

**Выяснение особенностей рост-ингибирующего действия
тяжёлых металлов на фоне различных форм минерального азота
(на примере *Hordeum vulgare* L.)**

©2016. Е. С. Петухова¹, аспирант, Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д.т.н, профессор,
¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: ecolab2@gmail.com

В модельном эксперименте проведено изучение эффектов свинца, меди, цинка, кадмия и нитрата аммония при раздельном и совместном действии на прорастание семян ячменя сорта Новичок. Выявлена способность ионов свинца, кадмия и меди в концентрации 100 мкМ оказывать ингибирующее действие на рост корня проростков и некоторая стимулирующая способность при этом ионов цинка. Нитрат-ионы в концентрации 100 мкМ не оказывали ингибирующего действия на рост корня проростков, а совместно с ионами Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} увеличивали их ингибирующее действие. Совместное действие ионов NH_4^+ в концентрации 100 мкМ с исследуемыми ионами металлов также увеличивало ингибирование роста. Наибольшее ингибирующее действие на рост корня проявлялось при совместном действии ионов Zn^{2+} и Cu^{2+} , а также Cd^{2+} и Cu^{2+} . Ионы Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} по отдельности ингибировали рост корня проростков в большей степени, чем при совместном воздействии с нитратом аммония, который является важным источником азотного питания растений.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, ингибиторы, стимуляторы, совместное и раздельное действие, эффект суммации.

**The peculiarities of growth inhibitory effect of heavy metals
on the background of various forms of mineral nitrogen
(by the example of *Hordeum vulgare* L.)**

E. S. Petukhova¹, T. Ya. Ashihmina^{1,2},
¹Vyatka State University,
36 Moskovskaya st., Kirov, Russia, 610000,
²Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,
28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russia, 167982,
e-mail: ecolab2@gmail.com

The model experiment was carried out to find out separate and joint effect of lead, copper, zinc, cadmium, and ammonium nitrate on seed germination of barley of the species Novichok. Heavy metals and nitrogen-containing compounds were introduced in variants with distilled water in the form of water-soluble salts $CuCl_2$, $ZnCl_2$, $CdCl_2$, $PbCl_2$, NH_4Cl , $NaNO_3$ and NH_4NO_3 with ion concentration Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , NH_4^+ , and NO_3^- 100 $\mu\text{mol/l}$ (μM). Distilled water was control. 44 combinations of metals were studied including lead, copper, zinc, cadmium, both individually and in double, triple, and quadruple combinations as for their influence on the growth of seedlings of barley *Hordeum vulgare* L. in the presence of various forms of mineral nitrogen. The experiment revealed that lead, cadmium and copper in concentration 100 μM have an inhibitory effect on root growth of seedlings, while zinc ions have some stimulating ability. Nitrate-ions in concentration of 100 μM did not have any inhibitory effect on the growth of seedlings roots, and in combination with ions of Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} their inhibitory effect was increased. Their combination with ions of NH_4^+ in concentration of 100 μM , also lead to increase in growth inhibition. The combined effect of ions Zn^{2+} and Cu^{2+} , as well as Cd^{2+} and Cu^{2+} had the biggest inhibitory effect. The inhibitory effect of ions of Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} taken separately on seedlings root growth was greater than that when in a double combination with ammonium nitrate, which is an important source of nitrogen nutrition of plants.

Keywords: heavy metals, inhibitors, stimulators, joint and separate action, the effect of summation.

В результате хозяйственной деятельности человека происходит загрязнение окружающей среды тяжёлыми металлами (ТМ). Повышенные концентрации ТМ в почвах приводят к потерям урожая сельскохозяйственных культур и накоплению металлов в продукции в количествах, представляющих опасность для здоровья человека. За последнее время изучению воздействия тяжёлых металлов на рост, развитие и другие физиологические процессы растений, экологическим последствиям загрязнения почв ТМ посвящён ряд работ [1–8] и др.

Токсическое действие металлов на растения чётко видно по ингибированию роста, что широко используется для тестирования их присутствия в окружающей среде [9, 10, 11]. Для разработки фундаментальных основ адаптации растений к ТМ и решения ряда практических задач необходимо выяснение механизма роста-ингибирующего действия различных ТМ на растения, включая их совместное действие. Специфика действия отдельных ТМ на ростовые процессы обусловлена как различиями физико-химических свойств их ионов, так и особенностями клеточного метаболизма конкретных растений. Известно, что действие ТМ на ростовые процессы напрямую зависит от особенностей их тканевого и внутриклеточного распределения в растущем участке корня, а также от эффективности механизмов детоксикации, которые могут реализоваться в тканях разных видов и сортов растений различным образом [12].

Поэтому решение проблемы специфичности и избирательности токсического действия металлов на рост, а также выяснение особенностей сочетанного действия ТМ на отдельные ростовые процессы требуют специальных исследований в модельных экспериментах. Кроме того, на токсичность металлов влияют другие ионы, присутствующие в среде, наиболее важную роль среди которых играют макроэлементы, участвующие в минеральном питании растений. Несмотря на активное изучение физиологической роли макроэлементов, и в особенности азота, его влияние на проявление токсического действия ТМ остаётся мало изученным.

Целью данного исследования является изучение специфичности и избирательного действия отдельных металлов на примере свинца, меди, цинка, кадмия и их сочетанного воздействия на рост корня проростков ячменя *Hordeum vulgare* L. в присутствии различных форм минерального азота.

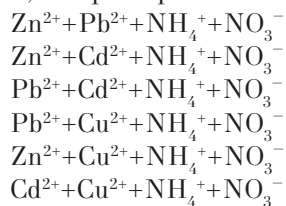
Объекты и методы

В качестве объекта исследования были взяты проростки ячменя сорта Новичок, который создан в результате направленной селекции на устойчивость к ионной токсикации (токсичности кислых почв).

Для изучения влияния воздействия ионов Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} проведена серия экспериментов, в которой проростки ячменя инкубировали на растворах ТМ в присутствии NH_4NO_3 . Действующие концентрации азота и тяжёлых металлов были подобраны в предварительных экспериментах.

Опыты по проращиванию семян ячменя проводили в чашках Петри, в термостате при температуре 25 °С. Семена считали проросшими, если длина первичного корешка была больше 2 мм. Опыты выполняли в четырехкратной повторности. В эксперименте оценивали лабораторную всхожесть, энергию прорастания и скорость прорастания ячменя. Всхожесть определяли на 7-е сут, энергию прорастания по числу проросших семян – на 3 сут. Скорость прорастания представляет собой средневзвешенное количество дней, приходящееся на прорастание одного зерна. Скорость прорастания определяли по методу Пипера [13]. В ходе эксперимента также определяли биометрические показатели 3-дневных проростков (длина корня и coleoptilia, число корешков, накопление сухой биомассы).

Тяжёлые металлы и азотсодержащие соединения вносились в варианты с дистиллированной водой в виде водорастворимых солей: $CuCl_2$, $ZnCl_2$, $CdCl_2$, $PbCl_2$, NH_4Cl , $NaNO_3$ и NH_4NO_3 с концентрацией ионов Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , NH_4^+ и NO_3^- 100 мкмоль/л (мкМ). В качестве контроля была взята в чашках Петри дистиллированная вода. Всего исследовано 44 комбинации металлов, включающих свинец, медь, цинк, кадмий по отдельности и в двойных, тройных и четверных сочетаниях на рост проростков ячменя *Hordeum vulgare* L. в присутствии различных форм минерального азота, например:



Статистическая обработка результатов проводилась при помощи пакета программы Excel. Экспериментальные данные из сово-

купностей с нормальным распределением сравнивались с помощью t-критерия Стьюдента для независимых выборок. Статистически достоверными считали различия при $p \leq 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Параметры прорастания семян ячменя (всхожесть семян, энергия и скорость прорас-

тания) определяли в модельном эксперименте в 44 различных комбинациях, включающих исследование воздействия как отдельных компонентов, так и их суммы. В таблице 1 представлены результаты изучения раздельного и совместного влияния ионов меди и цинка, а также воздействия аммиачной и нитратной форм азота на процесс прорастания семян ячменя.

Таблица 1

Всхожесть и энергия прорастания семян ячменя при раздельном и совместном влиянии ионов меди, цинка, аммония и нитрат-ионов

№ п/п	Вариант	Всхожесть семян, %	Энергия прорастания, %
1	Контроль (дистиллированная вода)	96±4	96±4
2	Cu ²⁺	98±2	96±3
3	Zn ²⁺	91±7	91±7
4	Cu ²⁺ +Zn ²⁺	99±2	99±2
5	Cu ²⁺ +NO ₃ ⁻	94±7	94±7
6	Zn ²⁺ +NO ₃ ⁻	97±3	96±3
7	Cu ²⁺ +NH ₄ ⁺	97±4	96±5
8	Zn ²⁺ +NH ₄ ⁺	96±3	96±3
9	Cu ²⁺ +Zn ²⁺ +NO ₃ ⁻	92±3	92±3
10	Cu ²⁺ +Zn ²⁺ +NH ₄ ⁺	93±7	93±7
11	Cu ²⁺ +Zn ²⁺ +NH ₄ ⁺ +NO ₃ ⁻	93±6	92±7
12	NH ₄ ⁺	92±2	92±2
13	NO ₃ ⁻	93±5	92±4
14	NH ₄ ⁺ +NO ₃ ⁻	97±3	97±3
15	Cu ²⁺ +NH ₄ ⁺ +NO ₃ ⁻	97±0	97±0
16	Zn ²⁺ +NH ₄ ⁺ +NO ₃ ⁻	96±4	96±4

Таблица 2

Влияние ионов Cu²⁺, Zn²⁺, NH₄⁺ и NO₃⁻ на показатели роста 3-дневных проростков ячменя

№ п/п	Вариант	Длина, см		Сухая масса 10 проростков, г
		корень	колеоптиль	
1	Контроль (дистиллированная вода)	9,0±1,8	5,1±1,0	0,353±0,019
2	Cu ²⁺	4,7±1,0*	4,3±1,3	0,377±0,046
3	Zn ²⁺	9,1±1,4	4,9±1,1	0,370±0,041
4	Cu ²⁺ +Zn ²⁺	3,6±1,0*	3,4±0,8	0,381±0,043
5	Cu ²⁺ +NO ₃ ⁻	4,0±1,0*	3,9±0,9	0,365±0,050
6	Zn ²⁺ +NO ₃ ⁻	7,4±1,8	4,8±1,1	0,363±0,033
7	Cu ²⁺ +NH ₄ ⁺	3,7±0,9*	3,4±1,0	0,377±0,028
8	Zn ²⁺ +NH ₄ ⁺	7,9±1,6	4,0±1,2	0,347±0,038
9	Cu ²⁺ +Zn ²⁺ +NO ₃ ⁻	5,8±1,3	4,2±0,7	0,366±0,043
10	Cu ²⁺ +Zn ²⁺ +NH ₄ ⁺	4,3±1,0*	5,1±0,9	0,367±0,033
11	Cu ²⁺ +Zn ²⁺ +NH ₄ ⁺ +NO ₃ ⁻	4,5±1,3*	3,9±1,0	0,369±0,037
12	NH ₄ ⁺	7,8±1,8	4,5±1,2	0,374±0,046
13	NO ₃ ⁻	9,0±1,5	4,7±1,3	0,408±0,043
14	NH ₄ ⁺ +NO ₃ ⁻	8,5±1,5	4,4±1,3	0,368±0,048
15	Cu ²⁺ +NH ₄ ⁺ +NO ₃ ⁻	3,8±1,0*	3,1±0,8	0,365±0,053
16	Zn ²⁺ +NH ₄ ⁺ +NO ₃ ⁻	7,5±1,2	3,6±1,0	0,365±0,064

Примечание: * – различия между вариантом и контролем достоверны при $p \leq 0,05$.

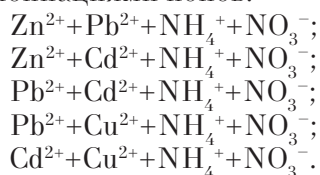
Полученные данные свидетельствуют о том, что в концентрации 100 мкМ каждого из взятых в эксперименте ионов Cu^{2+} , Zn^{2+} , NH_4^+ , NO_3^- всхожесть и энергия прорастания семян отличаются незначительно. На четвёртые сутки были проведены замеры линейных показателей роста проростков, подвергнутые воздействию ионов Cu^{2+} , Zn^{2+} , NH_4^+ , NO_3^- , и определена их биомасса.

Полученные данные представлены в таблице 2. Из данных, представленных в таблице 2, следует, что показатели роста длины coleoptily трёхдневных проростков ячменя имеют незначительные отличия по вариантам, поскольку их рост обеспечивается за счёт питательных веществ, содержащихся в эндосперме семени.

По показателю длины корня варианты различались в большей степени, так как корневая система проростков ячменя имела непосредственный контакт с раствором, содержащим тяжёлые металлы. Во всех вариантах, где содержались ионы меди в концентрации 100 мкМ (варианты №№ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16), ингибирующее действие в 1,6–2,5 раза было выше, чем в контроле, что вполне согласуется с литературными данными о том, что медь в избыточных концентрациях (от 100 мкМ и выше) оказывает токсическое действие на прорастание семян, рост и накопление биомассы молодых растений [14]. В отношении цинка из литературных данных известно, что влияние его на прорастание семян проявляется начиная с концентрации 1,5 мМ. Ингибирующее действие цинка на накопление биомассы молодых растений проявляется с концентрации 500 мкМ, а избыточные концентрации (до 5 мМ) полностью останавливают рост листьев [8].

Таким образом, при концентрации 100 мкМ ионов меди выявлены эффекты ингибирования роста проростков ячменя, в то время как для соединений цинка подобный эффект при такой концентрации незначителен.

Подобные исследования проведены по выявлению изменений в параметрах прорастания семян ячменя и показателей роста трёхдневных проростков в вариантах со следующими комбинациями ионов:



Следует отметить, что практически во всех вариантах не выявлено значительных отличий от контроля по показателям прорастания семян. Наибольшие различия выявлены по

показателю длины корня трёхдневных проростков. Полученные данные представлены на рис. 1–6 (см. цв. вкладку).

Наибольшее ингибирующее действие на рост 3-дневных проростков ячменя (рис. 1) оказывают ионы кадмия во всех вариантах, в которых они присутствовали в концентрации 100 мкМ (варианты №№ 2, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 15). Наиболее чувствительным параметром к воздействию Cd^{2+} является длина корня проростков, однако достоверных различий по сравнению с контролем не установлено. Ионы кадмия ингибировали рост корня в 1,5–1,8 раза по сравнению с контролем, что согласуется с литературными данными [14], где кадмий в избыточных концентрациях (от 100 мкМ и выше) оказывал токсическое действие на прорастание семян, рост и накопление биомассы молодых растений.

Снижение длины coleoptily в этих же вариантах составило 1,3–1,4 раза, при этом выявлены достоверные различия с контролем (для вариантов №№ 5 и 11).

Из литературных данных известно, что в процессе развития однолетних злаков (с момента прорастания семян до фазы трёх настоящих листьев) ингибирующее действие уксуснокислого свинца, применяемого в концентрациях 200–1000 мг/кг субстрата, и кадмия, применяемого в концентрациях 100–600 мг/кг субстрата, на рост растений ослабевает. Более высокие концентрации кадмия (> 800 мг/кг субстрата) приводят к полной остановке роста и последующей их гибели [5], что свидетельствует о более сильном токсическом действии ионов кадмия при данной концентрации, в сравнении с ионами свинца.

Из данных, представленных на рисунке 2, следует, что наибольшее ингибирующее действие оказывают ионы меди в вариантах №№ 2, 4, 5, 7, 15).

Наиболее чувствительным параметром к воздействию Cu^{2+} является длина корня проростков, причём имеются достоверные различия по сравнению с контролем в вариантах №№ 2, 5, 7 и 15. Ионы меди ингибируют рост корня в 1,9–2,4 раза по сравнению с контролем. Снижение длины coleoptily в этих же вариантах составило 1,2–1,6 раза. Подобная картина была выявлена при инкубации проростков в водных растворах свинца, цинка, кадмия, меди в присутствии аммонийного и нитратного азота (рис. 3, 4). Под воздействием ионов свинца рост корня угнетался в 1,2–2,3 раза, а под влиянием ионов меди в 1,2–2,4 раза по сравнению с контролем.

Таблица 3

Показатели всхожести и прорастания семян ячменя в зависимости от условий инкубации

№ п/п	Вариант	Всхожесть семян, %	Энергия прорастания, %
1	Контроль (дистиллированная вода)	96±4	96±4
2	Cu ²⁺ +Cd ²⁺ +Zn ²⁺ +Pb ²⁺	93±9	92±8
3	Cu ²⁺ +Cd ²⁺ +Zn ²⁺ +Pb ²⁺ +NO ₃ ⁻	93±6	92±7
4	Cu ²⁺ +Cd ²⁺ +Zn ²⁺ +Pb ²⁺ +NH ₄ ⁺	91±6	91±6
5	Cu ²⁺ +Cd ²⁺ +Zn ²⁺ +Pb ²⁺ +NH ₄ ⁺ +NO ₃ ⁻	92±3	92±3

Таблица 4

Средние значения длины корня проростков ячменя при инкубации на растворах Zn²⁺, Pb²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺, в присутствии NH₄⁺, NO₃⁻

№ п/п	Варианты	Длина корня, см	Длина корня, % от контроля	Ингибирование длины корня, %
1	Контроль (дистиллированная вода)	9,0±1,8	100,0	0
2	Zn ²⁺ +Pb ²⁺ +NH ₄ ⁺ +NO ₃ ⁻	7,8±1,4	86,6	13,4
3	Zn ²⁺ +Cd ²⁺ +NH ₄ ⁺ +NO ₃ ⁻	7,1±1,5	76,3	23,7
5	Pb ²⁺ +Cd ²⁺ +NH ₄ ⁺ +NO ₃ ⁻	6,7±1,3	72,9	27,1
4	Pb ²⁺ +Cu ²⁺ +NH ₄ ⁺ +NO ₃ ⁻	6,5±1,1	71,9	28,1
7	Zn ²⁺ +Cu ²⁺ +NH ₄ ⁺ +NO ₃ ⁻	6,0±1,3	66,8	33,2
6	Cd ²⁺ +Cu ²⁺ +NH ₄ ⁺ +NO ₃ ⁻	5,5±1,3	61	39

Таблица 5

Средние значения длины корня проростков ячменя в зависимости от условий инкубации

№	Варианты	Длина корня, см
1	Дистиллированная вода	9,0±1,8
2	Zn ²⁺ +Pb ²⁺	8,2±1,2
3	Zn ²⁺ +NH ₄ ⁺	7,9±1,6
4	Zn ²⁺ +NO ₃ ⁻	7,4±1,8
5	Pb ²⁺ +NH ₄ ⁺	7,2±1,2
6	Pb ²⁺ +NO ₃ ⁻	6,8±1,4
7	Cd ²⁺ +NO ₃ ⁻	6,2±1,5
8	Zn ²⁺ +Cd ²⁺	6,1±1,4
9	Pb ²⁺ +Cu ²⁺	5,6±1,4
10	Cd ²⁺ +Pb ²⁺	5,1±1,0
11	Cd ²⁺ +NH ₄ ⁺	5,1±1,1
12	Cu ²⁺ +Cd ²⁺	4,4±1,1*
13	Cu ²⁺ +NO ₃ ⁻	4,0±1,0*
14	Cu ²⁺ +NH ₄ ⁺	3,7±0,9*
15	Zn ²⁺ +Cu ²⁺	3,6±1,0*

Примечание: * – различия между вариантом и контролем достоверны при p≤0,05.

Из данных, представленных на рисунке 5, следует, что наибольшее ингибирующее действие на 3-дневные проростки ячменя оказывают ионы кадмия в вариантах №№ 3, 6, 8, 9, 10, 11, 16). Наиболее чувствительным параметром к воздействию Cu²⁺ является длина корня проростков. Ионы Cd²⁺ ингибировали рост корня в 1,2–1,8 раза по сравнению с контролем.

В таблице 3 представлены параметры прорастания семян ячменя при совместном действии ионов металлов Cu²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺, Pb²⁺, а также ионов NH₄⁺ и NO₃⁻.

Установлено, что во всех вариантах показатели всхожести и энергии прорастания ячменя несколько ниже, чем в контроле. Показатели роста трёхдневных проростков

Е. С. ПЕТУХОВА, Т. Я. АШИХМИНА
“ВЫЯСНЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РОСТ-ИНГИБИРУЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ
ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ФОНЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ МИНЕРАЛЬНОГО АЗОТА
(НА ПРИМЕРЕ HORDEUM VULGARE L.)” (С. 72)

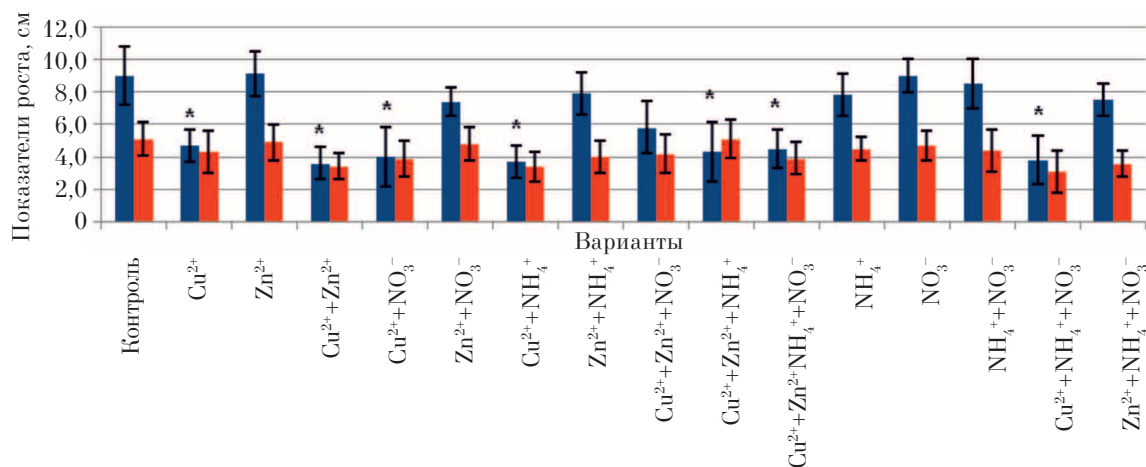


Рис. 1. Влияние водных растворов меди, цинка, аммонийного и нитратного азота в концентрациях 100 мкМ на показатели роста трёхдневных проростков ячменя

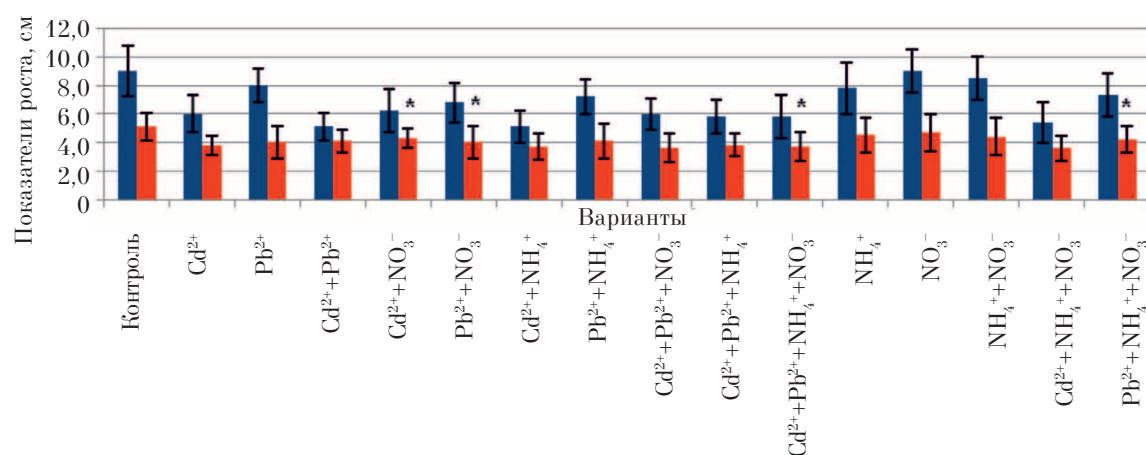


Рис. 2. Влияние водных растворов кадмия, свинца, аммонийного и нитратного азота в концентрациях 100 мкМ на показатели роста трёхдневных проростков ячменя

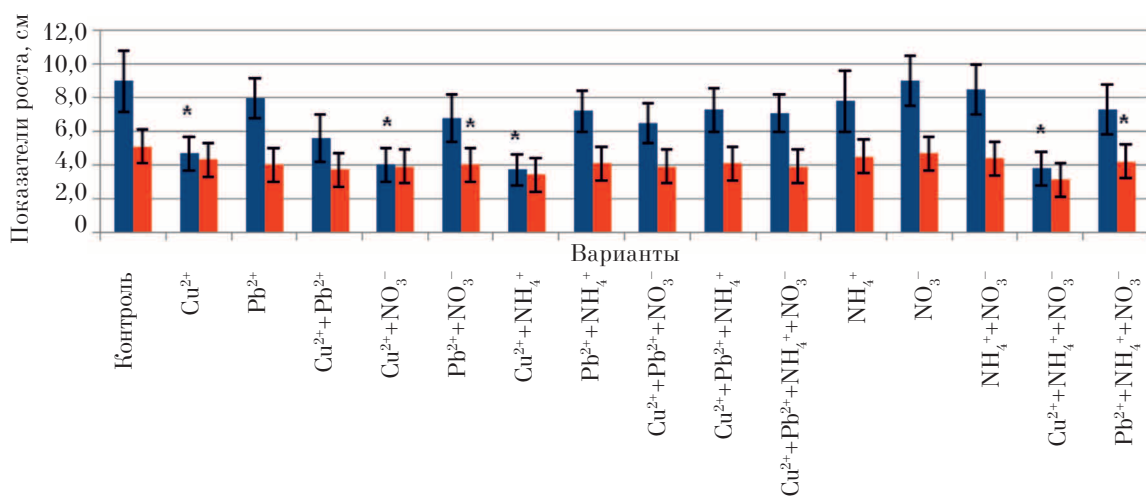


Рис. 3. Влияние водных растворов меди, свинца, аммонийного и нитратного азота в концентрациях 100 мкМ на показатели роста трёхдневных проростков ячменя

Примечания: * – различия между вариантом и контролем достоверны при $p \leq 0,05$;
■ – длина корня, см; ■ – длина колеоптиля, см

Е. С. ПЕТУХОВА, Т. Я. АШИХМИНА
“ВЫЯСНЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РОСТ-ИНГИБИРУЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ
ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ФОНЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ МИНЕРАЛЬНОГО АЗОТА
(НА ПРИМЕРЕ HORDEUM VULGARE L.)” (С. 72)

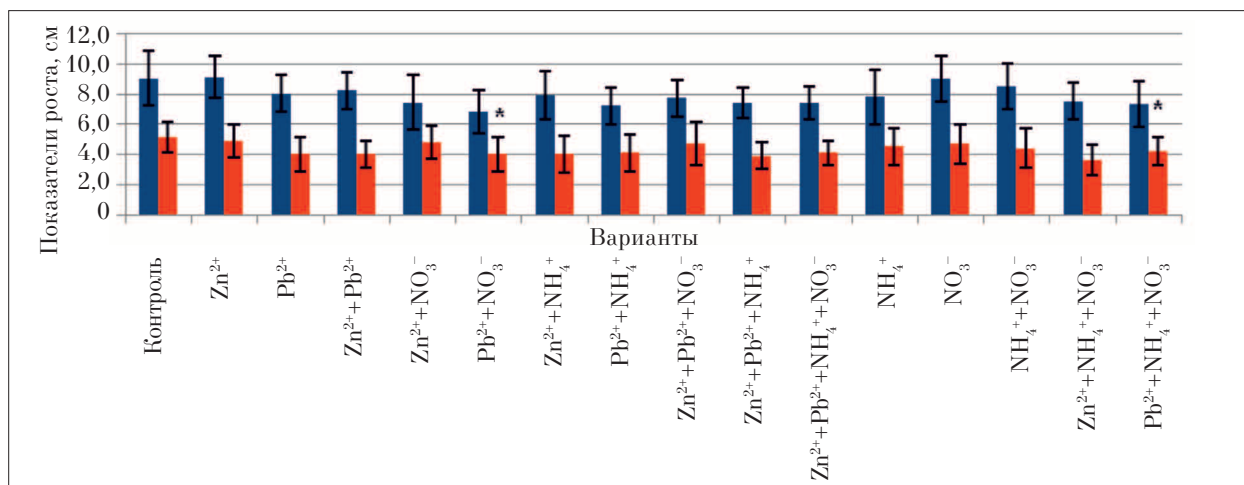


Рис. 4. Влияние водных растворов цинка, свинца, аммонийного и нитратного азота в концентрациях 100 мкМ на показатели роста трёхдневных проростков ячменя

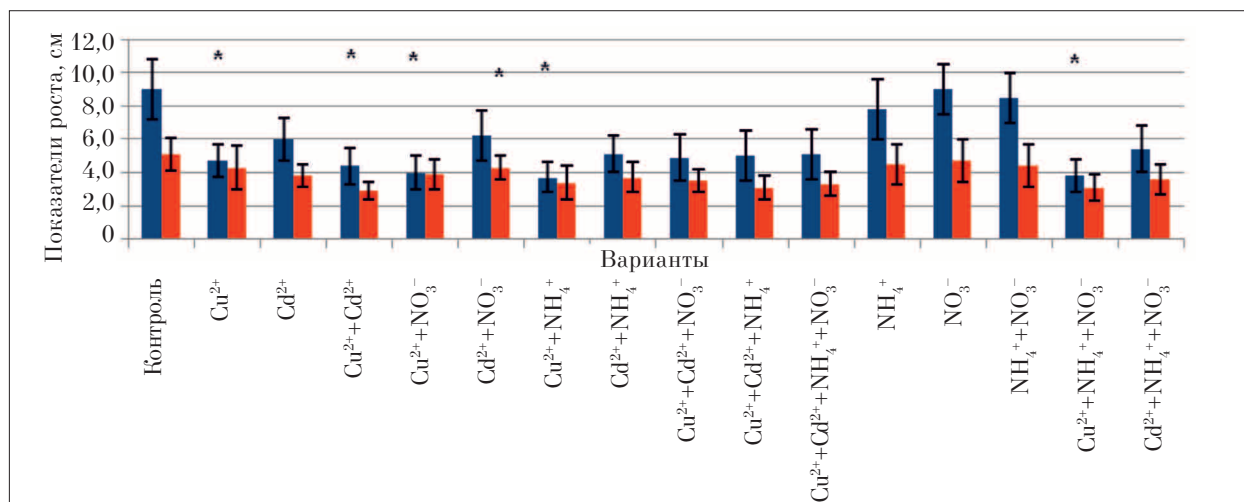


Рис. 5. Влияние водных растворов кадмия, меди, аммонийного и нитратного азота в концентрациях 100 мкМ на показатели роста трёхдневных проростков ячменя

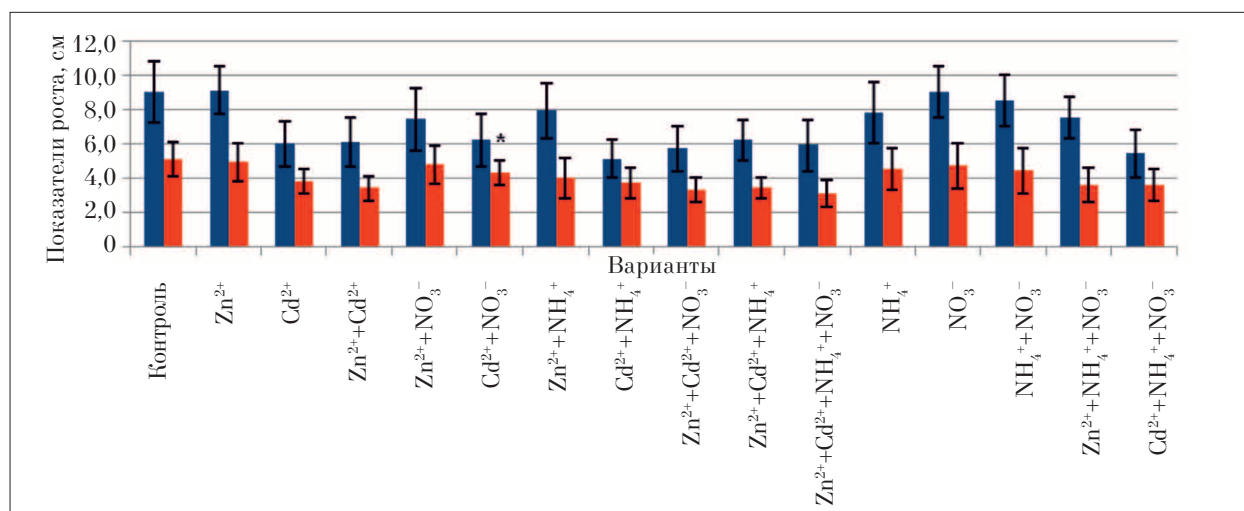


Рис. 6. Влияние водных растворов кадмия, цинка, аммонийного и нитратного азота в концентрациях 100 мкМ на показатели роста трёхдневных проростков ячменя

Примечания: * – различия между вариантом и контролем достоверны при $p \leq 0,05$;
■ – длина корня, см; ■ – длина coleoptиля, см

Литература

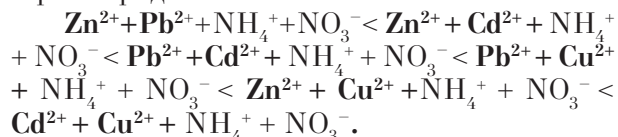
ячменя при совместном воздействии на них ионов Cu^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} и азотсодержащих ионов NH_4^+ и NO_3^- представлены в таблице 4.

Полученные данные свидетельствуют о том, что наибольшее (28,1–39%) ингибирование длины корня, в сравнении с контролем, проявилось в вариантах с участием Cu^{2+} . Несколько меньшие значения ингибирования (23,7–27,1%) получены в вариантах с участием Cd^{2+} . Наиболее близкие к контролю значения по росту длины корня получены в вариантах с участием ионов цинка.

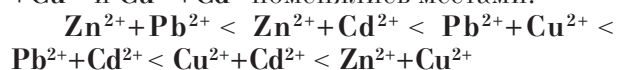
Изучение эффекта суммации воздействия двух токсичных металлов на рост проростков ячменя позволило выявить наибольшее ингибирование длины корня ионами $\text{Zn}^{2+} + \text{Cu}^{2+}$ и наименьшее ионами $\text{Zn}^{2+} + \text{Pb}^{2+}$ (табл. 5).

Заклучение

Таким образом, выявлены эффекты воздействия ионов металлов на параметры роста проростков ячменя. По ингибированию длины корня исследуемыми металлами в присутствии нитратного и аммонийного азота можно построить ряд:

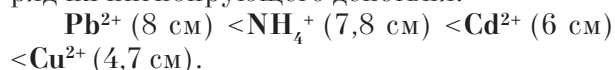


Без добавления нитрата аммония воздействие металлов на проростки ячменя, при совместном их присутствии, практически повторялись или были близки к значениям предыдущего ряда, однако пары металлов $\text{Zn}^{2+} + \text{Cu}^{2+}$ и $\text{Cu}^{2+} + \text{Cd}^{2+}$ поменялись местами:



Цинк в паре со свинцом ингибирует рост корня проростков ячменя в меньшей степени, чем этот же элемент в паре с медью. Причиной этому может служить антагонизм, который проявляется при совместном физиологическом действии соединений цинка и меди [15].

По результатам раздельного влияния исследуемых металлов в присутствии NH_4NO_3 на длину корня проростков ячменя составлен ряд их ингибирующего действия:



Ингибирующее действие от цинка к меди в ряду возрастает в 1,9 раза. Следует отметить, что ионы Zn^{2+} оказали некоторое стимулирующее воздействие на показатель длины корня в сравнении с контролем.

1. Башмаков Д.И., Лукаткин А.С. Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжёлых металлов у высших растений / Под ред. А. С. Лукаткина. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. 236 с.

2. Григорьев А.А., Бородихин А.С., Руденко О.В. Оценка влияния степени загрязнения почвы тяжёлыми металлами на процесс вегетации топинамбура // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1 (часть 1) (29.05.2015). [Электронный ресурс] <http://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vliyaniya-stepeni-zagryazneniya-pochvy-tyazhelymi-metallami-na-protsess-vegetatsii-topinambura> (дата обращения: 3.05.2016).

3. Дьяконова О.В. Тяжёлые металлы и минеральные формы азота в системе почва – растение: Автореф. дис. ... канд. сельскохозяйственных наук. Барнаул, 2005. 16 с.

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

5. Казнина Н.М. Влияние свинца и кадмия на рост, развитие и некоторые другие физиологические процессы однолетних злаков (ранние этапы онтогенеза): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2003. 23 с.

6. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Экологические последствия загрязнения почв тяжёлыми металлами. Ростов н/Д: Изд-во «СКНЦ ВШ», 2000. 232 с.

7. Косицына А.А., Макурина О.Н., Нестеров В.Н., Розенцвет О.А. Влияние ионов меди и кадмия на пигментный комплекс водных растений семейства HYDROCHARITACEAE / Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 1. С. 156–161.

8. Радионов Н. В. Физиологические и молекулярные ответные реакции растений рапса на воздействие солей меди и цинка: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва, 2008. 25 с.

9. Willkins D.A. The Measurment of tolerance to edaphic factors by means of root growth // New Phytol. 1978. V. 80. P. 623–633.

10. Wang W. Root elongation method for toxicity testing of organic and inorganic pollutants // Environ. Toxicol. Chem. 1987. V. 6. P. 409–414.

11. Breckle S.-W. Growth under stress: heavy metals // Plant roots: the hidden half / Eds.: Y. Waisel, A. Eshel and U. Kafkafi. NY.: M. Dekker, 1991. P. 351–373.

12. Серёгин И.В., Кожевников А.Д. Роль тканей корня и побега в транспорте и накоплении кадмия, свинца, никеля и стронция // Физиология растений. 2008. Т. 55. С. 3–26.

13. Майсурян Н.А., Степанов В.Н., Кузнецов В.С., Лукьянюк В.И., Черномаз П.А. Растениеводство. М.: Изд-во «Колос», 1965. 472 с.

14. Зарипова, Н.Р. Действие избыточных концентраций тяжёлых металлов на экспрессию хлоропластных генов растений ячменя: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва, 2008. 21 с.

15. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М., 1989. 439 с.

References

1. Bashmakov D.I., Lukatkin A.S. Ecological and physiological aspects of accumulation and distribution of heavy metals in higher plants / Ed. A.S. Lukatkin. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2009. 236 p. (in Russian).
2. Grigoryev A.A., Borodikhin A.S., Rudenko O.V. Evaluation of the effect of the degree of soil contamination with heavy metals on the vegetation of Jerusalem artichoke // *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. № 1 (chast 1). (29.05.2015). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vliyaniya-stepeni-zagryazneniya-pochvy-tyazhelymi-metallami-na-protsess-vegetatsii-topinambura> (accessed: 3.05.2016) (in Russian).
3. Dyakonova O.V. Heavy metals and mineral forms of nitrogen in the system soil – plant: Avtoref. dis. ... cand. selskokhozyaystvennikh nauk. Barnaul, 2005. 16 p. (in Russian).
4. Ilyin V.B. Heavy metals in the system soil – plant. Novosibirsk: Nauka, Sib. otd-nie, 1991. 151 p. (in Russian).
5. Kaznina N.M. Influence of lead and cadmium on growth, development and some other physiological processes of annual grasses (early stages of ontogenesis): Avtoref. dis. ... cand. biol. nauk. Petrozavodsk, 2003. 23 p. (in Russian).
6. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Valkov V.F. Environmental consequences of soil pollution with heavy metals. Rostov n/D: Izd-vo SKNTS VSH, 2000. 232 p. (in Russian).
7. Kositsyna A.A., Makurina O.N., Nesterov V.N., Rozentsvet O.A. The influence of ions of copper and cadmium on pigment complex of aquatic plant family HYDROCHARITACEAE. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2010. T. 12. № 1. P. 156–161 (in Russian).
8. Radionov N.V. Physiological and molecular responses of rape plants to the effect of salts of copper and zinc: Avtoref. dis. ... cand. biol. nauk. Moskva, 2008. 25 p. (in Russian).
9. Willkins D.A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth // *New Phytol.* 1978. V. 80. P. 623–633.
10. Wang W. Root elongation method for toxicity testing of organic and inorganic pollutants // *Environ. Toxicol. Chem.* 1987. V. 6. P. 409–414.
11. Breckle S.-W. Growth under stress: heavy metals // *Plant roots: the hidden half* / Eds. Y. Waisel, A. Eshel and U. Kafkafi. NY.: M.Dekker. 1991. P. 351–373.
12. Seregin I. V., Kozhevnikov A. D. The role of root and shoot tissues in the transportation and accumulation of cadmium, lead, nickel, and strontium // *Physiologiya rasteniy*. 2008. T. 55. P. 3–26 (in Russian).
13. Misuryan N.A., Stepanov V.N., Kuznetsov V.S., Lukyanuk I.V., Chernomaz P.A. *Plant breeding*. M.: Kolos, 1965. 472 p. (in Russian).
14. Zaripova N.R. The effect of excess concentrations of heavy metals on expression of chloroplast genes of barley plants: Avtoref. dis. ... cand. biol. nauk. Moskva, 2008. 21 p. (in Russian).
15. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. M., 1989. 439 p. (in Russian).