

КРАТКИЕ
СООБЩЕНИЯ

УДК 504.45.054-34

ВЛИЯНИЕ НИКЕЛЯ И МЕДИ НА РАЗВИТИЕ ПРОРОСТКОВ
ЧЕРЕДЫ ЛУЧИСТОЙ *Bidens radiata*

© 2022 г. Е. Г. Крылова*

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук,
пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия

*e-mail: panova@ibiw.ru

Поступила в редакцию 09.11.2020 г.

После доработки 15.12.2021 г.

Принята к публикации 20.12.2021 г.

Изучено влияние сульфатов никеля и меди в различных концентрациях на рост и развитие проростков *Bidens radiata* Thuill. Показано, что соль никеля токсичнее соли меди и их влияние в большей степени сказывается на корневой системе. Проведено сравнение устойчивости к токсическому действию никеля и меди *B. radiata* с изученными ранее *B. tripartita*, *B. cernua* и *B. frondosa*. Уточнены ряды устойчивости представителей рода *Bidens* к токсическому действию тяжелых металлов: для никеля — *B. tripartita* > *B. frondosa* > *B. radiata* > *B. cernua*; для меди — *B. radiata* > *B. tripartita* > *B. cernua* > *B. frondosa*.

Ключевые слова: сульфат никеля, сульфат меди, *Bidens radiata*, развитие проростков, морфометрические показатели

DOI: 10.31857/S0320965222030093

Растения относятся к важным компонентам водных экосистем и выявление их устойчивости к загрязнению ТМ — приоритетная задача в современной биологии (Devi, Prasad, 2005; Singh, Malik, 2011; Малева и др., 2012). Способность высших водных растений накапливать ТМ в значительных количествах, образуя нетоксичные комплексы, открывает широкие перспективы для использования их при мониторинге в качестве тест-объектов и в целях фиторемедиации (Malec et al., 2009; Maleva et al., 2009; Verbruggen et al., 2009; Zohra et al., 2014).

Большой интерес вызывает токсическое действие эссенциальных ТМ, например никеля и меди, которые в высоких концентрациях токсичны для роста и жизнеспособности растений, вызывая нарушения физиолого-биохимических процессов в клетках (Devi, Prasad, 2005; Chen et al., 2009; Ху и др., 2009; Yguela, 2013). Устойчивость растений к их воздействию зависит от видовой принадлежности, экотипа, стадии роста, жизненной стратегии, а также концентрации и времени действия токсиканта (Yguela, 2009; Косицына и др., 2010; Yusuf et al., 2011; Малева и др., 2012).

Ранее была показана высокая устойчивость на начальных этапах онтогенеза *Bidens tripartita* L., *B. cernua* L. и *B. frondosa* L. к действию ТМ (Крылова, Васильева, 2011а, 2011б; Крылова и др., 2015; Крылова и др., 2018; Крылова, 2020). Ареал обита-

ния представителей рода широк (Восточное и Северное полушария), они встречаются в долинах рек и заполнивших их водохранилищ Евразии, в том числе на всей территории России (Ковальчук и др., 2013; Vinogradova et al., 2014). В продолжение изучения адаптационных возможностей широко распространенных видов рода *Bidens* была исследована череда лучистая, обитающая на обсыхающих мелководьях водохранилищ, рек и влажных лугах (Лисицына и др., 2009; Маевский, 2014).

Семянки череды лучистой были собирали в Ярославской обл. на мелководьях р. Чеснава в 2019 г. После холодной влажной стратификации при температуре 4–8°C в течение 4–5 мес семянки по 30 шт. на чашку Петри проращивали в люминесценте при 20–25°C на фильтровальной бумаге, смоченной растворами NiSO₄·7H₂O и CuSO₄·5H₂O в разных концентрациях 0.1, 1, 10, 25, 50 мг/л никеля и меди. Контролем служила дистиллированная вода. Опыты проводили в трехкратной повторности при освещенности 3200 лк и фотопериоде 9/15, продолжительность опытов 15 сут. По окончании опыта у 10 проростков каждого варианта измеряли длину главного корня, гипокотили, семядолей, первого настоящего листа, ширину семядолей и количество придаточных корней. Данные представляли в виде средних и их стандартных отклонений ($\bar{x} \pm SD$). Нормальность распределения определяли в программе Statistica 8.0. Достовер-

Сокращения: ТМ — тяжелые металлы.

Таблица 1. Морфометрические показатели проростков *Bidens radiata*, выращенных при различных концентрациях сульфатов никеля (над чертой) и меди (под чертой) в среде

Показатель	Концентрации сульфатов никеля и меди, мг/л					
	0	0.1	1	10	25	50
Длина главного корня, мм	60.4 ± 5.7	<u>65.3 ± 5.4</u> 47.7 ± 4.1	<u>11.9 ± 1.3*</u> 33.2 ± 2.8*	<u>1.8 ± 0.1*</u> 4.0 ± 0.5*	<u>0.6 ± 0.07*</u> 1.5 ± 0.2*	<u>0</u> 1.2 ± 0.1*
Число придаточных корней, шт.	1.7 ± 0.5	<u>1.6 ± 0.3</u> 1.4 ± 0.3	<u>2.7 ± 0.3</u> 2.4 ± 0.3	<u>0</u> 6.6 ± 0.2*	<u>0</u> 10.1 ± 0.8*	<u>0</u> 6.2 ± 0.6*
Длина гипокотыля, мм	22.3 ± 0.9	<u>22.4 ± 1.4</u> 22.9 ± 1.4	<u>25.6 ± 1.7*</u> 22.7 ± 1.4	<u>15.9 ± 0.6*</u> 17.5 ± 0.9*	<u>5.3 ± 0.2*</u> 11.1 ± 0.9*	<u>0</u> 5.0 ± 0.4*
Длина семядоли, мм	6.4 ± 0.4	<u>5.8 ± 0.3</u> 7.5 ± 0.3*	<u>6.3 ± 0.4</u> 8.3 ± 0.3*	<u>6.1 ± 0.3</u> 7.7 ± 0.2*	<u>5.3 ± 0.2*</u> 6.5 ± 0.3	<u>0.5 ± 0.1*</u> 4.7 ± 0.2*
Ширина семядоли, мм	2.6 ± 0.1	<u>2.6 ± 0.2</u> 2.4 ± 0.1	<u>2.4 ± 0.2</u> 2.9 ± 0.4	<u>2.7 ± 0.2</u> 2.7 ± 0.1	<u>2.6 ± 0.1</u> 2.7 ± 0.05	<u>0.3 ± 0.05*</u> 2.1 ± 0.05*
Длина 1-го листа, мм	1.4 ± 0.1	<u>1.6 ± 0.2</u> 1.2 ± 0.1	<u>1.4 ± 0.1</u> 1.3 ± 0.2	<u>0.5 ± 0.1*</u> 1.5 ± 0.9	<u>0</u> 1.5 ± 0.2	<u>0</u> 0.5 ± 0.01*

* Достоверные различия с контролем при $p < 0.05$.

ность различий величин оценивали по t -критерию Стьюдента при уровне значимости $p \leq 0.05$.

Влияние сульфата никеля на рост и развитие проростков. Важно было изучить токсическое действие различных концентраций сульфатов никеля и меди на рост и развитие проростков абorigineного гигрофита *Bidens radiata* Thuill и сравнить с устойчивостью к ним изученных ранее *B. tripartita*, *B. cernua* и *B. frondosa*

В результате эксперимента выявлено, что начиная с концентрации 1 мг/л, наибольшее токсическое действие никель оказал на длину главного корня *B. radiata* (табл. 1). Угнетение развития главного корня при 50 мг/л ранее было обнаружено и для других видов череды – *B. tripartita*, *B. frondosa*, *B. cernua* (Крылова, Васильева, 2011а).

Придаточные корни *B. radiata* отсутствовали при 10–50 мг/л никеля, что совпадает с действием никеля на *B. cernua*. Более устойчивой оказалась корневая система у *B. tripartita*, придаточные корни не развивались только при 50 мг/л (Крылова, Васильева, 2011а). Достоверное отличие длины гипокотыля *B. radiata* при 1–25 мг/л от контрольных значений и угнетение его развития при 50 мг/л сходно с действием никеля на *B. cernua*. У остальных видов этот показатель изменялся незначительно. Выявлены достоверные отличия морфометрических показателей семядолей *B. radiata* при 25 и 50 мг/л от таковых в контроле. Отсутствие семядолей при 50 мг/л никеля в более ранних экспериментах отмечено только у *B. frondosa*. При 25 и 50 мг/л у *B. radiata* угнеталось развитие настоящих листьев, значительные измене-

ния их длины при этих же концентрациях были характерны для *B. cernua*. У *B. tripartita* и *B. frondosa* этот процесс зарегистрирован при 50 мг/л. Таким образом, концентрации 10–50 мг/л сульфата никеля вызывают значительное угнетение развития проростков *B. radiata* и по его влиянию сходны с действием на рост и развитие проростков *B. cernua*. Уточнен ряд устойчивости к токсическому действию ионов никеля для роста и развития проростков разных видов череды, выявленный нами ранее: *B. tripartita* > *B. frondosa* > *B. radiata* > *B. cernua*.

Влияние сульфата меди на рост и развитие проростков. В отличие от никеля, главный и придаточные корни *B. radiata* развивались при всех концентрациях сульфата меди (табл. 1). Однако, при 10–50 мг/л их морфометрические показатели достоверно различались с контрольными значениями, и, если длина главного корня значительно уменьшалась, то количество придаточных корней увеличивалось. Это свидетельствует о стимулировании защитной реакции растения за счет увеличения общей площади придаточных корней и, таким образом, о снижении влияния меди. Совершенно иное наблюдали при действии меди на остальные виды череды. У *B. tripartita* при концентрации 25 и 50 мг/л сульфата меди полностью угнеталось развитие главного корня, у *B. cernua* главный корень не развивался при 10–50 мг/л, у *B. frondosa* резко уменьшалась длина главного корня при 25 и 50 мг/л и отсутствовали придаточные корни при 50 мг/л (Крылова, Васильева, 2011б).

Развитие гипокотыля у *B. radiata* при всех концентрациях и достоверное отличие его размеров от таковых в контроле при 10–50 мг/л сходно с действием меди на другие виды череды. Достоверное изменение размеров семядолей *B. radiata* при 50 мг/л сходно с действием на *B. cernua*. Некоторые концентрации меди вызывали увеличение размеров семядолей у всех изученных видов. Достоверное уменьшение длины настоящего листа при 50 мг/л характерно и для других видов череды. Таким образом, к влиянию меди самым устойчивым был *B. radiata*, только у него при 50 мг/л отмечено наличие главного корня и в ряду устойчивости он занимает лидирующую позицию: *B. radiata* > *B. tripartita* > *B. cernua* > *B. frondosa*.

Внешние проявления токсического действия сульфата никеля. При концентрации 10 мг/л у проростков *B. radiata* начинался частичный некроз главного корня, как и у *B. tripartita* и *B. frondosa*. У *B. cernua* при этой концентрации отмечали полный некроз корней. Некроз придаточных корней не выявлен. Никель, быстро поступая в центральный цилиндр корня наземных растений, ингибирует клеточное деление и останавливает ветвление корня (Серегин и др., 2003; Voornathan, Doran, 2003). Подобным образом никель действует и на растения влажных мест обитания, включая представителей рода *Bidens*. Аналогичное действие свойственно также другим тяжелым металлам, например, кадмию (Shi, Cai, 2009).

Частичный некроз гипокотыля *B. radiata* наблюдали при концентрации 25 мг/л сульфата никеля. Таковой, отмечавшийся ранее при этой концентрации у *B. tripartita*, *B. frondosa* и *B. cernua*, начинался уже при 10 мг/л.

Частичное обесцвечивание и некроз семядолей (с 25 мг/л сульфата никеля) и листьев (при 10 мг/л *B. radiata*) сходно с влиянием никеля на проростки *B. cernua*. При низких концентрациях никеля (0.1 и 1 мг/л) хлороз семядолей и листьев у проростков всех исследуемых видов не выявлен, что свидетельствует об отсутствии подавления фотосинтеза.

Внешние проявления токсического действия сульфата меди. Как и у других видов рода *Bidens* (Крылова, Васильева, 2011б), некроза главного корня проростков *B. radiata* не наблюдали, однако при 10–50 мг/л зарегистрирован некроз придаточных корней, отмечавшийся ранее у *B. tripartita* и *B. cernua*. Не обнаружен некроз гипокотыля, как и при действии меди на проростки *B. tripartita* и *B. frondosa*. Выявлен частичный некроз семядолей при максимальной концентрации меди, однако хлороза семядолей и листьев у проростков всех исследуемых видов не наблюдали, т.е. подавление фотосинтеза не происходило.

Выводы. Сульфат никеля токсичнее сульфата меди для роста и развития проростков *B. radiata*,

о чем свидетельствует существенное изменение морфометрических показателей проростков вида при 10–50 мг/л. Токсический эффект обоих металлов в большей степени сказывается на уменьшении главного корня, что характерно и для других представителей рода *Bidens*. К действию меди *B. radiata* устойчивее других видов рода, а устойчивость к никелю находится между устойчивостью к нему *B. frondosa* и *B. cernua*.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания № 121051100099-5 “Разнообразие, структура и функционирование сообществ водорослей и растений континентальных вод”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ковальчук И.А., Тохтарь В.К., Шевера М.В. 2013. Особенности распространения видов рода *Bidens* (Asteraceae) в сопредельных областях России и Украины // *Фундаментальные исследования*. Т. 11. № 5. С. 939.
- Косицына А.А., Макурин О.М., Нестеров В.Н., Розенцвет О.А. 2010. Влияние ионов меди и кадмия на пигментный комплекс растений семейства Hydrocharitaceae // *Изв. Самарского науч. центра РАН*. Т. 12. № 1. С. 156.
- Крылова Е.Г., Васильева Н.В. 2011а. Действие сульфата никеля на начальные этапы онтогенеза растений трех видов рода *Bidens* (Asteraceae) // *Растительные ресурсы*. Т. 47. Вып. 1. С. 65.
- Крылова Е.Г., Васильева Н.В. 2011б. Прорастание семян и развитие проростков представителей рода *Bidens* (Asteraceae) в растворах сульфата меди // *Вестник Томского гос. ун-та*. № 352. С. 207.
- Крылова Е.Г., Лапиров А.Г., Бердник К.А. 2015. Устойчивость начальных этапов онтогенеза *Bidens cernua* (Asteraceae) к действию ацетатов никеля и меди // *Вестник Северного (арктического) федерального университета*. № 4. С. 66. <https://doi.org/10.17238/issn2227-6572.2015.4.66>
- Крылова Е.Г., Васильева Н.В., Иванова Е.С. 2018. Устойчивость проростков нативного и чужеродного видов рода *Bidens* (Asteraceae) из разных географических популяций к действию тяжелых металлов // *Biosystems Diversity*. № 26(4). С. 287. <https://doi.org/10.15421/011845>
- Крылова Е.Г. 2020. Влияние анионов солей тяжелых металлов на их токсичность для высших водных растений // *Трансформация экосистем*. Т. 3. № 1. С. 1. <https://doi.org/10.23859/estr-190418>
- Лисицына Л.И., Папченков В.Г., Артеменко В.И. 2009. Флора водоемов волжского бассейна. Определитель сосудистых растений. Москва: Товарищество науч. изданий КМК.
- Маевский П.Ф. 2014. Флора средней полосы европейской части России. Москва: Товарищество науч. изданий КМК.

- Малева М.Г., Некрасова Г.Ф., Борисова Г.Г. и др. 2012. Влияние тяжелых металлов на фотосинтетический аппарат и антиоксидантный статус элодеи // Физиол. растений. Т. 59. № 2. С. 216.
- Серегин И.В., Кожевникова А.Д., Казюмина Е.М., Иванов В.Б. 2003. Токсическое действие и распределение никеля в корнях кукурузы // Физиол. растений. Т. 50. № 5. С. 793.
- Ху Ж.Ч., Пей Д.Л., Лиан Ф., Шу Г.С. 2009. Влияние загрязнения воды кадмием на рост растений *Sagittaria sagittifolia* // Физиол. растений. Т. 56. № 5. С. 759.
- Boominathan R., Doran P.M. 2003. Organic acid complexation, heavy metal distribution and the effect of ATPase inhibition in hairy roots of hyperaccumulator plant species // J. Biotechnol. V. 101. № 2. P. 131. [https://doi.org/10.1016/s0168-1656\(02\)00320-6](https://doi.org/10.1016/s0168-1656(02)00320-6)
- Chen C., Huang D., Liu J. 2009. Functions and toxicity of nickel in plants: recent advances and future prospects. Review: Clean. V. 37. № 4–5. P. 304. <https://doi.org/10.1002/clen.200800199>
- Devi S.R., Prasad M.N.V. 2005. Antioxidant activity of *Brassica juncea* plants exposed to high copper concentrations // Plant Physiology. V. 52. № 3. P. 233.
- Malec P., Maleva M.G., Prasad M.N.V., Strzałka K. 2009. Identification and Characterization of Cd-Induced Peptides in *Egeria densa* (Water Weed): Putative Role in Cd Detoxification // Aquat. Toxicol. V. 95. P. 213. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2009.09.007>
- Maleva M.G., Nekrasova G.F., Malec P. et al. 2009. Ecophysiological Tolerance of *Elodea canadensis* to Nickel Exposure // Chemosphere. V. 77. P. 392. <https://doi.org/10.1016/j.chemosp>
- Shi G., Cai Q. 2009. Cadmium tolerance and accumulation in eight potential energy crops // Biotechnology Advances. V. 27. P. 555. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.04.006>
- Singh Y., Malik C. 2011. Phenols and their antioxidant activity in *Brassica juncea* seedlings growing under HgCl₂ stress // J. Microbiol. Biotechnol. V. 1. P. 124.
- Verbruggen N., Hermans C., Schat H. 2009. Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plant // Current Opinion in Plant Biology. V. 12. P. 364. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.05.001>
- Vinogradova Y.K., Galkina M.A., Mayorov S.R. 2014. Variability of the taxa of the *Bidens* L. Genera and the problem of hybridization // Rus. J. Biological Invasions. V. 5. № 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1134/S2075111714010111>
- Yruela I. 2009. Copper in Plants: Acquisition, Transport and Interactions // Funct. Plant Biol. V. 36. № 5. P. 409. <https://doi.org/10.3390/ijms13067828>
- Yruela I. 2013. Transition metals in plant photosynthesis // Metallomic. V. 5. № 9. P. 1090.
- Yusuf M., Fariduddin Q., Hayat S., Ahmad A. 2011. Nickel: an overview of uptake, essentiality and toxicity in plants // Bull. Environ. Contam. Toxicol. V. 86. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s00128-010-0171-1>
- Zohra B.S., Xavier L., Ahamed A. et al. 2014. Metal accumulation and distribution in the organs of Reeds and Cattails in a constructed treatment wetland (Etueffont, France) // Ecol. Engineering. V. 64. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.027>

Seedling Development of *Bidens radiata* in Solutions of Nickel and Copper Sulfates

E. G. Krylova*

Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences,
Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, Russia

*e-mail: panova@ibiw.ru

In laboratory experiments, the effect of nickel and copper sulfates in various concentrations on the growth and development of *Bidens radiata* Thuill. seedlings was studied. It has been shown that nickel salt is more toxic than copper salts and their effect on the root system is more pronounced. A comparison of the resistance of *B. radiata* to the toxic effect of nickel and copper with the previously studied *B. tripartita*, *B. cernua*, and *B. frondosa* was made. The series of resistance of representatives of the genus *Bidens* to the toxic effect of heavy metals has been specified: for nickel – *B. tripartita* > *B. frondosa* > *B. radiata* > *B. cernua*; for copper – *B. radiata* > *B. tripartita* > *B. cernua* > *B. frondosa*.

Keywords: nickel sulfate, copper sulfate, *Bidens radiata*, seedling development, morphometric parameters