

3-бөлім
**ӨСІМДІКТЕР ФИЗИОЛОГИЯСЫ
ЖӘНЕ БИОХИМИЯСЫ**

Раздел 3
**ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ
РАСТЕНИЙ**

Section 3
**PLANTS PHYSIOLOGY
AND BIOCHEMISTRY**

Атабаева С.Д.,
Нурмаханова А.С.,
Кенжебаева Ш.К.,
Асрандина С.Ш.,
Кенжебаева С.С.,
Алыбаева Р.А.,
Нармуратова М.К.,
Тыныбеков Б.М.

Казахский национальный университет
аль-Фараби, Казахстана, г. Алматы

Растения риса в условиях загрязнения среды ионами кадмия

Atabayeva S.D.,
Nurmahanova A.S.,
Kenzhebayeva Sh.K.,
Asrandina S.Sh.,
Kenzhebayeva S.S.,
Alybayeva R.A.,
Narmuratova M.K.,
Tynybekov B.M.

Al-Farabi Kazakh National University,
Kazakhstan, Almaty

Rice plants in cadmium polluted environment

Атабаева С.Д.,
Нурмаханова А.С.,
Кенжебаева Ш.К.,
Асрандина С.Ш.,
Кенжебаева С.С.,
Алыбаева Р.А.,
Нармуратова М.К.,
Тыныбеков Б.М.

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық
университеті, Қазақстан, Алматы қ.

Кадмий ионымен ластанған ортада өсірілген күріш өсімдігі

Был проведен скрининг различных сортов риса на устойчивость к действию различных концентраций сульфата кадмия по ростовым параметрам. В качестве объектов исследования были взяты различные сорта риса (*Oryza sativa* L.): Чапсары, Баракат, Бақанас, Виолетта, Анаит, Фишт, Маржан, Мадина. Растения выращивали 7 дней в растворах 0, 50, 100, 200, 400 μM CdSO₄. Установлено, что с увеличением концентрации кадмия рост и накопление биомассы растений снижаются. По сравнению с надземными органами корни оказались наиболее чувствительными к действию ионов кадмия. По линейному росту корней ряд устойчивости может выглядеть таким образом: Баракат (23%) > Чапсары (18%) > Виолетта (17%) > Фишт (7%) > Анаит (7%) > Маржан (5%) > Бақанас (4%). Биомасса корней растений подавлялась в большей степени, чем надземных органов. По росту надземных органов наиболее устойчивыми к действию высоких концентраций кадмия (400 μM CdSO₄) оказались сорта Мадина, Бақанас, Виолетта, в то время как сорта Маржан, Анаит и Фишт оказались чувствительными.

Ключевые слова: рис, кадмий, рост, устойчивость, сорт, биомасса.

The screening of different rice varieties to the effect of cadmium on growth parameters was done. As objects of the study were taken rice varieties – Chapsari, Barakat, Bakanas, Violetta, Anayt, Fisht, Marzhan, Madina. Plants were grown 7 days in solutions containing various concentrations of cadmium (Cd SO₄). Plants were grown in 5 variants: control, 50 μM , 100 μM , 200 μM , 400 μM CdSO₄. It was revealed that with increasing concentrations of cadmium the plants growth and accumulation of biomass are reduced. The biomass of the plant roots is inhibited to a greater degree than the above-ground organs. It was studied the action of cadmium on biomass accumulation of above-ground organs of rice. As a result of studies on the biomass accumulation by above-ground organs the rice varieties are located in the following way: Madina (75%) > Bakanas (62%) > Barakat (15%) > Chapsari (13%) > Violetta (10%) > Marzhan (3%) = Anayt (3%) > Fisht (2%). As the growth of the aerial organs most resistant to high concentrations of cadmium (CdSO₄ 400 μM) were Madina, Violetta varieties, the least – Fisht, Marzhan. In comparison with the above-ground organs the roots were the most sensitive to the effects of cadmium. According to a linear growth rice varieties are located in the following order: Barakat (23%) > Chapsari (18%) > Violetta (17%) > Fisht (7%) > Anayt (3%) > Marjane (5%) > Bakanas (4%). It was studied the effect of cadmium on biomass accumulation by above-ground organs of rice. On the biomass accumulation by above-ground organs the rice varieties are located in the following way: Madina (75%) > Bakanas (62%) > Barakat (15%) > Chapsari (13%) > Violetta (10%) > Marzhan (3%) = Anayt (3%) > Fisht (2%).

Key words: rice, cadmium, growth, stability, variety, biomass.

Әсу көрсеткіші бойынша кадмий тұзы әсеріне төзімді күріштің әртүрлі сорттарына скрининг жүргізілді. Зерттеу жұмысын сапалы жүргізу үшін күріштің Чапсары, Бақанас, Виолетта, Анаит, Фишт, Маржан, Мадина әртүрлі сорттары алынды. Кадмийдің әртүрлі концентрациясынан дайындалған ерітіндіде 7 күн өсірілді: 0, 50, 100, 200, 400 μM CdSO₄. Кадмий концентрациясы жоғарылаған сайын, олардың өсуі мен биомасса жинақталуы тежелетіндігі анықталды. Тамырдың өсу деңгейі бойынша төзімді сорттарды келесі тізбек бойымен орналастырамыз: Баракат (23%) > Чапсары (18%) > Виолетта (17%) > Фишт (7%) > Анаит (7%) > Маржан (5%) > Бақанас (4%). Өсімдіктер тамырындағы биомасса жинақталуы жерүсті мүшелеріне қарағанда тежелгендігі байқалды. Кадмий тұзы иондарының әсерінен күріштің жерүсті мүшелеріндегі биомасса жинақталуы зерттелді. Жерүсті мүшелерімен салыстырғанда тамыр мүшесі кадмий иондарына төзімді екендігін көрсетті. Зерттеу нәтижесі бойынша алынған күріштің Мадина және Бақанас сорттары кадмий тұзы иондарының (400 μM CdSO₄) әсеріне төзімді екендігі, осы уақыттың ішінде күріштің Маржан, Анаит, Фишт сорттары сезімтал болып танылды.

Түйін сөздер: күріш, кадмий, өсу, төзімді, сорт, биомасса.

РАСТЕНИЯ РИСА В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ ИОНАМИ КАДМИЯ

Введение

Степень загрязнения Cd почвы, удобряемой фосфорными удобрениями, может достигать 300 мг/кг сухого веса [1-7]. При действии кадмия снижается урожайность, наблюдается нарушение физиологических и биохимических процессов – снижение пигментов [8], нарушение фотосинтеза, эффективности водопотребления, минерального питания, метаболизм сахаров [9-12].

Мочковатая корневая система, увеличивающая поглощающую поверхность Cd [13], хелатирующие агенты, такие как органические кислоты, ризосферные микроорганизмы и фитосидерофоры, способствуют поглощению ионов Cd [14].

Низкие коэффициенты диффузии Cd в водный раствор показывают, что поглощение Cd корнями зависит от транспирации, что указывает на важность управления водными ресурсами в контроле за Cd [15]. Применение удобрений увеличивало концентрацию Cd в растениях [16, 17]. С увеличением ионной силы сорбция Cd частицами почвы снижается [18].

Механизм взаимодействия тяжелых металлов (ТМ) и растительного организма чрезвычайно сложен, это взаимодействие схематично можно представить следующей схемой: тяжелые металлы → клеточные мембраны → клетка → орган → система органов → организм → экологическая система.

Поступление ТМ в клетку растения осуществляется путем проникновения их через клеточные мембраны. Мембраны клеток являются первичной мишенью действия ТМ. Изменение проницаемости мембран – одно из проявлений ответных реакций растений на внешнее воздействие, которое свидетельствует о структурной перестройке мембран, которая в значительной мере определяет потенциально возможные механизмы растений противостоят неблагоприятным факторам среды [19].

Проницаемость пограничных клеточных мембран является также одним из специфических механизмов, на котором основана устойчивость растений. Проницаемость плазмалеммы для электролитов – это интегральный показатель функционального состояния клеточных мембран растений [20]. В связи с этим изучение действия ТМ на свойства клеточных мембран, в частно-

сти, на ее проницаемость, является показателем оценки устойчивости растений.

Многие внутриклеточные механизмы детоксикации, как и процессы, ограничивающие поступление ТМ в растения, неспецифичны. Так, связанный с белками теплового шока, клеточный ответ не является узко специализированным – это генерализованная система, активирующая транскрипцию ряда генов, обеспечивающих выживание клетки в экстремальных условиях. Все организмы реагируют на стресс на клеточном уровне быстрым синтезом так называемых стрессовых белков и одновременным ингибированием синтеза обычных белков. Предполагается, что в стрессовых условиях эти белки способствуют репарации денатурированных белков и защищают другие от повреждения. Это позволяет восстановиться и выжить клетке при стрессе [21].

Многие процессы, в которых участвует молекулярный кислород, сопровождаются образованием, так называемых активных форм кислорода (АФК). Постоянное образование АФК в растительной клетке является нормой и происходит главным образом в хлоропластах, митохондриях и пероксисомах. У растений накопление АФК (O_2^- и $H_2O_2^-$) наблюдается при старении тканей, а также при стрессах, вызванных неблагоприятными условиями среды, как тяжелые металлы и засоление. В этом случае роль этих опасных молекул двойственная. С одной стороны, они провоцируют окислительные реакции, способные привести клетку к гибели, с другой – выступают как участники сигнальных каскадов, в результате которых происходит экспрессия генов, контролирующих синтез компонентов защитных систем. Стресс сопровождается не только чрезмерной генерацией АФК, но и изменением активности ферментов-антиоксидантов в ту или другую сторону. Полагают, что уровень антиоксидантной защиты и способность быстро среагировать на опасную ситуацию увеличением активности определяют устойчивость растений к стрессу. Содержание H_2O_2 в клетке контролируется ферментами – антиоксидантами: супероксиддисмутазой, каталазой, аскорбатпероксидазой [22-24].

Как видно, существует целый ряд механизмов, который используют растения в борьбе с негативным влиянием стрессовых факторов окружающей среды. Изучение механизмов устойчивости к тяжелым металлам и засолению сельскохозяйственных культур, а также разработка физиологических и биохимических тест систем является очень актуальным и своевре-

менным в связи с увеличением антропогенной нагрузки на окружающую среду и представляет важный теоретический и практический интерес.

В Казахстане рис является важной импортозамещающей и экспортной культурой. Проблема загрязнения риса кадмием является актуальной в Казахстане в связи с широким применением фосфорных удобрений, а также из-за применения на засоленных почвах фосфогипса, который в своем составе содержит тяжелые металлы. В связи с этим выявление сортов риса, устойчивых к воздействию кадмия и наиболее полноценным составом минеральных веществ является необходимым шагом на пути обеспечения населения продуктами питания и использования этих сортов в селекции для получения высокопродуктивных сортов риса. Новизна исследования заключается в том, что в Казахстане впервые исследуются сорта риса на устойчивость к действию кадмия. Целью работы было выявление сортов риса (*Oryza sativa* L.), устойчивых к действию кадмия.

Материал и методы исследования

Объектами исследований явились различные сорта риса (*Oryza sativa* L.): Баканасский РМ-2000-183 – скороспелый сорт риса, полностью адаптированный к условиям рисосеяния на Акдалинском массиве орошения (Балхашский район Алматинской области, ТОО «Бирлик»); Маржан – среднеспелый сорт (оригинатор КазНИИ рисоводства, г. Кызылорда районирован в 1987 г. по Кызылординской области; Виолетта- глютинозный сорт риса (ВНИИ риса, 2001; Краснодар, Россия); Виолетта, Анаит и Фишт – амилозные сорта риса российской селекции; Баракат – китайский сорт, Чапсари – корейский сорт риса с большим содержанием клейковины.

Растения выращивали 7 дней в растворах, содержащих различные концентрации ионов кадмия в виде соли $CdSO_4$ – 0, 50, 100, 200, 300, 400 μM в факторостатных условиях при $t-22^{\circ}C$ днем и $18^{\circ}C$ ночью, с 14-ч фотопериодом.

Измерение биометрических показателей проводилось по общепринятым методам. Растения расчленили на надземную часть и корни. Измеряли среднюю лину корней и надземных органов. Для определения сухой биомассы растения сушили при $105^{\circ}C$ до постоянного веса, охлаждали до комнатной температуры и взвешивали. Статистический анализ проводили, используя программу ANOVA, двухфакторный дисперсионный анализ.

Результаты исследования и их обсуждение

При действии высоких концентраций ионов кадмия рост корней также значительно подавлялся у сортов риса. Так, например у сорта Баракат, Чапсари данный показатель снижался в наименьшей степени относительно контроля – на 76% и 81%, соответственно, в наибольшей степени снижался данный показатель у сортов Маржан, Фишт, Баканас и Анаит на 93, 94, 95 и 98%, соответственно (рисунок 1) ($p < 0.01$).

Сорта Виолетта и Мадина занимали промежуточное положение. По линейному росту корней ряд устойчивости может выглядеть таким

образом ($400 \mu\text{M CdSO}_4$; % к контролю): Баракат (24%) > Чапсари (19%) > Виолетта (17%) > Мадина (14%) > Маржан (7%) > Фишт (6%) > Баканас (5%) > Анаит (2%).

При высокой концентрации кадмия ($400 \mu\text{M}$) рост наземных органов значительно снижался. В наименьшей степени относительно контроля данный показатель снижался у сортов Виолетта, Мадина и Баканас: на 75, 77 и 80%, соответственно ($p < 0.05$). В наибольшей степени снижался данный показатель у сортов Фишт и Маржан – на 96 и 97%, соответственно ($p < 0.01$). Остальные сорта занимали промежуточное положение (рисунок 2).

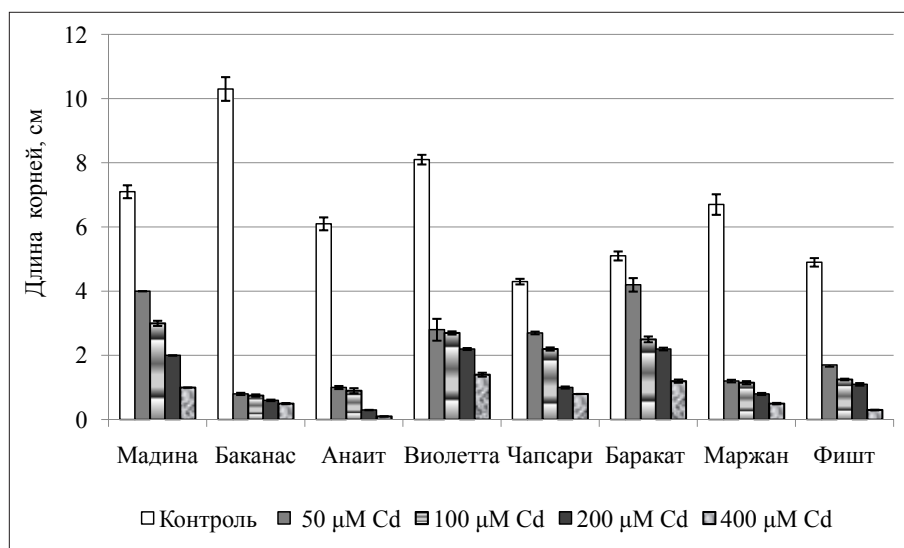


Рисунок 1 – Влияние ионов кадмия на линейный рост корней различных сортов риса

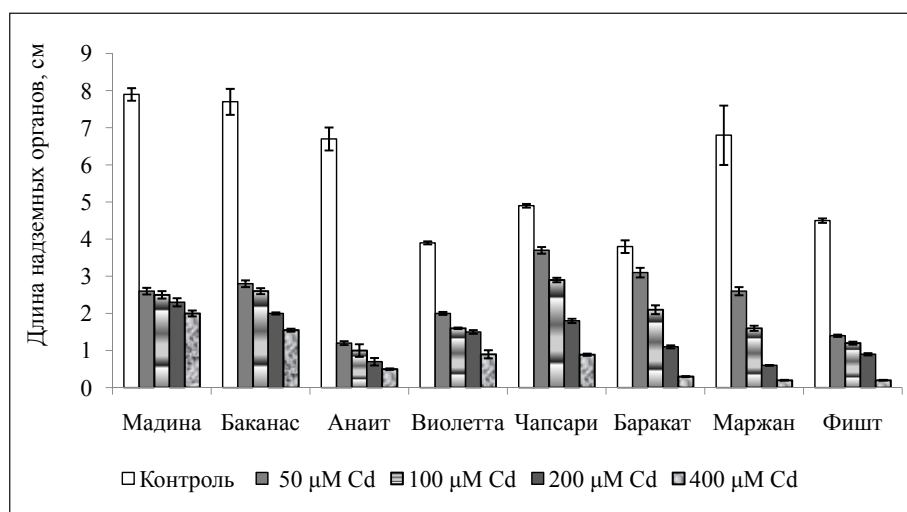


Рисунок 2 – Влияние ионов кадмия на линейный рост надземных органов различных сортов риса

По линейному росту надземных органов сорта риса расположились таким образом (400 мкМ CdSO₄; % к контролю): Мадина (25%) > Виолетта (23%) > Баканас (20%) > Чапсари (18%) > Баракат (8%) = Анаит (8%) > Фишт (4%) > Маржан (3%).

Влияние ионов кадмия на накопление биомассы сортами риса (Oryzasativa L.)

Накопление биомассы корнями риса сильно подавлялось в результате действия высоких концентраций кадмия. У сортов Мадина и Баканас были более высокие показатели по сравнению с другими сортами. Накопление биомассы корнями у этих сортов подавлялось у сорта Баканас на 50%, у сорта Мадина – на 53% (рисунок 3). У сорта Чапсари биомасса корней снижалась на 17%. Сильнейшее снижение биомассы корней показали сорта Фишт, Баракат и Виолетта, у которых

накопление биомассы корнями снижалось на 92, 96 и 97% по сравнению с контрольным вариантом. У сортов Маржан и Анаит почти полностью подавлялось накопление биомассы корнями (на 99,5 и 99,7%, соответственно).

По накоплению биомассы корнями растений сорта при действии 400 мкМ можно расположить следующий ряд (% к контролю): Баканас (50%) > Мадина (47%) > Чапсари (17%) > Фишт (8%) > Баракат (4%) > Виолетта (3%) > Маржан (0,7%) > Анаит (0,5%) (p < 0.01).

Накопление биомассы надземными органами является интегральным показателем устойчивости растений к неблагоприятным условиям среды, так как отражает интенсивность ассимиляционных процессов, в частности, фотосинтеза в условиях стресса.

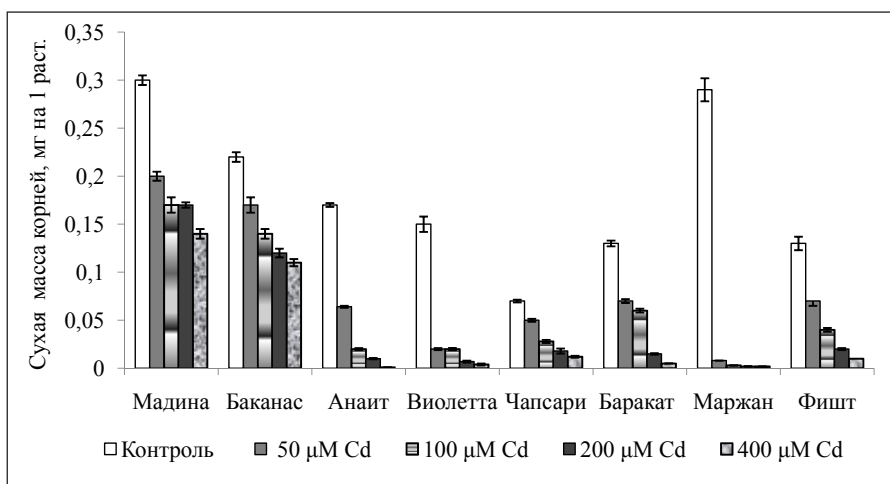


Рисунок 3 – Влияние ионов кадмия на накопление биомассы корнями различных сортов риса

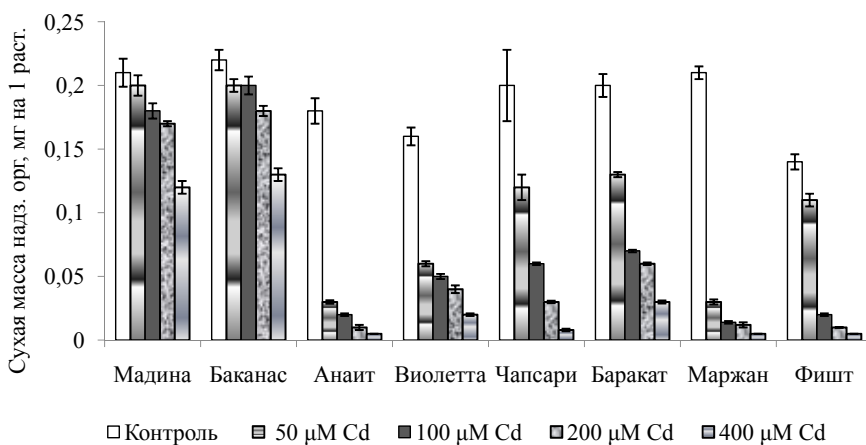


Рисунок 4 – Влияние ионов кадмия на накопление биомассы надземными органами различных сортов риса

По степени устойчивости при действии 400 μM CdSO_4 сорта риса можно расположить следующим образом (% к контролю): Баканас (59%) > Мадина (57%) > Баракат (15%) > Виолетта (13%) > Чапсари (4%) = Фишт (4%) > Анаит (3%) > Маржан (2%) ($p < 0.01$) (рисунок 4).

По результатам исследований установлено, что в наибольшей степени подавлялся процесс накопления биомассы надземными органами у сортов Чапсари, Фишт, Анаит, Маржан, у которых данный показатель снижался на 96, 96, 97 и 98%, соответственно

Относительно устойчивыми оказались сорта Баканас и Мадина, у которых накопление биомассы надземных органов подавлялся на

41 и 43%, соответственно. Накопление сухой биомассы корнями подавлялось в большей степени, чем длина корней. Таким образом, в результате скрининга различных сортов риса на устойчивость к действию кадмия были выявлены относительно устойчивые и чувствительные к действию кадмия сорта. По результатам исследований установлено, что в наибольшей степени подавлялся процесс накопления биомассы надземными органами у сортов Чапсари, Фишт, Анаит, Маржан, у которых данный показатель снижался на 96, 96, 97 и 98%, соответственно. Относительно устойчивыми оказались сорта Баканас и Мадина, у которых накопление биомассы надземных органов подавлялся на 41 и 43%, соответственно.

Литература

- 1 Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л. Комплексная переработка фосфогипса с извлечением редкоземельных элементов//Интегровані технології та енергозбереження-2008.-№ 2. -81 с.
- 2 Jones K.C., Johnston A.E. Cadmium in cereal grain and herbage from longterm experimental plots at Rothamsted // UK Environmental Pollution – 1989. – Vol. 57.- P. 199–216.
- 3 Kongshaug G., Bockman O.C., Kaarstad O., Morka H. Inputs of trace element to soils and plants // Proceedings of Chemical Climatology and Geomedical Problems, Norsk Hydro, Oslo, Norway. – 1992. –
- 4 Kpromblekou A.K., Tabatabai, M.A. Metal contents of phosphate rocks // Commun. Soil Sci. Plant Anal. – 1994. – Vol. 25. – P. 2871–2882.
- 5 Sheppard S.C., Grant C.A., Sheppard M.I., De Jong R., Long J. Risk indicator for agricultural inputs of trace elements to Canadian soils// J. Environ. Qual. – 2009 – Vol.38. – P. 919–932.
- 6 Tirado R., Allsop M., Phosphorus in agriculture: problems and solutions // Greenpeace Research Laboratories. Technical Report (Review) – 2012. (http://www.greenpeace.org).
- 7 Grant C.A., Monreal M.A., Irvine R.B., Mohr R.M., McLaren D.L., Khakbazan M. Preceding crop and phosphorus fertilization affect cadmium and zinc concentration of flaxseed under conventional and reduced tillage // Plant and Soil. – 2010. – Vol. 333. – P. 337–350.
- 8 Vassilev A., Lidon F. Cd-induced membrane damages and changes in soluble protein and free amino acid contents in young barley plants // Emirates Journal of Food and Agriculture – 2011. – Vol.23(2). – P.130–136.
- 9 Gill S.S., Tuteja N. Cadmium stress tolerance in crop plants—probing the role of sulfur // Plant Signal Behav. – 2011. – Vol.6(2). – P.215–222.
- 10 Wang F.Y., Wang H., Ma J.W. Adsorption of cadmium (II) ions from aqueous solution by a new low-cost adsorbent—bamboo charcoal // Journal of Hazard Materials – 2010. – Vol. 177. – P. 300–306.
- 11 Nazar R., Iqbal N., Masood A., Khan M.I.R., Syeed S., Khan N.A. Cadmium toxicity in plants and role of mineral nutrients in its alleviation // AJPS. – 2012. – Vol. 3. – P. 1476–1489.
- 12 Tóth T., Zsiros O., Kis M., Garab G., Kovács L. Cadmium exerts its toxic effects on photosynthesis via a cascade mechanism in the cyanobacterium, *Synechocystis* PCC 6803 // Plant Cell Environment – 2012. – Vol.35(12). – P. 2075–2086.
- 13 Coudert Y., Périn C., Courtois B., Khong N.G., Ganet P. Genetic control of root development in rice, the model cereal // Trends Plant Science. – 2010. – Vol. 15(4). – P. 219–226.
- 14 Lui H., Zhang J., Christie P., Zhang F. Influence of iron plaque on uptake and accumulation of Cd by rice (*Oryza sativa* L.) seedling grown in soil // *Science of the Total Environment* – 2008. – Vol.394. -P.361–368.
- 15 Lux A., Martink M., Vaculik M., White P.J. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review // J. Exp. Bot. - 2011. – Vol.62(1). -P.21–37.
- 16 He Q.B., Singh B.R. Cadmium availability to plants as affected by repeated applications of phosphorus fertilizers // *Acta Agriculturae Scandinavica*- 1995.- Vol. 45. – P. 22–31.
- 17 Grant C.A., Monreal M.A., Irvine R.B., Mohr R.M., McLaren D.L., Khakbazan M. Preceding crop and phosphorus fertilization affect cadmium and zinc concentration of flaxseed under conventional and reduced tillage // Plant and Soil. – 2010. – Vol. 333. – P. 337–350.
- 18 Lambert R., Grant C., Sauve S. Cadmium and zinc in soil solution extracts following the application of phosphate fertilizers // *Sci. Total Environ.* – 2007. – Vol. 378. – P. 293–305.
- 19 Коваль С.Ф. Исследование свойств клеточных мембран и устойчивости растений по вымываемости электролитов // Изв. Сиб. Отд. АН СССР. Серия биол. наук. – 1974. – № 15 (3). – С.161-167.

- 20 Кожушко И.Н. Изучение засухоустойчивости мирового генофонда яровой пшеницы для селекционных целей. – Ленинград, 1991. – 90 с.
- 21 Cobbett C.S. Phytochelatin biosynthesis and function in heavy metal detoxification // *Curr. Opin. Plant Biol.* – 2000. – Vol. 3. – P. 211-216.
- 22 Mattuis J.M. Effects of antioxidant enzymes in the molecular control of reactive oxygen species toxicology // *Toxicology.* – 2000. – Vol. 153. – P. 83-104.
- 23 Rodrigues F.R., Francisco F.R., Pierre V.A. Changes in antioxidant enzyme activities in soybean under cadmium stress // *J. Plant Nutr.* – 2002. – N 2. – P. 327-342.
- 24 Romero M.C., Corpas F.J., Zabalza A., Rodrigues S. M. Differential expression and regulation of antioxidative enzymes by cadmium in plants // *J. Plant Physiol.* – 2007. – Vol. 164. – P. 1346-1357.

References

- 1 Tovazhnyansky LL, Kapustenko PA, Yavin GL (2008) Complex processing of phosphogypsum with extraction of rare earth elements. Integration of energy conservation technologies [Kompleksnaya pererabotka fosfogipsa s izvlecheniem redkozemelnykh elementov. Integrovannyye tekhnologii na energosberezheniya] 2:81. (In Russian)
- 2 Jones KC, Johnston AE (1989) Cadmium in cereal grain and herbage from longterm experimental plots at Rothamsted, UK *Environmental Pollution*, 57:199–216
- 3 Kongshaug G, Bockman OC, Kaarstad O, Morka H (1992) Inputs of trace element to soils and plants, *Proceedings of Chemical Climatology and Geomedical Problems, NorskHydro, Oslo, Norway.*
- 4 Kpombekou AK, Tabatabai MA (1994) Metal contents of phosphate rocks, *Commun. Soil Sci. Plant Anal*, 25:2871–2882
- 5 Sheppard SC, Grant CA, Sheppard MI, De Jong R, Long J (2009) Risk indicator for agricultural inputs of trace elements to Canadian soils, *J. Environ. Qual.* 38: 919–932
- 6 Tirado R, Allsop M, (2012) Phosphorus in agriculture: problems and solutions, Greenpeace Research Laboratories, Technical Report (Review), (<http://www.greenpeace.org>).
- 7 Grant CA, Monreal MA, Irvine RB, Mohr RM, McLaren DL, Khakbazan M (2010) Preceding crop and phosphorus fertilization affect cadmium and zinc concentration of flaxseed under conventional and reduced tillage, *Plant and Soil.* 333: 337–350
- 8 Vassilev A, Lidon F (2011) Cd-induced membrane damages and changes in soluble protein and free amino acid contents in young barley plants, *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 23(2): 130–136
- 9 Gill SS, Tuteja N (2011) Cadmium stress tolerance in crop plants—probing the role of sulfur, *Plant Signal Behav*, 6(2): 215–222
- 10 Wang FY, Wang H, Ma JW (2010) Adsorption of cadmium (II) ions from aqueous solution by a new low-cost adsorbent—bamboo charcoal, *Journal of Hazard Materials*, 177: 300–306
- 11 Nazar R, Iqbal N, Masood A, Khan MIR, Syeed S, Khan NA (2012) Cadmium toxicity in plants and role of mineral nutrients in its alleviation, *AJPS.* 3: 1476–1489
- 12 Tóth T, Zsiros O, Kis M, Garab G, Kovács L (2012), Cadmium exerts its toxic effects on photosynthesis via a cascade mechanism in the cyanobacterium, *Synechocystis PCC 6803*, *Plant Cell Environment*, 35(12): 2075–2086
- 13 Coudert Y, Périn C, Courtois B, Khong NG, Ganet P (2010) Genetic control of root development in rice, the model cereal, *Trends Plant Science*, 15(4): 219–226
- 14 Lui H, Zhang J, Christie P, Zhang F (2008) Influence of iron plaque on uptake and accumulation of Cd by rice (*Oryza sativa* L.) seedling grown in soil, *Science of the Total Environment*, 394: 361–368
- 15 Lux A, Martink M, Vaculik M, White PJ (2011) Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review, *J. Exp. Bot.* 62(1): 21–37
- 16 He QB, Singh BR (1995) Cadmium availability to plants as affected by repeated applications of phosphorus fertilizers, *Acta Agriculturae Scandinavica*, 45: 22–31
- 17 Grant CA, Monreal MA, Irvine RB, Mohr RM, McLaren DL, Khakbazan M (2010) Preceding crop and phosphorus fertilization affect cadmium and zinc concentration of flaxseed under conventional and reduced tillage, *Plant and Soil.* 333:337–350
- 18 Lambert R, Grant C, Sauve S. (2007) Cadmium and zinc in soil solution extracts following the application of phosphate fertilizers, *Sci. Total Environ.* 378:293–305
- 19 Koval S.F. (1974) Studying the properties of cell membranes and the resistance of plants by elution electrolytes. Series of Biological Sciences [Issledovanie svojstv kletochnykh membran i ustojchivosti rastenij po vymyvaemosti elektrolitov] 15 (3):161-167 (In Russian)
- 20 Kozhushko I.N. (1991) The study of global drought resistance winter wheat gene pool for breeding purposes, [Izuchenie zasuhoustojchivosti mirovogo genofonda yarovoj pshenicy dlya selekcionnykh celej] *Leningrad* : 90 (In Russian)
- 21 Cobbett CS (2000) Phytochelatin biosynthesis and function in heavy metal detoxification, *Curr. Opin. Plant Biol.* 3: 211-216
- 22 Mattuis JM, Effects of antioxidant enzymes in the molecular control of reactive oxygen species toxicology, *Toxicology*, 153: 83-104
- 23 Rodrigues FR, Francisco FR, Pierre VA (2002) Changes in antioxidant enzyme activities in soybean under cadmium stress, *J. Plant Nutr.* 2: 327-342
- 24 Romero MC, Corpas FJ, Zabalza A, Rodrigues S, M, (2007) Differential expression and regulation of antioxidative enzymes by cadmium in plants, *J. Plant Physiol.* 164:1346-1357