

## Реакция растений овса и ячменя на действие кадмия в чистом виде и в смеси с алюминием

© 2009. О.А. Паладич<sup>3</sup>, к.б.н., ведущий специалист; Л.Н. Шихова<sup>2</sup>, д.б.н., профессор;  
Е.А. Русских<sup>1</sup>, аспирант; Е.М. Лисицын<sup>1</sup>, д.б.н., заведующий лабораторией,  
<sup>1</sup>ГУ НИИСХ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого,  
<sup>2</sup>Вятская государственная сельскохозяйственная академия,  
<sup>3</sup> Департамент сельского хозяйства Кировской области  
e-mail: shikhova@e-kirov.ru

Исследованы адаптивные реакции растений овса и ячменя на высокое содержание кадмия и алюминия в среде. Установлено, что кадмий действует на растения угнетающе только при очень высоких концентрациях. Устойчивость сортов овса и ячменя к токсическому действию кадмия совпадает с уровнем их алюмоустойчивости.

Adaptation reactions of oats and barley on high content of cadmium and aluminum in growth media were investigated. It was found out that cadmium depresses plant growth only when in high concentrations. Toxic resistance of oats and barley to cadmium is equal to that of aluminum.

Ключевые слова: овёс, ячмень, устойчивость, кадмий, алюминий

Высокое содержание в среде тяжёлых металлов (ТМ) негативно отражается на нормальном протекании многих процессов метаболизма в растениях, в результате чего угнетаются их рост и развитие, снижается продуктивность [1, 2]. Известно, что устойчивость растений к действию ТМ отличается не только на уровне семейств, но даже сортов культурных растений [3]. Исследователи всё чаще высказываются о возможности селекции сортов растений, толерантных к токсическому действию ТМ и способных противостоять накоплению поллютантов в продовольственной части растений [4]. В целом селекция, направленная на адаптацию культурных растений к неблагоприятным факторам окружающей среды, интенсивно ведётся как у нас в стране, так и за рубежом. На северо-востоке европейской части России приоритетным направлением в данной области является отбор на устойчивость к повышенной кислотности почв и содержанию обменного алюминия. Токсичность алюминия (Al) является главной проблемой растениеводства на кислых почвах. Растения, растущие на кислых почвах, из-за наличия в них алюминия при низкой величине pH имеют плохо развитую корневую систему и проявляют симптомы недостатка минерального питания с последующим снижением урожая. Алюминий нарушает поглощение, транспортировку и утилизацию необходимых

растению минеральных элементов, таких как Ca, Mg, K, P, Cu, Fe, Mn и Zn [5]. Однако пока ещё мало известно о совместном воздействии на растения ионов алюминия и кадмия (Cd), хотя их токсичность в чистом виде хорошо доказана [6]. Известно, что далеко не всегда при совместном действии двух токсичных металлов их суммарный эффект превосходит индивидуальный: например, влияние хрома значительно сильнее проявляется в чистом виде, чем в комплексе с алюминием [7, 8]. Взаимодействия Cd и жизненно необходимых элементов приводит к изменениям в содержании питательных веществ в растении и физиологическим нарушениям, угнетению роста и снижению урожая [9, 10]. Показано, что стресс, вызванный низкими концентрациями Cd, отличается от стресса, индуцированного кратковременным воздействием высоких его концентраций [11]. Можно предположить, что в основе устойчивости растений к токсическому действию алюминия и тяжёлых металлов лежат сходные механизмы, поэтому алюмоустойчивые сорта должны быть более толерантными к негативному действию ТМ.

Поэтому целью нашего исследования являлась оценка взаимоотношений между Cd и Al в их влиянии на рост растений и развитие фотосинтетического аппарата (содержание пигментов), а также возможные различия в ответе сортов ячменя и овса с различной

алюмоустойчивостью на токсическое действие кадмия и смеси кадмия с алюминием.

**Методика**

Для исследований выбраны сорта овса и ячменя, ранее оценённые нами по степени алюмоустойчивости в условиях рудонной культуры: алюмоустойчивость овсов уменьшается в ряду Кречет>Факир>Улов, ячменей – в ряду Дина>Абава>Эльф. В условиях песчаной культуры на основе питательной смеси Кюпа в качестве фона изучали следующие варианты воздействия на растения: 1) контроль – без ТМ; 2) 4,5 мг/кг Cd; 3) 4,5 мг/кг Cd + 11 мг/кг Al; 4) 10 мг/кг Cd; 5) 10 мг/кг Cd + 11 мг/кг Al. В сосуды объёмом 400 мл высаживали 3-дневные проростки по 5 штук в четырёхкратной повторности. Растения выращивали при освещении 15 клк люкс и фотопериоде 16 ч. Продолжительность опыта – 5 недель (до фазы кущения). Анализируемые показатели: высота растений, сухая масса листьев, стеблей и корней, содержание пигментов в листьях. Содержание пигментов определяли в ацетоновой вытяжке согласно [12].

В конце опыта оценивались параметры развития каждого индивидуального растения, рассчитывались средние показатели для каждого сосуда, которые далее использовались в качестве повторностей при статистической обработке данных с использованием дисперсионного анализа (пакет статистических программ AGROS 2.07).

**Результаты и обсуждение**

Совместное действие Al и 4,5 мг/кг Cd проявлялось в снижении *высоты растений* овса на 28,3 – 32,3%. Среди ячменей достоверное снижение высоты растений в этом варианте наблюдалось у сортов Дина и Эльф (на 6,8% и 7,6% соответственно). При использовании одного Cd высота растений практически не изменялась (рис. 1).

Снижение *сухой массы растений* овса при совместном внесении Al и Cd, по сравнению с контролем, наблюдалось у сортов Факир и Кречет (на 25,2 и 34,8% соответственно). При этом недобор массы в основном характерен для таких частей растения, как стебель и корень, а массовая доля листьев увеличена по сравнению с контрольным вариантом.

У ячменей снижение сухой массы растений отмечено также при совместном действии Al и Cd у сортов Эльф и Дина (на 11,8% и 19,3% соответственно).

В отличие от овсов, депрессия характерна для корней и листьев – стеблей изменения не коснулись, а на фоне снижения общей массы растения массовая доля стеблей даже выросла. У сортов овса Улов и ячменя Абава изменения массы растений недостоверны (рис. 2).

Изменения в *пигментном комплексе* отмечены только у сорта овса Факир в варианте кадмий+алюминий: на 28,3% увеличилось содержание хлорофилла б. Однако при этом несколько снизилось содержание хлорофилла а, поэтому изменение содержания общего хлорофилла (а + б) оказалось незначительным.

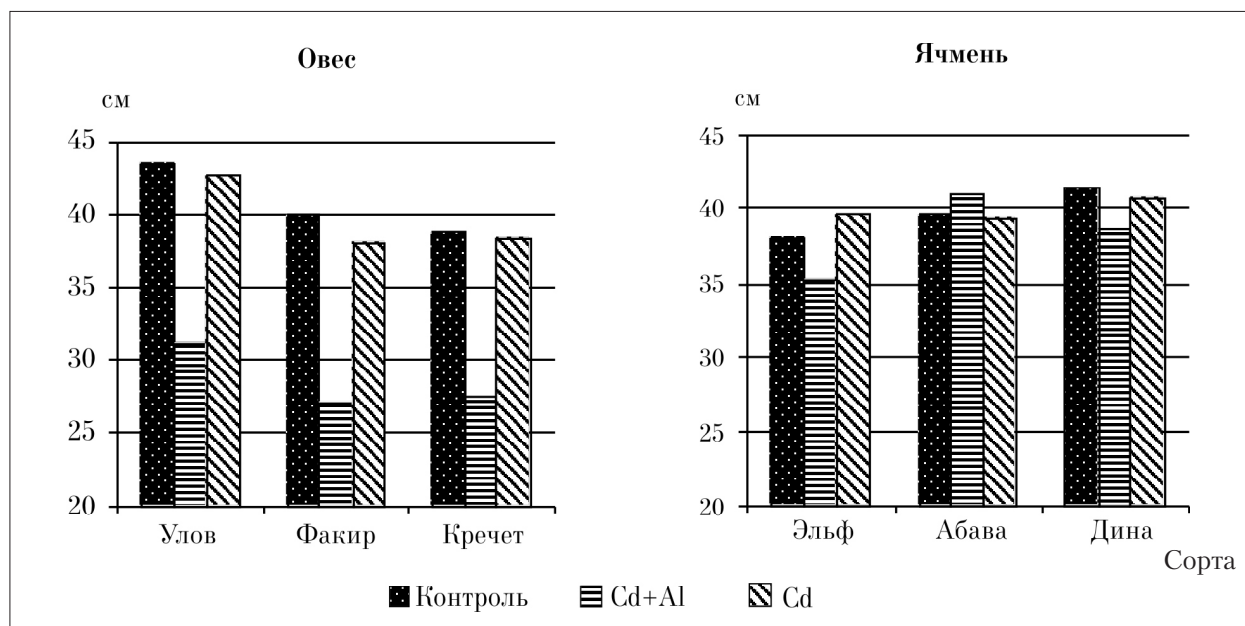


Рис. 1. Влияние Al и Cd на высоту растений

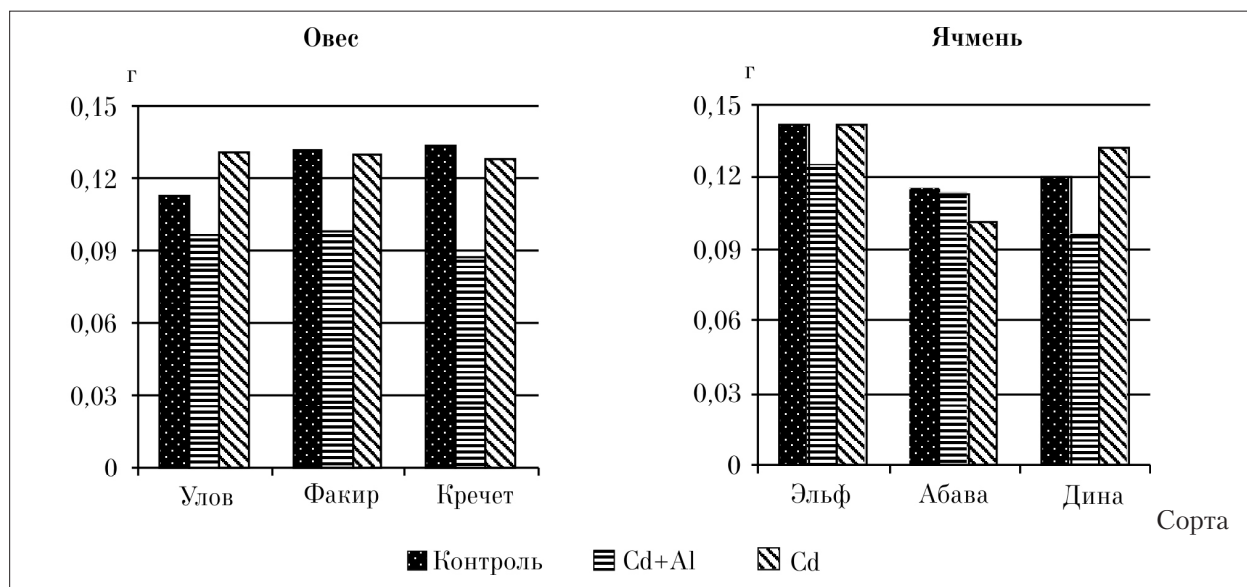


Рис. 2. Влияние Al и Cd на сухую массу растений

У ячменей изменения в пигментном комплексе не выявлены. Как у овсов, так и у ячменей каротиноиды оказались более стабильными образованиями – изменения их содержания незначительны.

Таким образом, наблюдается как депрессия отдельных морфофизиологических показателей, так и, наоборот, стимулирующие.

Ориентировочно допустимая концентрация (ОДК) валового кадмия в песчаных и супесчаных почвах составляет 0,5 мг/кг почвы [13]. Используемое в опыте девятикратное превышение ОДК по валовому содержанию кадмия не привело к значительному угнетению роста и развития овса и ячменя даже в песчаной культуре, когда практически отсутствует поглощательная способность почвы в отношении загрязнителя и весь металл находится в подвижной, доступной для растений форме. Вероятно, такая концентрация кадмия недостаточна для четкого проявления морфофизиологических признаков угнетения растений.

При повышении концентрации Cd до 10 мг/кг в варианте Cd+Al депрессия практиче-

ски всех параметров приобрела достоверный характер. В вариантах с добавлением кадмия отмечалась задержка всходов на 2-3 дня, листовая пластинка была более узкой, чем в контрольных вариантах. На 5-й неделе роста нижние листья стали засыхать и отмирать.

Снижение *высоты растений* по сравнению с контролем отмечено у всех сортов овса и ячменя (табл. 1). Только у сортов ячменя совместное действие алюминия и кадмия отличалось от действия одного кадмия. В вариантах с овсом разница между вариантами Cd и Cd+Al статистически недостоверна. По степени проявления депрессии роста под действием Cd сорта овса и ячменя расположились аналогично их устойчивости к высокой кислотности и содержанию алюминия: Кречет>Факир>Улов и Дина>Абава>Эльф.

Снижение *массы растений* овса в варианте Cd+Al составляло от 64,2% у сорта Улов до 25% у сорта Кречет. То есть устойчивость сортов по данному признаку совпадала с их алюмоустойчивостью. Разница между вариантами Cd и Cd+Al недостоверна, за

Таблица 1

Изменение высоты растений (см) под действием Cd и Al

Культура	Сорт	Варианты		
		Контроль	Cd	Cd+Al
Овес	Улов	23,3±1,2	10,1±0,5	9,6±0,4
	Факир	19,0±0,8	10,3±0,4	10,8±0,3
	Кречет	16,9±0,7	12,3±0,8	11,4±0,6
Ячмень	Эльф	28,7±0,5	21,9±1,3	9,8±0,9
	Абава	25,9±1,0	22,6±0,6	13,5±0,9
	Дина	24,4±1,3	22,9±1,2	8,7±1,0

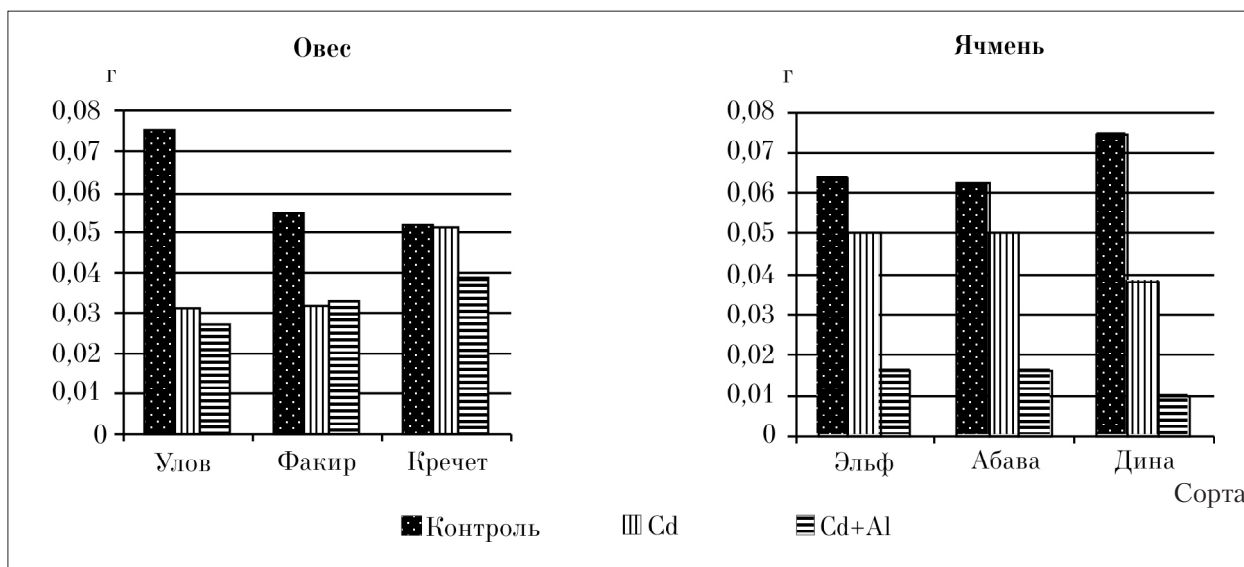


Рис. 3. Изменение сухой массы растений

исключением сорта Кречет, который под воздействием кадмия вообще не снизил массу (рис. 3).

Устойчивость сортов ячменя к действию кадмия по данному признаку не совпала с их алюмоустойчивостью: слабее всех реагировали сорта Эльф и Абава (рис. 3). Наибольшее снижение сухой массы растений (на 87,1%) отмечено у сорта Дина в варианте Cd+Al. Совместное токсическое действие кадмия и алюминия оказалось значительнее, чем действие одного кадмия.

Высокие концентрации Cd повлияли на пигментный комплекс листьев зерновых культур. В основном имело место снижение содержания хлорофилла, однако отмечены и случаи его повышения. При внесении Cd содержание хлорофилла у овсов уменьшалось на 12,2% – 50,4%. Совместное действие Cd и Al приводило как к снижению, так и к повышению содержания хлорофиллов *a* и *b* (табл. 2).

У ячменей отклонения от контрольных значений в содержании хлорофилла лежат

в пределах от 18,2% до 66%. Причём внесение одного Cd приводит к повышению содержания пигментов, а внесение Cd и Al – к его снижению (табл. 3). Постоянство соотношения хлорофиллов *a/b* свидетельствует об одинаковой направленности изменения их количества.

Аналогичное действие Cd оказывает и на содержание каротиноидов. Совместное действие Cd и Al носит аддитивный характер. Более устойчивым к токсическому действию Cd оказался пигментный комплекс сортов Абава и Дина, что в целом совпадает с их характеристикой как более устойчивых к высокой кислотности и содержанию обменного Al.

Таким образом, результаты нашей работы согласуются с данными других исследователей, показавших, что низкие концентрации Cd (1 мкМ/л = 0,3 мг/кг) могут иметь положительное влияние на рост растений [5, 6] либо их влияние недостоверно [14]. Повышение концентрации кадмия в 100-150 раз в этих работах приводило к значительному угнетению роста растений. Мы также наблюдали

Таблица 2  
Изменения в содержании фотосинтетических пигментов в листьях овса под влиянием Cd и Al

Сорт	Вариант	Содержание пигментов в сухом веществе, мг/г			Хл <i>a</i> / Хл <i>b</i>
		Хл <i>a</i>	Хл <i>b</i>	Хл <i>a</i> + Хл <i>b</i>	
Улов	Контроль	9,64±1,50	3,84±0,59	13,47±2,09	2,5±0,1
	Cd	6,99±1,49	3,25±0,30	10,23±1,76	2,1±0,3
	Cd+Al	4,68±0,68	2,01±0,28	6,68±0,33	2,3±0,6
Факир	Контроль	7,10±0,83	2,78±0,29	9,88±1,12	2,6±0,0
	Cd+Al	5,38±0,38	2,26±0,51	7,64±0,28	2,4±0,1
Кречет	Контроль	7,56±0,45	2,91±0,25	10,47±0,69	2,6±0,1
	Cd	5,38±1,76	2,31±0,68	7,70±73,30	2,3±0,2
	Cd+Al	8,88±0,14	2,90±0,18	11,78±0,32	3,1±0,1

Таблица 3

Изменения в содержании фотосинтетических пигментов в листьях ячменя под влиянием Cd и Al

Сорт	Вариант	Содержание пигментов в сухом веществе, мг/г				Хл а / Хл б
		Хл а	Хл б	Хл а+Хл б	Каротин	
Эльф	Контроль	8,54±2,09	2,45±0,58	10,99±1,61	3,05±1,07	2,4±0,2
	Cd	8,64±1,31	3,81±0,56	12,45±1,87	2,91±0,40	2,3±0,0
	Cd+Al	2,55±0,90	1,45±0,65	4,00±1,60	1,21±0,13	1,8±0,2
Абава	Контроль	7,36±0,52	3,49±0,63	10,85±1,16	2,32±0,05	2,2±0,2
	Cd	9,59±1,29	4,22±0,63	13,81±1,88	3,08±0,43	2,3±0,1
	Cd+Al	4,08±0,53	1,97±0,35	6,05±0,88	1,63±0,63	2,1±0,1
Дина	Контроль	5,72±1,04	2,71±0,50	8,43±1,54	1,74±0,25	2,1±0,1
	Cd	8,75±0,87	4,26±0,72	13,02±1,59	3,07±0,23	2,1±0,1
	Cd+Al	2,37±0,17	1,35±0,25	3,72±0,95	1,27±0,20	1,7±0,2

усиление действия кадмия при повышении его концентрации, хотя это и проявилось не на всех изученных сортах.

В работе [14] угнетение роста растений сои было более серьезным в варианте Cd+Al, чем только при действии Al или Cd, указывая на аддитивный эффект этих двух металлов. Аналогичные результаты получены на ячмене [5]. В нашем исследовании в зависимости от использованной концентрации кадмия отличие совместного действия этих двух металлов от действия только кадмия проявлялось, во-первых, не на всех исследованных сортах и, во-вторых, не по всем исследованным параметрам. В работах [5, 14] авторы показали меньшую реакцию на кадмий у алюмоустойчивых сортов, в отличие от чувствительных к действию алюминия. Однако в нашей работе алюмоустойчивость и устойчивость к кадмию не всегда совпадали: например, устойчивость сортов ячменя к действию высокой концентрации кадмия не совпала с их алюмоустойчивостью по параметру массы растений, а у сортов овса наблюдалось полное совпадение. В то же время степень влияния кадмия на высоту растений у обеих культур была сопряжена с уровнем алюмоустойчивости.

Что касается содержания пигментов в листьях, то в нашей работе отмечено как повышение содержания хлорофиллов под действием стрессоров, так и его снижение, в зависимости от вида и сорта растений. Чаще имело место снижение этого параметра, однако у ячменной Cd приводил к повышению содержания пигментов, а в варианте Cd+Al отмечалось снижение его содержания. Для сортов сои показано снижение содержания хлорофилла как под действием только Cd, так и в совместном варианте Cd+Al [14]. Возможно, имеет место значительная видовая и сортовая вариабельность ответных реакций растений на Cd.

Таким образом, в результате нашей работы установлено, что токсическое действие Cd проявляется на зерновых культурах только при очень высоких концентрациях, превышающих ОДК в десятки раз. Негативное действие Cd усиливается на фоне высокого содержания в среде ионов Al, особенно для ячменя. Сорта овса и ячменя отличаются по степени устойчивости к токсическому действию Cd, которая в целом совпадает с их алюмоустойчивостью.

### Литература

1. Sanita di Toppi L., Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants // Environ. Exp. Bot. 1999. V.41. № 2. P.105-130.
2. Marienfeld S., Schmohl N., Klein M., Schroder W.H., Kuhn A.J., Horst W.J. Localisation of aluminium in root tips of Zea mays and Vicia faba // J. Plant Physiol. 2000. V.156. № 5-6. P. 666-671.
3. Черных Н.А., Милащенко Н.З., Ладонин В.Ф. Экологические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами. Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2001. 148 с.
4. Feibo W., Guoping Z. Genotypic variation in kernel heavy metal concentrations in barley and as affected by soil factors // J. Plant Nutr. 2002. V.25. № 6. P.168-173.
5. Guo T.R., Zhang G.P., Lu W.Y., Wu H.P., Wu F.B., Chen J.X., Zhou M.X. Effect of Al on dry matter accumulation and Al and nutrients in barleys differing in Al tolerance // Plant Nutr. Fert. Sci. 2003. V.9 № 3. P. 324-330.
6. Wu F.B., Zhang G.P. Genotypic variation in kernel heavy metal concentrations in barley and as affected by soil factors // J. Plant Nutr. 2002. V. 25. P. 1163-1173.
7. Nosko P., Brassard P., Kramer J.R., Kershaw K.A. The effect of aluminum on seed germination and early seedling establishment, growth and respiration of white spruce (Picea glauca) // Can. J. Bot. 1988. V.66. P. 2305-2310.



8. Rellen-Alvarez R., Ortega-Villasante C., Alvarez-Fernandez A., del Campo F. F., Hernandez L. E. Stress response of Zea mays to cadmium and mercury // Plant Soil. 2006. V. 279. P. 41-50.

9. Sandalio L.M., Dalurzo H.C., Gomez M., Romero-Puertas M.C., del Rio L.A. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants // J. Exp. Bot. 2001. V.52. № 364. P. 2115-2126.

10. Mazon A.M.A. Accumulation of four metals in tissues of Corchorus olitorius and possible mechanisms of their tolerance // Biologia Plantarum. 2004. V. 48. № 2. P. 267-272.

11. Larbi A., Morales F., Abadia A., Gogorcena Y., Lucena J., Abadia J. Effects of Cd and Pb in sugar beet plants grown in nutrition solution: induced Fe deficiency

and growth inhibition // Funct. Plant Biol. 2002. V. 29. № 12. P. 1453-1464.

12. Кожушко Н.Н. Оценка засухоустойчивости полевых культур // Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям (методическое руководство). Л.: ВИР, 1988. С. 10-25.

13. Ориентировочно-допустимые концентрации химических веществ в почве: Гигиенические нормы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 11 с.

14. Shamsi I.H., Wei K., Jilani G., Zhang G. Interactions of cadmium and aluminum toxicity in their effect on growth and physiological parameters in soybean // J Zhejiang Univ. Sci B. 2007. V. 8. № 3. P.181-188.

Российская академия наук  
Уральское отделение  
Коми научный центр  
Институт биологии  
Научный совет по изучению, охране  
и рациональному использованию животного мира  
Министерство природных ресурсов и охраны  
окружающей среды Республики Коми  
Русское энтомологическое общество  
Русское гидробиологическое общество

**УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!  
ПРИГЛАШАЕМ ВАС ПРИНЯТЬ УЧАСТИЕ**

в работе Всероссийской конференции с международным участием  
«ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ И ОХРАНЫ ЖИВОТНОГО МИРА НА СЕВЕРЕ»

16 – 20 ноября 2009 г., г. Сыктывкар, Республика Коми

На конференции будут рассмотрены проблемы изучения позвоночных, а также почвенных, наземных и водных беспозвоночных на Севере.

Основные направления работы конференции:

- фауна, систематика и зоогеография;
- внутривидовое разнообразие;
- структура и динамика сообществ и популяций;
- влияние естественных и антропогенных факторов на фауну и население животных;
- адаптации животных к условиям Севера
- охрана и рациональное использование животного мира.

Контактные адреса и телефоны оргкомитета:

167982, Республика Коми, г. Сыктывкар, ГСП-2, ул. Коммунистическая, д. 28,  
телефон: (8212) 43-19-69, факс: (8212) 24-01-63