

УДК 546.47:581.5

*Поступление цинка и свинца в ячмень из загрязненной почвы*

Минкина Татьяна Михайловна, Манджиева Саглара Сергеевна, Богданова Анна Михайловна, Чаплыгин Виктор Анатольевич, Бауэр Татьяна Владимировна, Бурачевская Марина Викторовна, Маштыкова Людмила Юрьевна, Громакова Наталья Викторовна, Сушкова Светлана Николаевна

*Аннотация:*

По результатам полевого опыта установлены различия в распределении цинка и свинца по органам ярового ячменя, выращенного на незагрязненном и загрязненном черноземе обыкновенном. Показано, что основную барьерную функцию по инактивации исследуемых тяжелых металлов выполняют корни растений. Устойчивость ячменя к загрязнению почв цинком выше, чем свинцом. Исследовано поступление металлов в течение трех лет с момента загрязнения.

*Ключевые слова:* загрязнение, цинк, свинец, ячмень, корень, стебель, зерно, устойчивость, биологическое поглощение, коэффициент накопления, распределение

*Translocation of zink and lead on technogenic polluted soil*

Minkina Tatiana Mihailovna, Mandzhieva Saglara Sergeevna, Chaplygin Victor Anatolievich, Bauer Tatyana Vladimirovna, Burachevskaya Marina Viktorovna, Mashtykova Lyudmila Yurievna, Gromakova Natalia Viktorovna, Sushkova Svetlana Nikolaevna

*Abstract:*

The differences of Zn and Pb distribution in the body of barley growing on unpolluted and polluted chernozem are established in field experiment. It is shown that roots of plants execute the main barrier function to heavy metals inactivation. Resistance of barley to soil contamination by Zn is higher than to Pb. The heavy metal translocation during three years after contamination is investigated.

*Keywords:* pollution, zinc, lead, barley, root, stem, seed, stability, biological absorption coefficient accumulation, the distribution

В современных условиях сельскохозяйственные товаропроизводители нередко сталкиваются с необходимостью производить продукцию на землях, в разной степени загрязненных тяжелыми металлами (ТМ). Известно, что загрязнение почв ТМ оказывает негативное влияние на возделываемые культуры, снижая количество и качество получаемой продукции, последнее является основным критерием ее использования. Поскольку Ростовская область производит значительное количество растениеводческой продукции, возникает естественный вопрос об изучении механизмов транслокации ТМ в сельскохозяйственные растения при разных уровнях техногенной нагрузки.

Изучение поступления ТМ в растения имеет несколько практических моментов. Во-первых, растения являются промежуточным резервуаром, через который металлы переходят из воды, воздуха и, главным образом, почвы в организмы человека и животных, в связи с чем, необходима разработка методов защиты пищевых цепей от проникновения токсикантов в опасных концентрациях. Во-вторых, доказана токсичность ТМ для самих растений, что ставит ряд вопросов о реакции растений на их избыток в среде. И третий аспект – это выяснение возможности использования растений в качестве биоиндикаторов загрязненной ТМ среды [14].

В настоящее время в литературе нет достаточно данных о накоплении ТМ в зерновых культурах, выращенных на загрязненных почвах и влиянии на этот процесс многих факторов: почвенно-климатических условий, свойств загрязняющих веществ, вида и возраста растений.

Цель работы – изучить закономерности накопления цинка и свинца в растениях ячменя, выращенного на загрязненной данными металлами почве.

### **Материал и методы**

Для проведения исследований был заложен мелкоделяночный полевой опыт. Почва опытного участка – чернозем обыкновенный мощный слабогумусированный тяжелосуглинистый на лессовидных суглинках, имеющий следующие свойства:  $pH_{\text{водн.}} - 7,5$ ; содержание частиц  $< 0,01\text{мм} - 58 \%$ ;  $\text{CaCO}_3 - 0,15 \%$ ;  $\text{C}_{\text{орг.}} - 2,2 \%$ ; обменных катионов  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - 34,5 \text{ мг-экв/100 г}$ ;  $\text{NO}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_{5\text{подв.}}$ ,  $\text{K}_2\text{O}_{\text{обм.}}$  в мг/100 г – 0,9, 6,0 и 6,4 соответственно. Обеспеченность подвижным фосфором оценивается как высокая, обменным калием – повышенная [18].

Для проведения исследований были выбраны наиболее часто встречающиеся на территории Ростовской области поллютанты – цинк и свинец. ТМ вносили отдельно в форме легкорастворимых ацетатных солей с осени в сухом виде в пахотный горизонт (0–20 см) и тщательно перемешивали с почвой. Учетная площадь опытных делянок 1 м<sup>2</sup>. Схема опыта включала следующие варианты: 1) контроль; 2) металл. В качестве металла в одной серии опытов вносили цинк в дозе 300 мг/кг почвы, в другой – свинец в дозе 96 мг/кг почвы. Дозы внесения соответствуют трем предельно допустимым концентрациям (ПДК) по валовым формам (ПДК Zn – 100 мг/кг, ПДК Pb – 32 мг/кг) и соотношены со встречающимся уровнем загрязнения ими почв Ростовской области [20].

Исследуемая культура – яровой ячмень (*Hordeum sativum distichum*) сорта «Одесский-100». Для того чтобы добавленные в почву соли ТМ прошли трансформацию, между их внесением и посевом ячменя был выдержан период 8 месяцев.

Агротехника возделывания культуры – зональная. Закладку опытов, проведение наблюдений и учетов, отбор растительных проб проводили в

соответствии с методиками полевого опыта [4] на базе государственного сортоиспытательного участка (ГСУ) «Ростовский». Образцы растений отбирали в фазу полной спелости ярового ячменя.

Повторность опыта – трехкратная. Почва была искусственно загрязнена металлами в 2010–2012 гг. Изучение последствий их было начато через год с момента закладки опыта и продолжалось до 2014 г. включительно.

Во время проведения опыта складывались благоприятные погодные условия, вместе с тем некоторые климатические показатели значительно различались по годам (табл. 1). Метеоусловия 2010 и 2011 годов были достаточно благоприятными для роста и развития ярового ячменя, тогда как 2012 год был засушливым.

*Таблица 1 - Основные показатели климата Государственного сортоиспытательного участка (ГСУ) «Ростовский» в 2010–2012 гг.*

Показатели	2010 г.	2011 г.	2012 г.	Среднее значение
Число дней с относительной влажностью < 30 %	16	29	48	31
Осадки, всего за год, мм	625,5	805,7	550,2	660,5
Осадки, апрель–октябрь, мм	393,1	469,0	327,7	396,6
Сумма активных температур ( $t^{\circ} > 10^{\circ} \text{C}$ ), $^{\circ}\text{C}$	3698	3306	3456	3487
Среднегодовая температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$	+9,99	+9,98	+10,23	+10,07
Гидротермический коэффициент, за год	1,06	1,42	0,95	1,14
Минимальная температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$	-18,0	-19,5	-26,3	-21,3
Максимальная температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$	+37,0	+37,9	+38,3	+37,7
Период активной вегетации ( $t^{\circ} > 10^{\circ}\text{C}$ ), дней	183	180	178	180,3
Обеспеченность влагой	0,39	0,48	0,25	0,37
Суровость зимы	Умеренно мягкая	мягкая	мягкая	мягкая

Общее содержание ТМ в почве определяли ренген-флюоресцентным методом. Концентрацию подвижных соединений металлов в почве определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (ААС). Для их экстракции применяли 1 н аммонийно-ацетатный буфер ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ) – ААБ, рН 4,8 (при соотношении почва : раствор 1 : 5, время экстракции 18 часов), характеризующий наиболее подвижные, обменные формы элементов в почве [18].

Тяжелые металлы в растениях определены методом мокрого озоления в смеси кислот  $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$  [17] с последующим определением на ААС.

### Результаты и обсуждение

Установлено, что общее содержание Zn в почве на контрольных участках за 3 года исследований составило в среднем 67 мг/кг (табл. 2).

Таблица 2 - Содержание тяжелых металлов в черноземе обыкновенном в течение трех лет после загрязнения

Варианты опыта	Общее содержание			Подвижная форма		
	1-й год после загрязнения	2-й год после загрязнения	3-й год после загрязнения	1-й год после загрязнения	2-й год после загрязнения	3-й год после загрязнения
<b>Zn</b>						
Контроль	68,4	65,3	67,1	0,6	0,6	0,6
Металл	355,9	348,7	352,0	33,0	27,6	26,1
НСР <sub>05</sub> *	11,4	14,9	24,1	5,2	3,8	2,5
<b>Pb</b>						
Контроль	24,1	23,5	27,5	0,8	0,9	1,0
Металл	109,6	101,3	100,4	12,8	10,8	8,7
НСР <sub>05</sub>	8,6	2,5	9,9	3,6	3,0	2,1

\* НСР – наименьшая существенная разность.

Содержание подвижных форм Zn равно 0,6 мг/кг (0,89 % от общего содержания). Такие концентрации Zn даже для растений слабого выноса соответствуют очень низкому (< 1,0 мг/кг) уровню обеспеченности этим микроэлементом. Это связано с тем, что в карбонатных почвах со слабощелочной реакцией среды не создаются условия для накопления подвижных форм ТМ из-за образования недоступных для растений соединений. На карбонатных черноземах отмечается очень низкая обеспеченность цинком [1]. Таким образом, дефицит отдельных элементов в естественных ландшафтах и высокое их содержание при интенсивном антропогенном воздействии создают условия экологического риска.

Определено, что содержание Zn в зерне ячменя в контроле составляет 21,6–24,8 мг/кг (табл. 3), что отвечает их фоновому содержанию [5, 10, 11]. Концентрация Zn в стеблях была на уровне 16,6–18,7 мг/кг и оценивалась как дефицитная (< 20 мг/кг) [9].

**Таблица 3 - Содержание тяжелых металлов в различных органах растений ярового ячменя (*Hordeum sativum distichum*), мг/кг**

Варианты опыта	2010 г.			2011 г.			2012 г.			Среднее значение за 3 года		
	зерно	стебли	корни	зерно	стебли	корни	зерно	стебли	корни	зерно	стебли	корни
<b>Zn</b>												
Контроль	22,6	17,3	19,4	24,8	18,7	21,3	21,6	16,6	19,0	23,0	17,5	19,9
Металл	65,3	74,8	207,2	68,2	75,7	222,1	62,7	69,6	182,6	65,4	73,4	204,0
НСР <sub>05</sub>	4,4	7,4	8,3	5,2	8,2	9,2	4,8	6,6	8,7	4,0	5,6	8,4
<b>Pb</b>												
Контроль	0,4	1,4	4,1	0,3	1,7	4,4	0,3	1,2	4,7	0,3	1,4	4,4
Металл	2,4	10,2	17,4	2,0	9,0	20,6	3,0	7,3	19,2	2,5	8,8	19,1
НСР <sub>05</sub>	0,2	0,3	1,4	0,2	0,9	2,9	0,2	0,2	2,5	0,4	1,5	2,4

Корневые системы часто содержат больше Zn, чем надземные части, в особенности, если растение выросло на почве, богатой Zn. При оптимальном содержании Zn в почве этот элемент может перемещаться из корней и накапливаться в верхних частях растений [8].

Концентрация Zn в корнях ярового ячменя была несколько ниже, чем в зерне (табл. 3), то есть их корни не выполняли барьерную функцию в отношении этого элемента. Такое распределение Zn в ячмене, по-видимому, связано с недостатком его подвижных форм в карбонатном черноземе (табл. 2).

Известно, что на количество Zn в зерновых культурах оказывают существенное влияние условия влажности. Некоторое повышение содержания Zn во всех органах ячменя в 2011 г. как в действии, так и в последствии объясняется тем, что вегетационный период этого года был очень влажным. Благоприятные погодные условия данного года способствовали лучшей обеспеченности ячменя важным микроэлементом – цинком.

Общее содержание Pb в черноземе обыкновенном в незагрязненном черноземе составляет 25,0 мг/кг (табл. 2). Количество подвижных форм Pb в контроле больше, чем Zn, и равно 0,9 мг/кг (3,6 % от общего содержания).

Содержание Pb в зерне было намного ниже, чем в других органах – от 0,3 до 0,4 мг/кг (табл. 3). Полученные значения согласуются с литературными данными по среднему содержанию элемента в ячмене [2, 6].

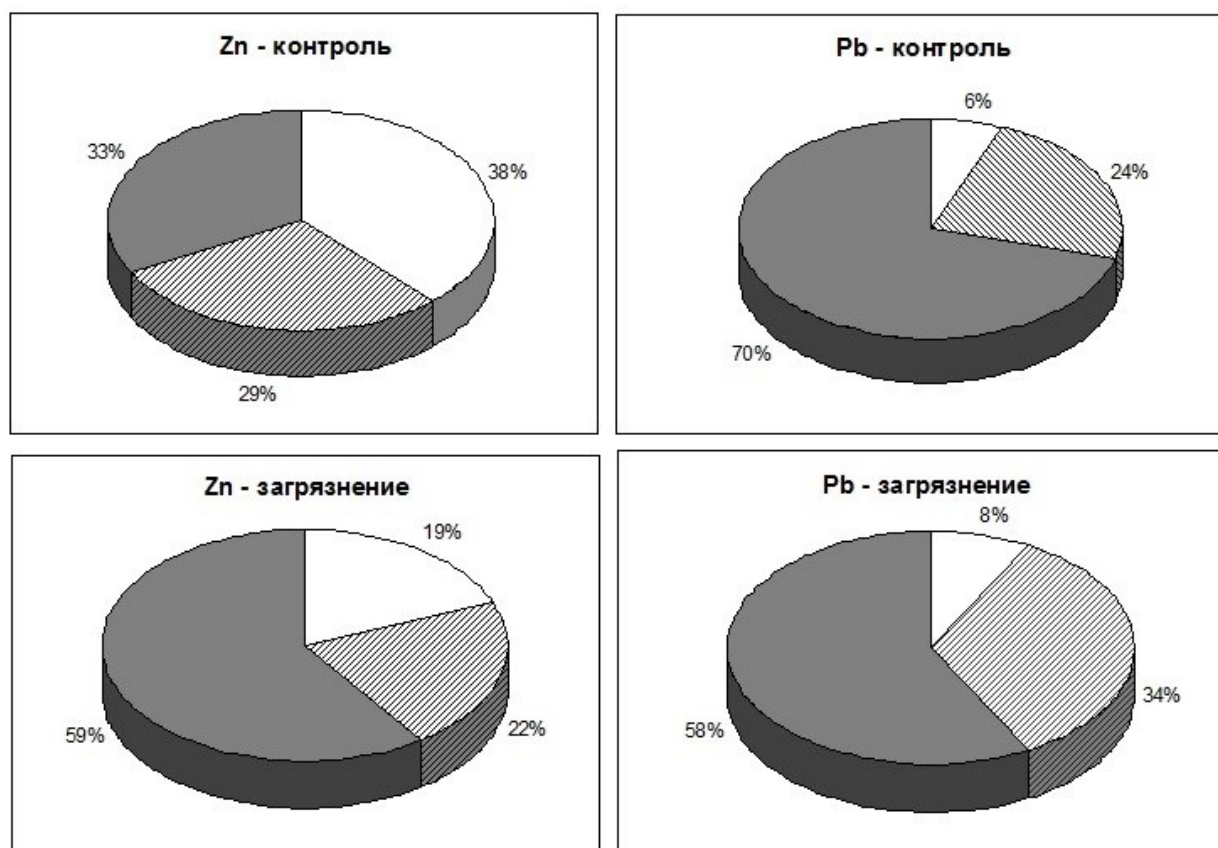
Основная часть Pb задерживалась в корнях растений, что указывает на существование защитных барьеров, препятствующих его накоплению в генеративных органах. Больше по сравнению с другими частями растений накопление металла в корнях объясняется тем, что при проникновении в плазму происходит инактивация и депонирование значительных его количеств в результате образования малоподвижных соединений с органическим веществом. Поглощенный корнями Pb находится в свободном клеточном пространстве или используется в процессах метаболизма. Только часть Pb с ксилемным током транспортируется в надземные органы [3, 19].

Таким образом, распределение ТМ по органам ярового ячменя на незагрязненном черноземе следующее (рис. 1): для цинка – зерно > корни > стебли; для свинца – корни > стебли > зерно. Причем различия в накоплении Pb исследуемыми органами растений выражены сильнее, чем в накоплении Zn.

Загрязнение чернозема обыкновенного ТМ привело к накоплению их в растениях (табл. 3). Содержание Zn и Pb в зерне превышает ПДК (ПДК для Zn – 50 мг/кг, для Pb – 0,5 мг/кг) [16], причем концентрация Pb в 5 раз выше критической. Как показывают данные таблицы 2, превышение ПДК по подвижным формам Pb также больше, чем по Zn.

Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что содержание цинка и свинца достоверно варьирует в разных вариантах опыта (контроль и загрязнение) и органах растений (ANOVA:  $F = 23,9$ ;  $P < 0,001$  и  $F = 105,6$ ;  $P < 0,001$ ). Взаимодействие факторов также существенно сказывается на содержании обоих металлов (ANOVA:  $F = 215,2$ ;  $P < 0,001$ ).

В загрязненной почве происходят существенные изменения в перераспределении металлов по органам ярового ячменя (рис. 1). При моделировании загрязнения чернозема Zn базипетальный характер накопления элемента в растениях (увеличение от корней к зерну) меняется на акропетальный: корни > стебли > зерно. Концентрация Zn в корнях ячменя по сравнению с контролем увеличилась в 10 раз. Соотношение зерно : стебли : корни в контроле составляет 1 : 1 : 1; при загрязнении – 1 : 1 : 3.



*Рис.1 - Распределение Zn и Pb по органам ярового ячменя*

Следовательно, основную барьерную функцию по снижению поступления Zn в растениях выполняют корни. При проникновении металла в корни растений происходит его хелатирование и, как следствие, уменьшение подвижности. Предполагается, что определенную защитную функцию в корнях могут выполнять клетки пояса Каспари, препятствующие движению вещества по межклеточному пространству и ограничивающие его переход в проводящие ткани [12, 21].

Рассчитана высота барьера на границе корень / стебель и стебель / зерно для ярового ячменя. Она определяется отношением содержания ТМ в стебле к его концентрации в зерне и количеству элемента в корнях. Для Zn на контроле высота барьера корень / стебель составляет 1,1, стебель / зерно – 0,8; при загрязнении высота барьера увеличивается до 2,8 и 1,1 соответственно.

Распределение Pb в органах ячменя в загрязненной почве имеет аналогичный контролю характер (рис. 1): больше всего поллютанта находится в корнях, далее – в стеблях и меньше – в зерне. Соотношение зерно : стебли : корни в контроле равно 1 : 5 : 15, при загрязнении – 1 : 4 : 8. Таким образом, при повышении содержания Pb в почве соотношение выравнивается, металл преимущественно накапливается в зерне и стеблях.

Высота барьеров при этом уменьшается до 2,2 на границе корень / стебель и до 3,5 на границе стебель / зерно против 3,1 и 4,7 соответственно в контроле.

Таким образом, природа и концентрация металлов в почве влияют на их распределение по органам ярового ячменя:

**Zn: контроль** – зерно > корни > стебли; **загрязнение** – корни > стебли > зерно;

**Pb: контроль и загрязнение** – корни > стебли > зерно.

Различия в содержании цинка и свинца по органам ячменя объясняются физиологической ролью их в живом организме. Цинк является эссенциальным микроэлементом, в то время как какую-либо особую роль свинца в метаболизме до настоящего времени выявить не удалось, несмотря на его присутствие в природных условиях во всех растениях. Поэтому у растений в процессе эволюции не выработано специальных механизмов по детоксикации этого поллютанта.

В случае с Zn внесенная доза оказалась не такой токсичной для растений ярового ячменя, во многом благодаря действию защитных механизмов на границе корень / стебель, стебель / зерно. Подтверждением этому служит менее существенное уменьшение основных морфометрических и качественных характеристик растений под влиянием цинка по сравнению с влиянием свинца [13]. Определенную роль имеет и различная степень увеличения их подвижных форм при загрязнении почвы.

Анализ данных по накоплению Pb корнями растений позволил прийти к заключению, что способ его поглощения – пассивный [14]. Несмотря на плохую растворимость Pb в почве, он поглощается корневыми волосками и задерживается в стенках клеток. На незагрязненной почве перемещение Pb из корней в надземную часть ограничено. Главный процесс, с которым связано накопление Pb в тканях корней, – это отложение на стенках клеток.

Ограничение поступления ТМ в надземную часть растений – один из механизмов, определяющих устойчивость растений к загрязнению. Физиологический смысл этого явления, вероятно, состоит в снижении концентрации металла в тех участках, где наиболее активно протекают процессы биосинтеза.

Несмотря на относительно небольшую дозу внесения ТМ, наблюдается стойкое загрязнение ими растительной продукции. Количество Zn и Pb в генеративных органах ячменя превышало ПДК в течение трех лет с момента загрязнения (табл. 4).



*Таблица 4 - Среднее содержание тяжелых металлов в различных органах растений ярового ячменя (*Hordeum sativum distichum*) в течение 3 лет после загрязнения почвы, мг/кг*

Варианты опыта	1-й год после загрязнения			2-й год после загрязнения			3-й год после загрязнения		
	зерно	Стебли	корни	зерно	стебли	корни	зерно	стебли	корни
<b>Zn</b>									
Контроль	23,0	17,5	19,9	24,2	18,1	20,6	22,7	17,9	19,5
Металл	65,4	73,4	204,0	58,7	67,4	185,7	51,2	58,0	160,2
НСР <sub>05</sub>	4,0	5,6	8,4	4,8	4,4	12,8	3,7	9,8	11,0
<b>Pb</b>									
Контроль	0,3	1,4	4,4	0,2	1,1	3,2	0,3	1,3	4,5
Металл	2,5	8,8	19,1	1,7	5,9	17,6	0,9	3,0	11,9
НСР <sub>05</sub>	0,4	1,5	2,4	0,4	0,9	4,4	н/о	1,3	5,1

Установлены различия в закономерностях накопления элементов со временем. В последствии происходит снижение количества Zn во всех органах ячменя на 8–10 % в первый год последствия, и на 21–22 % – во второй год последствия (табл. 4). Соотношение зерно / стебли / корни остается неизменным.

Транслокация Pb в последующие годы выражена значительно слабее. Концентрация Pb в зерне и стеблях в среднем во второй и третий год уменьшилась на 33 и 65 % соответственно, в корнях изменилась незначительно (табл. 4). Следовательно, доля участия корней в накоплении металла постепенно возрастает и расширяется соотношение зерно / стебли / корни до 1 : 3 : 13. Это связано с тем, что когда Pb присутствует в питательных растворах в растворимой форме, корни растений способны поглощать его в большом количестве, при этом скорость поглощения возрастает с ростом концентрации и временем.

Показателем степени накопления элементов растениями является коэффициент биологического поглощения (КБП). КБП – это отношение содержания элемента в золе растений к валовому содержанию его в почве. КБП позволяет косвенно судить о степени доступности элемента для растений и его поведении в системе «почва – растение».

Установлено, что в контрольных вариантах все органы растений использовали соединения ТМ наиболее полно (табл. 5). Особенно это характерно для Zn, который является эссенциальным микроэлементом. В соответствии с величиной КБП Zn относится к группе элементов сильного накопления, Pb – к группе элементов слабого и очень слабого захвата.

*Таблица 5- Коэффициенты биологического поглощения (КБП) и накопления (КН) Zn и Pb органами растений ярового ячменя (*Hordeum sativum distichum*) в течение 3 лет после загрязнения почвы*

Варианты опыта	Zn					
	1-й год после загрязнения		2-й год после загрязнения		3-й год после загрязнения	
	зерно	стебли	зерно	стебли	зерно	стебли
КБП						
Контроль	0,34	0,26	0,37	0,28	0,34	0,27
Металл	0,18	0,21	0,17	0,19	0,15	0,16
КН						
Контроль	38,33	29,17	40,33	30,17	37,83	29,83
Металл	1,98	2,22	2,13	2,44	1,96	2,22

Варианты опыта	Pb					
	1-й год после загрязнения		2-й год после загрязнения		3-й год после загрязнения	
	зерно	стебли	зерно	стебли	зерно	стебли
КБП						
Контроль	0,01	0,06	0,01	0,05	0,01	0,05
Металл	0,02	0,08	0,02	0,06	0,01	0,03
КН						
Контроль	0,38	1,75	0,22	1,22	0,3	1,3
Металл	0,2	0,69	0,15	0,55	0,08	0,29

Существенным различием между этими двумя элементами является также то, что при загрязнении почвы Zn КБП снижается, а Pb – возрастает. Отмеченные закономерности сохраняются и в последствии, что объясняется различной биохимической ролью металлов в растениях и способами их поглощения и переноса. Для Zn характерен метаболический перенос, он поглощается против градиента концентрации [7], так как в процессе эволюции у растений имеются определенные защитные механизмы для снижения поступления избыточных количеств этого элемента в генеративные органы. При повышенных концентрациях Pb в почве происходит в основном пассивный перенос.

Оценивая величины КБП, следует отметить, что вегетативные органы накапливают больше поллютантов, чем генеративные, – особенно свинца.

Данные корреляционного анализа показывают умеренную связь между общим содержанием металлов в почве и в растениях (от 0,45 до 0,56). Связь между подвижными формами соединений Zn и Pb в почве и их содержанием в зерне и стеблях ярового ячменя во все годы исследования была сильной (коэффициент корреляции 0,83 – 0,96).

В связи с этим, более информативным критерием оценки количества металлов, перешедших из почвы в растения, является коэффициент накопления (КН). Он рассчитывается как отношение содержания элемента в золе растений к содержанию его подвижных форм в почве, так как именно они доступны растениям. Подвижные формы металлов извлекаются вытяжкой ААБ.

Самые высокие величины КН, как и КБП, характерны для растений, выросших на незагрязненной почве (табл. 5). При загрязнении почвы установлено значительное снижение КН для обоих металлов, особенно по Zn, что, вероятно, обусловлено защитной реакцией растений на избыток элементов в почве. Наиболее значительное уменьшение КН характерно для Zn. Следует отметить, что оценка тенденций накоплений различных поллютантов в растениях, полученных на основе показателей КБП и КН, неоднозначна. Например, в случае загрязнения Pb КБП уменьшается, а КН возрастает. Это связано с тем, что растения могут использовать не только обменные формы элементов, но и другие подвижные формы, содержание которых увеличивается с ростом загрязнения. Так, при внесении Pb в почву идет преимущественное накопление комплексных форм в группе подвижных соединений [15]. Таким образом, при расчете КН желательно использовать содержание всех подвижных соединений, включающих обменные, комплексные и специфически сорбированные формы.

Одним из показателей накопления элементов растениями является величина биологического выноса ТМ с урожаем растений. Биологический вынос с основной и побочной продукцией определяется величиной урожая, содержанием металлов в растениях, а также биологическими особенностями возделываемых культур. Вынос Zn с урожаем ячменя (зерно + солома) в среднем за 3 года составил в контроле 170,3 г/га. Во влажные годы вынос возрастает в связи с ростом биомассы до 225,5 г/га. В вариантах загрязнения наблюдается значительное увеличение выноса элемента растениями до 634,2 г/га.

Вынос Pb с урожаем ячменя (зерно + солома) составлял в контроле 9,3 г/га. Меньшая величина его выноса по сравнению с Zn связана с тем, что, согласно КБП, Pb относится к группе элементов слабого и очень слабого захвата. При загрязнении вынос Pb существенно увеличился – до 53,6 г/га.

### **Заключение**

Загрязнение Zn и Pb ведет к повышению содержания металлов во всех органах ячменя. Биологический вынос ТМ с урожаем ярового ячменя также увеличивается. Влияние Pb на качество зерна ячменя выражено сильнее (превышение ПДК Pb в 5 раз, Zn – в 1,3 раза). В последующие годы транслокация Zn и Pb в растения снижается. Вместе с тем наблюдается

стойкое загрязнение ими растительной продукции в течение трех лет после загрязнения.

Основную барьерную функцию по инаktivации исследуемых ТМ выполняют корни растений. Внесение ТМ способствовало увеличению их количества в корнях ячменя: Pb – в 4 раза, Zn – в 10 раз.

Устойчивость ячменя к загрязнению Zn выше, чем к загрязнению Pb. Это выражается в значительном увеличении высоты барьера на границе корень / стебель и уменьшении величины КБП. При внесении Pb в почву установлена обратная тенденция. Отмеченные закономерности сохраняются и в последствии. Различия в накопления элементов связаны с биохимической ролью металлов в растениях и способами их поглощения и переноса.

Часть результатов были получены в ходе реализации программы академической мобильности на базе Южного федерального университета в рамках Сети академической мобильности «Академическая мобильность молодых ученых России – АММУР» ГСУ/2016/3».

### **Список литературы**

1. Агафонов, Е. В. Тяжелые металлы в черноземах Ростовской области // Тяжелые металлы и радионуклиды в агроэкосистемах: Сб. науч. ст. Новочеркасск, 1994. С. 22–26.
2. Азаров, Б. Ф., Соловиченко, В. Д. Содержание тяжелых металлов в сахарной свекле и ячмене в зависимости от их концентрации в почве и уровня удобренности // Химия в сельском хозяйстве. 1995. № 5. С. 31–35.
3. Гармаш, Н. Ю. Накопление тяжелых металлов в почвах и растениях вокруг металлургических предприятий: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 1985. 16 с.
4. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1968. 336 с.
5. Закруткин, В. Е., Шишкина, Д. Ю. Некоторые аспекты распределения меди и цинка в почвах и растениях агроландшафтов Ростовской области // Тяжелые металлы в окружающей среде: Мат-лы межд. симпозиума. Пушкино, 1996. С. 101–109.
6. Закруткин, В. Е., Шкафенко, Р. П. Некоторые аспекты распределения свинца в почвах и растениях агроландшафтов Ростовской области // Тяжелые металлы в окружающей среде: Мат-лы межд. симпозиума. Пушкино, 1996. С. 110–117.
7. Зялалов, А. А., Плеханова, В. А., Ганиев И. Г. Поступление тяжелых металлов в томаты в гидропонной культуре // Агрохимия. 2002. № 8. С. 82–85.
8. Кабата-Пендиас, А., Пендиас, Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
9. Кондрахин, И. П. Алиментарные и эндокринные болезни животных. М.: Агропромиздат, 1989. 256 с.

10. Лукин, С. В., Солдат, И. Е., Пендюрин, Е. А. Закономерности накопления цинка в сельскохозяйственных растениях // *Агрохимия*. 1999. № 2. С. 79–82.

11. Мамилов, Ш. З., Саданов, А. К., Илялетдинов, А. П. Цинк в почвах и питание растений цинком // *Агрохимия*. 1987. № 4. С. 107–115.

12. Матвеев, Н. М., Павловский, В. А., Прохорова, Н. В. Экологические основы аккумуляции тяжелых металлов сельскохозяйственными растениями в лесостепном и степном Поволжье. Самара: Изд-во Самарского ун-та, 1997. 220 с.

13. Минкина, Т. М., Федосеенко, С. В., Крыщенко, В. С. Некоторые морфобиометрические параметры ярового ячменя на черноземе обыкновенном при антропогенном воздействии // *Тяжелые металлы, радионуклиды и элементы-биофилы в окружающей среде: Докл. II Междунар. науч.-практ. конф. Т. 2. Семипалатинск: Изд-во Семипалатинского гос. университета им. Шакарима, 2002. С. 253–257.*

14. Минкина, Т. М., Крыщенко, В. С., Федосеенко, С. В. Качество зерна пивоваренного ячменя при техногенном загрязнении чернозема обыкновенного // *Научная мысль Кавказа*. 2003. Приложение. Вып. 2. С. 119–123.

15. Минкина, Т. М., Мотузова, Г. В., Назаренко, О. Г. Взаимодействие тяжелых металлов с органическим веществом чернозема обыкновенного // *Почвоведение*. 2006. № 7. С. 804–811.

16. Медико-биологические требования и санитарные нормы качества продовольственного сырья и пищевых продуктов. М., 1990. 54 с.

17. Методические указания по определению тяжелых металлов в кормах и растениях и их подвижных соединений в почвах. М.: ЦИНАО, 1993. 74 с.

18. Практикум по агрохимии / Под ред. В. Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 1989. 304 с.

19. Покровская, С. Ф. Приемы детоксикации почв, загрязненных тяжелыми металлами // *Агропромышленное производство: опыт, проблемы и тенденции развития: Сб. Вып. 3. М., 1995. С. 51–59.*

20. Экологический атлас Ростовской области / Под ред. В. Е. Закруткина. Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. 120 с.

21. Ягодин, Б. А., Кидин, В. В., Цвирко, Э. А., Маркелова, В. Н., Саблина, С. М. Тяжелые металлы в системе почва – растение // *Химия в сельском хозяйстве*. 1996. № 5. С. 43–45.

### **Spisok literatury**

1. Agafonov, E. V. Tyaghelye metally v chernozemah Rostovskoy oblasti // *Tyagelye metally i radionuklidy v agroekosistemah: Sb. nauch. st. Novocherkassk*, 1994. S. 22-26.

2. Azarov, B. F., Solovichenko, V. D. Soderzhanie tyaghelyh metallov v saharnoy svekle I yachmene v zavisimosti ot ih koncentracii v pochve I urovnya udobrennosti // Himiya v sel'skom hozyaystve. 1995. № 5. S. 31–35.
3. Garmash, N. Yu. Nakoplenie tyaghelyh metallov v pochvah I rasteniyah vokrug metalurgicheskikh predpriyatij: Avtoref. dis. ... kand. biol.nauk. Novosibirsk, 1985. 16 s.
4. Dospheov, B. A. Metodika polevogo opita. M.: Kolos, 1968. 336 s.
5. Zakrutin, V. E., Shishkina, D. Yu. Nekotorye aspekty raspredeleniya medi I zinka v pochvah I rasteniyah agrolandshaftov Rostovskoi oblasti // Tyagelie metalli v okrugayushchei srede: Materiali mezhd. simpoziuma. Pushchino, 1996. S. 101–109.
6. Zakrutkin, V. E., Shkafenko, R. P. Nekotorye aspekty raspredeleniya svinca v pochvah i rasteniyah agrolandshaftov Rostovskoj oblasti // Tyazhelye metally v okruzhayushchej srede: Mat-ly mezhd. simpoziuma. Pushchino, 1996. S. 110–117.
7. Zyalalov, A. A., Plekhanova, V. A., Ganiev I. G. Postuplenie tyazhelyh metallov v tomaty v gidroponnoj kul'ture // Agrohimiya. 2002. № 8. S. 82–85.
8. Kabata-Pendias, A., Pendias, H. Mikroelementy v pochvah i rasteniyah. M.: Mir, 1989. 439 s.
9. Kondrahin, I. P. Alimentarnye i ehndokrinnye bolezni zhivotnyh. M.: Agropromizdat, 1989. 256 s.
10. Lukin, S. V., Soldat, I. E., Pandyurin, E. A. Zakonomernosti nakopleniya cinka v sel'skohozyajstvennyh rasteniyah // Agrohimiya. 1999. № 2. S. 79–82.
11. Mamilov, Sh. Z., Sadanov, A. K., Ilyaletdinov, A. P. Cink v pochvah i pitanie rastenij cinkom // Agrohimiya. 1987. № 4. S. 107–115.
12. Matveev. N. M., Pavlovskij, V. A., Prohorova, N. V. Ehkologicheskie osnovy akumul'yacii tyazhelyh metallov sel'skohozyajstvennyimi rasteniyami v lesostepnom i stepnom Povolzh'e. Samara: Izd-vo Samarskogo un-ta, 1997. 220 s.
13. Minkina, T. M., Fedoseenko, S. V., Kryshchenko, V. S. Nekotorye morfobiometricheskie parametry yarovogo yachmenya na chernozeme obyknovennom pri antropogennom vozdejstvii // Tyazhelye metally, radionuklidy i ehlementy-biofily v okruzhayushchej srede: Dokl. II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. T. 2. Semipalatinsk: Izd-vo Semipalatinskogo gos. universiteta im. SHakarima, 2002. S. 253–257.
14. Minkina, T. M., Kryshchenko, V. S., Fedoseenko, S. V. Kachestvo zerna pivovarenного yachmenya pri tekhnogennom zagryaznenii chernozema obyknovennogo // Nauchnaya mysl' Kavkaza. 2003. Prilozhenie. Vyp. 2. S. 119–123.
15. Minkina, T. M., Motuzova, G. V., Nazarenko, O. G. Vzaimodejstvie tyazhelyh metallov s organicheskim veshchestvom chernozema obyknovennogo // Pochvovedenie. 2006. № 7. S. 804–811.

16. Mediko-biologicheskie trebovaniya i sanitarnye normy kachestva prodovol'stvennogo syr'ya i pishchevyh produktov. M., 1990. 54 s.
17. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu tyazhelyh metallov v kormah i rasteniyah i ih podvizhnyh soedinenij v pochvah. M.: CINAO, 1993. 74 s.
18. Praktikum po agrohimii / Pod red. V. G. Mineeva. M.: Izd-vo MGU, 1989. 304 s.
19. Pokrovskaya, S. F. Priemy detoksikacii pochv, zagryaznennyh tyazhelymi metallami // Agropromyshlennoe proizvodstvo: opyt, problemy i tendencii razvitiya: Sb. Vyp. 3. M., 1995. S. 51–59.
20. Ehkologicheskij atlas Rostovskoj oblasti / Pod red. V. E. Zakrutkina. Rostov n/D: Izd-vo SKNC VSH, 2000. 120 s.
21. Yagodin, B. A., Kidin, V. V., Cvirko, Eh. A., Markelova, V. N., Sablina, S. M. Tyazhelye metally v sisteme pochva – rastenie // Himiya v sel'skom hozyajstve. 1996. № 5. S. 43–45.