

17. Gabriel J., Kofronova O., Rychlovský P., Krenželok M. Accumulation and effect of cadmium in the wood-rotting basidiomycete *Daedalea quercina* // Bull Environ Contam Toxicol. 1996. V. 57. P. 383–390.
18. Sayer J., Gadd G.M. Solubilization and transformation of insoluble inorganic metal compounds to insoluble metal oxalates by *Aspergillus niger* // Mycol. Res. 1997. V. 106. P. 653–661.
19. Shimada M., Akamitsu Y., Tokimatsu T., Mii K., Hattori T. Possible biochemical roles of oxalic acid as a low molecular weight compound involved in brown-rot and white-rot wood decays // J. Biotechnol. 1997. V. 53. P. 101–113.
20. Machuca A., Napoleao D., Milagres A.M.F. Detection of metalchelating compounds from wood-rotting fungi *Trametes versicolor* and *Wolfiporia cocos* // World J. Microbiol. Biotechnol. 2001. V. 17. P. 687–690.
21. Green F., Larsen M., Highley T. Ultrastructural morphology of the hyphal sheath of wood-rotting fungi modified by preparation for SEM // Biodeterior Res. 1990. V. 3. P. 311–325.
22. Dutton M.V., Evans C.S., Atkey P.T., Wood D.A. Oxalate production of basidiomycetes including the white-rot species *Coriolus versicolor* and *Phanerochaete chrysosporium* // Appl. Microbiol. Biotechnol. 1993. V. 39. P. 5–10.
23. Yetis Ü., Özcengiz G., Dilek F. B., Ergen N., Erbay A., Dölek A. Heavy metal biosorption by white-rot fungi // Water Science and Technology. 1998. T. 38. № 4–5. C. 323–330.

УДК 581.192;549.67;546.47;546.732

## Влияние цеолита и гидрофосфата натрия на биоаккумуляцию цинка и кобальта(II) растениями ячменя

© 2017. С. Г. Скугорева<sup>1,2,3</sup>, к. б. н., магистрант, н. с., доцент,  
Т. Я. Ашихмина<sup>2,3</sup>, д. т. н., профессор, зав. лабораторией, зав. кафедрой,  
А. К. Эсаулова<sup>3</sup>, студент, А. И. Фокина<sup>3</sup>, к. б. н., доцент,

<sup>1</sup>Вятская государственная сельскохозяйственная академия,  
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

<sup>2</sup>Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,  
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар,  
ул. Коммунистическая, д. 28,

<sup>3</sup>Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

e-mail: skugoreva@mail.ru, esaulova.a.k@gmail.com

В ходе модельного эксперимента изучено влияние цеолита (Ц) и гидрофосфата натрия (ГФН) на биоаккумуляцию цинка и кобальта(II) растениями ячменя *Hordeum distichum* L., выращенного на почвенном субстрате. Искусственное загрязнение субстрата создавали однократным внесением растворов солей тяжёлых металлов (ТМ) из расчёта 154,8 мг  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  и 662,4 мг  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  на сосуд, что соответствовало 10 ПДК подвижных форм кобальта и цинка.

В результате эксперимента выявлены особенности аккумуляции цинка и кобальта растениями ячменя. При внесении ТМ в субстрат максимальные количества кобальта и цинка накапливали корни, играя роль защитного барьера на пути проникновения избыточных количеств элементов в побеги. В присутствии Ц и ГФН биоаккумуляция цинка снижалась в 2–4,5 раза и кобальта – в 2–32 раза. При совместном внесении солей кобальта и цинка Ц и ГФН снижали в большей мере поступление в растение цинка, не влияя на концентрацию кобальта.

Снижение аккумуляции цинка и кобальта в присутствии Ц и ГФН обусловлено сорбционной способностью цеолита и связыванием ТМ в нерастворимые фосфаты. В связи с этим можно рекомендовать внесение данных мелиорантов в загрязнённые соединениями цинка и кобальта почвы для снижения их биоаккумуляции растениями.

**Ключевые слова:** цеолит, гидрофосфат натрия, тяжёлые металлы, цинк, кобальт(II), ячмень, аккумуляция.

## Effect of zeolite and sodium hydrogenphosphate on the bioaccumulation of zinc and cobalt(II) by barley plants

S. G. Skugoreva<sup>1,2,3</sup>, T. Ya. Ashikhmina<sup>2,3</sup>, A. K. Esaulova<sup>3</sup>, A. I. Fokina<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>Vyatka State Agricultural Academy,

133 Oktyabrskiy Prospect, Kirov, Russia, 610017,

<sup>2</sup>Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,

28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Komi Republic, Russia, 167982,

<sup>3</sup>Vyatka State University,

36 Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

e-mail: skugoreva@mail.ru, esaulova.a.k@gmail.com

In the model experiment the influence of zeolite (Z) and sodium hydrogenphosphate  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  on the bioaccumulation of zinc and cobalt(II) by the plants of barley *Hordeum distichum* L. grown on a soil substrate was studied. Artificial contamination of the substrate was created by a single application of solutions of heavy metal (HM) salts in amount of 154.8 mg of  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  and 662.4 mg of  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  per vessel, which corresponds to 10 maximum allowable concentrations of mobile forms of cobalt and zinc.

As a result of the experiment, the specific features of the accumulation of zinc and cobalt by barley plants were revealed. When introducing HM into the substrate, the maximum amounts of cobalt and zinc were accumulated by roots, acting as a protective barrier in the way of penetration of excess quantities of elements into the shoot. In the presence of Z and  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  bioaccumulation of zinc decreased by 2–4.5 times and cobalt – by 2–32 times. With the joint application of salts of cobalt and zinc, Z and  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  mainly reduced the supply of zinc to the plant, without affecting the concentration of cobalt.

The decrease in the accumulation of zinc and cobalt in the presence of Z and  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  is due to the sorption capacity of zeolites and the binding of HM to insoluble phosphates. In connection with this, it is possible to recommend the introduction of these ameliorants into compounds contaminated by zinc and cobalt to reduce their bioaccumulation by plants.

**Keywords:** zeolite, sodium hydrogenphosphate, heavy metals, zinc, cobalt(II), barley, accumulation.

Тяжёлые металлы (ТМ) относятся к стойким загрязняющим веществам, являясь высокотоксичными даже в относительно низких концентрациях для живых организмов и обладая способностью к биоаккумуляции. В то же время большинство ТМ относятся к эссенциальным элементам, а такие как цинк (Zn) и кобальт (Co), являются микроэлементами для высших растений. Zn участвует в азотном, фосфорном и углеводном обменах, способствует синтезу нуклеиновых кислот и белка. Он входит в состав 35 ферментов и активирует ещё 40 [4]. Co регулирует ростовые процессы, биосинтез белка, число хлоропластов. Он входит в состав витамина  $\text{B}_{12}$  (цианкобаламин), повышает иммунитет к болезням, участвует в синтезе ДНК и делении клеток [2].

Потребность в данных микроэлементах у растений разная: в больших количествах растениям необходим Zn, в меньших – Co. Так, содержание Zn в листьях 10–20 мг/кг сухой массы является дефицитным для растений, для Co содержание, равное 0,02–1 мг/кг сухой массы, соответствует нормальному [3].

В избыточных количествах эссенциальные элементы становятся фитотоксичными.

Поданным [4], содержание Zn 200 мг/кг сухой массы токсично для растений. Избыток Zn подавляет их рост, синтез хлорофилла, интенсивность фотосинтеза, вызывает хлороз листьев [3, 5]. Избыток Co вызывает межжилковый хлороз, побеление и отмирание участков листьев [3].

В литературе встречаются отдельные сведения о характере взаимодействия Zn и Co в растениях [6–8]. Однако сведений о влиянии различных сорбентов и химических агентов на биоаккумуляцию ТМ при их совместном присутствии в среде выращивания не так много.

Как правило, для инактивации ТМ используют мелиоранты: мел, известь, глауконит, торф, цеолит, диатомит, комплексные фосфаты. За счёт процессов фиксации ТМ в структуре минералов происходит уменьшение их подвижности и накопления растениями. Показано, что применение цеолита снижало содержание подвижного кобальта в почве на 10–20% [9]. Накопление Zn ячменем снижалось при внесении глауконита, мела, суперфосфата [10, 11]. По данным [12], фосфаты способны снижать подвижность Zn в почве.

Для снижения аккумуляции ТМ в растениях в работе использовали гидрофосфат натрия (ГФН) и цеолит (Ц). Гидрофосфат-ионы связывают  $Zn^{2+}$  и  $Co^{2+}$  в нерастворимые соединения, кроме того, фосфор – элемент питания растений, что также способствует снижению фитотоксичности ТМ. Цеолиты – кристаллические водные алюмосиликаты, содержащие ионы щелочных и щелочноземельных металлов. Благодаря строго определённым размерам пор (каналов) и внутренних полостей, они способны вступать в реакции ионного обмена с ТМ:  $Zn^{2+} + Ca-Ц \rightarrow Ca^{2+} + Zn-Ц$ .

В связи с этим целью работы было изучить влияние цеолита и гидрофосфата натрия на биоаккумуляцию цинка и кобальта(II) растениями ячменя *Hordeum distichum* L.

### Объекты и методы исследования

Объект исследования – растения ячменя *Hordeum distichum* L. сорта «Новичок» ПР-1. Растения выращивали в пластиковых контейнерах объёмом 17,5 см x 12,1 см x 6,1 см, в которые помещали по 650 г сухого почвенного субстрата.

По актуальной и обменной кислотности субстрат для выращивания растений имел слабощелочную реакцию ( $pH_{H_2O} = 7,5$ ;  $pH_{KCl} = 7,1$ ) [13]. Содержание органического вещества в субстрате было достаточно низким –  $3,3 \pm 0,5\%$ . Подвижного фосфора содержалось  $85 \pm 19$  мг  $P_2O_5$ /кг, что соответствует средней

обеспеченности для растений [14]. Обменного калия в субстрате было  $153$  мг  $K_2O$ /кг, что свидетельствует о повышенной обеспеченности для растений. Содержание нитратного азота –  $9,8 \pm 0,7$  мг/кг, что характеризует субстрат как низко обеспеченный для растений. Содержание подвижных и валовых форм большинства ТМ не превышало ПДК и ОДК (табл. 1), исключение составило содержание подвижных форм марганца – оно было несколько выше ПДК.

В каждый сосуд высеивали по 30 семян. Повторность опыта трёхкратная. Для снижения биоаккумуляции ТМ перед посевом в субстрат вносили цеолит из расчёта  $42$  г на сосуд, что соответствовало норме внесения для зерновых культур  $20$  т/га [19]. С этой же целью в субстрат вносили  $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$  в виде сухой соли массой  $655$  мг/сосуд, что соответствовало норме внесения  $200$  мг  $P_2O_5$ /кг [20]. Соли металлов вносили однократно перед посевом в почвенный субстрат в виде растворов из расчёта  $154,8$  мг  $CoSO_4 \cdot 7H_2O$  и  $662,4$  мг  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  на сосуд, что соответствовало внесению  $10$  ПДК подвижных форм кобальта и цинка [15].

Опыт включал три серии (табл. 2), контролем служил вариант без внесения солей ТМ, Ц и ГФН.

Сосуды с семенами помещали в контролируемые условия климатической камеры: фотопериод –  $14$  ч, освещённость –  $1000$  лк, температурный режим выращивания –  $13$  °С (ночь)/ $21$  °С (день).

Таблица 1

Содержание тяжёлых металлов в почвенном субстрате, используемом в опыте, мг/кг

Тяжёлые металлы	Zn	Co	Cd	Pb	Mn	Ni	Fe	Cu
Содержание	$8,1 \pm 2,7$ $67 \pm 22$	$0,060 \pm 0,025$ $6,0 \pm 1,7$	$0,095 \pm 0,029$ $0,19 \pm 0,06$	$3,8 \pm 0,8$ $14,0 \pm 2,9$	$158 \pm 36$ $660 \pm 150$	$1,6 \pm 0,5$ $67 \pm 19$	$4,8 \pm 1,2$ $13300 \pm 3300$	$0,70 \pm 0,16$ $15,4 \pm 3,5$
ПДК	$23$ [15]	$5$ [15]	$0,2$ [17]	$6$ [15]	$100$ [15]	$4$ [15]	$1000$ [3]	$3$ [15]
ОДК	$220$ [16]	$50$ [18]	$2,0$ [16]	$130$ [16]	$1500$ [17]	$80$ [16]	$38000$ [15]	$132$ [16]

Примечание: над чертой приведены данные по содержанию подвижных форм, под чертой – валовых форм ТМ.

Таблица 2

Схема опыта по изучению влияния цеолита и гидрофосфата натрия на биоаккумуляцию цинка и кобальта растениями ячменя

Варианты		
1. Внесение солей ТМ	2. Внесение цеолита (Ц)	3. Внесение гидрофосфата натрия (ГФН)
Контроль (без ТМ)	Ц	ГФН
Zn	Zn + Ц	Zn + ГФН
Co(II)	Co(II) + Ц	Co(II) + ГФН
Zn + Co(II)	Zn + Co(II) + Ц	Zn + Co(II) + ГФН

Агрехимические показатели проб субстрата после проведения модельного опыта

Вариант	pH <sub>H2O</sub>	pH <sub>KCl</sub>	Содержание органического вещества, %	Содержание P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг
Субстрат до опыта	7,5	7,1	3,3±0,5	85±19
Контроль	7,6	7,1	3,1±0,5	84±19
Ц	7,5	7,0	3,0±0,6	91±18
ГФН	7,6	7,1	3,0±0,6	167±33
Со(II)	7,5	7,1	2,8±0,6	68±14
Со(II)+ Ц	7,6	7,1	3,2±0,5	75±15
Со(II)+ ГФН	7,5	7,0	2,6±0,5	162±32
Zn	7,5	7,0	3,4±0,5	75±15
Zn + Ц	7,6	7,0	3,2±0,5	94±19
Zn + ГФН	7,5	7,0	2,6±0,5	148±30
Zn + Со(II)	7,5	7,0	2,7±0,5	81±16
Zn + Со(II)+ Ц	7,6	7,0	2,9±0,6	90±18
Zn + Со(II)+ ГФН	7,4	7,0	2,3±0,5	159±32

Примечание: измерения кислотности выполнены с погрешностью 0,1 ед. рН.

Через 17 сут с момента появления всходов растения извлекали из сосудов, отделяли надземную часть, корни отмывали. Растительный материал фиксировали при 105 °С, затем высушивали до постоянной массы при 70 °С, определяли содержание ТМ в корнях и побегах ячменя.

В почвенном субстрате до и после опыта определяли содержание валовых и подвижных форм ТМ методом атомно-абсорбционной спектроскопии [21]. Содержание органического вещества определяли фотометрически по методу Тюрина в модификации ЦИНАО: по количеству образовавшегося Cr<sup>3+</sup> [22], кислотность – потенциометрически в водной и солевой вытяжках [23]. Содержание подвижного фосфора определяли по методу Мачигина [24], обменного калия – по методу Пейве [25], нитратного азота – по методу ЦИНАО [26].

Содержание Zn и Со в растениях определяли методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторе «Экотест-ВА» [27]. Подготовку проб растений к анализу проводили по ГОСТ 26929-94 [28]. Для характеристики депонирующих свойств корня рассчитывали коэффициент задержки или акропетальный коэффициент (АК) как отношение содержания элемента в корне к его содержанию в побеге.

### Результаты и их обсуждение

*Влияние цинка, кобальта, цеолита и гидрофосфата натрия на агрохимические характеристики субстрата*

После проведения модельного эксперимента анализировали кислотность, содержание органического вещества и подвижного фосфора в почвенном субстрате.

Установлено, что присутствие в субстрате сульфатов цинка и кобальта, гидрофосфата натрия и цеолита во взятых для опыта количествах не повлияло на кислотность субстрата (табл. 3). Содержание органического вещества варьировало в пределах от 2,3 до 3,4% и практически не отличалось от контроля во всех вариантах. Относительно низкое содержание органического вещества (2,3±0,5%) в варианте Zn + Со(II) + ГФН может быть обусловлено тем, что фосфаты металлов, не подвергающиеся разложению хромовой смесью, могут «обволакивать» частицы почвы, препятствуя проникновению окислительного раствора и разложению органического вещества внутри частиц.

Содержание подвижного фосфора в субстрате согласуется с условиями эксперимента. В вариантах с внесением ГФН в субстрате осталось 52–58% от суммы внесённого и исходного количества P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Высокий вынос фосфора растениями ячменя может быть вызван тем, что на начальных стадиях онтогенеза для роста и развития растений требуются достаточные количества питательных веществ. Содержание P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в других вариантах колебалось на уровне контроля.

*Аккумуляция цинка и кобальта (II) растениями ячменя*

В результате химического анализа были получены данные по накоплению Zn и Со

побегами и корнями растений ячменя в присутствии Ц и ГФН (рис. 1–2).

**Аккумуляция цинка.** В контрольном варианте Zn в корнях ячменя не обнаружен (рис. 1), содержание в побегах (9,7 мг/кг) не превышало среднего содержания в растениях (15–22 мг/кг) [29]. По данным [18], нормальное содержание Zn в молодых растениях ячменя составляет 60 мг/кг сухой массы, критическое среднее значение – 200 мг/кг сухой массы.

В других вариантах без внесения соли цинка содержание элемента в растениях было выше по сравнению с контролем, однако не превышало среднее количество в растениях.

Можно отметить общую закономерность для незагрязнённого цинком почвенного субстрата: аккумуляция в корнях ниже, чем в побегах ( $AK < 1$ ). Исключение составил вариант с внесением Со, в котором содержание Zn в корнях было несколько выше, чем в побегах ( $AK = 1,1$ ). Внесение цеолита и ГФН снижало накопление элемента в 2,6 и 2,9 раза соответственно.

Во всех вариантах, в которые была внесена соль цинка, отмечали наибольшее накопление элемента в корнях: АК варьировал от 1,6 до 4,3. Таким образом, основную барьерную функцию по снижению поступления Zn в растения выполняют корни. При проникновении

ионов металла в корни растений происходит его хелатирование и, как следствие, уменьшение подвижности. Цинк способен связываться с SH-группами фитохелатинов – богатых цистеином пептидов, локализующихся в тканях корней растений [30].

Максимальные количества Zn аккумулялировали растения в варианте с совместным внесением Со и Zn. Так, содержание Zn в корнях составило 260 мг/кг, что выше среднего в 12 раз и является критическим для молодых растений ячменя [18]. Использование цеолита и ГФН привело к снижению аккумуляции корнями в 4,5 и 2,4 раза соответственно, побегами – в 2 раза.

В варианте Zn содержание элемента в побегах было сопоставимо с вариантом Zn + Со(II) ( $\approx 60$  мг/кг), а в корнях элемента содержалось меньше в 2,6 раза. Большую аккумуляцию Zn в корнях растений в данном варианте можно объяснить тем, что присутствие Со «стимулирует» накопление Zn в корнях. Внесение в субстрат цеолита не повлияло на накопление Zn, а внесение ГФН – снизило поступление Zn в побеги ячменя в 1,6 раза.

**Аккумуляция кобальта.** Содержание элемента в контрольном варианте (рис. 2) находилось в пределах нормы – 0,2–0,6 мг/кг [29]. По другим данным [18], нормальное

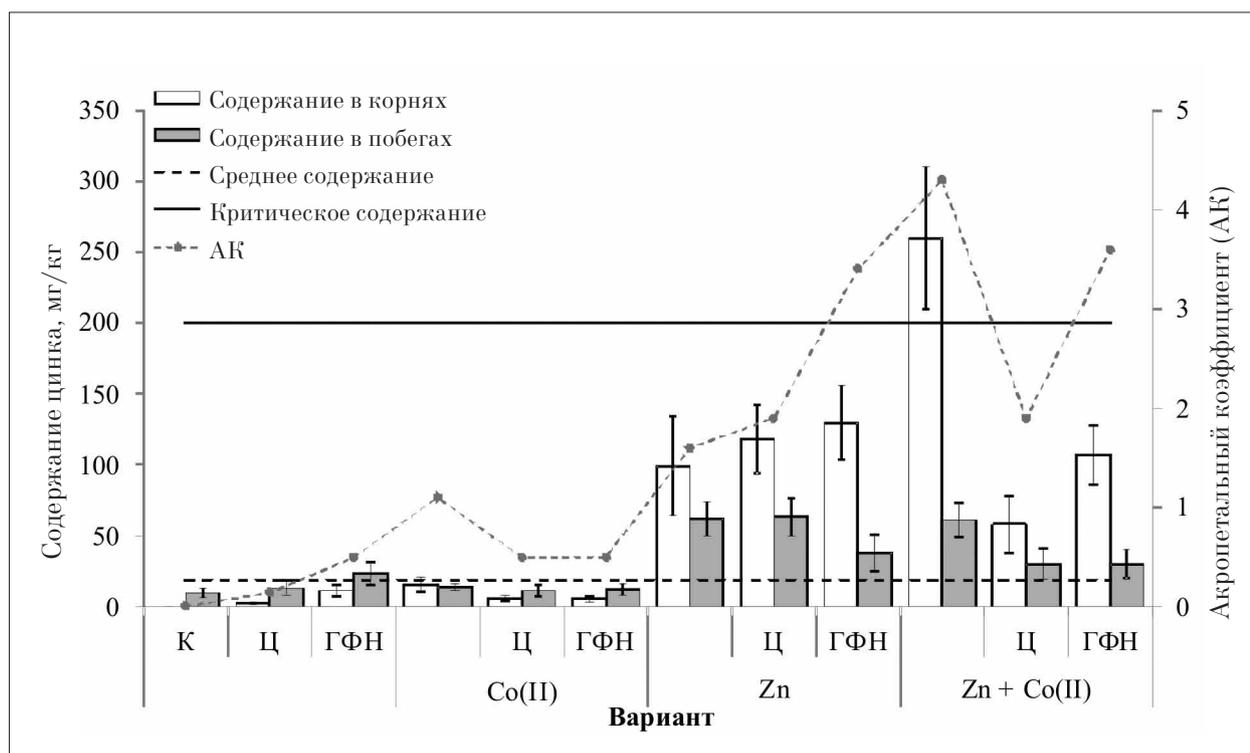
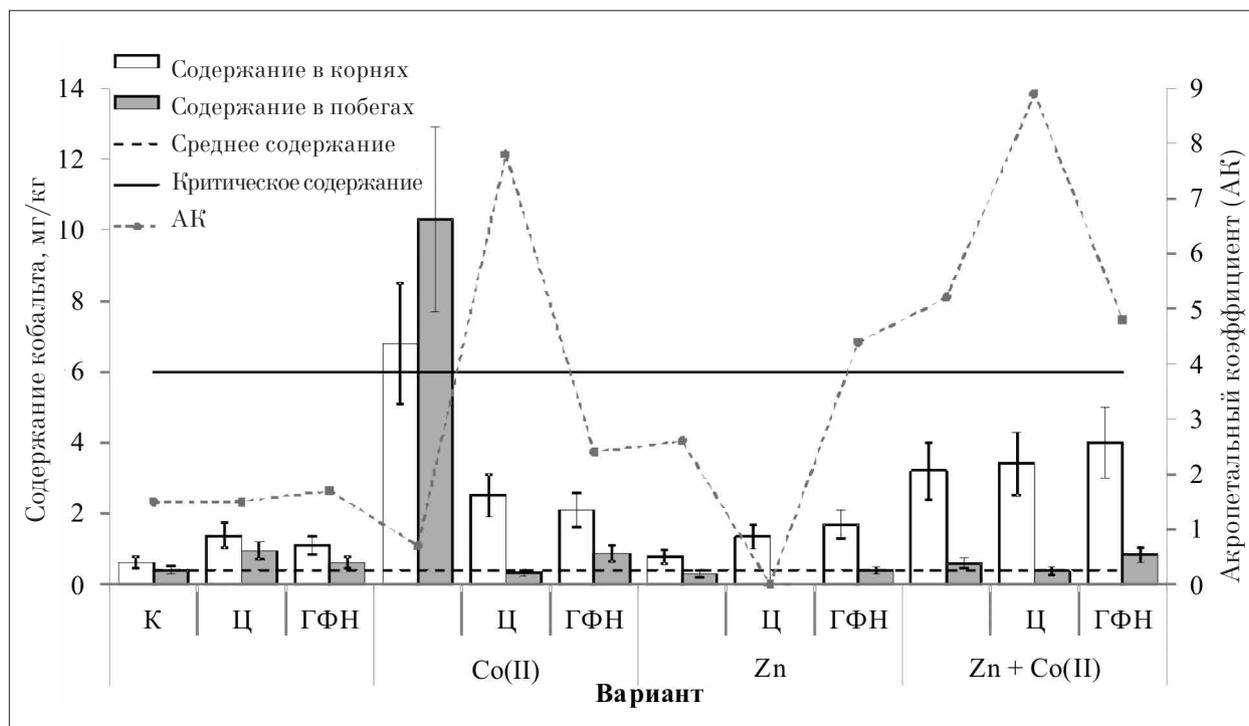


Рис. 1. Аккумуляция цинка растениями ячменя  
Примечание: К – контроль, Ц – цеолит, ГФН – гидрофосфат натрия



**Рис. 2.** Аккумуляция кобальта растениями ячменя  
Примечание: К – контроль, Ц – цеолит, ГФН – гидрофосфат натрия

содержание Co в молодых растениях ячменя составляет 0,5 мг/кг сухой массы, среднее критическое значение – 6 мг/кг сухой массы.

Наибольшей степенью накопления Co отличались растения ячменя в варианте с внесением Co (10 ПДК подвижной формы) без добавки Ц и ГФН. Максимальное количество элемента, выше критического [18], определено в побегах – 10,3 мг/кг, несколько ниже было содержание в корнях – 6,8 мг/кг. Однако эти значения достоверно не различаются, так как погрешность по используемой методике достаточно высока (25%). В остальных вариантах аккумуляция Co в корнях растений превышала аккумуляцию в побегах: АК больше 1, что вполне согласуется с литературными данными [31, 32].

Акропетальный характер накопления Co, вероятно, объясняется отсутствием большой необходимости в нём растений. Известно, что Co способен связываться с гистидином и другими аминокислотами в хелаты в связи с большим сродством к азоту [33], что снижает его подвижность и затрудняет поступление в надземные части растений.

По сравнению с контролем, АК был выше в 4–4,5 раза в вариантах Co + Ц и Co + Zn + Ц. ГФН не оказывал большого влияния на АК.

В присутствии Ц и ГФН (Co + Ц, Co + ГФН) накопление Co корнями уменьшилось в 2,7 и 3,2 раза, побегами – снизилось более существенно – в 32 и 12 раз соответственно.

Данное снижение может быть обусловлено сорбционной способностью цеолита и связыванием ТМ в нерастворимые фосфаты.

Несколько меньшей степенью аккумуляции Co отличался вариант Zn + Co. Содержание элемента в побегах (0,61 мг/кг) и корнях (3,2 мг/кг) было в 17,0 и 2,1 раза ниже, чем в варианте с внесением соли Co. Присутствие цеолита и ГФН не приводило к изменению накопления Co ячменём. Вероятно, внесение Zn в субстрат снижает биоаккумуляцию Co, а цеолит и ГФН в большей степени связывают цинк, чем кобальт.

В варианте с внесением Zn содержание Co в растениях было на уровне контроля. Добавление цеолита и ГФН (Zn + Ц, Zn + ГФН) увеличивало содержание элемента в корнях ячменя в 1,8–2,1 раза, практически не влияя на содержание в побегах. Увеличение аккумуляции в корнях может быть связано с более высоким поглощением Co корнями ячменя в присутствии Ц и ГФН. Так, в вариантах Ц и ГФН отмечено большее содержание элемента в корнях, по сравнению с контролем (в 1,8–2,0 раза).

Данные факты дают основание полагать, что во взятых количествах ионы цинка и кобальта являются конкурентами за поступление в растение, за сорбцию цеолитом и связывание ГФН. Ионы металлов имеют много сходства: одинаковые эффективные ионные радиусы

для всех координационных чисел, вполне сравнимые константы устойчивости в комплексах со многими лигандами [34]. В связи с тем, что Zn относится к элементам сильного накопления, а Co – к элементам слабого накопления, в этой конкуренции при поглощении растениями «выигрывает» цинк.

### Заключение

В результате проведённого эксперимента выявлены следующие особенности аккумуляции Zn и Co растениями ячменя.

1) Для кобальта, как в случае загрязнения субстрата, так и без него отмечали преимущественное накопление элемента в корнях ( $AK > 1$ ). Наибольшее накопление элемента характерно для растений в варианте с внесением сульфата кобальта. В присутствии Ц и ГФН аккумуляция кобальта корнями уменьшилась в 2,7 и 3,2 раза, побегами – более существенно, в 32 и 12 раз соответственно.

2) Для незагрязнённого Zn субстрата аккумуляция элемента в корнях растений ячменя была ниже, чем в побегах ( $AK < 1$ ). При загрязнении субстрата корень накапливал элемент больше ( $AK > 1$ ), играя роль защитного барьера на пути проникновения избыточных количеств элемента в побег. Внесение в субстрат наряду с сульфатом цинка цеолита не влияло на накопление цинка, а внесение фосфатов – снижало в 1,6 раза поступление Zn в побеги ячменя.

3) При совместном внесении Co и Zn в почвенный субстрат аккумуляция Co корнями снижалась в 2,1 раза, побегами – в 17 раз; накопление Zn корнями возрастало в 2,6 раза, по сравнению с внесением отдельной соли металла. Ц и ГФН снижали поступление в растение Zn (в корнях в 4,5 и 2,4 раза, в побегах – 2 раза), практически не влияя на концентрацию Co. Таким образом, внесение Zn в субстрат снижает биоаккумуляцию Co, а присутствие Co в среде выращивания стимулирует накопление Zn. Цеолит и гидрофосфат натрия в большей степени связывают цинк, чем кобальт.

Снижение аккумуляции цинка и кобальта в присутствии цеолита и гидрофосфата натрия может быть обусловлено сорбционной способностью цеолитов и связыванием ТМ в нерастворимые фосфаты. В связи с этим можно рекомендовать внесение данных мелиорантов в загрязнённые соединениями цинка и кобальта почвы для снижения их биоаккумуляции растениями.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Вятского государственного университета по теме «Механизмы адаптации и устойчивости почвенной микробиоты к техногенному загрязнению» №5.4962.2017/БЧ и в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка последствий антропогенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги» № гос. регистрации 115020310080.*

### Литература

1. Кидин В.В., Торшин С.П. Агрохимия. М.: Проспект, 2016. [Электронный ресурс]: <https://books.google.ru> (Дата обращения 03.11.2016).
2. Смирнов П.М. Минеральные удобрения // Агрохимия. М.: Агропромиздат, 1989. С. 367–427.
3. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
4. Фелленберг Г. Загрязнение природной среды. Введение в экологическую химию. М.: Мир, 1997. 228 с.
5. Башмаков Д.И., Лукаткин А.С. Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжёлых металлов у высших растений. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. 236 с.
6. Chaudhury F.M., Loneragan J.F. Zinc absorption by wheat seedlings: II. Inhibition by hydrogen ions and by micronutrient cations // Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1972. V. 36. P. 327–331.
7. Anisimov A.A., Ganicheva O.P. Possible interchangeability between Co and Zn in plants // Fiziol. Biochim. Kult Rast. V. 10. 1978. P. 613–617.
8. Berry W.L., Wallace A. Toxicity: The concept and relationship to the dose response curve // J. Plant Nutr. 1981. V. 3. P. 13–19.
9. Савельева В.А. Трансформация соединений кобальта в почвах при различных условиях увлажнения и внесения органического вещества: Автореф ... канд. биол. наук. М., 1998. 27 с.
10. Манджиева С.С., Минкина Т.М., Сушкова С.Н. Использование мелиорантов для предотвращения загрязнения растений цинком и свинцом // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2011. № 3 (03). [Электронный ресурс] [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_16995885\\_38716561.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_16995885_38716561.pdf) (Дата обращения 29.05.2017).
11. Байкенова Ю.Г., Байкин Ю.Л. Эффективность технологий экогеохимической рекультивации почв (ТЭРП), загрязнённых тяжёлыми металлами (ТМ) // Аграрный вестник Урала. 2015. № 4 (134). С. 10–14.
12. Белоусова Ю.С. Состояние меди и цинка в системе «почва-растение» в условиях загрязнения: Автореф ... канд. биол. наук. М., 2013. 26 с.

13. Федотов В.Л. Почвоведение с основами растениеводства. Витебск: Изд-во УО ВГУ им. П.М. Машерова, 2003. 114 с.

14. Агрохимические методы исследования почв / Под ред. А.В. Соколова. М.: Наука, 1975. 655 с.

15. ГН 2.1.7.2042-06. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 8 с.

16. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 15 с.

17. Водяницкий Ю.Н. Нормативы содержания тяжёлых металлов и металлоидов в почвах // Почвоведение. М.: Наука, 2012. № 3. С. 368–375.

18. Ильин В.Б. Тяжёлые металлы в системе почва – растение. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 151 с.

19. Рекомендации по применению цеолитсодержащей кормовой добавки «ТЕРРАВИТ» для сельскохозяйственных животных и птицы. Белгород. ФГОУ ВПО БелГСХА, 2009. 22 с.

20. Кравченко В.А. Методические указания и справочный материал для составления курсового проекта (работы) по системе применения удобрений в севооборотах. Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2007. 40 с.

21. ФР.1.31.2012.13573. Методика выполнения измерений массовых долей токсичных металлов в пробах почв атомно-абсорбционным методом. Москва, 2012. 16 с.

22. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Государственный комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. 8 с.

23. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 488 с.

24. ГОСТ 26205-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО.

25. Жежель Н.Г., Пантелеева Е.И. Агрохимия. Л.: «Колос», Ленингр. отд-ние, 1972. 288 с.

26. ГОСТ 26488-85. Почвы. Определение нитратов по методу ЦИНАО.

27. Сборник методик выполнения измерений массовой концентрации ионов меди, свинца, кадмия, цинка, висмута, марганца, никеля и кобальта, методом вольтамперометрии на вольтамперометрическом анализаторе «Экотест-ВА». М.: НПП ООО «Эконикс-Эксперт», 2004. 61 с.

28. ГОСТ 26929-94. Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов. М.: Стандартиформ, 2010. 12 с.

29. Агрохимия / Под ред. В.М. Ключковского, А.В. Петербургского. М.: Колос, 1967. 583 с.

30. Скугорева С.Г., Огородникова С.Ю., Головки Т.К., Ашихмина Т.Я. Фитотоксичность фосфорорганических соединений и ртути. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 154 с.

31. Siedlecka A. Some aspects of interactions between heavy metals and plant mineral nutrients // Acta Soc. Bot. Pol. 1995. V. 64. № 3. P. 262–272.

32. Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. Устойчивость растений к тяжёлым металлам. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 172 с.

33. Pearson R.G. Hard and soft acids and bases, HSAB. Part 1: Fundamental principles (англ.) // J. Chem. Educ. 1968. V. 45. № 9. P. 581–586.

34. Некоторые вопросы токсичности ионов металлов / Под ред. Х. Зигеля, А. Зигель. М.: Мир, 1993. 368 с.

## References

1. Kidin V.V., Torshin S.P. Agrochemistry. M.: Prospekt, 2016. [Electronic resource]: <https://books.google.ru> (Date of the application 03.11.2016) (in Russian).

2. Smirnov P.M. Mineral fertilizers // Agrochemistry. M: Agropromizdat, 1989. P. 367–427 (in Russian).

3. Kabata-Pendias A., Pendias X. Microelements in soils and plants. M.: Mir, 1989. 439 p. (in Russian).

4. Fellenberg G. Pollution of the natural environment. Introduction to environmental chemistry. M.: Mir, 1997. 228 p. (in Russian).

5. Bashmakov D.I., Lukatkin A.S. Ecological and physiological aspects of accumulation and distribution of heavy metals in higher plants. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2009. 236 p. (in Russian).

6. Chaudhury F.M., Loneragan J.F. Zinc absorption by wheat seedlings: II. Inhibition by hydrogen ions and by micronutrient cations // Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1972. V. 36. P. 327–331.

7. Anisimov A.A., Ganicheva O.P. Possible interchangeability between Co and Zn in plants // Fiziol. Biokhim. Kult Rast. V. 10. 1978. P. 613–617.

8. Berry W.L., Wallace A. Toxicity: The concept and relationship to the dose response curve // J. Plant Nutr. 1981. V. 3. P. 13–19.

9. Savelyeva V.A. Transformation of cobalt compounds in soils under different conditions of wetting and application of organic matter: Avtoref ... kand. biol. nauk. M., 1998. 27 p. (in Russian).

10. Mandzhiyeva S.S., Minkina T.M., Sushkova S.N. Use of meliorants to prevent plant contamination with zinc and lead // Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii. 2011. № 3 (03). [Electronic resource] [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_16995885\\_38716561.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_16995885_38716561.pdf) (Data of the application 29.05.2017) (in Russian).

11. Baykenova Yu.G., Baykin Yu.L. Efficiency of technologies of ecogeochemical reclamation of soils (TERP) contaminated with heavy metals (HM) // Agrarnyy vestnik Urala. 2015. № 4 (134). P. 10–14 (in Russian).

12. Belousova Yu.S. The state of copper and zinc in the system “soil-plant” in conditions of contamination: Avtoref ... kand. biol. nauk. M., 2013. 26 p. (in Russian).

13. Fedotov V.L. Soil science with the basics of plant growing. Vitebsk: Izd-vo UO VGU im. P.M. Masherova, 2003. 114 p. (in Russian).
14. Agrochemical methods of soil investigation / Ed. A.V. Sokolov. M.: Nauka, 1975. 655 p. (in Russian).
15. GN 2.1.7.2042-06. Approximate permissible concentration (ODC) of chemical substances in the soil. Hygienic standards. M.: Federalnyy tsentr gigiyeny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2006. 8 p. (in Russian).
16. GN 2.1.7.2044-06. The maximum permissible concentration (MPC) of chemicals in the soil. Hygienic standards. M.: Federalnyy tsentr gigiyeny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2006. 15 p. (in Russian).
17. Vodyanitskiy Yu.N. Norms for the content of heavy metals and metalloids in soils // Pochvovedenie. M.: Nauka, 2012. № 3. P. 368–375 (in Russian).
18. Ilin V.B. Heavy metals in the soil-plant system. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-niye, 1991. 151 p. (in Russian).
19. Recommendations for the use of zeolite-containing feed additive “TERRAWIT” for farm animals and poultry. Belgorod. FGOU VPO BelGSKhA. 2009. 22 p. (in Russian).
20. Kravchenko V.A. Methodical instructions and reference material for the formulation of a course project (work) on the system of application of fertilizers in crop rotations. Elets: EGU im. I.A. Bunina, 2007. 40 p. (in Russian).
21. FR.1.31.2012.13573. Method for performing measurements of mass fractions of toxic metals in soil samples by atomic absorption method. Moskva, 2012. 16 p. (in Russian).
22. GOST 26213-91. Soil. Methods for the determination of organic matter. M.: Gosudarstvennyy komitet standartizatsii i metrologii SSSR, 1991. 8 p. (in Russian).
23. Arinushkina E.V. Guidelines for the chemical analysis of soils. M.: MGU, 1970. 488 p. (in Russian).
24. GOST 26205-91. Soil. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium by the method of Machigin in the modification of CINAO. (in Russian).
25. Zhezhel N.G., Panteleyeva E.I. Agrochemistry. L.: “Kolos”, Leningr. otd-niye, 1972. 288 p. (in Russian).
26. GOST 26488-85. Soil. Determination of nitrates by the method of CINAO. (in Russian).
27. Collection of methods for performing measurements of the mass concentration of copper, lead, cadmium, zinc, bismuth, manganese, nickel, and cobalt ions by voltammetry on the voltammetric analyzer “Ecotest-VA”. M.: NPP OOO “Ekoniks-Ekspert”, 2004. 61 p. (in Russian).
28. GOST 26929-94. Raw materials and food products. Preparation of samples. Mineralization to determine the content of toxic elements. M.: Standartiform, 2010. 12 p.
29. Agrochemistry / Eds. V.M. Klechkovskiy, A.V. Petersburgskiy. M.: Kolos, 1967. 583 p. (in Russian).
30. Skugoreva S.G., Ogorodnikova S.Yu., Golovko T.K., Ashikhmina T.Ya. Phytotoxicity of organophosphorus compounds and mercury. Ekaterinburg: UrO RAN, 2008. 154 p. (in Russian).
31. Siedlecka A. Some aspects of interactions between heavy metals and plant mineral nutrients // Acta Soc. Bot. Pol. 1995. V. 64. № 3. P. 262–272.
32. Titov A.F., Talanova V.V., Kaznina N.M., Laydin G.F. Stability of plants to heavy metals. Petrozavodsk: Karelskiy nauchnyy tsentr RAN, 2007. 172 p. (in Russian).
33. Pearson R.G. Hard and soft acids and bases, HSAB. Part 1: Fundamental principles (angl.) // J. Chem. Educ. 1968. V. 45. № 9. P. 581–586.
34. Some issues of toxicity of metal ions / Eds. X. Zigel, A. Zigel. M.: Mir, 1993. 368 p. (in Russian).