

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНОВ МЕДИ
НА РОГОЛИСТНИК ПОГРУЖЕННЫЙ (*CERATOPHYLLUM DEMERSUM L.*)**

© 2024

Бочка В.В., Григорьев Ю.С., Сорокина Г.А., Корнякова К.И.*Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Российская Федерация)*

Аннотация. В данной статье представлены результаты исследования влияния ионов меди в концентрациях 0,01–0,16 мг/дм³ в лабораторных условиях на устойчивость высшего водного растения – роголистника погруженного. Несмотря на то, что медь является биофильным элементом, все изученные концентрации ионов данного элемента оказали негативное воздействие на прирост массы растений и величину относительного параметра замедленной флуоресценции хлорофилла (ОПЗФ) уже на первые сутки экспонирования. В течение семисуточного токсикологического эксперимента подавление роста растений при воздействии токсиканта усиливалось. Наибольшее снижение ОПЗФ по сравнению с контролем во всех исследованных концентрациях ионов меди наблюдается на первые сутки эксперимента. Однако после длительного периода нахождения роголистника в токсичной среде происходит его частичная адаптация, в результате которой некоторые части этого растения сохраняют фотосинтетическую активность. Установлено, что растения сохраняют свою жизнеспособность до концентрации 0,02 мг/дм³, соответствующей 20 ПДК в водах объектов рыбохозяйственного значения. Концентрации 0,04 мг/дм³ и выше уже на первые сутки привели к потере листьев. Устойчивость растения к действию ионов меди позволяет рассматривать его как потенциальный фиторемедиант вод, загрязненных соединениями данного элемента.

Ключевые слова: ионы меди; водные макрофиты; тяжелые металлы; флуоресценция хлорофилла; относительный показатель замедленной флуоресценции.

**THE EFFECT OF COPPER IONS
ON SUBMERGED HORNWORT (*CERATOPHYLLUM DEMERSUM L.*)**

© 2024

Bochka V.V., Grigoriev Yu.S., Sorokina G.A., Kornyakova K.I.*Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russian Federation)*

Abstract. This article presents the results of a study of the effect of copper ions at concentrations of 0,01–0,16 mg/dm³ in laboratory conditions on the stability of the highest aquatic plant, the submerged hornwort. Despite the fact that copper is a biophilic element, all the studied ion concentrations of this element had a negative effect on plant weight gain and the value of the relative parameter of delayed chlorophyll fluorescence already on the first day of exposure. During a seven-day toxicological experiment, the suppression of plant growth when exposed to a toxicant increased. The greatest decrease in the relative parameter of delayed fluorescence compared with the control in all studied concentrations of copper ions was observed on the first day of the experiment. However, after a long period of stay of the hornwort in a toxic environment, its partial adaptation occurs, as a result of which some parts of this plant retain photosynthetic activity. It was found that plants retain their viability up to a concentration of 0,02 mg/dm³ corresponding to 20 MPC in the waters of fisheries facilities. Concentrations of 0,04 mg/dm³ and higher already on the first day led to the loss of leaves. The plant's resistance to the action of copper ions allows it to be considered as a potential phytoremediant of waters contaminated with compounds of this element.

Keywords: copper ions; aquatic macrophytes; heavy metals; chlorophyll fluorescence; relative index of delayed fluorescence.

Введение

Загрязнение водной среды соединениями тяжелых металлов приводит к негативным последствиям для живых организмов, в том числе и для человека [1]. Тяжелые металлы поступают в окружающую среду из природных и антропогенных источников. С развитием промышленности и нарушением естественных биогеохимических циклов проблема загрязнения данными поллютантами становится все более серьезной [2].

Медь занимает третье место по потреблению в мире [3]. Соединения двухвалентной меди широко распространены – они используются в строительстве, текстильной промышленности, электронике и сельском хозяйстве (пестициды и фунгициды) [4, p. 870]. Предельно допустимая концентрация ионов Cu²⁺, элемента II класса опасности, в водах объектов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рв}) составляет 0,001 мг/дм³ [5]. Загрязнение природных вод соединениями меди характерно для многих водоемов Красноярского края.

Например, основываясь на повторяемости случаев превышения ПДК, загрязненность воды рек Чулым, Енисей, Кача в 2023 году определяется как «характерная» по ионам меди [6, с. 85–90].

Медь является микроэлементом, вовлеченным во многие биохимические процессы живых организмов. Например, данный элемент задействован в процессах митохондриальном дыхании и принимает участие в образовании лигнина [7, р. 270; 8]. Медь играет важнейшую роль в электронном транспорте между фотосистемами I и II [9, р. 28]. Ионы данного металла являются кофакторами различных ферментов [10; 11]. Однако медь способна изменять свой окислительно-восстановительный потенциал, образуя активные формы кислорода [12]. Токсическое действие данного металла может проявляться в угнетении процессов роста и хлорозах, повреждении хлорофилла [13, с. 100; 14, р. 438; 15]. Кроме того, повышенные концентрации ионов меди могут ингибировать поглощение железа растением [16; 17, р. 234].

Некоторые растения способны аккумулировать тяжелые металлы в своих тканях, что позволяет использовать их для очистки среды от данных поллютантов – фиторемедиации [18, р. 260–265]. При этом растение должно быть устойчивым к высоким концентрациям токсиканта. Этим требованиям соответствуют многие виды водных макрофитов [19]. Исследования M.L. Matache et al. и A. Parnian et al. подтвердили, что такое водное растение как роголистник погруженный является гипераккумулятором кадмия [20; 21]. Согласно V. Kastratović et al., данное растение наиболее эффективно для очистки природных водоемов от ионов марганца и цинка [22, р. 1457]. В статье M. Chogom et al. отмечается, что *C. demersum* способен очищать воду от никеля [23].

В связи с этим целью данной работы является определение устойчивости роголистника погруженного (*Ceratophyllum demersum* L.) как потенциального фиторемедианта к действию ионов меди.

Материалы и методы

В качестве тест-объекта в экспериментах используется роголистник погруженный (*Ceratophyllum demersum* L.), выращенный в лабораторных условиях. *C. demersum* – многолетнее травянистое растение без корня, широко распространенное в пресноводных водоемах [24, с. 188].

Для исследования воздействия ионов меди на роголистник погруженный растения массой порядка 0,100 г помещались во флаконы культиватора УЭР-03 (ООО «СФУ-Система», Красноярск, Россия), заполненные 50 мл 20% среды Штейнберга. Культиватор обеспечивал активный газообмен с окружающей средой. Ионы металла в форме сульфата меди (II) ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) вносились в концентрациях 0,01–0,16 мг Cu^{2+} /л в трех повторностях. Контрольные образцы экспонировались без добавления токсиканта. Эксперимент продолжался в течение 7 суток. Температура +24°C и освещенность 2000 люкс с фотопериодом 12/12 ч. (день/ночь) поддерживались в климатостате В4 (ООО «СФУ-Система», Красноярск, Россия).

Прирост массы растений вычислялся по формуле:

$$G_m = (m_2 - m_1) / m_1 \times 100\%,$$

где G_m – прирост массы, %; m_2 – масса растения на рассматриваемые сутки эксперимента, г; m_1 – масса растения на начало эксперимента, г.

Регистрация параметров замедленной флуоресценции (длительного послесвечения) хлорофилла для оценки состояния фотосинтетического аппарата производилась на приборе Фотон-10 (ООО «СФУ-Система», Красноярск, Россия). Параметры флуоресценции регистрируются в двух режимах: при возбуждении свечения «высоким» и «низким» светом. Интенсивность «высокого света» (регистрируется ЗФв) достаточна для обеспечения активного фотосинтетического транспорта электронов. В этих условиях в кривой затухания свечения после всплеск возбуждающего света доминируют быстрые компоненты затухания. При подавлении фотосинтетического транспорта электронов или нарушении целостности мембран хлоропластов интенсивность быстрых (микро- и миллисекундных) компонент затухания уменьшается. На «низком свету» (регистрируется ЗФн) представлены в основном медленные компоненты затухания. При подавлении электронного транспорта интенсивность медленных (секундных) компонент затухания ЗФ возрастает. Таким образом, относительный показатель замедленной флуоресценции хлорофилла (ОПЗФ), рассчитываемый как отношение ЗФв/ЗФн, многократно снижается при нарушениях в работе фотосинтетического аппарата [25].

Статистическая обработка данных производилась в программе Microsoft Excel 2021.

Результаты и обсуждение

Проведенные эксперименты по изучению воздействия ионов меди на *C. demersum* показали, что в диапазоне концентраций 0,01–0,16 мг/дм³ оказывали негативное влияние на прирост массы растения. Данные, представленные на рисунке 1, указывают на значительное ухудшение жизнеспособности роголистника при концентрации 0,04 мг/дм³. В этих условиях прирост первоначальной массы растения становится отрицательным уже на первые сутки экспонирования в среде с токсикантом (рис. 1).

В течение всего семисуточного токсикологического эксперимента подавление роста растений усиливалось (рис. 2). При концентрациях ионов меди выше 0,04 мг/дм³ прирост был отрицательным, а в действие максимальных концентрациях приводило к потере растением всего листового покрова.

При концентрациях 0,08 и 0,16 мг/дм³ растения потеряли весь листовый покров, что привело к отрицательным значениям прироста биомассы. Последнее, вероятно, связано с тем, что *C. demersum* поглощает тяжелые металлы из среды преимущественно через листья [26]. В свою очередь, уменьшение площади листовых пластинок заметно сказывается на интенсивности фотосинтеза [27, с. 29].

Регистрация в этих условиях замедленной флуоресценции роголистника показала (рис. 3), что наибольшее снижение ОПЗФ по сравнению с контролем во всех исследованных концентрациях ионов меди наблюдается на первые сутки эксперимента.

При концентрациях ионов меди 0,02 мг/дм³ и выше, при которых наблюдается снижение интенсивности ЗФв при относительной стабильности свечения на низком свету (ЗФн), свидетельствует о подавлении фотосинтетического электронного транспорта у роголистника [25].

На седьмые сутки эксперимента на фоне общего снижения интенсивности замедленной флуоресценции при повышенных концентрациях ионов меди, обусловленного отмиранием значительной части растения, значение ОПЗФ остается близким контрольному

варианту (рис. 4). Очевидно, после длительного периода нахождения роголистника в токсичной среде происходит его частичная адаптация, в результате которой некоторые части этого растения сохраняют фотосинтетическую активность.

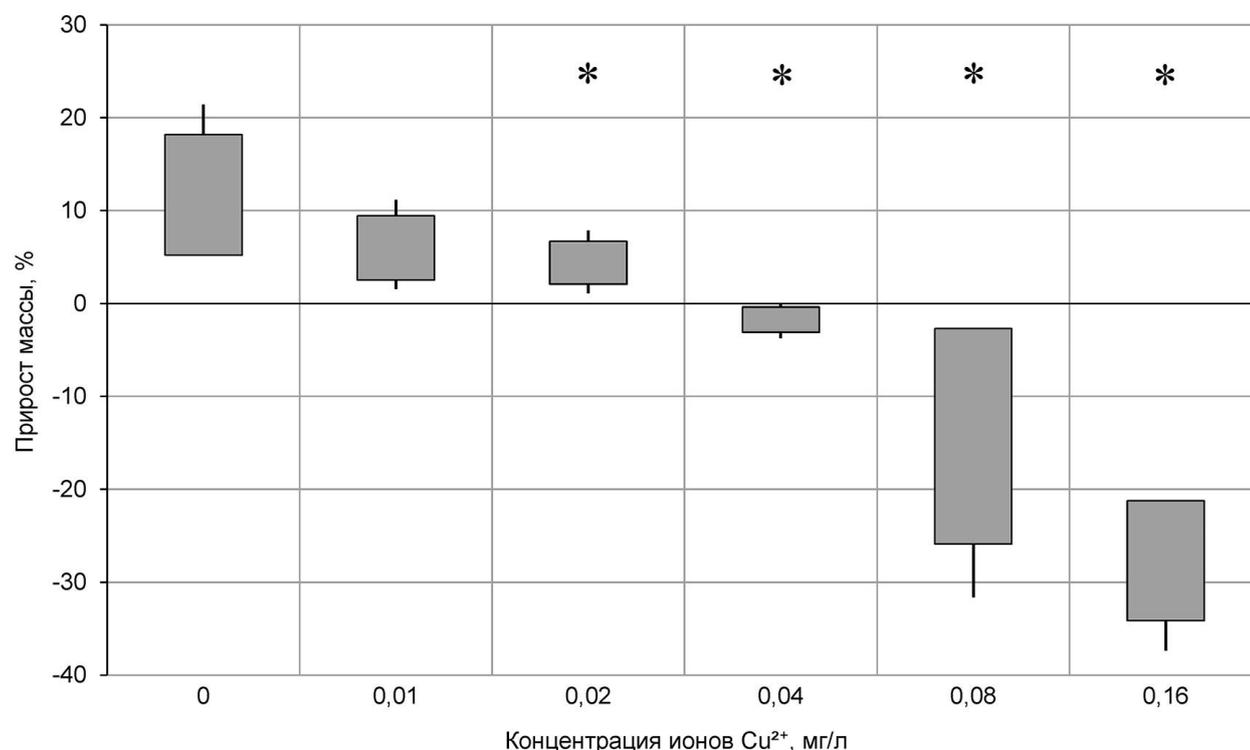


Рисунок 1 – Прирост массы роголистника погруженного при воздействии ионов меди на первые сутки эксперимента.
Примечание: * – достоверные отличия контрольной и опытной проб ($P = 0,95$)

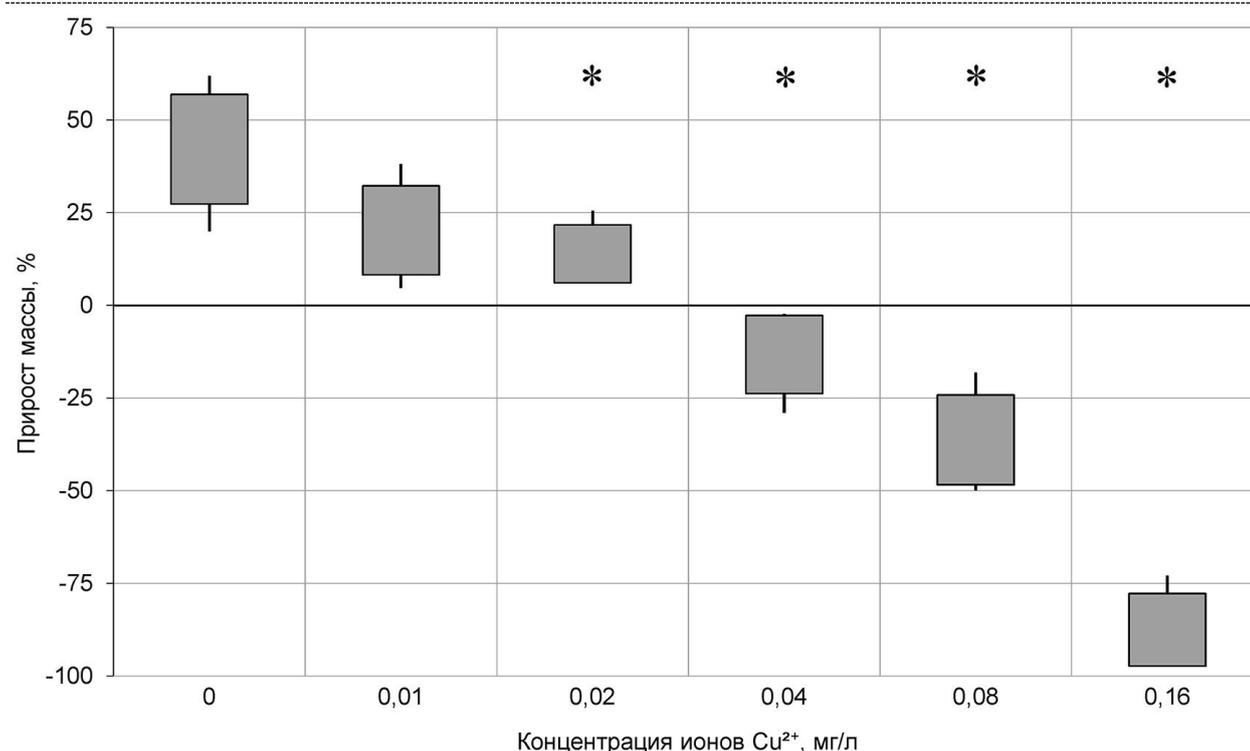


Рисунок 2 – Прирост массы роголистника погруженного при воздействии ионов меди на седьмые сутки эксперимента.
Примечание: * – достоверные отличия контрольной и опытной проб ($P = 0,95$)

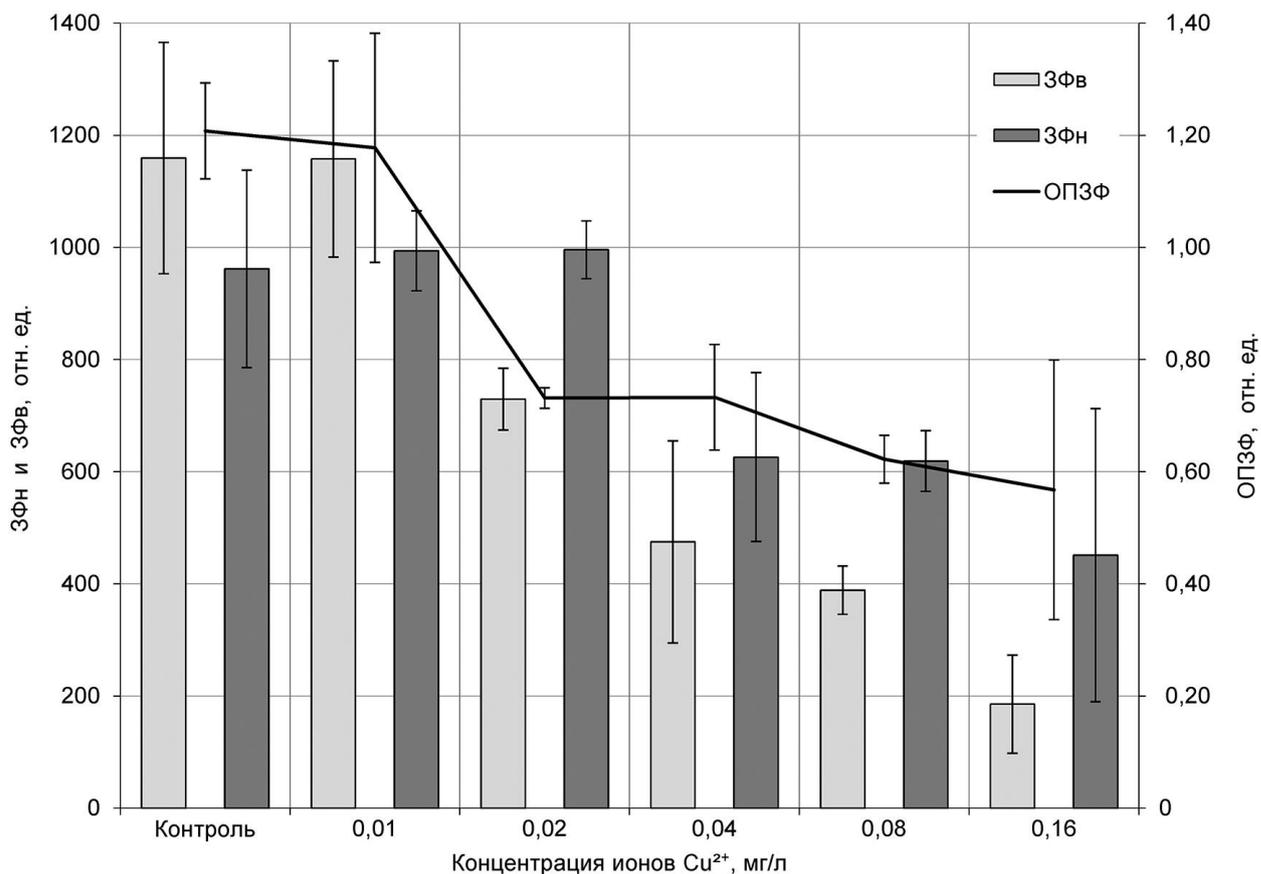


Рисунок 3 – Показатели замедленной флуоресценции роголистника погруженного на первые сутки эксперимента

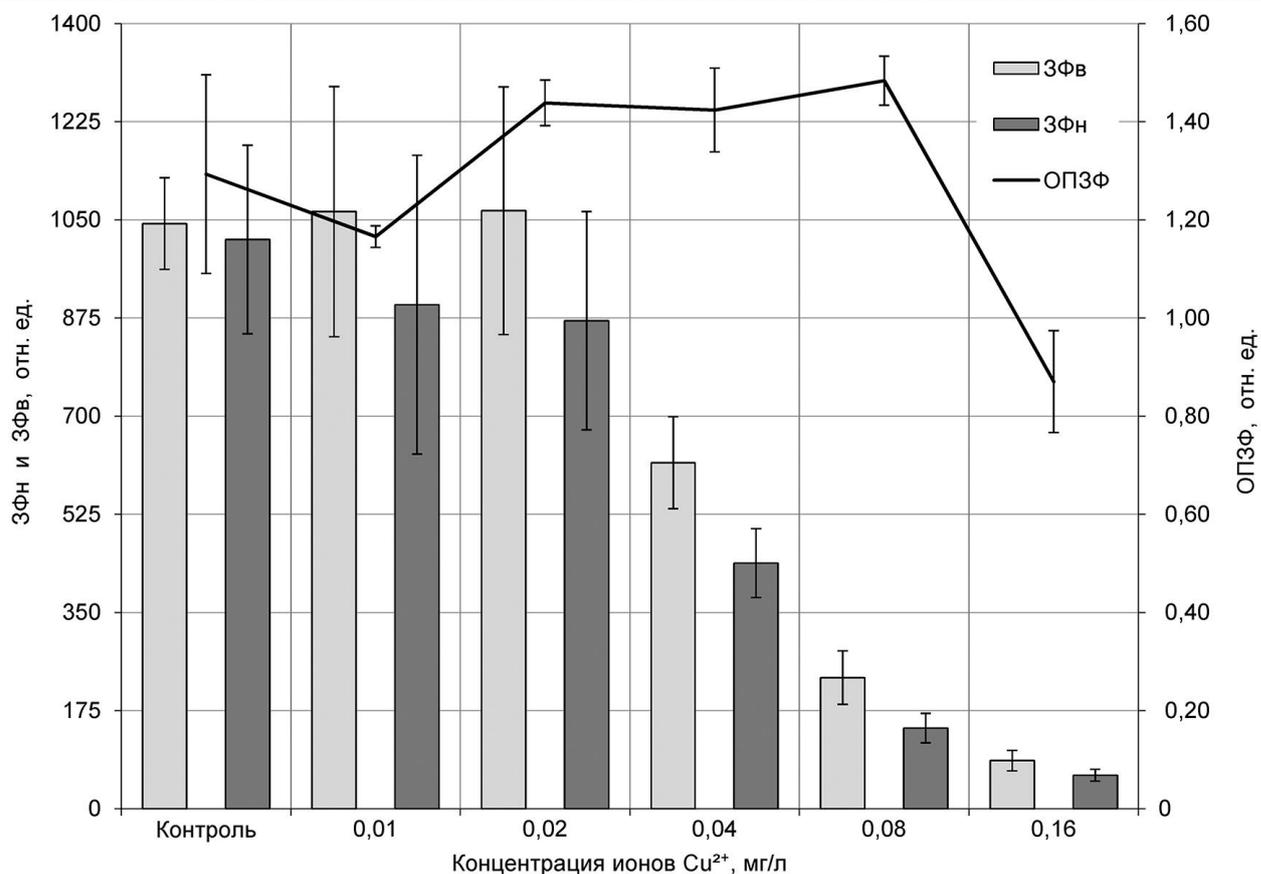


Рисунок 4 – Показатели замедленной флуоресценции роголистника погруженного на седьмые сутки эксперимента

Заключение

В целом, можно отметить, что несмотря на то, что медь является биофильным элементом, внесение ее в концентрации выше 0,04 мг/дм³ оказывает токсическое воздействие как на прирост, так и на флуоресцентные показатели роголистника погруженного. В этих условиях происходит снижение прироста массы растений, наблюдается разрушение мягких тканей, приводящее к распадению мутовок.

Наибольшее уменьшение ОПЗФ по сравнению с контрольным вариантом отмечается на первые сутки экспозиции. К концу экспозиции (7-е сутки) эффект сглаживается, что может обуславливаться адаптацией роголистника погруженного к условиям загрязнения среды соединениями меди, а также снижением концентрации ионов данного металла в результате его поглощения.

Не все исследованные концентрации ионов меди являются летальными для растения. Так, до концентрации 0,02 мг/дм³, соответствующей 20 ПДК_{рх}, роголистник погруженный сохраняет свою жизнеспособность, что подтверждается увеличением массы растений, а также величиной флуоресцентных показателей.

В дальнейшем планируется оценка аккумуляционного потенциала данного растения по отношению к ионам меди как в искусственной среде, так и в природных водах.

Список литературы:

1. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А., Кочуров Б.И. Аккумуляция тяжелых металлов водными растениями при техногенезе // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 2. С. 81–85.
2. Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам / отв. ред. Н.Н. Немова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 172 с.
3. Shabbir Z., Sardar A., Shabbir A., Abbas G., Shamshad S., Khalid S., Murtaza G., Dumat C., Shahid M. Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment // Chemosphere. 2020. Vol. 259. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127436.
4. Ali H., Khan E., Sajad M.A. Phytoremediation of heavy metals – concepts and applications // Chemosphere. 2013. Vol. 91, iss. 7. P. 869–881. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.01.075.
5. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения [Электронный ресурс] // Гарант.ру. <https://base.garant.ru/71586774>.
6. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2023 году». Красноярск, 2024. 386 с.
7. Garcia L., Welchen E., Gonzalez D.H. Mitochondria and copper homeostasis in plants // Mitochondrion. 2014. Vol. 19, part B. P. 269–274. DOI: 10.1016/j.mito.2014.02.011.
8. Printz B., Lutts S., Hausman J.-F., Sergeant K. Copper trafficking in plants and its implication on cell wall dynamics // Frontiers in Plant Science. 2016. Vol. 7. DOI: 10.3389/fpls.2016.00601.
9. Thomas G., Stärk H.-J., Wellenreuther G., Dickinson B.C., Küpper H. Effects of nanomolar copper on water plants – comparison of biochemical and biophysical mechanisms of

deficiency and sublethal toxicity under environmentally relevant conditions // Aquatic Toxicology. 2013. Vol. 140–141. P. 27–36. DOI: 10.1016/j.aquatox.2013.05.008.

10. Constabel C.P., Barbehenn R. Defensive roles of polyphenol oxidase in plants // Induced Plant Resistance to Herbivory. Dordrecht: Springer, 2008. P. 253–270. DOI: 10.1007/978-1-4020-8182-8_12.

11. Tavladoraki P., Cona A., Angelini R. Copper-containing amine oxidases and FAD-dependent polyamine oxidases are key players in plant tissue differentiation and organ development // Frontiers in Plant Science. 2016. Vol. 7. DOI: 10.3389/fpls.2016.00824.

12. Krayem M., El Khatib S., Hassan Y., Deluchat V., Labrousse P. In search for potential biomarkers of copper stress in aquatic plants // Aquatic toxicology. 2021. Vol. 239. DOI: 10.1016/j.aquatox.2021.105952.

13. Волков К.С., Иванова Е.М., Велисар С.Г., Куликова А.Л., Кузнецова Н.А., Холодова В.П., Кузнецов В.В. Возможности использования растений различных семейств в целях фиторемедиации загрязненных медью территорий // Проблемы региональной экологии. 2013. № 1. С. 97–101.

14. Küpper H., Šetlík I., Spiller M., Küpper F.C., Prášil O. Heavy metal-induced inhibition of photosynthesis: targets of *in vivo* heavy metal chlorophyll formation // Journal of Phycology. 2002. Vol. 38, iss. 3. P. 429–441. DOI: 10.1046/j.1529-8817.2002.01148.x.

15. Rehman A.U., Nazir S., Irshad R., Tahir K., Rehman K.U., Islam R.U., Wahab Z. Toxicity of heavy metals in plants and animals and their uptake by magnetic iron oxide nanoparticles // Journal of Molecular Liquids. 2021. Vol. 321. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.114455.

16. Rai S., Singh P.K., Mankotia S., Swain J., Satbhai S.B. Iron homeostasis in plants and its crosstalk with copper, zinc, and manganese // Plant Stress. 2021. Vol. 1. DOI: 10.1016/j.jstress.2021.100008.

17. Thomas G., Andresen E., Mattusch J., Hubáček T., Küpper H. Deficiency and toxicity of nanomolar copper in low irradiance – a physiological and metalloproteomic study in the aquatic plant *Ceratophyllum demersum* // Aquatic Toxicology. 2016. Vol. 177. P. 226–236. DOI: 10.1016/j.aquatox.2016.05.016.

18. Prasad M.N.V. Aquatic plants for phytotechnology // Environmental Bioremediation Technologies. Berlin–Heidelberg: Springer, 2007. P. 259–274. DOI: 10.1007/978-3-540-34793-4_11.

19. Kafle A., Timilsina A., Gautam A., Adhikari K., Bhattarai A., Aryal N. Phytoremediation: mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents // Environmental Advances. 2022. Vol. 8. DOI: 10.1016/j.envadv.2022.100203.

20. Matache M.L., Marin C., Rozyłowicz L., Tudorache A. Plants accumulating heavy metals in the Danube River wetlands // Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2013. Vol. 11. DOI: 10.1186/2052-336x-11-39.

21. Pamian A., Chorom M., Jaafarzadeh N., Dinarvand M. Use of two aquatic macrophytes for the removal of heavy metals from synthetic medium // Ecohydrology & Hydrobiology. 2016. Vol. 16, iss. 3. P. 194–200. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2016.07.001.

22. Kastratović V., Krivokapić S., Bigović M., Đurović D., Blagojević N. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Ceratophyllum demersum* from the Skadar Lake, Montenegro // Journal of the Serbian Chemical Society. 2014. Vol. 79, iss. 11. P. 1445–1460. DOI: 10.2298/jsc140409074k.

23. Chorom M., Pamian A., Jaafarzadeh N. Nickel removal by the aquatic plant (*Ceratophyllum demersum* L.) // In-

ternational Journal of Environmental Science and Development. 2012. Vol. 3, № 4. P. 372–375. DOI: 10.7763/ijesd.2012.v3.250.

24. Губанов И.А., Киселева К.В., Новиков В.С., Тихомиров В.Н. Иллюстрированный определитель растений Средней России. Т. 1. Папоротники, хвощи, плауны, голосеменные, покрытосеменные (однодольные). М.: Т-во научных изданий КМК, Ин-т технологических исследований, 2002. 526 с.

25. Григорьев Ю.С., Стравинскене Е.С. Методика определения токсичности питьевых, природных и сточных вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод

и отходов по изменению относительного показателя замедленной флуоресценции культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer). ПНД Ф Т 14.1:2:4.16-2009. Т 16.1:2.3:3.14-2009. М.: Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия, 2012. 43 с.

26. Qadri H., Uqab B., Javeed O., Dar G.H., Bhat R.A. *Ceratophyllum demersum* – an accretion biotool for heavy metal remediation // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 806, part 2. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150548.

27. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с.

Информация об авторе(-ах):	Information about the author(-s):
<p>Бочка Валерия Вячеславовна, аспирант кафедры экологии и природопользования; Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Российская Федерация). E-mail: vbochka@sfu-kras.ru.</p> <p>Григорьев Юрий Сергеевич, кандидат биологических наук, профессор кафедры экологии и природопользования; Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Российская Федерация). E-mail: gr2897@gmail.com.</p> <p>Сорокина Галина Александровна, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и природопользования; Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Российская Федерация). E-mail: sorokina_gas@mail.ru.</p> <p>Корнякова Карина Ильясовна, магистрант кафедры экологии и природопользования; Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Российская Федерация). E-mail: kkornyakova-eb19@stud.sfu-kras.ru.</p>	<p>Bochka Valeriya Viacheslavovna, postgraduate student of Ecology and Environmental Management Department; Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russian Federation). E-mail: vbochka@sfu-kras.ru.</p> <p>Grigoriev Yuri Sergeevich, candidate of biological sciences, professor of Ecology and Environmental Management Department; Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russian Federation). E-mail: gr2897@gmail.com.</p> <p>Sorokina Galina Alexandrovna, candidate of biological sciences, associate professor of Ecology and Environmental Management Department; Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russian Federation). E-mail: sorokina_gas@mail.ru.</p> <p>Kornyakova Karina Ilyasovna, master student of Ecology and Environmental Management Department; Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russian Federation). E-mail: kkornyakova-eb19@stud.sfu-kras.ru.</p>

Для цитирования:

Бочка В.В., Григорьев Ю.С., Сорокина Г.А., Корнякова К.И. Воздействие ионов меди на роголистник погруженный (*Ceratophyllum demersum* L.) // Самарский научный вестник. 2024. Т. 13, № 3. С. 8–13. DOI: 10.55355/snv2024133101.