

**Министерство образования и науки РФ**  
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ИНСТИТУТ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ МЕДИЦИНЫ И БИОЛОГИИ**

**КАФЕДРА БОТАНИКИ И ФИЗИОЛОГИИ РАСТЕНИЙ**  
Направление: 06.03.01 - биология

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
Дипломная работа  
**ВЛИЯНИЕ ЛАНТАНОИДОВ НА ПАРАМЕТРЫ ВОДООБМЕНА**  
**РАСТЕНИЙ**

**Работа завершена:**

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2016 г. \_\_\_\_\_ (К. А. Стерхова)

**Работа допущена к защите:**

Научные руководители

к.б.н., доцент

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2016 г. \_\_\_\_\_ (В.Н. Воробьев)

к.б.н., н.с. лаб. БТП КИББ КазНЦ РАН

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2016 г. \_\_\_\_\_ (Т.А. Сибгатуллин)

Заведующий кафедрой

д.б.н., профессор

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2016 г. \_\_\_\_\_ (О.А. Тимофеева)

Казань – 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	4
<b>1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ</b>	6
1.1 Роль воды в растениях	6
1.2 Движение воды в целом растении	6
1.3 Транспирация	8
1.4 Радиальный транспорт воды в корнях	10
1.4.1. Апопластный путь	11
1.4.2. Симпластный путь	12
1.4.3. Трансмембранный путь	13
1.5 Строение плазматической мембраны растительных клеток	13
1.5.1 Аквапорины	17
1.5.2 Аквапорины <i>Zea mays</i>	22
1.5.3 Ингибирование аквапоринов	22
1.6 Лантаноиды	23
1.6.1 Накопление лантаноидов в природе	24
1.6.2 Влияние лантаноидов на растения	25
1.7 Метод ядерно-магнитного резонанса в исследовании водного обмена	27
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ</b>	30
<b>2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ</b>	30
2.1 Объект исследований	30
2.1.1 Условия проращивания	30
2.2 Варианты приготовления образцов	30
2.3 Метод определения параметров газообмена растений	31
2.4 Метод ЯМР	34
2.5 Статистический анализ результатов	34
<b>3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ</b>	35
<b>ВЫВОДЫ</b>	44



## ВВЕДЕНИЕ

Благоприятное влияние редкоземельных элементов (РЗЭ) на рост растений известно с 19 века. С конца 20 века и по настоящее время активное применение РЗЭ в сельском хозяйстве обусловлено влиянием элементов этой группы на физиолого-биохимические процессы растений, что приводит к повышению урожайности без потери в качестве сахарной свеклы, риса, картофеля, рапса и других с/х культур.

Было выяснено, что низкие концентрации лантаноидов увеличивают активность ферментов антиоксидантной системы, инвертаз, амилаз и ингибируют активность оксидаз индолил-уксусных кислот. Известны данные о влиянии РЗЭ на стабильность и функциональное состояние компонентов цитоскелета и клеточных мембран. Кроме того, РЗЭ могут работать как мощные гормональные эффекторы. После обработки РЗЭ наблюдалось повышение содержания ИУК. Было обнаружено увеличение количества предшественника синтеза ИУК - триптофана.

Попытки объяснить повышение урожайности только изменениями в интенсивности биохимических процессов или изменениями гормонального статуса будут не полными без учета параметров водного обмена, так как именно водная среда обеспечивает взаимосвязь на различных уровнях организации, клеточном, тканевом и органном. Отсутствие работ по исследованию влияния лантаноидов на параметры водного обмена явилось стимулом к проведению данного исследования, цель которого – выявить различия в параметрах водообмена проростков кукурузы выращенных на растворах содержащих ионы лантаноидов.

В соответствии с целью были поставлены следующие задачи:

1. Сравнить параметры газообмена проростков, выращенных на растворах содержащих ионы лантаноидов.
2. Оценить влияние лантаноидов на радиальный транспорт воды в корнях проростков кукурузы.

3. Определить какой вариант cell-to-cell пути радиального водного транспорта модифицируется в присутствии лантаноидов: симпластный (через плазмодесмы) или трансмембранный.

## ВЫВОДЫ

1. Действие иттербия на параметры газообмена семидневных проростков кукурузы выражается в увеличении устьичной проводимости ( $gH_2O$ ) на 33% по сравнению с контролем.
2. Общая диффузионная проницаемость ( $P_{diff}$ ) корней проростков увеличивается в присутствии иттербия на 23%.
3. Под действием иттербия увеличение проницаемости корней кукурузы обусловлено вкладом аквапоринов в трансмембранный обмен воды.
4. Выявлены различия во влиянии легких (Ce) и тяжелых (Yb) лантаноидов на параметры водообмена проростков кукурузы. Иттербий увеличивал  $gH_2O$  и  $P_{diff}$ , церий - не влиял на эти показатели.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) **Алехина, Н.Д.** Физиология растений [Текст] / Н.Д. Алехина, Ю. В. Балнокин, В. Ф. Гавриленко и др. // Под ред. И. П. Ермакова. и др. – М. Academia. – 2005. – 640 с.
- 2) **Анисимов, А.В.** Транспорт воды в растениях. Исследование импульсным методом ЯМР [Текст] / А.В. Анисимов, С. Раткович // М., Наука. – 1992. – 144 с.
- 3) **Гамалей, Ю.В.** Отток фотоассимилятов в природных и экспериментальных условиях [Текст] / Ю.В. Гамалей // Физиология растений. – 1996. – Т. 43. – С. 328-343.
- 4) **Гамалей, Ю.В.** Надклеточная организация растений [Текст] / Ю.В. Гамалей // Физиология растений. – 1997. – Т. 44. – С. 819-846.
- 5) **Зеликман, А. Н.** Metallургия редкоземельных металлов, тория и урана [Текст] / А.Н. Зеликман. – Мир, 1961. – 110 с.
- 6) **Ионенко, И.Ф.** Радиальный диффузионный транспорт воды в разных зонах корня кукурузы и его чувствительность к хлориду ртути [Текст] / И.Ф. Ионенко, А.В. Анисимов // Физиология растений. – 2007. – Т. 54. – С. 1-7.
- 7) **Ионенко, И.Ф.** Различие чувствительности диффузионного транспорта воды в корнях и стебле кукурузы к действию блокатора аквапоринов  $HgCl_2$  [Текст] / И.Ф. Ионенко, А.В. Анисимов // Физиология растений. – 2008. – Т. 55. – С. 5-13.
- 8) **Медведев, С.С.** Физиология растений [Текст] / С.С. Медведев. – Издательство Санкт-Петербургского университета. – 2004. – 336 с.
- 9) **Полевой, В.В.** Физиология растений [Текст] / В.В. Полевой. – Издательство: "Высшая школа". – 1989. – 464 с.
- 10) **Серебренников, В.Н.** Смеситель для получения тонкораспыленной жидкости для охлаждения [Текст] / В.Н. Серебренников, Д.Н. Трифонов // «Станки и инструмент». – 1960. – Т. 12. – С. 10-12.
- 11) **Якушкина, Н.И.** Водный обмен растений [Текст] / Н.И. Якушкина // Физиология растений: учебное пособия для студентов биологических

специальностей педагогических институтов / Е.Ю. Бахтенко. –  
Издательство «Владос», 2010. – С. 164-166.

- 12) **Agre, P.** Aquaporin water channels: molecular mechanisms for human diseases [Text] / P. Agre, D. Kozono // FEBS Lett. – 2003. – Vol. 8. – P. 27-72.
- 13) **Alberts, B.** Molecular Biology of the Cell [Text] / B. Alberts, A. Johnson, J. Lewis, M. Raff, K. Roberts, P. Walter // Garland Science. – 2002. – Vol. 2. – P. 13-50.
- 14) **Alleva, K.** Plasma membrane of Beta vulgaris storage root shows high water channel activity regulated by cytoplasmic pH and a dual range of calcium concentrations [Text] / K. Alleva, C.M. Niemietz, M. Sutka, C. Maurel, M. Parisi, S.D. Tyerman, G. Amodeo // J Exp Bot. – 2006. – Vol. 57. – P. 609-621.
- 15) **Anisimov, A. V.** Water diffusion in biological porous systems: a NMR approach [Text] / A.V. Anisimov, N.Y. Sorokina, N.R. Dautova // Magn Reson Imaging. – 1998. – V. 16. – P. 565-568.
- 16) **Bangham, A.D.** Negative Staining of Phospholipids and their Structured Modification by Surface Agents as Observed in the Electron Microscope [Text] / A.D. Bangham, R.W. Horne // J. Mol. Biol. – 1964. – Vol. 8. – P. 660-668.
- 17) **Biela, A.** The Nicotiana tabacum plasma membrane aquaporin NtAQP1 is mercury-insensitive and permeable for glycerol [Text] / A. Biela, K. Grote, B. Otto, S. Hoth, R. Hedrich, R. Kaldenhoff // The Plant Journal. – 1999. – Vol. 18. – P. 565-570.
- 18) **Bienert, G.P.** Plant aquaporins: roles in water homeostasis, nutrition, and signaling processes [Text] / G.P. Bienert, F. Chaumont // Plant Physiol. – 2011. – Vol. 7. – P. 3-36.
- 19) **Bienert, G.P.** A conserved cysteine residue is involved in disulfide bond formation between plant plasma membrane aquaporin monomers [Text] / G.P. Bienert, D. Cavez, A. Besserer, M.C. Berny, D. Gilis, M. Rooman, F. Chaumont // Biochem J. – 2012. – Vol. 445. – P. 101-111.



- 20) **Buchanan, B.B.** Biochemistry and Molecular Biology of Plants [Text] / B.B. Buchanan, W. Gruissem, R.L. Jones // Amer. Soc. Plant Physiologists, Rockville, MD. - 2000. – Vol. 18. – P. 204-228.
- 21) **Caemmerer, S.** Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas-exchange of leaves [Text] / S. Caemmerer, G.D. Farquhar // Planta. – 1981. – Vol. 153. – P. 376-387.
- 22) **Carvajal, M.** Responses of wheat plants to nutrient deprivation may involve the regulation of water-channel function [Text] / M. Carvajal, D.T. Cooke, D.T. Clarkson // Planta. – 1996. – Vol. 199. – P. 372-381.
- 23) **Chaumont, F.** Plasma membrane intrinsic proteins from maize cluster in two sequence subgroups with differential aquaporin activity [Text] / F. Chaumont, F. Barrieu, R. Jung, M.J. Chrispeels // Plant Physiol. – 2000.– Vol. 122.– P. 1025-1034.
- 24) **Chaumont, F.** Aquaporins constitute a large and highly divergent protein family in maize [Text] / F. Chaumont, F. Barrieu, E. Wojcik, M.J. Chrispeels, R. Jung // Plant Physiol. – 2001. – Vol. 125. – P. 1206-1215.
- 25) **Chaumont, F.** Regulation of plant aquaporin activity [Text] / F. Chaumont, M. Moshelion, M.J. Daniels // Biol Cell. – 2005. – Vol. 97. – P. 749–764.
- 26) **Chaumont, F.** Aquaporins: Highly Regulated Channels Controlling Plant Water Relations [Text] / F. Chaumont, Stephen D. Tyerman // Plant Physiology. – 2014. – Vol. 164. – P. 1600-1618.
- 27) **Codd, S.L.** Magnetic resonance microscopy: spatially resolved NMR techniques and applications [Text] / S.L. Codd, J.D. Seymour // J. Magn Reson. – 2008. – Vol. 83. – P. 252-266.
- 28) **Daniel, J.A.** Phosphorylation of aquaporin PvTIP3;1 defined by mass spectrometry and molecular modeling [Text] / J.A. Daniel, M. Yeager // Biochemistry. – 2005. – Vol. 44. – P. 14443–14454.
- 29) **Danielson, J.A.** Unexpected complexity of the aquaporin gene family in the moss *Physcomitrella patens* [Text] / J.A. Danielson, U. Johanson // BMC Plant Biol. – 2008. – Vol. 8. – P. 45.

- 30) **Diatloff, E.** Foliar application of rare earth elements to maize and mungbean [Text] / E. Diatloff, C.J. Asher, F.W. Smith // Aust J Exp Agric. – 1999. – Vol. 39. – P. 189-194.
- 31) **Diatloff, E.** Effects of lanthanum and cerium on the growth and mineral nutrition of corn and mungbean [Text] / E. Diatloff, F.W. Smith, C.J. Asher // Ann Bot. – 2008. – Vol. 101. – P. 971-982.
- 32) **Ehlert, C.** Aquaporin-mediated reduction in maize root hydraulic conductivity impacts cell turgor and leaf elongation even without changing transpiration [Text] / C. Ehlert, C. Maurel, F. Tardieu, T. Simonneau // Plant Physiol. – 2009. – Vol. 150. – P. 1093-1104.
- 33) **Ferrier, J.M.** Water Relations of Plant Cells and Tissues / J.M. Ferrier, J. Dainty // J. Magn Reson. – 1979. – Vol. 2. – P. 31-48.
- 34) **Frick, A.** Mercury increases water permeability of a plant aquaporin through a non-cysteine-related mechanism [Text] / Frick A, Jarva M, Ekvall M, Uzdavinyas P, Nyblom M, Törnroth-Horsefield S // Biochem J. – 2013a. – Vol. 454. – P. 491-499.
- 35) **Frick, A.** Structural basis for pH gating of plant aquaporins [Text] / A. Frick, M. Jarva, S. Törnroth-Horsefield // FEBS Lett. – 2013b. – Vol. 587. – P. 989-993.
- 36) **Gaspar, A.** Cloning and characterization of ZmPIP1-5b, an aquaporin transporting water and urea [Text] / A. Gaspar, A. Mahe // Plant Sci. – 2003. – Vol. 165. – P. 21-31.
- 37) **Green, N.** Stout Biological Science [Text] / N. Green, Y. Stout, D. Taylor // Plant Physiol. – 1997. – Vol. 231. – P. 992.
- 38) **Gomes, D.** Aquaporins are multifunctional water and solute transporters highly divergent in living organisms [Text] / D. Gomes, A. Agasse, P. Thiebaud, S. Delrot, H. Geros, F. Chaumont // Biochim Biophys Acta. – 2009. – Vol. 336. – P. 1213-1228.
- 39) **He, M.L.** Study on the performance enhancing effects of rare earth elements in growing and fattening pigs [Text] / M.L. He, D. Ranz, W.A. Rambeck // Anim Physiol Anim Nutr. – 2001. – Vol. 85. – P. 263-270.

- 40) **Hedfalk, K.** Aquaporin gating [Text] / K. Hedfalk, S. Törnroth-Horsefield, M. Nyblom, U. Johanson, P. Kjellbom, R. Neutze // *Curr Opin Struct Biol.* – 2006. – Vol. 16. – P. 447-456.
- 41) **Homan, N.** 0.7 and 3 T MRI and sap flow in intact trees: xylem and phloem in action / N. Homan, C.W. Windt, F.J. Vergeldt, E. Gerkema, H. Van As // *Appl Magn Reson.* – 2007. – Vol. 32. – P. 157-170.
- 42) **Hong, F.S.** Physiological effects of cerium nitrate on seed germination of rice [Text] / F.S. Hong, N.F. Fang, G.W. Zhao // *Acta Agronomica Sinica.* – 2000. – Vol. 26. — P. 7-12.
- 43) **Hong, F.S.** Study on the mechanism of cerium nitrate effects on germination of aged rice seed [Text] / F.S. Hong // *Biol Trace Elem Res.* – 2002a. – Vol. 87. – P. 191-200.
- 44) **Hong, F.S.** Mechanism of lanthanum effect on chlorophyll of spinach [Text] / F.S. Hong, Z.G. Wei, G.W. Zhao // *Sci China Ser C.* – 2002b. – Vol. 45. – P. 166-176.
- 45) **Hong, F.S.** Study of lanthanum on seeds germination and growth of rice [Text] / F.S. Hong, L. Wang, C. Liu // *Biol Trace Elem Res.* – 2003. – Vol. 94. — P. 273-286.
- 46) **Hong, F.S.** Effects of rare earth elements on vigor enhancement of aged spinach seeds [Text] / C. Liu, F.S. Hong, L. Zheng, Z.G. Wang, P. Tang // *J Rare Earths.* – 2004. – Vol. 22. – P. 547-552.
- 47) **Hornak, J.P.** Multivariate Image Analysis of Magnetic Resonance Images with the Direct Exponential Curve Resolution Algorithm (DECRA) [Text] / J.P. Hornak, W. Windig, B. Antalek // *J Magn Reson.* – 1998. – Vol. 132. – P. 298-306.
- 48) **Hu, Z.** Physiological and biochemical effects of rare earth elements on plants and their agricultural significance: a review [Text] / Z. Hu., H. Richter, G. Sparovek, E. Schnug// *J Plant Nutr.* – 2004. – Vol. 27. – P. 183-220.
- 49) **Ionenko, I.F.** Water transport in maize roots under the influence of mercuric chloride and water stress: a role of water channels [Text] / I.F. Ionenko, A.V.

- Anisimov, F.G. Karimova // *Biologia Plantarum*. – 2001. – Vol. 44. – P. 247-252.
- 50) **Ippolito, M.P.** Effect of rare earth elements on growth and antioxidant metabolism in *Lemna minor* [Text] / M.P. Ippolito, C. Paciolla, L. d'Aquino, M. Morgana, F. Tommasi // *Caryologia*. – 2007. – Vol. 60. – P. 125-128.
- 51) **Ishikawa, F.** Novel type aquaporin SIPs are mainly localized to the ER membrane and show cell-specific expression in *Arabidopsis thaliana* [Text] / F. Ishikawa, S. Suga, T. Uemura, M.H. Sato, M. Maeshima // *FEBS Lett.* – 2005. – Vol. 579. – P. 5814-5820.
- 52) **Javot, H.** Role of a single aquaporin isoform in root water uptake [Text] / H. Javot, V. Lauvergeat, V. Santoni, F. Martin-Laurent, J. Güçlü, J. Vinh, J. Heyes, K.I. Franck, A.R. Schaffner, D. Bouchez // *Plant Cell*. – 2003. – Vol. 15. – P. 509-522.
- 53) **Johansson, I.** Water transport activity of the plasma membrane aquaporin PM28A is regulated by phosphorylation [Text] / I. Johansson, M. Karlsson, V.K. Shukla, M.J. Chrispeels, C. Larsson, P. Kjellbom // *Plant Cell*. – 1998. – Vol. 10. – P. 451-459.
- 54) **Johansson, I.** The role of aquaporins in cellular and whole plant water balance [Text] / I. Johansson, M. Karlsson, U. Johanson, C. Larsson, P. Kjellbom // *Biochimica et Biophysica Acta*. – 2000. – Vol. 1465. – P. 324-342.
- 55) **Johanson, U.** The complete set of genes encoding major intrinsic proteins in *Arabidopsis* provides a framework for a new nomenclature for major intrinsic proteins in plants [Text] / U. Johanson, M. Karlsson, I. Johansson, S. Gustavsson, S. Sjövall, L. Fraysse, A.R. Weig, P. Kjellbom // *Plant Physiol.* – 2001. – Vol. 126. – P. 1358-1369.
- 56) **Kammerloher, W.** Water channels in the plant plasma membrane cloned by immunoselection from a mammalian expression system [Text] / W. Kammerloher, U. Fischer, G.P. Piechottka, A.R. Schaffner // *Plant*. – 1994. – Vol. 6. – P. 187-199.

- 57) **Kedem, O.** Thermodynamic Analysis of the Permeability of Biological Membranes to Non-Electrolytes / O. Kedem, A. Katchalsky // *Biochim. Biophys. Acta.* – 1958. – Vol. 27. – P. 229-246.
- 58) **Kiosawa, K.** Hydraulic conductivity of tonoplast-free Chara cells [Text] / K. Kiosawa, M. Tazawa // *J. Membr. Biol.* – 1977. – Vol. 37. – P. 157-166.
- 59) **Knipfer, T.** Root pressure and a solute reflection coefficient close to unity exclude a purely apoplastic pathway of radial water transport in barley (*Hordeum vulgare*) [Text] / T. Knipfer, W. Fricke // *New Phytologist.* – 2010. – V. 187. – P. 159-170.
- 60) **Knipfer, T.** Water uptake of seminal and adventitious roots in relation to whole-plant water flow in barley (*Hordeum vulgare* L.) [Text] / T. Knipfer, W. Fricke // *J Exp Bot.* – 2011. – V. 62. – P. 717-733.
- 61) **Lettwin, J.Y.** [Text] / J.Y. Lettwin, W.F. Pickard, W.S. McCulloch // *Nature.* – 1964. – Vol. 202. – P. 1338.
- 62) **Liang, T.** Environ biogeochemical behaviour of rare earth elements in soil plant systems [Text] / T. Liang, S. Zhang, L. Wang, H-T. Kung, Y. Wang, A. Hu, S. Ding // *Environ Geochem Health.* – 2005. – Vol. 27. – P. 302-311.
- 63) **Li, Z.** Effects of Lanthanum on Calcium and Magnesium Contents and Cytoplasmic Streaming of Internodal Cells of Chara coralline [Text] / Z. Li, Z. Zhang, M. Yu, Y. Zhou, Y. Zhao // *Biol Trace Elem Res.* – 2011. – Vol. 143. – P. 555-561.
- 64) **Lopez, F.** Diurnal regulation of water transport and aquaporin gene expression in maize roots: contribution of PIP2 proteins [Text] / F. Lopez, A.S. Bousser, I. Sissoëff, M. Gaspar, B. Lachaise, J. Hoarau, A. Mahé // *Plant Cell Physiol.* – 2003. – Vol. 44. – P. 1384-1395.
- 65) **Luu, D.T.** Aquaporins in a challenging environment: molecular gears for adjusting plant water status [Text] / D.T. Luu, C. Maurel // *Plant Cell Environ* – 2005. – Vol. 28. – P. 85-96.

- 66) **Ma, Y.H** Effects of rare earth oxide nanoparticles on root elongation of plants [Text] / Y.H. Ma, L.L. Kuang, X. He, W. Bai, Y.Y. Ding, Z.Y. Zhang, Y.L. Zhao, Z.F. Chai // *Chemosphere*. – 2010. – Vol. 78. – P. 273-279.
- 67) **MacFall, J.J.** Magnetic resonance imaging of plants / J.J. MacFall, H. Van As // *J Exp Bot*. – 1996. – Vol. 21. – P. 33-76.
- 68) **MacKinnon, R.** Structure of ion channels [Text] / R. MacKinnon // *J Am Soc Nephrol*. – 2004. – Vol. 15. – P. 23-32.
- 69) **Maggio, A.** Effects of mercuric chloride on the hydraulic conductivity of tomato root systems [Text] / A. Maggio, R.J. Yolly // *Plant Physiol*. – 1995. – Vol. 109. – P. 331-335.
- 70) **Maurel, C.** The vacuolar membrane protein  $\gamma$ -TIP creates water specific channels in *Xenopus* oocytes [Text] / C. Maurel, J. Reizer, J.I. Schroeder, M.J. Chrispeels // *EMBO J*. – 1993. – Vol. 12. – P. 2241-2247.
- 71) **Naccache, P.** Effect of PCMBs on water transfer across biological membranes [Text] / P. Naccache, R.I. Sha'afi // *J. Cell Physiol*. – 1974. – Vol. 83. – Vol. 91. – P. 449-456.
- 72) **Ni, J.Z.** Rare earth bioinorganic chemistry [Text] / J.Z. Ni // *Science Beijing*. – 2002. – Vol. 10. – P. 2-24.
- 73) **Niinistö, L.** Industrial applications of the rare earths: an overview [Text] / L. Niinistö // *Inorg Chim Acta*. – 1987. – Vol. 140. – P. 339-343.
- 74) **Norris, D.G.** The effects of microscopic tissue parameters on the diffusion weighted magnetic resonance imaging experiment [Text] / D.G. Norris // *NMR Biomed*. – 2001. – Vol. 14. – P. 77-93.
- 75) **Nyblom, M.** Structural and functional analysis of SoPIP2;1 mutants adds insight into plant aquaporin gating [Text] / M. Nyblom, A. Frick, Y. Wang, M. Ekvall, K. Hallgren, K. Hedfalk, R. Neutze, E. Tajkhorshid, S. Törnroth-Horsefield // *J Mol Biol*. – 2009. – Vol. 387. – P. 653-668.
- 76) **Oparka, K.J.** Plasmodesmata. A Not So Open-and-Shut Case [Text] / K.J. Oparka, G.A. Roberts // *Plant Physiology*. – 2001. – Vol. 125. – P. 123-126.

- 77) **Schäffner, A.R.** Aquaporin function, structure, and expression: are there more surprises to surface in water relations? [Text] / A.R. Schäffner // *Planta*. – 1998. – Vol. 204. – P. 131-139.
- 78) **Sen, P.N.** Time-dependent diffusion coefficient as a probe of geometry / P.N. Sen // *Biophys J*. – 2004. – Vol. 82. – P. 481-498.
- 79) **Sibgatullin, T.A.** Quantitative permeability imaging of plant tissues [Text] / T.A. Sibgatullin, F.J. Vergeldt, E. Gerkema, H. Van As // *Eur. Biophys. J.* – 2010. – Vol. 39. – P. 699-710.
- 80) **Singer, S.J.** The Fluid Mosaic Model of the structure of cell membranes [Text] / S.J. Singer, G.L. Nicolson // *Science*. – 1972. – Vol. 175. – P. 720-731.
- 81) **Steudle, E.** Water transport across plant tissue: Role of water channels [Text] / E. Steudle // *Biology of the Cell*. – 1997. – Vol. 89. – P. 259-273.
- 82) **Steudle, E.** How does water get through roots? [Text] / E. Steudle, C.A. Peterson // *J. Exp. Bot.* – 1998. – Vol. 49. – P. 775–788.
- 83) **Steudle, E.** Water uptake by roots: effect of water deficit [Text] / E. Steudle // *J. Exp. Bot.* – 2000. – Vol. 51. – P. 1531-1542.
- 84) **Suku, S.** Do root hydraulic properties change during the early vegetative stage of plant development in barley (*Hordeum vulgare*) [Text] / S.Suku, T. Knipfer , W. Fricke // *Ann Bot.* – 2014. – V. 113. – P. 385-402.
- 85) **Takase, T.** The circadian clock modulates water dynamics and aquaporin expression in *Arabidopsis* roots [Text] / T. Takase, H. Ishikawa, H. Murakami, J. Kikuchi, K. Sato-Nara, H. Suzuki // *Plant Cell Physiol.* –2011. – Vol. 52. – P. 373-383.
- 86) **Tazawa, M.** Mercurial-sensitive water transport in barley roots [Text]/ M. Tazawa, E. Ohkuma, M. Shibasaka, S. Nakashima // *J. Plant Research*. – 1997. – Vol. 110. – P. 435-442.
- 87) **Törnroth-Horsefield, S.** Structural mechanism of plant aquaporin gating [Text] / S. Törnroth-Horsefield, Y. Wang, K. Hedfalk, U. Johanson, M. Karlsson, E. Tajkhorshid, R. Neutze, P. Kjellbom // *Nature*. – 2006. – Vol. 439. – P. 688-694.

- 88) **Tournaire-Roux, C.** Cytosolic pH regulates root water transport during anoxic stress through gating of aquaporins [Text] / C. Tournaire-Roux, M. Sutka, H. Javot, E. Gout, P. Gerbeau, D.T. Luu, R. Bligny, C. Maurel // *Nature*. – 2003. – Vol. 425. – P. 393-397.
- 89) **Tyerman, S.D.** Plant aquaporins: multifunctional water and solute channels with expanding roles [Text] / S.D. Tyerman, C.M. Niemietz, H. Bramley // *Plant Cell*. – 2002. – Vol. 25. – P. 173-194.
- 90) **Vandeleur, R.** Roles of aquaporins in root responses to irrigation [Text] / R. Vandeleur, C. Niemietz, J. Tilbrook, S.D. Tyerman // *Plant Soil*. – 2005. – Vol. 274. – P. 141–161.
- 91) **Vandeleur, R.K.** Rapid shoot-to-root signalling regulates root hydraulic conductance via aquaporins [Text] / R.K. Vandeleur, W. Sullivan, A. Athman, C. Jordans, M. Gilliam, B.N. Kaiser, S.D. Tyerman // *Plant Cell Environ.* – 2014. – Vol. 37. – P. 520-538.
- 92) **Van Wilder, V.** Maize plasma membrane aquaporins belonging to the PIP1 and PIP2 subgroups are in vivo phosphorylated [Text] / V. Van Wilder, U. Miecielica, H. Degand, R. Derua, E. Waelkens, F. Chaumont // *Plant Cell Physiol.* – 2008. – Vol. 49. – P. 1364-1377.
- 93) **Velikanov, G.A.** Membrane water permeability of maize root cells under two levels of oxidative stress [Text] / G.A. Velikanov, T.A. Sibgatullin, L.P. Belova, I.F. Ionenko *Protoplasma* // *Plant Cell Physiol.* – 2015. – Vol. 50. – P. 328-343.
- 94) **Verdoucq, L.** Structure-function analysis of plant aquaporin AtPIP2;1 gating by divalent cations and protons [Text] / L. Verdoucq, A. Grondin, C. Maurel // *Biochem* – 2008. – Vol. 415. – P. 409-416.
- 95) **Von, T.S.** Lanthanum uptake from soil and nutrient solution and its effect on plant growth [Text] / T.S. Von, U.J. Schmidhalter // *Plant Nutr Soil Sci.* – 2005. – Vol. 168. – P. 574-580.
- 96) **Wang, L.** Rare earth elements activate endocytosis in plant cells [Text] / L. Wang, J. Lic, Q. Zhoub, G. Yanga, X. Lan Ding, X. Lia, C. Xin Caia, Z.



Zhangf, H. Yan Weia, T. Hong Lug, X. Wang Dengc, X. Hua Huanga // J Biol Inorg Chem. – 2014. – Vol. 12. – P. 120-129.

- 97) **Xiong, B.K.** Reviews of the use of REE-based fertilizer in the past of three decades [Text] / B.K. Xiong, S.R. Zhang, B.S. Guo, W. Zheng // Symposium on the Use of REE in Agriculture of China, Baotou, 8-10 november 2001. – P. 182-193.
- 98) **Zhang, W.H.** Effect of low O<sub>2</sub> concentration and azide on hydraulic conductivity and osmotic volume of the cortical cells of wheat roots [Text] / W.H. Zhang, S.D. Tyerman // Aust. J. Plant Physiol. – 1991. – Vol. 18. – P. 603-613.
- 99) **Zeidel, M.L.** Ultrastructure, pharmacologic inhibition, and transport selectivity of aquaporin channel-forming integral protein in proteoliposomes [Text] / M.L. Zeidel, S. Nielsen, B.L. Smith // Biochem. – 1994. – Vol. 33. – P. 1606-1615.
- 100) **Zeng, F.L.** The effects of La on the peroxidation of membrane lipids in wheat seedling leaves under osmotic stress [Text] / F.L. Zeng, Y. An, H.T. Zhang, M.F. Zhang // Biol Trace Elem Res. –1999. – Vol. 69. – P. 141-150.
- 101) **Zhu, G.L.** Water transport across maize roots [Text] / G.L. Zhu, E. Steudle // Plant Physiol. – 1991. – Vol. 95. – P. 305-315.