

УДК 581.1

СОДЕРЖАНИЕ НЕПРОТЕИНОВЫХ ТИОЛОВ В КЛЕТКАХ КОРНЯ ДИКОРАСТУЩИХ МНОГОЛЕТНИХ ЗЛАКОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ КАДМИЯ И СВИНЦА

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

Институт биологии Карельского научного центра РАН

В условиях вегетационного опыта изучено влияние кадмия (40 мг/кг субстрата) и свинца (400 мг/кг субстрата) на содержание непротеиновых тиолов в клетках корня дикорастущих многолетних злаков – тимофеевки луговой (*Phleum pratense* L.) и пырея ползучего (*Elytrigia repens* L. (Nevski)). Растения выращивали в течение 40 дней в присутствии тяжелых металлов, что приводило к значительному увеличению содержания фитохелатинов в клетках корня обоих видов, особенно выраженное при действии кадмия. В отношении восстановленного глутатиона (GSH) отмечены заметные межвидовые различия: у тимофеевки содержание GSH сильнее возрастало в присутствии кадмия, а у пырея – в присутствии свинца. Указанные различия корреспондировались с устойчивостью вида к изученным металлам. Кроме того, многолетние злаки оказались способными накапливать значительные количества тяжелых металлов в корнях, причем если тимофеевка в большей степени аккумулировала кадмий, то пырей – свинец. На основании полученных результатов сделан вывод о возможности использования тимофеевки луговой для фиторемедиации почв, загрязненных кадмием, а пырея – загрязненных свинцом.

К л ю ч е в ы е с л о в а: *Phleum pratense* L., *Elytrigia repens* L. (Nevski), восстановленный глутатион, фитохелатины, кадмий, свинец.

N. M. Kaznina, A. F. Titov, Yu. V. Batova. THE CONTENT OF NON-PROTEIN THIOLS IN ROOT CELLS OF WILD PERENNIAL GRASSES (*PHLEUM PRATENSE* L. AND *ELYTRIGIA REPENS* L.) TREATED WITH CADMIUM AND LEAD

The effect of cadmium (40 mg/kg of substratum) and lead (400 mg/kg of substratum) on the content of non-protein thiols in the root cells of wild perennial grasses – timothy (*Phleum pratense* L.) and couch grass (*Elytrigia repens* L. (Nevski)) was studied in a greenhouse experiment. The plants were grown for 40 days in the presence of heavy metals, resulting in a significant increase in phytochelatins content in the root cells of both species, especially under the influence of cadmium. In regard to reduced glutathione (GSH), the following differences between the species were observed: GSH content in timothy increased at a faster rate in the presence of cadmium, while in couch grass – in the presence of lead. These differences corresponded to the resistance of the plant species to the heavy metals. In addition, perennial grasses appeared to be capable of accumulating significant amounts of heavy metals in the roots. Thus, timothy largely accumulated cadmium, while couch grass accumulated lead. Based on the obtained results, a conclusion about the possibility of using timothy for phytoremediation of soils contaminated with cadmium, and couch grass for those contaminated with lead, was drawn.

Введение

Значительные масштабы загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами вызвали во второй половине XX века резкое усиление интереса исследователей к вопросу об их влиянии на живые организмы, включая растения. При этом в последние годы наибольшее внимание уделяется изучению механизмов металлоустойчивости, действующих на клеточном, субклеточном и молекулярном уровнях организации, понимание которых на сегодняшний день заметно расширилось и углубилось [Meharg, 2005; Clemens et al., 2006; Gallego et al., 2012]. Вместе с тем необходимо констатировать, что в основном такого рода исследования проводятся с использованием весьма ограниченного набора видов, принадлежащих главным образом к семействам *Brassicaceae* и *Fabaceae*. Растения из семейства *Poaceae*, особенно дикорастущие виды, в этом отношении почти не изучены, хотя некоторые из них отличаются высокой металлоустойчивостью и успешно произрастают на территориях со значительным загрязнением почвы тяжелыми металлами [Безель, Жуйкова, 2007; Лайдинен и др., 2011]. Поэтому изучение механизмов, обеспечивающих устойчивость растений этих видов к высоким концентрациям тяжелых металлов в окружающей среде, представляет не только значительный научный, но и практический интерес в связи с перспективой их возможного использования для фиторемедиации почв.

Учитывая это, целью данной работы явилось изучение влияния кадмия и свинца, которые относятся к числу наиболее распространенных и высокотоксичных тяжелых металлов, на содержание непротеиновых тиолов (глутатиона и фитохелатинов) у дикорастущих многолетних злаков – тимофеевки луговой (*Phleum pratense* L.) и пырея ползучего (*Elytrigia repens* L. (Nevski)).

Материалы и методы

Семена злаков проращивали в чашках Петри при температуре воздуха 22 °C в течение 7 дней, после чего высаживали в сосуды с песком объемом 1 дм³. В опытных вариантах в сосуды добавляли кадмий в концентрации 40 мг/кг субстрата или свинец в концентрации 400 мг/кг субстрата. Используемые концентрации металлов вызывали (как это было выявлено в предварительных опы-

тах) 30%-е ингибирование роста корня. Полив растений осуществляли питательным раствором с добавлением микроэлементов. Опыт проводили в вегетационных условиях. Спустя 40 дней в корнях растений определяли концентрацию восстановленного глутатиона (GSH) и фитохелатинов, а также содержание тяжелых металлов, оценивали их влияние на накопление биомассы растениями и рассчитывали индекс устойчивости.

Количество GSH и фитохелатинов определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. После замораживания образцов корней в жидком азоте проводили экстракцию GSH и фитохелатинов с использованием смеси ледяной 6,3 мМ диэтилтриаминпентауксусной кислоты (ДТПА, «Sigma») и 0,1%-й трифторуксусной кислоты («Merck»). Гомогенат центрифугировали при 10 000 об./мин и 4 °C. Полученные экстракты подвергали предколонной дериватизации с монобромбиманом (mBBBr, «Sigma»). Разделение GSH и фитохелатинов проводили в аналитической колонке Phenomenex Luna 5u C18 при температуре колонки 37 °C и скорости потока 1,0 мл/мин. согласно методике Снеллер с соавт. [Sneller et al., 2000]. Количество непротеиновых тиолов определяли по стандарту GSH («Sigma»). Расчет площадей пиков осуществляли с помощью компьютерной программы Мульти-Хром (Версия 1,5X).

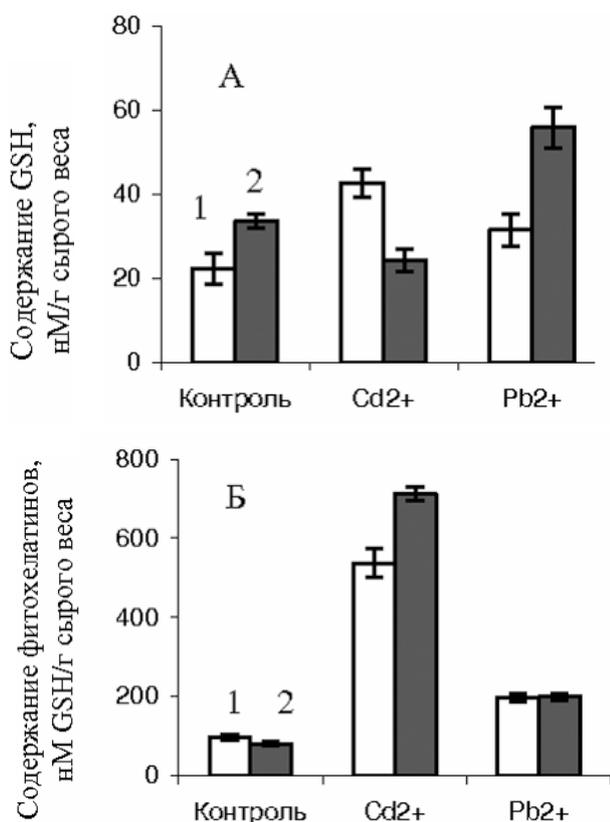
Содержание кадмия в корнях и листьях растений определяли методом инверсионной вольтамперометрии с использованием полярографа ABC-1.1 («Вольта», Россия). Разложение растительных образцов проводили в смеси HNO₃ и H₂O₂ в соотношении 4:1 с использованием микроволновой системы пробоподготовки MC-6 («Вольта», Россия). Индекс устойчивости (I_t) вычисляли по формуле: $I_t = I_{Me}/I_k$, где I_{Me} – биомасса растений опытного варианта; I_k – биомасса растений контрольного варианта.

Биологическая повторность в пределах каждого варианта опыта составляла для разных измерений от 6 до 20 растений. Аналитическая повторность при проведении химических анализов 3–5-кратная. Весь опыт повторяли дважды. В таблице и на рисунке представлены средние значения по двум опытам и их стандартные ошибки. Достоверность различий оценивали с помощью критерия Стьюдента при $p < 0,05$.

Исследования проведены с использованием научного оборудования ЦКП ИБ КарНЦ РАН.

Результаты

Результаты проведенного исследования показали, что изученные виды злаков способны расти и развиваться в течение длительного времени в присутствии высоких концентраций кадмия и свинца в субстрате. При этом содержание непротеиновых тиолов в клетках корня изменяется (по отношению к контролю) у них в зависимости как от видовой принадлежности, так и от действующего на них металла. В частности, под влиянием кадмия у тимофеевки наблюдалось значительное (в 2 раза) увеличение количества GSH, тогда как у пырея – некоторое его снижение (рис.). Под действием свинца уровень GSH возрастал у обоих видов злаков, но в большей степени (почти в 2 раза) – у пырея. В отличие от этого, содержание фитохелатинов в корнях растений в присутствии свинца повышалось у обоих видов почти в 2 раза. При действии кадмия отмечено еще более резкое увеличение их количества: у тимофеевки – в 6 раз, а у пырея – в 9 раз.



Влияние тяжелых металлов на содержание восстановленного глутатиона (А) и фитохелатинов (Б) в клетках корня растений тимофеевки луговой (1) и пырея ползучего (2)

Учитывая, что уровень непротеиновых тиолов в клетке в присутствии тяжелых металлов во многом зависит от количества токсичных

ионов в органах растений [Maier et al., 2003; Tausz et al., 2004; Gard, Kaur, 2013], нами проведен анализ содержания кадмия и свинца в корнях растений (табл.). Он показал, что оба вида злаков способны накапливать значительные количества тяжелых металлов. Однако если у тимофеевки содержание кадмия было выше, чем у пырея, то пырей в большей степени аккумулировал свинец (его концентрация почти в 2 раза превышала концентрацию в корнях тимофеевки). Важно также отметить, что тимофеевка при этом оказалась более устойчивой к кадмию ($I_t = 0,72$), тогда как пырей гораздо более устойчив к свинцу ($I_t = 1,19$).

Содержание (мг/г сырого веса) тяжелых металлов в корнях тимофеевки луговой и пырея ползучего после 40 дней выращивания на субстратах, содержащих Cd²⁺ (40 мг/кг) или Pb²⁺ (400 мг/кг) и индекс металлоустойчивости растений (I_t)

Вид	Cd ²⁺		Pb ²⁺	
	содержание металла	I_t	содержание металла	I_t
Пырей ползучий	116,2 ± 5,0	0,56	173,9 ± 4,5	1,19
Тимофеевка луговая	128,3 ± 14,8	0,72	95,4 ± 15,5	0,86

Примечание. Содержание Cd²⁺ у растений контрольного варианта составляло 0,2–0,4 мг/г сырого веса; Pb²⁺ – 0,5–0,6 мг/г сырого веса.

Обсуждение

Способность некоторых видов дикорастущих растений накапливать в корнях большое количество тяжелых металлов и при этом демонстрировать высокую металлоустойчивость, отмечена в целом ряде исследований. Например, растения *Alyssum montanum* с высоким содержанием никеля в корнях [Kramer et al., 1996], *Setaria viridis* – с избыточными концентрациями цинка [Казнина и др., 2009] и *Vasopa monnieri* с повышенным уровнем кадмия [Mishra et al., 2006] характеризовались и высокой устойчивостью к этим металлам. Считается, что металлоустойчивость растений обеспечивается прежде всего эффективной работой клеточных механизмов детоксикации, среди которых важную роль играет связывание токсичных ионов непротеиновыми тиолами – GSH и фитохелатинами [Mendoza-Cozalt, Moreno-Sanchez, 2006].

Доказано, что GSH выполняет в клетках растений несколько очень важных функций. Он является одним из наиболее эффективных низкомолекулярных антиоксидантов, участвует в регуляции внутриклеточного окислительно-восстановительного потенциала, клеточном сигналинге, является запасной и транспортной формой серы в клетке, а также предшественни-

ком фитохелатинов [Zhu et al., 1999; Pietrini et al., 2003; Noctor et al., 2011]. В ряде исследований обнаружено изменение уровня GSH в клетке при воздействии тяжелых металлов, хотя о его роли в качестве самостоятельного хелатора токсичных ионов стало известно относительно недавно [Maier et al., 2003; Tausz et al., 2004].

В наших опытах у растений тимopheевки содержание GSH в клетках корня заметно увеличивалось в присутствии кадмия, тогда как у пырея – в присутствии свинца, что коррелировалось с устойчивостью видов к этим металлам. Аналогичные данные были получены и другими авторами. Так, при действии кадмия более высокий уровень GSH был обнаружен у более устойчивых к металлу генотипов гороха посевного [Metwally et al., 2005], сортов ячменя [Радюк и др., 2007] и конских бобов [Ѓabala et al., 2011]. Предполагается, что восстановление пула глутатиона в клетках за счет активации его синтеза способствует повышению устойчивости растений к тяжелым металлам. Причем это связано не только с использованием его молекул на синтез фитохелатинов, но и с участием GSH в качестве основного антиоксиданта при окислительном стрессе, вызванном действием токсичных ионов [Mishra et al., 2006]. В свою очередь, неспособность растений поддерживать высокий уровень GSH приводит к усилению окислительного стресса и увеличению их чувствительности к тяжелым металлам [Mendoza-Cozalt, Moreno-Sanchez, 2006].

Хорошо известно, что в ответ на действие многих тяжелых металлов в клетках растений запускается синтез фитохелатинов, основная роль которых, как предполагается, заключается в связывании токсичных ионов в цитоплазме и транспорте образовавшихся комплексов в вакуоль [Sanita di Toppi, Gabrielli, 1999; Серегин, 2001; Schat et al., 2002; Mishra et al., 2006; Казнина и др., 2012 и др.]. При этом под влиянием кадмия, который является одним из наиболее сильных индукторов их синтеза [Rausser, 1999; Woojck, Tukendorf, 2005], количество фитохелатинов возрастает в гораздо большей степени, чем, например, в присутствии свинца. Это наблюдалось и нами, а ранее – в экспериментах с растениями кукурузы [Серегин и др., 2007] и ячменя [Радюк и др., 2007].

Заметные межвидовые различия в содержании фитохелатинов были также обнаружены лишь при действии кадмия: большее их количество синтезировалось в клетках корня пырея, по сравнению с тимopheевкой, несмотря на меньшую концентрацию металла в корнях и более низкую устойчивость к нему.

Об отсутствии прямой зависимости между уровнем фитохелатинов в клетках растений, с одной стороны, и их устойчивостью к тяжелым металлам, а также содержанием их ионов в органах, с другой, уже сообщалось ранее. Например, у трансгенных растений *Arabidopsis thaliana* [Lee et al., 2003] и табака [Wojas et al., 2008] с повышенным уровнем экспрессии гена фитохелатинсинтазы, несмотря на заметно более высокое количество фитохелатинов в корнях в присутствии кадмия, устойчивость к этому металлу оказалась гораздо ниже, чем у растений дикого типа. При одинаковом уровне фитохелатинов в клетках растений разных генотипов овса щетинистого их устойчивость к кадмию, а также содержание металла в органах оказались различными [Uraguchi et al., 2009]. У разных сортов пшеницы количество фитохелатинов в корнях не было связано с концентрацией кадмия в растениях и устойчивостью их к металлу [Stolt et al., 2003]. Полагают, что уменьшение устойчивости растений к тяжелым металлам при высоком уровне фитохелатинов в клетках скорее всего связано с нарушениями, происходящими на других этапах их детоксикации, например, со снижением активности белков, участвующих в транспорте комплексов металлов с непротеиновыми тиолами через тонопласт в вакуоль [Li et al., 2004]. Помимо этого различия в металлоустойчивости видов (сортов, генотипов) могут быть связаны не только с количеством синтезируемых молекул фитохелатинов, но и, возможно даже в большей степени, со скоростью их образования [Ebbs et al., 2002; Schat et al., 2002].

Заключение

Проведенные исследования показали, что растения тимopheевки луговой и пырея ползучего обладают способностью расти и развиваться в условиях повышенного содержания в почве кадмия и свинца и накапливать эти металлы в корнях в относительно больших количествах. При этом тимopheевка оказалась более устойчивой к кадмию, а пырей – к свинцу.

Из полученных данных следует, что в металлоустойчивости злаков важную роль играют непротеиновые тиолы; в присутствии кадмия и свинца у обоих изученных видов существенно увеличивается содержание фитохелатинов в клетках корня, особенно выраженное при действии кадмия. В отношении GSH отмечены заметные межвидовые различия, которые коррелируются с устойчивостью к изученным металлам: у тимopheевки содержание GSH сильнее возрастает в присутствии кадмия, а у пырея – в присутствии свинца.

На основании полученных результатов сделан вывод о возможности использования тимфеетки луговой для фиторемедиации почв, загрязненных кадмием, а пырея – загрязненных свинцом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН «Живая природа: современное состояние и проблемы развития».

Литература

- Безель В. С., Жуйкова Т. В. Химическое загрязнение среды: вынос химических элементов надземной фитомассой травянистой растительности // Экология. 2007. № 4. С. 259–267.
- Казнина Н. М., Титов А. Ф., Лайдинен Г. Ф., Таланов А. В. Устойчивость щетинника зеленого к повышенным концентрациям цинка // Известия РАН. Сер. биологическая. 2009. № 6. С. 677–684.
- Казнина Н. М., Титов А. Ф., Топчиева Л. В., Лайдинен Г. Ф., Батова Ю. В. Влияние возрастных различий на реакцию растений ячменя на действие кадмия // Физиология растений. 2012. Т. 59, № 1. С. 74–79.
- Лайдинен Г. Ф., Казнина Н. М., Батова Ю. В., Титов А. Ф. Состояние травянистой растительности в условиях промышленного загрязнения (на примере южной Карелии) // Растительные ресурсы. 2011. Т. 47, вып. 4. С. 50–60.
- Радюк М. С., Будакова Е. А., Шалыго Н. В. Влияние катионов Cd^{2+} и Pb^{2+} на общий пул тиолов в зеленых листьях ячменя // Вестник НАН Беларуси. Серия биологических наук. 2007. № 3. С. 61–65.
- Серегин И. В. Фитохелатины и их роль в детоксикации кадмия у высших растений // Успехи биол. химии. 2001. Т. 41. С. 283–300.
- Серегин И. В., Vooijs R., Кожевникова А. Д., Иванов В. Б. Влияние кадмия и свинца на накопление фитохелатинов в побегах и различных участках корня кукурузы // Докл. АН. 2007. Т. 215, № 4. С. 571–577.
- Čabala R., Slováková L., El Zohri M., Frank H. Accumulation and translocation of Cd metal and the Cd-induced production of glutathione and phytochelatin in *Vicia faba* L. // Acta Physiol. Plant. 2011. Vol. 33. P. 1239–1248.
- Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants // Biochemie. 2006. Vol. 88. P. 1707–1719.
- Ebbs S., Lau I., Ahner B., Kochian L. Phytochelatin synthesis is not responsible for tolerance in Zn/Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* // Planta. 2002. Vol. 214. P. 635–640.
- Gallego S. M., Pena L. B., Barcia R. A., Azpilicueta C. E., Iannone M. F., Rosales E. R., Zawoznic M. S., Groppa M. D., Benavides M. P. Unraveling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms // Env. Exp. Bot. 2012. Vol. 83. P. 33–46.
- Gard N., Kaur H. Response of antioxidant enzymes, phytochelatin and glutathione production towards Cd and Zn stresses in *Cajanus cajan* (L.) Millsp. Genotypes colonized by arbuscular mycorrhizal fungi // J. Agron. Crop Sci. 2013. Vol. 199. P. 118–133.
- Krämer U., Cotter-Howells J. D., Charnock J. M., Baker A. J. M., Smith J. A. C. Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel // Nature. 1996. Vol. 379. P. 635–638.
- Li Y., Dhankher O., Lee D., Chen A., Schroeder J., Balish R., Meagher R. Overexpression of phytochelatin synthase in Arabidopsis leads to enhanced arsenic tolerance and cadmium sensitivity // Plant Cell Physiol. 2004. Vol. 45. P. 1787–1797.
- Lee S., Moon J. S., Ko T. S., Petros D., Goldsbrough P. B., Korban S. S. Overexpression of Arabidopsis phytochelatin synthase paradoxically leads to hypersensitivity to cadmium stress // Plant Physiol. 2003. Vol. 131. P. 656–663.
- Maier E. A., Matthews R. D., McDowell J. A., Walden R. R., Ahner B. A. Environmental cadmium level increase phytochelatin and glutathione in lettuce grown in a chelator-buffered nutrient solution // J. Environ. Qual. 2003. Vol. 32. P. 1356–1364.
- Meharg A. A. Mechanisms of plant resistance to metal and metalloid ions and potential biotechnological applications // Plant Soil. 2005. Vol. 274. P. 163–174.
- Mendoza-Cozatl D. G., Moreno-Sanchez R. Control of glutathione and phytochelatin synthesis under cadmium stress. Pathway modeling for plants // J. Theoret. Biol. 2006. Vol. 238. I. 4. P. 919–936.
- Metwally A., Safronova V. I., Belimov A. A., Dietz K. J. Genotypic Variation of response to cadmium toxicity in *Pisum sativum* L. // J. Exp. Bot. 2005. Vol. 56. P. 1267–1279.
- Mishra S., Srivastava S., Tripathi R. D., Govindarajan R., Kuriakose S. V., Prasad M. N. V. Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Bacopa monnieri* L. // Plant Physiol. Biochem. 2006. Vol. 44. P. 25–37.
- Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione. In: Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi:10.1199/tab.0142.
- Pietrini F., Iannelli M. A., Pasqualini S., Massacci A. Interaction of cadmium with glutathione and photosynthesis in developing leaves and chloroplasts of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel // Plant Physiol. 2003. Vol. 133. P. 829–937.
- Rausser W. E. Structure and function of metal chelators produced by plants // Cell Biochem. Biophys. 1999. Vol. 31. P. 19–48.
- Sanita di Toppi L., Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants // Environ. Exp. Bot. 1999. Vol. 41. P. 105–130.
- Schat H., Llugany M., Vooijs R., Hartley-Whitaker J., Bleeker P. A. The role of phytochelatin in constitutive and adaptive heavy metal tolerances in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator metallophytes // J. Exp. Bot. 2002. Vol. 53, N 379. P. 2381–2392.
- Sneller F. E. S., van Heerwaarden L. M., Koevoets P. L. M., Vooijs R., Schat H., Verkleij A. C. Derivatization of phytochelatin from *Silene vulgaris*, induced upon exposure to arsenate and cadmium: comparison of derivatization with Ellman's Reagent and Monobromobimane // J. Agric. Food Chem. 2000. Vol. 48. P. 4014–4019.

Stolt J. P., Sneller F. E. C., Bryngelsson T., Lundborg T., Schat H. Phytochelatin and cadmium accumulation in wheat // *Env. Exp. Bot.* 2003. Vol. 49. P. 21–28.

Tausz M., Sircelj H., Grill D. The glutathione system as a stress marker in plant ecophysiology: is a stress-response concept valid // *J. Exp. Bot.* 2004. Vol. 55. P. 1955–1962.

Uraguchi S., Mori S., Kuramata M. et al. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice // *J. Exp. Bot.* 2009. Vol. 60, N 9. P. 2677–2688.

Wojas S., Clemens St., Hennig J., Skłodowska A., Kopera E., Schat H., Bal W., Antosiewicz D. M. Overexpression of phytochelatin synthase in tobacco: distinctive effects of *AtPCS* and *CePCS* genes on plant response to cadmium // *J. Exp. Bot.* 2008. Vol. 59, N 8. P. 2205–2219.

Wójcik M., Tukiendorf A. Cadmium uptake, localization and detoxification in *Zea mays* // *Biol. Plant.* 2005. Vol. 49, N 2. P. 237–245.

Zhu Y. L., Pilon-Smits E. A. H., Tarun A. S., Jouanin L., Terry N. Overexpression of glutathione synthetase in Indian mustard enhances cadmium accumulation and tolerance // *Plant Physiol.* 1999. Vol. 119. P. 73–79.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

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

Титов Александр Федорович

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

Батова Юлия Валерьевна

старший 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

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

Titov, Alexandr

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

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