

УДК 631.81:631.821:632.122.1

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ И ИЗВЕСТКОВАНИЯ НА СОДЕРЖАНИЕ И БИОЛОГИЧЕСКОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ РАСТЕНИЯМИ ОВСА

© 2025 г. С. В. Пугаев^{1,*}, Л. Н. Прокина¹

¹Мордовский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
430904 Саранск, п/о. Ялга, ул. Мичурина, 5, Россия
*E-mail: niish-mordovia@mail.ru

В длительном стационарном опыте в зернотравянопропашном севообороте изучили содержание Cd, Pb, Cu и Zn в зерне и соломе овса на фоне применения минеральных удобрений (азотных, фосфорных и калийных) и известкования и без него. Агрохимикаты изменяли содержание тяжелых металлов (ТМ) в основной и побочной продукции овса. Требования гигиенических нормативов по содержанию ТМ в растениеводческой продукции в условиях опыта не были нарушены. В условиях применения средств химизации биологическое поглощение ТМ растениями овса изменялось. Для соломы была характерна барьерная способность по отношению к Pb. Корреляционные связи содержания ТМ между собой как в зерне, так и в соломе овса изменялись под влиянием агрохимикатов с отрицательных на положительные и наоборот.

Ключевые слова: овес, тяжелые металлы, минеральные удобрения, известкование.

DOI: 10.31857/S0002188125030098, **EDN:** UQJIW

ВВЕДЕНИЕ

Основная часть растениеводческой продукции России производится с применением удобрений, в основном минеральных [1]. Земледелие ежегодно подвергается влиянию соединений природного и антропогенного характера, свойства почв меняются [2–4]. Удельную долю загрязнителей почв показывает следующий ряд: удобрения → транспорт → промышленное производство [5]. В почве при этом происходят превращения химических и органических веществ, изменяется фракционный состав и подвижность тяжелых металлов (ТМ), усиливается их доступность для растительных организмов [4, 6]. При этом черноземы проявляют большую буферную емкость и депонирующую способность по отношению к ТМ [7]. На черноземе выщелоченном овес накапливал больше Zn, Cd, Cu и Pb, чем на темно-серой лесной и серой лесной почвах [8].

Растения имеют специфические защитные механизмы, благодаря которым поток избыточных ТМ в органы запасаания ассимилянтов существенно ограничен [9–13]. Барьерный коэффициент – это коэффициент распределения содержания металлов между надземной массой и корневой системой [14].

Поэтому особо следует изучать роль корней при поступлении ТМ в растения на барьере почва–корень и корень–надземные органы [15, 16]. Авангардом в защите растений от избытка в почве ТМ являются корневые выделения, которые составляют 5–6% от вегетативной массы растений. Изучение барьерных свойств растений необходимо для выявления экологического потенциала растений [17]. Уровень ТМ в почве, их фракционный состав, обуславливающие биодоступность металлов, не всегда определяют количество поглощаемых металлов и уровень их содержания в растениях, приоритетом в этом случае является потребность самого растения [18]. Это особенно важно из-за того, что для продукции растениеводства установлены требования безопасного содержания ТМ в пищевых продуктах и кормах [19, 20].

Известны работы по изучению влияния отдельных видов удобрений, мелиорантов на поглощение и содержание ТМ растениями [21–26]. Достоверное накопление ТМ зависит от длительности применения удобрений, их видов и форм [27]. При изучении поглощения ТМ зерном овса было выявлено, что коэффициент биологического поглощения (КБП) Pb был меньше, чем у ячменя, но больше, чем у яровой пшеницы, как и КБП Cu, тогда как КБП Zn,

наоборот, был меньше у яровой пшеницы, но больше, чем у ячменя [8].

Однако недостаточно работ по изучению комплексного влияния средств химизации на накопление ТМ продукцией растениеводства: в 100 раз меньше, чем только с удобрениями [12], причем известно, что 47% агрохимических приемов приводят к накоплению ТМ и только 12.7% экспериментальных работ (из 3809) описывают результаты уменьшения содержания ТМ в овсе. В связи с этим цель работы – изучение поглощения, накопления и содержания ТМ зерном и соломой овса при его выращивании с применением разных видов и доз минеральных удобрений на фоне известкования и без него.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой опыт, в котором проводили исследование, существует в Мордовском НИИСХ – филиале ФАНЦ Северо-Востока с 1972 г. Его почва – чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый по классификации Добровольского [28]. Посевная площадь делянки – 150 м², учетная для зерновых – 100 м², повторность трехкратная. Опыт заложен методом расщепленных делянок. Делянки 1-го порядка: 1 – без известкования с 1972 г. (контроль), 2 – известкование по 0.5 г.к. Делянки 2-го порядка: I – без удобрений с 1972 г. (контроль), II – фосфорно-калийные удобрения (P50K80), III – РК + N30, IV – РК + N90.

Последовательность культур в зернотравянопропашном севообороте: яровая пшеница (*Triticum monococcum* L.) яровая пшеница (*Triticum monococcum* L.) + многолетние травы – многолетние травы 1-го года пользования – многолетние травы 2-го года пользования – многолетние травы 3-го года пользования – озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.) – яровая пшеница (*Triticum monococcum* L.) – соя культурная (*Glycine max* (L.) Merr.) – овес посевной (*Avena sativa* L.). Многолетние травы – кострец безостый (*Bromus inermis* Leys). Агротехника культур – рекомендованная для условий Мордовии, кроме изученных факторов [29].

Известкование проводили перед закладкой опыта и в 2000 г. Удобрения вносили поделяночно вручную: P_{сд} и K_х – под основную обработку, N_{аа} – ежегодно весной. Агрохимическая характеристика почвы (слой 0–20 см) перед закладкой опыта: содержание гумуса – 8.7 ± 0.5%, рН_{H2O} 6.3 ± 0.1 ед., рН_{KCl} 5.4 ± 0.1 ед., H_г и S – 6.2 ± 0.3 и 32.6 ± 0.8 ммоль (экв)/100 г соответственно, V – 84 ± 2%, содержание P₂O₅ – 65 ± 15 и K₂O – 120 ± 38 мг/кг. Агроклиматические условия – типичные для зоны неустойчивого увлажнения.

Зерно и солому овса посевного сорта Горизонт отбирали на анализ во время уборки (2012 г.) по унифицированным правилам [30]. Содержание

ТМ в воздушно-сухой массе растительных образцов определяли в трехкратной повторности атомно-абсорбционным методом на приборе “Квант” (Россия) с использованием реактивов марок ч.д.а. и х.ч. по [31]. Применяли общепринятые агрохимические методики.

Отношение результатов содержания ТМ в растительном материале, усредненных в вариантах, к усредненному содержанию в почве соответствующих вариантов их кислоторастворимых форм (КРФ) из нашей работы [32] рассчитывали как коэффициенты биологического поглощения (КБП) металлов по [10]. Барьерные коэффициенты (БК) получены по методике [33].

Результаты обрабатывали статистическими методами [34] с помощью программ STAT-3. В таблицах даны средние величины со среднеарифметической ошибкой, K_v – коэффициент варибельности анализов. Достоверность между вариантами определяли путем расчета коэффициента Стьюдента – *td*-критерия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание Cd в зерне овса (табл. 1) увеличилось достоверно по сравнению с контролем при внесении РК-удобрений без известкования (вариант II). Тенденция к снижению содержания металла, которая проявлялась при добавлении азота к РК-удобрениям (вариант III), продолжалась при увеличении его дозы (вариант IV), но полученный результат оказался больше контроля. Коэффициенты варибельности результатов (K_v) были близкими по величине и меньше в вариантах с удобрениями в 2–3 раза, чем в контроле.

Содержание Pb в зерне не изменялось при использовании РК-удобрений (вариант II), как и величина K_v. Тенденция к увеличению содержания проявлялась при разных дозах азота до одного уровня (вариант III и IV), величины K_v в этом случае снижались, были равновеликими и <19%.

Изменения содержания Cu в зерне овса имели при действии минеральных удобрений характер тенденций: увеличение с внесением РК-удобрений (вариант II), а добавление азота (вариант III) возвращало его к уровню контроля. Увеличение дозы азота (вариант IV) вызывало тенденцию к повышению содержания металла.

Величина K_v Cu снижалась при внесении РК-удобрений (вариант 2), в вариантах внесения азота (варианты III и IV) – до 2 раз. Это указывало на более низкую пространственную неоднородность образцов зерна, выращенного при использовании NPK-удобрений.

Содержание Zn в зерне овса увеличивалось при внесении минеральных удобрений практически до равновеликих величин, однако достоверное различие с контролем было только в варианте III. K_v Zn было <17%, т.е. с достаточно низкой

Таблица 1. Содержание ТМ в зерне и соломе овса в вариантах без известкования, мг/кг воздушно-сухой массы

Металл	Показатель	Варианты			
		I. Контроль без удобрений	II. P50K80	III. PK + N30	IV. PK + N90
Зерно					
Cd	$M \pm m$	0.07 ± 0.03	0.40 ± 0.05	0.31 ± 0.05	0.25 ± 0.05
	$Kv, \%$	62.3	22.5	29.6	32.7
I/II, I/III					
Pb	$M \pm m$	0.32 ± 0.06	0.32 ± 0.06	0.41 ± 0.04	0.39 ± 0.04
	$Kv, \%$	33.8	33.1	18.4	18.0
Cu	$M \pm m$	2.94 ± 0.55	3.23 ± 0.56	2.85 ± 0.27	3.10 ± 0.28
	$Kv, \%$	32.4	29.8	16.5	15.6
Zn	$M \pm m$	23.9 ± 2.3	33.7 ± 2.7	32.4 ± 1.9	31.1 ± 2.3
	$Kv, \%$	16.6	13.6	12.0	12.7
I/III					
Солома					
Cd	$M \pm m$	0.046 ± 0.009	0.099 ± 0.02	0.13 ± 0.01	0.088 ± 0.005
	$Kv, \%$	32.5	28.3	20.0	9.95
I/III, I/IV, III/IV					
Pb	$M \pm m$	0.66 ± 0.06	0.72 ± 0.01	0.78 ± 0.06	1.34 ± 0.19
	$Kv, \%$	15.8	24.4	13.3	33.3
II/IV					
Cu	$M \pm m$	2.78 ± 0.55	4.22 ± 0.55	6.39 ± 1.08	3.52 ± 0.32
	$Kv, \%$	34.4	22.7	29.2	15.5
I/III					
Zn	$M \pm m$	7.28 ± 0.90	6.47 ± 1.34	6.04 ± 1.28	5.48 ± 1.42
	$Kv, \%$	21.4	35.8	36.8	44.8

пространственной неоднородностью содержания Zn в зерне овса в вариантах опыта.

Содержание Cd в соломе овса увеличивалось в 2 раза под влиянием PK-удобрений (вариант II), внесенных без известкования, но недостоверно (табл. 1). Оно также повышалось при добавлении к ним азота в дозе 30 кг/га (вариант III) и оказалось достоверно больше контроля, а увеличение дозы азота до 90 кг/га (вариант IV) также достоверно, но снижало содержание кадмия до уровня в вариантах I и II. Величина Kv снижалась до минимума в варианте IV с ростом дозы азота.

Содержание Pb в соломе, проявив тенденцию к повышению, было равновеликим при использовании PK-удобрений отдельно и вместе с низкой дозой азота (варианты II и III соответственно). Тенденция достигла достоверного отличия по сравнению с вариантом II при увеличении дозы азота в варианте IV. В каждом варианте Kv варьировал, достигая максимума в варианте IV.

Удобрения (варианты II, III) увеличивали содержание Cu в соломе, но достоверность различий с контролем была отмечена только в варианте III (максимальная концентрация ТМ). Оно снижалось с увеличением дозы азота (вариант IV) более чем в 1.5 раза, но недостоверно, и было больше, чем в контроле. Удобрения снижали Kv (до 2 раз в варианте IV) по сравнению с контролем.

Величины содержания Zn в соломе овса были самыми высокими среди изученных металлов с максимумом в контроле. Каждый вариант применения удобрений усиливал тенденцию к снижению содержания металла до минимального в варианте IV. Достоверных различий между вариантами не было выявлено, вероятно, из-за того, что Kv увеличивался при росте дозы азота (до 2 раз в варианте IV).

Содержание Cd в зерне увеличивалось при известковании и внесении PK-удобрений (вариант II) достоверно по сравнению с контролем (табл. 2).

Оно снижалось при добавлении к ним азота (вариант III), увеличении его дозы (вариант IV) и было

равновеликим в этих вариантах при достоверном отличии с вариантом II. Величина K_v снижалась от высокой в варианте контроля до низкой в варианте II. Затем она увеличивалась в варианте III до уровня контроля и опять резко снижалась в варианте IV до минимальной величины.

Содержание Pb в зерне овса проявило при использовании удобрений тенденцию к повышению, которая усиливалась при увеличении дозы азота. При этом K_v снижался в удобренных вариантах до величин с незначительными различиями.

Содержание Cu проявляло тенденцию к увеличению при внесении РК-удобрений (вариант II). Добавление к ним азотного удобрения изменяло вектор влияния на снижение в каждом варианте с NPK (вариант III и IV) до минимального. Оказалось, что K_v снижался до минимума в варианте III, затем увеличивался трехкратно в варианте IV.

Содержание Zn в зерне овса было одинаковым во всех вариантах. Их K_v были высокими и с минимальными различиями.

При сравнении результатов содержания ТМ в зерне овса, выращенном на известкованном фоне и без него, видно, что величины содержания Cd в вариантах I и II были практически равными. Они уменьшались при использовании NPK (вариант III и IV) после известкования до 2 и более раз, при этом достоверно в варианте III (табл. 1, 2).

Содержание Pb в зерне незначительно увеличивалось после известкования в вариантах I, II и III, более сильно в варианте IV, но недостоверно по сравнению с контролем.

Содержание Cu в зерне незначительно различалось между вариантами контроль, II, III, затем увеличивалось в варианте IV в 1.6 раза, однако недостоверно.

Известкование способствовало увеличению содержания Zn в зерне овса во всех вариантах, особенно в контроле, но везде недостоверно.

Взаимосвязи между определенными в зерне овса ТМ имели наибольшее количество значимых (при $P \leq 5\%$) корреляций (4 связи) при внесении РК-удобрений без известки, с известкованием – в контроле (также 4) (табл. 3).

Корреляция Zn–Cu на фоне без известкования была, кроме отрицательной и незначимой в контроле, положительной при внесении удобрений, а в случае с РК-удобрениями (вариант II) – значимой. Такую же закономерность имела корреляция Zn–Cd, но уже была отрицательной в варианте IV. Взаимосвязь Zn–Pb была в вариантах I, II и III отрицательной, при этом в варианте II (РК-удобрения) она была высокой и достоверной.

Корреляция Cu–Pb была положительной в варианте III, в других – отрицательной и всегда недостоверной.

Корреляции Cu–Cd имели высокие величины. Внесение РК-удобрений (вариант II) способствовало перемене этой связи из отрицательной значимой в контроле на положительную значимую. То есть взаимосвязь превращалась из отрицательной в положительную, которая при внесении низкой дозы азота (вариант III) была вновь отрицательной сильной, но уже не значимой. Увеличение дозы азота (вариант IV) усиливало эту корреляцию до значимого уровня. Таким образом, корреляция Cu–Cd имела наибольшее количество значимых связей, в основном отрицательного характера.

Низкая и незначимая положительная корреляция Pb–Cd в контроле отмечена при внесении РК-удобрений (вариант II) была более сильной, но отрицательного характера, и значимой при внесении NPK с низкой дозой азота (вариант III). Направленность

Таблица 2. Содержание ТМ в зерне овса при известковании, мг/кг воздушно-сухой массы

Металл	Показатель	Варианты			
		I. Контроль без удобрений	II. P50K80	III. РК + N30	IV. РК + N90
Cd	$M \pm m$	0.11 ± 0.04	0.43 ± 0.05	0.12 ± 0.04	0.13 ± 0.03
	$K_v, \%$ td	59.6	18.6	58.3	3.5
I/II, II/III, II/IV известкование/без известки (вариант III)					
Pb	$M \pm m$	0.39 ± 0.09	0.41 ± 0.06	0.43 ± 0.07	0.52 ± 0.08
	$K_v, \%$	38.3	25.5	29.1	26.0
Cu	$M \pm m$	2.94 ± 0.48	3.43 ± 0.39	2.47 ± 0.24	1.95 ± 0.56
	$K_v, \%$	28.1	19.7	15.3	49.9
Zn	$M \pm m$	36.4 ± 7.9	36.6 ± 7.2	34.2 ± 6.9	35.1 ± 6.4
	$K_v, \%$	37.6	33.9	35.2	31.7

Таблица 3. Корреляционные связи содержания ТМ в зерне и соломе овса

Пары металлов	Варианты			
	I. Контроль без удобрений	II. P50K80	III. РК + N30	IV. РК + N90
Зерно (без известкования)				
Zn–Cu	–0.29	0.93*	0.42	0.69
Zn–Pb	–0.78	–0.93*	–0.25	0.05
Zn–Cd	0.31	0.99*	0.17	–0.39
Cu–Pb	–0.37	–0.73	0.77	–0.69
Cu–Cd	–0.99*	0.96*	–0.82	–0.94*
Pb–Cd	0.35	–0.89	–0.99*	0.90
Солома (без известкования)				
Zn–Cu	0.98*	–0.07	0.81	–0.48
Zn–Pb	0.51	0.87	0.12	–0.65
Zn–Cd	–0.99*	–0.31	–0.95*	0.37
Cu–Pb	0.68	0.44	0.68	–0.36
Cu–Cd	–0.99*	0.97*	–0.58	0.64
Pb–Cd	–0.56	0.21	0.20	–0.95*
Зерно (известкование по 0.5 г.к.)				
Zn–Cu	0.98*	0.89	–0.33*	–0.52
Zn–Pb	–0.89	–0.91*	0.81	–0.12
Zn–Cd	0.99*	0.49	–0.74	–0.76
Cu–Pb	–0.97*	–0.63	–0.82	–0.79
Cu–Cd	0.95*	0.84	–0.39*	0.95*
Pb–Cd	–0.85	–0.10	–0.21	–0.55

* Корреляции, значимые при $p = 0.01$.

этой взаимосвязи изменялась на противоположную при увеличении дозы азота (вариант IV), оставаясь высокой, но уже незначимой.

Наибольшее количество значимых корреляций между содержаниями ТМ в соломе (3 корреляции) было отмечено в контроле (табл. 3). Связь Cu–Pb так же, как и в зерне, не имела значимых величин, но в отличие от зерна (варианты I, II, IV) связи сильнее варьировали и были в основном положительными.

Корреляция Zn–Cu была в контроле высокой положительной, значимой, но превращалась при внесении РК-удобрений (вариант II) в нейтральную. Добавление азота (вариант III) превращало ее вновь в сильную положительную, увеличение дозы азота (вариант IV) делало ее низкой отрицательной, однако обе величины были незначимыми.

Корреляция Zn–Pb была незначимой во всех вариантах опыта. Положительная в контроле, она усиливалась при внесении РК-удобрений (вариант II), с добавлением азота (вариант III) резко снижалась, а с повышением его дозы (вариант IV) превращалась в сильную отрицательную.

Корреляция Zn–Cd была отрицательной в вариантах I–III: высокая и достоверная в контроле, она снижалась при внесении РК-удобрений (вариант II) до незначимой. Затем она увеличивалась до достоверной при низкой дозе азота в NPK (вариант III), но при повышении дозы азота (вариант IV) эта зависимость была положительной, но незначимой.

Значимая корреляция Cu–Cd была отрицательной в контроле, но положительной при внесении РК-удобрений (вариант II). Добавление азота (в варианте III) делало ее отрицательной, увеличение дозы азота (вариант IV) – вновь положительной, но в вариантах с внесением NPK она была незначимой и по абсолютной величине одинаковой.

Незначимая и отрицательная связь Pb–Cd в контроле изменялась при внесении РК-удобрений (вариант II) и добавлении к ним низкой дозы азота (вариант III) на положительную низкую, но при увеличении дозы азота (вариант IV) становилась высокой отрицательной и значимой.

Количество значимых связей увеличивалось в 4 раза в варианте контроля при известковании и в 3 случаях изменялась их направленность (табл. 3). Высокая

положительная и значимая корреляция Zn–Cu в контроле снижалась при внесении РК-удобрений (вариант II), оставаясь достаточно высокой, но уже незначимой. При низкой дозе азота (вариант III) она была отрицательной низкой и значимой, а увеличение дозы азота (вариант IV) усиливало ее, но она была незначимой.

Корреляция Zn–Pb в контроле была отрицательной высокой, но незначимой. Применение РК-удобрений (вариант II) усиливало эту связь до значимой. Добавление низкой дозы азота (вариант III) ослабляло ее и превращало в положительную и незначимую. Увеличение дозы азота (вариант IV) делало эту связь между ТМ слабой отрицательной и незначимой.

Корреляция Zn–Cd в зерне после известкования в контроле была синергической и достоверной. Внесение РК-удобрений (вариант II) снижало уровень связи в 2 раза и превращало ее в незначимую отрицательную связь. В вариантах III и IV она была равной, достаточно высокой, но незначимой.

Корреляция Cu–Pb была во всех вариантах отрицательной со значимой величиной в контроле, которая превращалась в вариантах использования удобрений и известкования в незначимую и близкую по величине.

Высокая положительная и значимая корреляция Cu–Cd, которая была в контроле, в варианте внесения РК-удобрений (вариант II) снижалась до незначимой.

При внесении низкой дозы азота (вариант III) связь стала отрицательной, значимой, но низкой. Повышение дозы азота в NPK-удобрениях (вариант IV) делало эту взаимосвязь положительной, сильной и значимой.

Корреляции Pb–Cd в вариантах были отрицательными и незначимыми. Высокая в контроле, она резко снижалась в варианте РК-удобрений (вариант II), а при применении NPK (варианты III и IV) увеличивалась, но не достигала своего уровня в контроле.

Величины КБП Cd, Pb и Cu зерном были <1.0, особенно Pb, что соответствовало низкому уровню поглощения металлов из почвы (табл. 4).

КБП Cd увеличивался при внесении РК-удобрений (вариант II) до максимума. Он снижался при добавлении низкой дозы азота (вариант III) и незначительно изменялся при увеличении его дозы (вариант IV). Величины КБП металлов зерном овса были больше у Cu, чем у Pb, и у обоих элементов незначительно варьировали при использовании минеральных удобрений.

Величины КБП Zn зерном – самые высокие среди ТМ, в варианте контроля она была минимальной (≈ 3.0). Использование РК-удобрений (вариант II) усиливало поглощение металла на 50%. Добавление низкой дозы азота (вариант III) вызывало незначительное уменьшение КБП, которое более интенсивно продолжалось при увеличении его дозы (вариант IV), почти достигая уровня контроля.

Таблица 4. Коэффициенты биологического поглощения (КБП) металлов растениями овса

Металл	Варианты			
	I. Контроль без удобрений	II. P50K80	III. РК + N30	IV. РК + N90
Без известкования				
КБП зерном				
Cd	0.11	0.61	0.49	0.36
Pb	0.08	0.08	0.10	0.10
Cu	0.36	0.38	0.26	0.34
Zn	2.98	4.31	4.04	3.18
КБП вегетативной частью				
Cd	0.07	0.15	0.20	0.13
Pb	0.17	0.18	0.20	0.35
Cu	0.34	0.49	0.69	0.38
Zn	0.91	0.82	0.75	0.56
Известкование				
КБП зерном				
Cd	0.18	0.66	0.19	0.19
Pb	0.10	0.10	0.11	0.13
Cu	0.36	0.40	0.26	0.21
Zn	4.55	4.68	4.27	3.60

КБП изученных ТМ соломой были <1.0 . Величины КБП Cd увеличивались при внесении удобрений в 2–3 раза. КБП Pb соломой были практически равновеликими в контроле, при внесении РК-удобрений и РК-удобрений с низкой дозой азота (вариант I–III). Максимальная доза азота (вариант IV) увеличивала его в 2 раза по сравнению с контролем. КБП Cu повышался на 50% при внесении РК-удобрений (вариант II) и до 2 раз при использовании низкой дозы азота (вариант III). NPK-удобрения с высокой дозой азота (вариант IV) вызывали его снижение до уровня контроля. КБП Zn уменьшался по сравнению с контролем в каждом варианте при использовании удобрений и увеличении дозы азота.

Величины КБП Cd, Pb и Cu зерном были <1.0 при внесении удобрений при известковании, что свидетельствовало о низком уровне поглощения данных металлов зерном овса в этих условиях (табл. 4). Однако при внесении РК-удобрений (вариант II) поглощение Cd увеличивалось более чем в 3.5 раза. Добавление разных доз азота (вариант III и IV) снижало его поглощение до величин, равных контролю. Внесение удобрений практически не изменяло КБП Pb. КБП Cu незначительно снижался при внесении NPK-удобрений (вариант III и IV) до равновеликих величин. Высокая величина КБП Zn зерном овса варьировала в вариантах I, II, III, а при внесении NPK с высокой дозой азота (вариант IV) она была меньше других на $\approx 20\%$.

При сравнении произвесткованных и удобренных делянок с фоном без известкования видно, что характер поглощения металлов зерном изменялся. КБП Cd незначительно, но увеличивался в контроле и не изменялся в варианте II (РК-удобрения). Однако поглощение Cd зерном снижалось в 2 и более раз при применении NPK с разными дозами азота (вариант III и IV).

Величины КБП Pb и Cu зерном овса варьировали незначительно, а КБП Zn оказался более высоким, особенно в контроле. Различия в КБП ТМ после известкования проявились как незначительные, вероятно из-за того, что изучали практически по следствию известкования.

Барьерные коэффициенты (БК) металлов изменялись под влиянием удобрений при внесении их без известки (табл. 5).

БК Cd и Zn имели величины <1.0 . Величина БК Cd снижалась в варианте II в 2.5 раза. Затем она возрастала почти в 2 раза при применении низкой дозы азота (вариант III) и незначительно снижалась при ее повышении (вариант IV), т.е. БК металла уменьшался под влиянием удобрений, особенно фосфорно-калийных.

БК Pb был во всех вариантах >1.0 . Он увеличивался на 10% под влиянием фосфорно-калийных удобрений (вариант II). Величина коэффициента снижалась на 15% с применением низкой дозы азота в NPK (вариант III), при повышении которой (вариант IV) барьерная функция соломы значительно усиливалась и оказывалась максимальной для Pb.

БК Cu в контроле был <1.0 и с применением РК-удобрений (вариант II) увеличивался до 1.3, а с добавлением азота (вариант III) — еще на 75%. Однако повышение его дозы (вариант IV) вызывало снижение барьерной функции соломы в отношении Cu почти в 2 раза, но ее величина превышала уровень контроля.

БК Zn = 0.3 в контроле, и он снижался в вариантах внесения удобрений на 30% практически до равновеликих величин.

Таким образом, удобрения усиливали барьерную функцию соломы по отношению к Cu, а к Pb в варианте IV — в 1.5 раза, но снижали к Cd и Zn. Это означало задержку миграции Pb в соломе, транслокацию Cd и Zn в зерно, аккумуляцию Cu в вегетативной части растений овса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в длительном стационарном опыте в зернотравянопропашном севообороте изучили содержание Cd, Pb, Cu и Zn в зерне и соломе овса на фоне применения минеральных удобрений (азотных, фосфорных и калийных) и известкования и без него. Агрохимикаты изменяли содержание тяжелых металлов (ТМ) в основной и побочной продукции

Таблица 5. Изменение барьерного коэффициента растений овса (солома/зерно) на фоне без известкования

Металл	Варианты			
	I. Контроль без удобрений	II. P50K80	III. PK + N30	IV. PK + N90
Cd	0.65	0.24	0.41	0.35
Pb	2.06	2.25	1.90	3.43
Cu	0.94	1.30	2.24	1.13
Zn	0.30	0.19	0.18	0.17

овса. Требования гигиенических нормативов по содержанию ТМ в растениеводческой продукции в условиях опыта не были нарушены. В условиях применения средств химизации биологическое поглощение ТМ растениями овса изменялось. Для соломы была характерна барьерная способность по отношению к Рb. Корреляционные связи содержаний ТМ между собой как в зерне, так и в соломе овса изменялись под влиянием агрохимикатов с отрицательных на положительные и наоборот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кудяров В.Н.* Баланс азота, фосфора и калия в земледелии России // *Агрохимия*. 2018. № 10. С. 3–11.
2. *Кабата-Пендиас А.* Проблемы современной биогеохимии микроэлементов // *Рос. хим. журн.* 2005. Т. 69. № 3. С. 15–19.
3. *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.
4. *Лукалов В.Н., Савич В.И., Трифонова Н.А.* Поэтапное изменение свойств почв при загрязнении их тяжелыми металлами // *Плодородие*. 2015. № 1. С. 42–44.
5. *Комаров В.И., Селиванов О.Г., Марцев А.А., Подолец А.А., Лукьянов С.Н.* Содержание тяжелых металлов в пахотном горизонте почв сельскохозяйственного назначения Владимирской области // *Агрохимия*. 2019. № 12. С. 75–82.
6. *Соколова Т.А.* Роль почвенной биоты в процессах выветривания минералов (обзор литературы) // *Почвоведение*. 2011. № 1. С. 64–81.
7. *Савич В.И., Никиточкин Д.Н., Лукалов В.Н., Караш П.Ю.* Фракционный состав тяжелых металлов в дерново-подзолистых почвах и черноземах // *Агрохим. вестн.* 2014. № 2. С. 22–23.
8. *Пугаев С.В.* Особенности аккумуляции тяжелых металлов продуктивной частью сельскохозяйственных растений в различных агроэкологических условиях Республики Мордовия // *Агрохимия*. 2020. № 12. С. 71–80.
9. *Ильин В.Б.* К оценке массопотока тяжелых металлов в системе почва–сельскохозяйственная культура // *Агрохимия*. 2006. № 3. С. 52–59.
10. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва–растение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 220 с.
11. *Литвинович А.В., Ковлева А.О., Хомяков Ю.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю.* Возможность загрязнения кадмием яровых зерновых культур при мелиорации кислых почв // *Агрохимия*. 2014. № 4. С. 80–87.
12. Тяжелые металлы в агроценозах: миграция, действие, нормирование / Под ред. Санжаровой И.И. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2019. 318 с.
13. *Уфимцева М.Д.* Закономерности накопления химических элементов высшими растениями и их реакции в аномальных биогеохимических провинциях // *Геохимия*. 2015. № 5. С. 450–465.
14. *Сабинин Д.А.* Физиологические основы питания растений. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 510 с.
15. *Милевская И.А.* Роль корней при поступлении тяжелых металлов почв в растения в условиях повышенной концентрации в почвах // *Экол. безопасность в АПК. Реф. журн.* 2007. № 2. С. 478.
16. *Минеев В.Г., Лебедева Л.А., Арзамасова А.В.* Влияние последствий систем удобрения на барьерные функции растений ячменя на дерново-подзолистой почве, загрязненной свинцом и кадмием // *Агрохимия*. 2009. № 9. С. 60–68.
17. *Ильин В.Б.* Оценка защитных возможностей системы почва–растение при модельном загрязнении почвы свинцом (по результатам вегетационных опытов) // *Агрохимия*. 2004. № 4. С. 52–57.
18. *Макарова Ю.В.* Эколого-биохимические исследования в агрофитоценозах Самарской области // *Вестн. СамарГУ. Естеств.-научн. сер.* 2006. № 7(47). С. 108–117.
19. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.3.2.1078-01. М.: Интер СЭН, 2002. 51 с.
20. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных. М.: Глав. управ-е ветер. Госагропрома СССР, 1987. 3 с.
21. *Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Манджиева С.С.* Барьерные функции системы почва–растение // *Вестн. МГУ. Сер. 3. Почвоведение*. 2008. № 2. С. 3–8.
22. *Алексеев Ю.В., Вялушкина Н. И.* Влияние кальция и магния на поступление кадмия и никеля из почвы в растения вики и ячменя // *Агрохимия*. 2002. № 1. С. 82–84.
23. *Карпова Е.А., Потатуева Ю.А.* Накопление тяжелых металлов растениями озимой ржи и овса при применении азотных, калийных и длительном последствии фосфорных удобрений на дерново-подзолистой почве // *Агрохимия*. 2005. № 4. С. 59–66.
24. *Пугаев С.В.* Влияние агротехнологических приемов на накопление тяжелых металлов озимой пшеницей на черноземе выщелоченном тяжелоуглинистом // *Агрохимия*. 2016. № 4. С. 70–77.
25. *Литвинович А.В., Ковлева А.О., Павлова О.Ю.* Влияние известкования на накопление марганца

- и железа растениями яровой пшеницы // *Агрохимия*. 2015. № 5. С. 61–68.
26. *Витковская С.Е., Шаврина К.Ф., Яковлев О.Н.* Продуктивность растений ячменя и взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва–растение при нейтрализации почвенной кислотности доломитовой мукой // *Агрохимия*. 2020. № 1. С. 50–57.
27. *Карпова Е.А., Минеев В.Г.* Тяжелые металлы в агроэкосистеме. М.: Изд-во КДУ, 2015. 252 с.
28. Классификация и диагностика почв СССР / Под ред. Г.В. Добровольского. М., 1977. 223 с.
29. Адаптивные технологии возделывания сельскохозяйственных культур в условиях Республики Мордовия (метод. рук-во). Саранск, 2003. 428 с.
30. Универсальные правила отбора проб растениеводческой продукции. М.: Агропромиздат, 1987. 198 с.
31. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.

Effect of Mineral Fertilizers and Liming on the Content and Biological Absorption of Heavy Metals by Oat Plants

S. V. Pugaev^{a,#}, L. N. Prokina^a

^a*Mordovian Research Institute of Agriculture – Branch of the N.V. Rudnitsky Federal Agrarian Scientific Center of the North-East,*

ul. Michurina 5, Republic of Mordovia, Saransk, p/o Yalga 430904, Russia,

[#]*E-mail: niish-mordovia@mail.ru*

In a long-term stationary experiment in grain-grass-row crop rotation, the content of Cd, Pb, Cu and Zn in grain and straw of oats was studied against the background of the use of mineral fertilizers (nitrogen, phosphorus and potassium) and liming, and without it. Agrochemicals changed the content of heavy metals (HM) in the main and by-products of oats. The requirements of hygienic standards for the content of HM in crop production were not violated in the conditions of the experiment. Under the conditions of using chemicalization agents, the biological absorption of HM by oat plants changed. Straw was characterized by a barrier ability with respect to Pb. Correlations of HM contents among themselves in both grain and oat straw changed under the influence of agrochemicals from negative to positive and vice versa.

Keywords: oats, heavy metals, mineral fertilizers, liming.