

УДК 581.1: 633.16: 546.48

НАКОПЛЕНИЕ КАДМИЯ И ЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ОРГАНАМ У РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ РАЗНОГО ВОЗРАСТА

Ю. В. Батова, А. Ф. Титов, Н. М. Казнина, Г. Ф. Лайдинен

Институт биологии Карельского научного центра РАН

В условиях лабораторного опыта изучено накопление кадмия и его распределение по органам у растений ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) в зависимости от их возраста. Установлено, что содержание кадмия в органах 7-, 14- и 21-дневных растений после 4 суток воздействия металла в концентрации 100 мкМ заметно различается. С увеличением возраста растений возрастает содержание кадмия в корнях и стеблях, в то время как в листьях не изменяется или даже несколько снижается. Помимо этого, у более взрослых растений уменьшается доля кадмия, поступающего из корней в побеги, что свидетельствует об усилении их барьерной функции. Несмотря на значительное усиление поступления кадмия в растения ячменя с увеличением их возраста, существенных различий в ответной реакции на действие металла не обнаружено. Высказано предположение, что возрастные изменения в клетках и тканях корней, приводящие к усилению их поглотительной способности, сопровождаются увеличением эффективности работы механизмов, обеспечивающих иммобилизацию избыточного количества ионов кадмия в подземных органах растений, способствуя тем самым их адаптации к повышенным концентрациям этого металла в корнеобитаемой зоне.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare* L., возраст, кадмий, накопление, распределение.

Yu. V. Batova, A. F. Titov, N. M. Kaznina, G. F. Laidinen. CADMIUM ACCUMULATION AND DISTRIBUTION IN BARLEY PLANTS DEPENDING ON THEIR AGE

Cadmium uptake and distribution in spring barley (*Hordeum vulgare* L.) plants were studied in relation to their age. After 4 days of treatment with a solution with 100 μM cadmium the metal content in organs of 7-, 14- and 21- day-old plants was notably different. The concentration of cadmium in roots and stems increased with plant age, whereas in leaves it either did not change or even decreased somewhat. Furthermore, the proportion of cadmium transported from roots to shoots decreased in older plants, which testifies their barrier function strengthened. Although cadmium supply to barley plants increased considerably with age no significant distinctions were revealed in the response of the plants to the metal. It is supposed that age-related changes in plant cells and tissues, which accelerated cadmium uptake from the solution, go along with more effective operation of the mechanisms facilitating immobilization of excess quantities of cadmium ions in underground organs, thus promoting plant adaptation.

Key words: *Hordeum vulgare* L., age, cadmium, accumulation, distribution.

Введение

Кадмий является одним из наиболее токсичных металлов для всех живых организмов, включая растения [Wagner, 1993]. В отличие от ряда других тяжелых металлов он не относится к числу необходимых для жизнедеятельности растений элементов, но они достаточно активно поглощают и аккумулируют его в различных органах [Verkleij et al., 2009]. Накопление кадмия в клетках и тканях приводит к многочисленным структурно-функциональным нарушениям, оказывает отрицательное влияние на многие физиологические процессы, что ведет не только к снижению продуктивности растений, но в отдельных случаях даже к их гибели [Prasad, 1995; Sanità di Toppi, Gabbrielli, 1999; Серегин, Иванов, 2001; Clemens, 2006; Титов и др., 2007; Wahid et al., 2009].

К настоящему времени установлено, что поступление ионов кадмия в растения осуществляется с помощью ионтранспортных систем (транспортных белков, ионных каналов), обеспечивающих поглощение необходимых растений элементов, таких как железо, цинк, кальций и др. [Hall, Williams, 2003; Clemens, 2006; Krämer et al., 2007]. Показано также, что скорость накопления, а также характер распределения этого металла по органам растений зависят от условий выращивания и биологических особенностей вида (сорта) [Baker, Walker, 1990; Ильин, 1991; Wagner, 1993; Башмаков, Лукаткин, 2009; Hassan, Aarts, 2011 и др.]. Кроме того, некоторые авторы отмечают, что способность растений аккумулировать кадмий изменяется в ходе онтогенеза [Prasad, 1995; Sanità di Toppi, Gabbrielli, 1999; Regvar, Vogel-Mikuš, 2008]. Однако экспериментальных данных, однозначно подтверждающих это, в литературе пока недостаточно.

В связи с этим основная цель нашего исследования состояла в изучении накопления кадмия и его распределения по органам у растений ячменя в зависимости от их возраста.

Материал и методы

Для проведения эксперимента растения ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Зазерский 85 выращивали в течение 7 дней в вегетационных условиях в сосудах с песком до достижения ими фазы всходов, фазы 2-х листьев (14 дней) или фазы 3-х листьев (21 день). Затем растения переносили в лабораторные условия и выращивали в пластиковых контейнерах объемом 2 литр на половинном питательном растворе Кнопа при температуре воз-

духа 20–22 °С, освещенности 10 клк и фотопериоде 14 ч. В опытных вариантах к питательному раствору добавляли 100 мкМ кадмия в форме сульфата.

Анализ растений проводили на 4-е сутки от начала экспозиции. О влиянии кадмия на растения судили по изменению накопления сырой биомассы надземных и подземных органов. Содержание металла определяли в корнях, стеблях (укороченный стебель и влагалища листьев) и листовых пластинках. Разложение растительных образцов осуществляли в смеси HNO_3 и H_2O_2 в соотношении 4 : 1 с использованием микроволновой системы пробоподготовки MC-6 (Вольта, Россия). Определение содержания кадмия проводили методом инверсионной вольтамперометрии на полярографе ABC-1.1 (Вольта, Россия).

Биологическая повторность при анализе биомассы органов составляла 20 растений. Определение содержания кадмия проводили в 2-кратной биологической и 3–5-кратной аналитической повторностях.

Результаты и обсуждение

Проведенные опыты показали, что реакция растений разного возраста на воздействие кадмия оказалась однотипной. В присутствии металла у них снижалась (по отношению к контролю) сырая биомасса побега, причем примерно в равной степени у разновозрастных растений, тогда как биомасса корней оставалась на уровне контроля (табл. 1). Такую же ответную реакцию ячменя на кадмий наблюдали и другие авторы при использовании аналогичной [Puertas-Mejía et al., 2010] или более высокой концентрации (500 мкМ) этого металла [Demirevska-Kerova et al., 2006]. Отсутствие влияния кадмия на биомассу корней в нашем опыте, возможно, объясняется сравнительно короткой экспозицией, в течение которой у растений, уже имевших к началу эксперимента достаточно хорошо развитую корневую систему, существенного изменения биомассы корней не происходило.

Химический анализ растений контрольного варианта показал, что содержание кадмия в корнях составляет 0,23–0,29 мкг/г сырой массы, тогда как в надземных частях растений он обнаружен не был.

У опытных растений после экспозиции на растворе с кадмием содержание металла в корнях значительно превышало его уровень в стеблях и листовых пластинках (табл. 2), что является типичным для видов, относящихся к группе исключателей [Grant et al., 1998; Wójcick,

Таблица 1. Влияние 4-суточной экспозиции растений ячменя разного возраста на растворе с кадмием (100 мкМ) на накопление биомассы надземных и подземных органов

Возраст растений	Сырая биомасса побега, мг		Сырая биомасса корня, мг	
	контроль	опыт	контроль	опыт
7-дневные + 4 сут экспозиции с кадмием	167,8 ± 4,5	134,9 ± 4,8* (80)	154,7 ± 13,2	141,9 ± 7,5 (92)
14-дневные + 4 сут экспозиции с кадмием	254,9 ± 16,1	182,9 ± 4,0* (72)	268,9 ± 24,4	246,5 ± 16,7 (92)
21-дневные + 4 сут экспозиции с кадмием	393,5 ± 15,7	325,8 ± 12,8* (83)	273,0 ± 21,8	325,1 ± 24,6 (119)

Примечание. * – различия между контролем и опытом достоверны при $P < 0,05$; в скобках – % от контроля.

Таблица 2. Содержание кадмия в органах растений ячменя разного возраста после 4-суточной экспозиции на растворе с кадмием (100 мкМ)

Возраст растений	Содержание кадмия, мкг/г сырой массы				
	корни	стебли	1-й лист	2-й лист	3-й лист
7-дневные + 4 сут экспозиции с кадмием	16,19 ± 0,48	3,41 ± 0,09	3,02 ± 0,12	–	–
14-дневные + 4 сут экспозиции с кадмием	23,89 ± 0,46*	6,02 ± 0,10*	0,66 ± 0,01*	1,73 ± 0,08	–
21-дневные + 4 сут экспозиции с кадмием	42,80 ± 1,41*	7,59 ± 0,16*	1,22 ± 0,05*	0,70 ± 0,03*	1,45 ± 0,03

Примечание. * – различия между вариантами опыта достоверны при $P < 0,05$; прочерк – отсутствие данного листа.

Tukiendorf, 1999; Vassilev, 2002], и рассматривается как один из основных механизмов их металлоустойчивости [Baker, 1981; Серегин, Иванов, 2001; Wahid et al., 2009]. Обнаружено также, что содержание кадмия в корнях разновозрастных растений заметно различается. Так, у 21-дневных растений после 4-суточного воздействия металла оно было в 1,8 раза выше, чем у 14-дневных растений, и в 2,6 раза выше, чем у 7-дневных. Подобные различия отмечали ранее и другие исследователи, изучавшие накопление кадмия у ячменя [Smýkalová, Zámešpíková, 2003] и поглощение цинка у кукурузы [Рудакова и др., 1987].

В результате анализа надземных органов растений было выявлено, что с увеличением возраста содержание кадмия в стебле, так же как и в корнях, возрастало, а в листовых пластинках не изменялось или даже несколько снижалось (табл. 2).

Оценка накопления кадмия в органах показала, что 21-дневные растения аккумулируют за время экспозиции в 2,4 раза больше кадмия, чем 14-дневные, и в 5,6 раза больше, чем 7-дневные. При этом с увеличением возраста растений количество металла в корнях и стеблях значительно возрастает, общее же количество кадмия, поступившего в листья, остается неизменным, несмотря на увеличение их числа (рис. 1).

Обнаруженные нами возрастные различия в накоплении металла растениями ячменя свидетельствуют об увеличении с возрастом поглотительной способности корневой системы. Действительно, известно, что скорость поглощения растениями элементов минерального питания может изменяться в зависимости от фазы их развития [Кларксон, 1978; Рудакова и др., 1987]. У однолетних злаков поступление в органы основных питательных

элементов наиболее активно происходит в первые недели вегетации [Петербургский, 1971; Полевой, 1989]. Этому способствуют структурно-функциональные изменения, происходящие в корневой системе. В частности, в этот период наблюдается значительное увеличение поглощающей поверхности корней [Berkelaar, Hale, 2000; Chaney et al., 2007], возрастает катионообменная способность клеточных оболочек [Mane et al., 1970; Мейчик, 2007], усиливается гидравлическая проводимость [Кузнецов, Дмитриева, 2006], изменяется интенсивность работы ионтранспортных систем [Кларксон, 1978; Полевой, 1989; Marschner, 1995]. Поскольку поступление токсичных ионов в корни осуществляется с помощью тех же механизмов, что и ионов, необходимых для жизнедеятельности растений [Clemens, 2006], отмеченные выше возрастные изменения корневой системы могут способствовать и усилению поглощения кадмия более взрослыми растениями ячменя.

С увеличением возраста растений и усилением поглощения кадмия корнями возрастало и количество металла, поступившего в стебель, при этом в листьях оно оставалось низким (рис. 1), что, очевидно, связано со скоростью и особенностями передвижения ионов металла по органам. Например, в опытах с растениями риса было обнаружено, что ионы кадмия достаточно быстро (через 1 час от начала воздействия) проникают в основание стебля, в то время как их перемещение в листовые пластинки в значительной степени затруднено из-за наличия на поверхности клеточных стенок сосудов ксилемы большого количества отрицательно заряженных групп, способных связывать и задерживать катионы, находящиеся в ксилемном соке [Fujimaki et al., 2010].

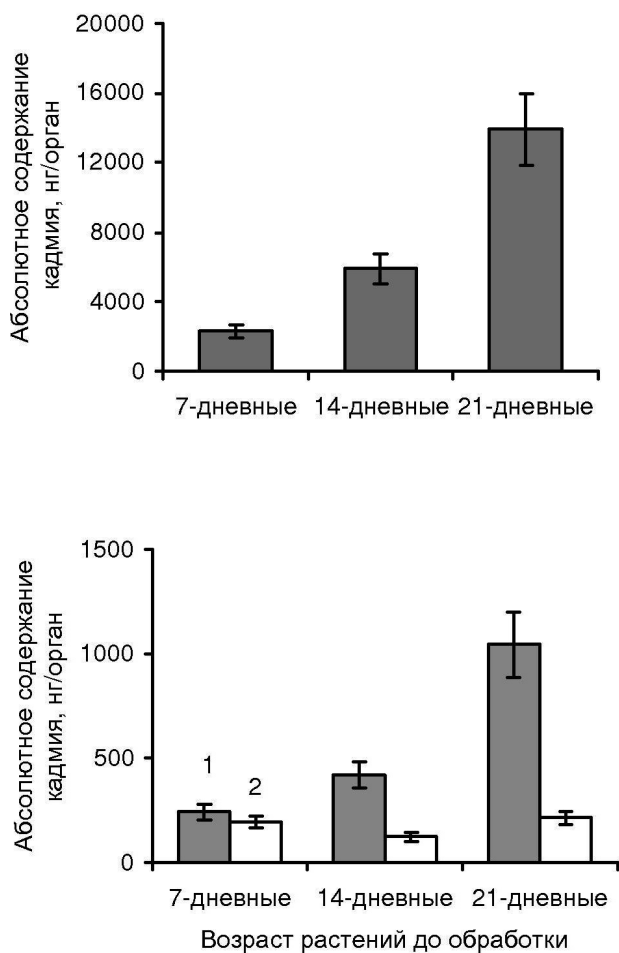


Рис. 1. Накопление кадмия в подземных (А) и надземных (Б) органах у растений ячменя разного возраста:

1 – стебли, 2 – листья

Анализ распределения кадмия по органам растений ячменя показал, что несмотря на некоторое возрастание количества металла в побегах у 14- и 21-дневных растений по сравнению с 7-дневными, относительная доля металла, поступившего в надземные органы у более взрослых растений, заметно снижается (рис. 2), что свидетельствует об усилении барьерной функции корневой системы. Сходные изменения в распределении кадмия с увеличением возраста растений наблюдали у *Vigna radiata* [Šimonová et al., 2007]. Как известно, у растений, относящихся к группе исключателей, металлоустойчивость зависит от эффективности работы механизмов, обеспечивающих иммобилизацию ионов металлов в корнях, что позволяет защитить от их негативного действия надземные органы. К числу таких механизмов относят связывание ионов в апопласте клеток корня, хелатирование в цитоплазме и компартментацию в вакуоли [Clemens, 2001; Verbruggen et al., 2009; Verkleij et al., 2009; Lux

et al., 2011]. Кроме того, поступление ионов металлов в надземные органы может регулироваться на этапе загрузки в ксилему путем изменения активности транспортных белков [Clemens, 2006; Van der Vliet et al., 2007; Verbruggen et al., 2009]. Высказано также предположение, что уменьшение содержания кадмия в надземных органах может достигаться путем их перемещения по флоэме из побегов обратно в корни [Van Belleghem et al., 2007]. Однако в литературе практически отсутствуют сведения, позволяющие сравнить эффективность работы этих механизмов у растений разного возраста. Можно лишь предположить, что увеличению иммобилизации ионов кадмия в корнях могут способствовать такие возрастные изменения, как усиление суберинизации клеточных стенок эндодермы и экзодермы [Schreiber et al., 1999; Hose et al., 2001], а также увеличение «емкости апопласта» клеток коры корня – основной ткани, накапливающей ионы кадмия, у растений группы исключателей [Серегин, 2009].

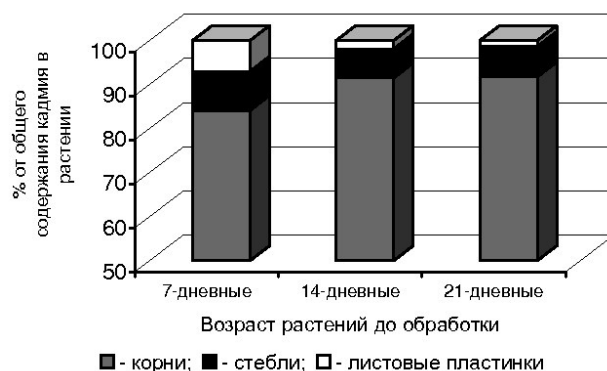


Рис. 2. Распределение кадмия по органам у растений ячменя разного возраста

Не исключено также, что существуют определенные возрастные различия и в эффективности работы механизмов, обеспечивающих связывание ионов металла внутри клеток корня. Например, недавно нами получены данные, показывающие, что у более взрослых растений ячменя содержание фитохелатинов (пептидов, участвующих в связывании ионов тяжелых металлов в цитоплазме) в клетках корня после экспозиции на растворе с кадмием увеличивается в большей степени, чем у более молодых [Казнина и др., в печати]. Последнее указывает на возможное участие данного механизма в усилении барьерной функции корней с увеличением возраста растений.

О более высокой эффективности функционирования механизмов детоксикации ионов металла в корнях у более взрослых растений

говорит и тот факт, что несмотря на значительное усиление поступления кадмия в растения ячменя с увеличением их возраста, существенных различий в ответной реакции на действие металла обнаружено не было. Однако для выявления конкретных причин возрастных различий в накоплении и иммобилизации кадмия в корнях у ячменя необходимы специальные исследования.

Заключение

В целом результаты нашего исследования показали, что реакция разновозрастных растений на действие кадмия была однотипной, хотя содержание металла в органах существенно различалось. В частности, с увеличением возраста растений содержание кадмия в корнях и стеблях у ячменя заметно возрастало, в то время как в листьях не изменялось или даже несколько снижалось. Кроме того, у более взрослых растений отмечено уменьшение доли кадмия, поступающего из корневой системы в побеги. Вероятно, возрастные изменения в клетках и тканях корней, приводящие к усилению их поглотительной способности, сопровождаются увеличением эффективности работы механизмов, обеспечивающих иммобилизацию избыточного количества ионов металла в подземных органах. Это позволяет защитить надземные органы и, прежде всего, листья от негативного воздействия кадмия, способствуя тем самым адаптации растений к повышенным концентрациям металла в корнеобитаемой среде.

Литература

- Башмаков Д. И., Лукаткин А. С. Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжелых металлов у высших растений. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. 236 с.
- Ильин В. Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. Новосибирск: Наука, 1991. 150 с.
- Казнина Н. М., Титов А. Ф., Топчиева Л. В. и др. Влияние возрастных различий на реакцию растений ячменя на действие кадмия // в печати.
- Кларксон Д. Транспорт ионов и структура растительной клетки. М.: Мир. 1978. 368 с.
- Кузнецов Вл. В., Дмитриева Г. А. Физиология растений. Изд. 2-е. М.: Высшая школа, 2006. 742 с.
- Мейчик Н. Р. Ионный обмен и диффузия в клеточных стенках растений: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 2007. 48 с.
- Петербургский А. В. Агрехимия и физиология питания растений. М.: Россельхозиздат, 1971. 334 с.
- Полевой В. В. Физиология растений. М.: Высшая школа, 1989. 464 с.
- Рудакова Э. В., Каракис К. Д., Сидоршина Т. Н. Микроэлементы: поступление, транспорт и физиологические функции в растениях / Ред. Л. К. Островская. Киев: Наукова думка, 1987. 184 с.
- Серегин И. В. Распределение тяжелых металлов в растениях и их действие на рост: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 2009. 53 с.
- Серегин И. В., Иванов В. Б. Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48, № 4. С. 606–630.
- Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М., Лайдинен Г. Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. 170 с.
- Baker A. J. M. Accumulators and excluders strategies in the response of plants to heavy metals // Journal of Plant Nutrition. 1981. Vol. 3, N 1/4. P. 643–654.
- Baker A. J. M., Walker P. M. Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants // Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects. Boca Raton: CRC Press, Fl. 1990. P. 155–177.
- Berkelaar E., Hale B. The relationship between root morphology and cadmium accumulation in seedlings of two durum wheat cultivars // Canadian Journal of Botany. 2000. Vol. 78. P. 381–387.
- Chaney R. L., Angle J. S., Broadhurst C. L. et al. Improved understanding of hyperaccumulation yields commercial phytoextraction and phytomining technologies // Journal of Environmental Quality. 2007. Vol. 36. P. 1429–1443.
- Clemens S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis // Planta. 2001. Vol. 212. P. 475–486.
- Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants // Biochimie. 2006. Vol. 88. P. 1707–1719.
- Demirevska-Kepova K., Simova-Stoilova L., Petrova Stoyanova Z., Feller U. Cadmium stress in barley: growth, leaf pigment and protein composition and detoxification of reactive oxygen species // Journal of Plant Nutrition. 2006. Vol. 29. P. 451–468.
- Fujimaki S., Suzui N., Ishioka N. S. et al. Traising cadmium from culture to spiklet: noninvasive and quantitative characterization of absorption, transport and accumulation of cadmium in an intact rice plant // Plant Physiology. 2010. Vol. 152. P. 1796–1806.
- Grant C. A., Buckley W. T., Bailey L. D., Selles F. Cadmium accumulation in crops // Canadian Journal of Plant Science. 1998. Vol. 78. P. 1–17.
- Hall J. L., Williams L. E. Transition metal transporters in plants // Journal of Experimental Botany. 2003. Vol. 54, N 393. P. 2601–2613.
- Hassan Z., Aarts M. G. M. Opportunities and feasibilities for biotechnological improvement of Zn, Cd, or Ni tolerance and accumulation in plants // Environ. Exp. Bot. 2011. Vol. 72. P. 53–63.
- Hose E., Clarkson D. T., Steudle L., Hartung W. The exodermis: a variable apoplastic barrier // Journal of Experimental Botany. 2001. Vol. 52. P. 2245–2264.
- Krämer U., Talke I. N., Hanikene M. Transition metal transport // FEBS Letters. 2007. Vol. 581. P. 2263–2272.

Lux A., Martinka M., Vaculik M., White P. J. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review // *Journal of Experimental Botany*. 2011. Vol. 62. P. 21–37.

Mane V. B., Savant N. K., Shingte A. K. Relationship between cation exchange capacity of roots and mineral composition of plants tops as influenced by age // *Plant and Soil*. 1970. Vol. 33. P. 113–119.

Marschner H. Mineral nutrition of higher plants. London: Academic Press, 1995. 674 p.

Prasad M. N. V. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants // *Environ. Exp. Bot.* 1995. Vol. 35. P. 525–545.

Puertas-Mejía M. A., Ruiz-Díez B., Fernández-Pascual M. Effect of cadmium ion excess over cell structure and functioning of *Zea mays* and *Hordeum vulgare* // *Biochemical Systematics and Ecology*. 2010. Vol. 38. P. 285–291.

Regvar M., Vogel-Mikuš K. Recent advances in understanding of plant responses to excess metals: exposure, accumulation and tolerance // *Sulfur assimilation and abiotic stress in plants* / Ed. N. A. Khan. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. P. 227–251.

Sanità di Toppi L., Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants // *Environ. Exp. Bot.* 1999. Vol. 41. P. 105–130.

Schreiber L., Hartmann K., Skrabs M., Zeier J. Apoplastic barriers in roots: chemical composition of endodermal and hypodermal cell walls // *Journal of Experimental Botany*. 1999. Vol. 50. P. 1267–1280.

Šimonová E., Henselová M., Masarovičová E., Kohanová J. Comparison of tolerance of *Brassica juncea* and *Vigna radiata* to cadmium // *Biologia Plantarum*. 2007. Vol. 51. P. 488–492.

Smýkalová I., Zámečnicková B. The relationship between salinity and cadmium stress in barley // *Biologia Plantarum*. 2003. Vol. 46, N 2. P. 269–273.

Van Belleghem F., Cuypers A., Semane B. et al. Subcellular localization of cadmium in roots and leaves of *Arabidopsis thaliana* // *New Phytologist*. 2007. Vol. 173. P. 495–508.

Van der Vliet L., Peterson C., Hale B. Cd accumulation in roots and shoots of durum wheat: the roles of transpiration rate and apoplastic bypass // *Journal of Experimental Botany*. 2007. Vol. 58. P. 2939–2947.

Vassilev A. Physiological and agroecological aspects of cadmium interactions with barley plants: an overview // *Journal of Central European Agriculture*. 2002. Vol. 4, N 1. P. 65–74.

Verbruggen N., Hermans C., Schat H. Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants // *Current Opinion in Plant Biology*. 2009. Vol. 12. P. 364–372.

Verkleij J. A. C., Golan-Goldhirsh A., Antosiewicz D. M. et al. Dualities in plant tolerance to pollutants and their uptake and translocation to upper plant parts // *Environ. Exp. Bot.* 2009. Vol. 67. P. 10–22.

Wahid A., Arshad M., Farooq M. Cadmium phytotoxicity: responses, mechanisms and mitigation strategies // *Organic farming, pest control and remediation of soil pollutants* / Ed. E. Lichtfouse. Springer Science+Business Media B.V. 2009. P. 371–403.

Wagner G. J. Accumulation of cadmium in crop plants and consequences to human health // *Advances in Agronomy*. 1993. Vol. 51. P. 173–212.

Wyjck M., Tukiendorf A. Cd-tolerance of maize, rye and wheat seedlings // *Acta Physiologia Plantarum*. 1999. Vol. 21, N 2. P. 99–107.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Батова Юлия Валерьевна

научный сотрудник, к. б. н.
Институт биологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: batova@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 762706

Титов Александр Федорович

председатель КарНЦ РАН, чл.-корр. РАН, д. б. н.
Институт биологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: krcras@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 769710

Казнина Наталья Мстиславовна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт биологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: kaznina@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 762706

Лайдинен Галина Федоровна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт биологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: laidinen@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 762706

Batova, Yulia

Institute of Biology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: batova@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 762706

Titov, Alexandr

Institute of Biology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: krcras@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 769710

Kaznina, Natalia

Institute of Biology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: kaznina@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 762706

Laidinen, Galina

Institute of Biology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: laidinen@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 762706