова Г.М., Додонов И.А.* Классификация, свойства, бонитировка и охрана почв Республики Мордовия / Под ред. Ахметова Ш.И. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2005. 108 с.
5. *Пугаев С.В.* Геохимическое районирование пахотных почв Республики Мордовия по содержанию тяжелых металлов // Достиж. науки и техн. АПК. 2015. Т. 29. № 3. С. 28–32.
6. *Кабата-Пендиас А.* Проблемы современной биогеохимии микроэлементов // Росс. хим. журн. 2005. Т. 69. № 3. С. 15–19.
7. *Baron S., Carignan J., Plogiun A.* Dispersion of heavy metals (metalloids) soils from 800 year old pollution (Mont Lotere, France) // Environ. Sci. Technol. 2006. V. 40. P. 5319–5326.
8. *Гукалов В.Н., Савич В.И., Трифонова Н.А.* Поэтапное изменение свойств почв при загрязнении их тяжелыми металлами // Плодородие. 2015. № 1. С. 42–44.
9. *Пугаев С.В.* Содержание и транслокация поллютантов в компонентах антропогенно измененных биогеоценозов в условиях Республики Мордовия: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Н. Новгород, 2013. 23 с.
10. *Пугаев С.В., Лукаткин А.С.* Накопление тяжелых металлов в почве и листовом аппарате растений дендрария Ботанического сада Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва // Агрохимия. 2015. № 5. С. 82–89.
11. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва–растение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 220 с.
12. *Ali H., Khan E., Ilahi I.* Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation // J. Chem. 2019. V. 2019, Article ID 6730305.
13. *Bücker-Neto L., Paiva A.L.S., Machado R.D., Arenhart R.A., Margis-Pinheiro M.* Interactions between plant hormones and heavy metals responses // Genet. Mol. Biol. 2017. V. 40(1 Suppl 1). P. 373–386.
14. *Sytar O., Kumari P., Yadav S., Brestic M., Rastogi A.* Phytohormone priming: Regulator for heavy metal stress in plants // J. Plant Growth Regul. 2019. V. 38. P. 739–752.
15. *Зубкова В.М., Демин В.Н.* Роль корней при поступлении тяжелых металлов в растения в условиях повышенной концентрации их в почве // Докл. РАСХН. 2004. № 1. С. 23–26.
16. *Андреева И.В., Говорина В.В., Виноградова С.Б., Ягодин Б.А.* Никель в растениях // Агрохимия. 2001. № 3. С. 82–94.
17. *Noulas C., Tziouvalekas M., Kariotis T.* Zinc in soils, water and food crops // J. Trace Element. Med. Biol. 2018. V. 49. P. 252–260.
18. *Пугаев С.В.* Содержание ТМ в продукции зерновых и зерно-бобовых культур на почвах разных типов // Освоение адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий. Мат-лы Всеросс. науч.-практ. конф. Ульяновский НИИСХ, 6–8 июля 2010 г. С. 174–179.
19. *Кудашкин М.И.* Медь и марганец в агроландшафтах юга Нечерноземья. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2008. 329 с.
20. *Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства.* М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
21. *Универсальные правила отбора проб растениеводческой продукции.* М.: Агропромиздат, 1987. 198 с.
22. *Методика определения тяжелых металлов в растительном сырье.* МВИ ЭС № 883-93. СПб.: НПО “Спектрон”, 1993. 25 с.
23. *Методика определения содержания металлов в поршковых пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа.* СПб.: НПО “Спектрон”, 1994. 11 с.
24. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Колос, 1985. 423 с.

25. Барсукова В.С., Гамзикова О.И. Влияние избытка никеля на элементный состав контрастных по устойчивости к нему сортов пшеницы // *Агрохимия*. 1999. № 1. С. 80–85.
26. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Сан-ПиН 2.3.2.1078-01. М.: Интер СЭН, 2002. 51 с.
27. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных. М.: Глав. управл-е ветеринарии Госагропрома СССР, 1987. 3 с.
28. Кашин В.К., Убугунов Л.Л. Особенности накопления микроэлементов в зерне пшеницы в Западном Забайкалье // *Агрохимия*. 2012. № 4. С. 68–76.
29. Кашин В.К. Особенности накопления микроэлементов в зерне овса в Западном Забайкалье // *Агрохимия*. 2013. № 10. С. 56–65.
30. Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов и мышьяка в почвах (Дополнения №1 к перечню ПДК и ОДК № 6229-91): Гигиенические нормативы. М.: Информ.-издат. центр Госсанэпиднадзора России, 1995. 8 с.
31. Пугаев С.В., Прокина Л.Н. Эффективность комплекса агрохимических средств в зернотравяно-пропашных севооборотах // *Агрохимия*. 2016. № 7. С. 44–51.
32. Пугаев С.В. Влияние агротехнологических приемов на накопление тяжелых металлов озимой пшеницей на черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом // *Агрохимия*. 2016. № 4. С. 70–77.
33. Анисимов В.С., Санжарова Н.И., Анисимова Л.Н., Гераськин С.А., Дикарев Д.В., Фригидова Л.М., Фригидов Р.А., Белова Н.В. Оценка миграционной способности и фитотоксичности Zn в системе почва–растение // *Агрохимия*. 2013. № 1. С. 64–74.
34. Пугаев С.В., Прокина Л.Н. Способ оптимизации содержания кадмия и кобальта в зерне озимой пшеницы. Пат. 2633777, РФ, от 22.03.16, А01С 1/00 (2006.01). Б.И. 2018. № 5. 6 с.
35. Пугаев С.В., Прокина Л.Н. Способ снижения содержания кадмия в зерне озимой пшеницы (2 формулы) Пат. 2648704, РФ, от 24.03.16. А01С 1/00 (2006.01). Б.И. 2018. № 10. 7 с.
36. Пугаев С.В., Прокина Л.Н. Способ снижения содержания кадмия в зерне озимой пшеницы. Пат. 2632083, РФ, от 22.03.16. А01С 1/00 (2006.01). Б.И. 2018. № 4. 5 с.

Peculiarities of Heavy Metals Accumulation in Productive Part of Crop Plants in Different Agro-Ecological Conditions of the Republic of Mordovia

S. V. Pugaev

*Mordovia Research Institute of Agriculture—Branch of the N.V. Rudnitsky
Federal Agricultural Research Center of the North-East
ul. Michurina 5, r. p. Yalga, Saransk 430904, Russia*

E-mail: niish-mordovia@mail.ru

The biological uptake of heavy metals (HM) by seeds of agricultural plants in different soils of the Republic of Mordovia, which by common characteristics and Genesis are United in agro-soil areas: sod-podzolic soils of sandy loam granulometric composition-district I, district III – gray forest soils of heavy granulometric composition; district IV – heavy loamy chernozems. The range of HM content in the soils of the districts, their variability and reliability of differences are shown. The nature of the accumulation of metals by seeds was species – specific, but it also had General patterns. On sod-podzolic soils (district I), peas were distinguished by the highest content of Cu, winter wheat and barley – Ni, the content of all HMS in oats was higher on gray forest soils (district III), on chernozems (district IV) there was the most Pb in pea seeds, in winter wheat grain – all HMS except Pb. The Co content in the seeds was low and only in rare cases, Cr – at the Co level, but in the seeds of all crops and in all areas. The intensity of TM absorption from soils decreased depending on the value of the biological absorption coefficients (BAC) in the series: gray forest soils > chernozems > sod-podzolic soils. Cu and Zn had the highest CBP. Ni uptake was average among crops and more intense than Mn; plants minimally absorbed Pb, Fe, Cr, and Co. The series of metals by the value of BAC depending on the soil of the area and culture are given.

Key words: heavy metals, agricultural plants, seeds, soil, biological absorption coefficient.