



Влияние анионов солей тяжелых металлов на их токсичность для высших водных растений

Е.Г. Крылова

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, 152742, Россия, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109

*rapovaeg@mail.ru

Поступила в редакцию: 18.04.2019
Принята к печати: 29.07.2019
Опубликована онлайн: 05.02.2020

DOI: 10.23859/estr-190418
УДК 504.45.054-34

ISSN 2619-094X Print
ISSN 2619-0931 Online

Проведено сравнение токсического действия солей никеля и меди с разными анионами на начальные этапы онтогенеза *Bidens cernua*. Предел токсичности исследованных солей для прорастания семян не выявлен, что позволяет говорить о высокой устойчивости данного вида к действию ТМ по сравнению с другими представителями водных растений. Показано, что ацетаты обоих металлов токсичнее хлоридов для прорастания семян при высоких концентрациях (500–1000 мг/л), о чем свидетельствует значительное уменьшение лабораторной всхожести. Выявлено также, что для роста проростков ацетат никеля токсичнее его хлорида, о чем говорит достоверное уменьшение (по сравнению с контрольными вариантами) значений длины главного корня и гипокотыля. Вместе с тем хлорид меди оказался токсичнее ацетата меди, о чем можно сделать вывод на основании наблюдений за развитием проростков. Данное исследование свидетельствует о необходимости учитывать анионы при сравнении действия солей ТМ на растения в рамках экспериментов.

Ключевые слова: никель, медь, хлорид, ацетат, прорастание семян, рост и развитие проростков, *Bidens cernua*.

Крылова, Е.Г., 2020. Влияние анионов солей тяжелых металлов на их токсичность для высших водных растений. *Трансформация экосистем* 3 (1), 63–70.

Введение

В связи с ростом антропогенного влияния на окружающую среду большое значение приобретает вопрос о контроле содержания тяжелых металлов (ТМ) в различных звеньях водных экосистем. Тяжелые металлы попадают в водоемы с гидрохимическим стоком, сравнительно быстро распределяются по их объемам, накапливаясь в воде и донных отложениях в различных концентрациях, иногда в сотни раз превышающих ПДК, и оказывают токсическое действие. Растительные организмы как первичное звено трофической цепи первыми испытывают на себе влияние ТМ. Устойчивость

растений к их воздействию зависит от видовой принадлежности, экотипа, стадии роста, концентрации металлов, времени действия и проявляется на различных уровнях организации растительных организмов (Косицына и др., 2010; Малева и др., 2012; Чукина и Борисова, 2010; Yruela, 2009; Yusuf et al., 2011).

Для определения адаптационных возможностей водных растений изучается широкий спектр концентраций различных ТМ в экспериментальных и природных условиях. Особый интерес представляют эссенциальные ТМ (например, медь и никель), которые в высоких концентрациях ток-

сичны для физиологических процессов растений (Серегин и Кожевникова, 2006; Yruela, 2013). Ранее нами также проводились работы на некоторых видах водных растений (Крылова, 2012, 2013).

Большие дозы никеля угнетают рост и продуктивность, подавляют фотосинтез, способствуют хлорозам и некрозам листьев, побурению и торможению роста корневой системы (Серегин и др., 2003; Титов и др., 2011). Избыток меди вызывает изменения в процессах фотосинтеза и дыхания, что особенно отчетливо проявляется в молодых тканях и органах (Косицына и др., 2010).

Авторы некоторых работ считают, что в токсическом действии солей ТМ основное значение принадлежит катиону. Кислотный радикал влияет на этот эффект незначительно в силу изменения растворимости или степени диссоциации соли (Дмитриева и др., 2002). Однако имеются сведения, указывающие, что степень окисления основного элемента аниона может влиять на токсичность солей. Например, токсичность анионов, содержащих хлор и бром, увеличивается с возрастанием их степени окисления, а анионов, включающих азот и серу, снижается при повышении валентности (Левина, 1972). Поэтому целью нашей работы является определение действия анионов разных солей никеля и меди на прорастание семян и морфофизиологические показатели проростков череды поникшей (*Bidens cernua* Linnaeus, 1753), аборигенного гигрофита, распространенного на влажных лугах, в болотно-луговых и прибрежно-водных сообществах (Лисицына и др., 2009; Brändel, 2004).

Материал и методы

Проращивание семян проводилось согласно общепринятой методике (Международные правила..., 1969). Семянки после холодной влажной стратификации в течение 4–5 месяцев по 30 штук проращивали в люминостате в чашках Петри диаметром 90 мм на фильтровальной бумаге, смоченной растворами NiCl_2 , $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, CuCl_2 , в объеме 15 мл на каждую чашку в концентрациях 1, 10, 25, 50, 100, 250, 500, 750 и 1000 мг/л при температуре 20–25 °С. Концентрации выбирали по рекомендации специалистов Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН и рассчитывали для каждой соли на ион металла. Высокие концентрации использовали для выявления предела токсичности никеля и меди для прорастания семян (т.е. той концентрации, при превышении которой они не прорастали). Эксперименты с ацетатами и хлоридами ставились в разные сроки – отсюда различия в контрольных показателях, но не в характере проявления действия разных ТМ. Длительность эксперимента составила 15 суток, повторность опытов трехкратная. Контроль – дистиллированная вода. В конце эксперимента определяли количество про-

росших семян в процентах – лабораторную всхожесть (Shiple and Parent, 1991). Через 15 суток из каждого варианта опыта отбирали случайным образом по 10 проростков для оценки основных морфологических параметров: длины корней (главного и придаточных), гипокотила, семядолей и листьев. Для статистической обработки данных и построения графиков использовали программу Microsoft Office Excel 2003. Данные представили в виде средних и их стандартных отклонений ($\bar{x} \pm SD$). Нормальность распределения определяли в программе Statistica 8.0. Достоверность различий величин оценивали по t-критерию Стьюдента при уровне значимости $p \leq 0.05$.

Результаты и обсуждение

Влияние хлоридов и ацетатов никеля и меди на прорастание семян

Семена в эксперименте прорастали дружно, и их всхожесть в контроле и при низких концентрациях ТМ была высокой, что свидетельствует о нормальном дозревании и способности к прорастанию (Крылова и др., 2014, 2015).

При действии хлорида никеля существенных различий лабораторной всхожести с контрольными значениями не обнаружено (Рис. 1). Значительной стимуляции или угнетения процесса прорастания не наблюдалось независимо от концентрации ТМ. Следует отметить волнообразный характер (последовательное повышение и понижение показателя) изменений лабораторной всхожести при повышении концентрации. Он отражает внутреннюю ритмику развития растений данного вида и указывает на то, что процесс прорастания формируется посредством взаимодействия механизмов выхода семян из состояния покоя с потенциальными возможностями среды, отвечающими условиям реализации прорастания (Иванова, 2006). Под влиянием ацетата никеля в концентрации 25 мг/л и выше отмечено достоверное уменьшение лабораторной всхожести по сравнению с контрольными значениями в 1.1–3.7 раза. Выявленная закономерность показывает постепенное угнетение процесса прорастания при возрастании концентрации исследуемой соли. Несмотря на изменения лабораторной всхожести, предела токсичности никеля для прорастания семян *B. cernua* не выявлено. Ускорение прорастания при 50 мг/л (хлорид) и при 25 и 50 мг/л (ацетат), возможно, связано с активацией механизмов защиты и детоксикации ТМ (Розенцвет и др., 2003). В целом ацетат никеля значительно токсичнее хлорида никеля при высоких концентрациях ТМ (250–1000 мг/л).

Хлорид и ацетат меди оказались токсичнее солей никеля для прорастания семян (Рис. 2).

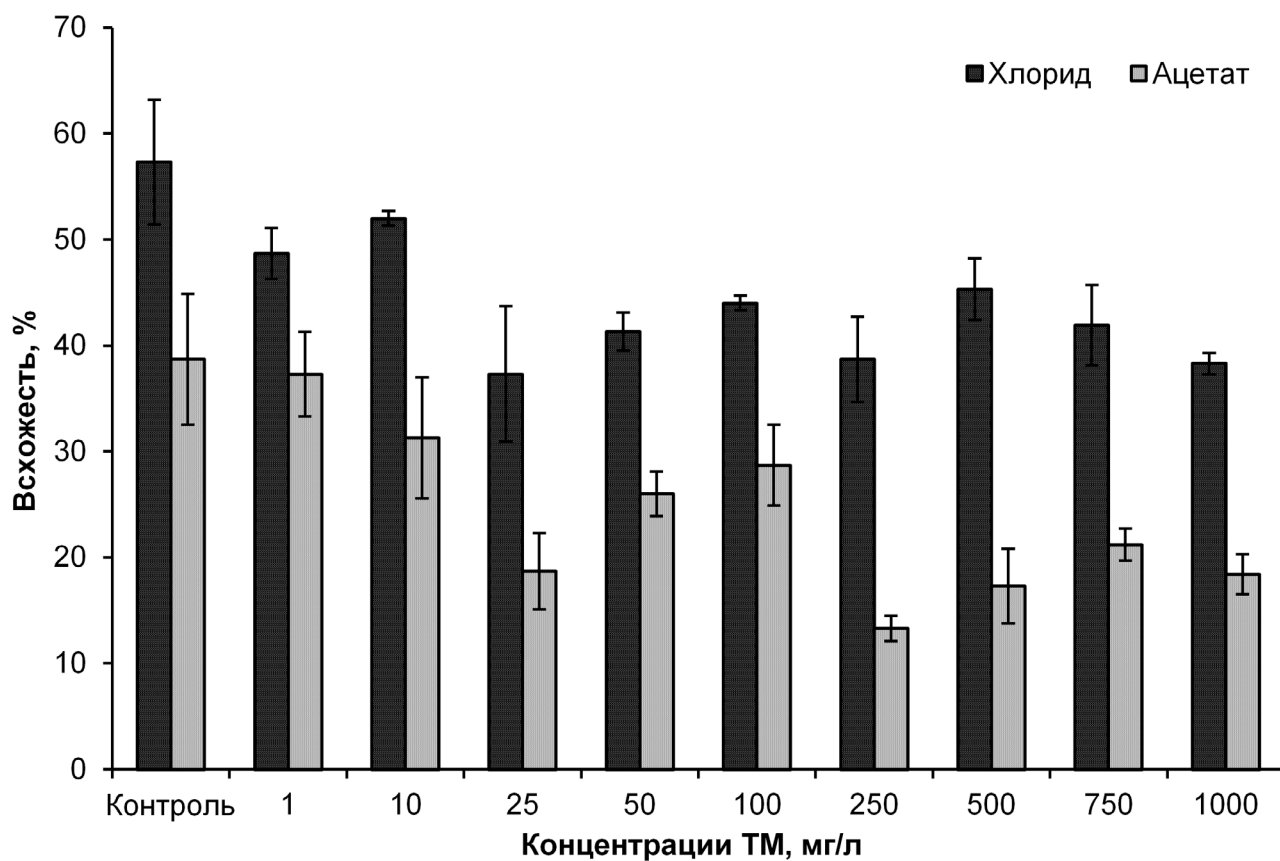


Рис. 1. Влияние солей никеля на лабораторную всхожесть семян *V. setiva*.

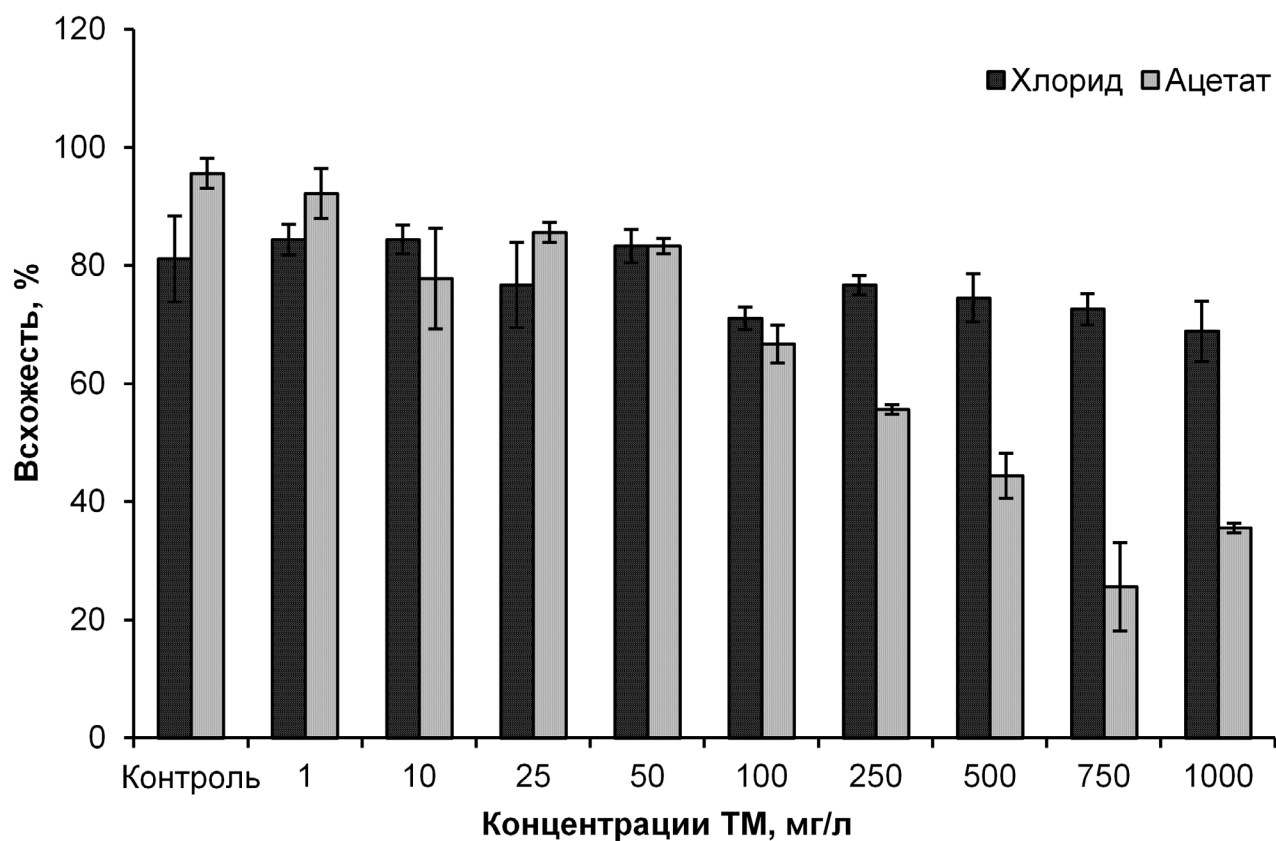


Рис. 2. Влияние солей меди на лабораторную всхожесть семян *V. cernua*.

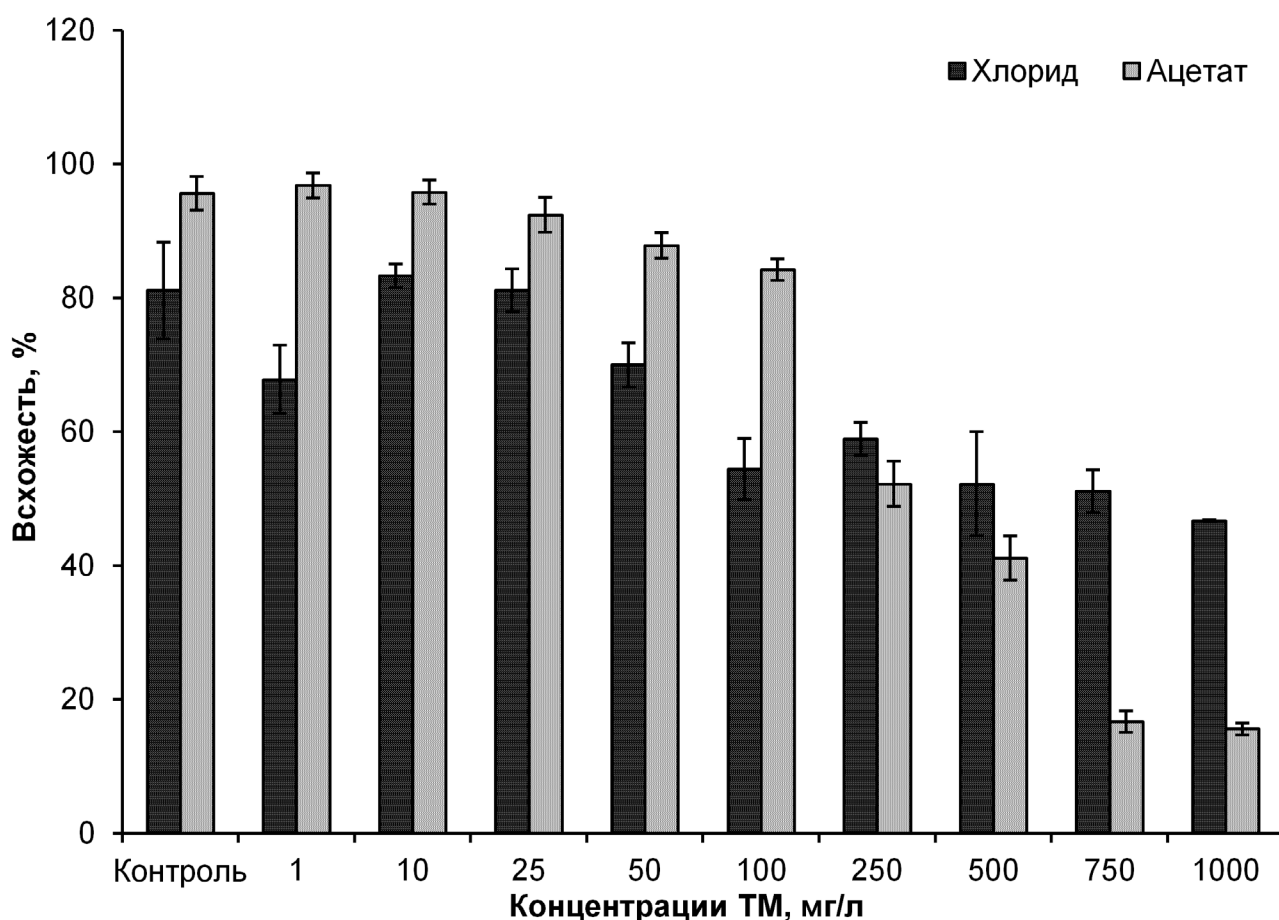


Рис. 3. Влияние солей никеля на лабораторную всхожесть семян *A. plantago-aquatica* (Крылова, 2013).

Характер изменения лабораторной всхожести также волнообразный. При действии хлорида меди выявлена пороговая концентрация для прорастания семян – 25 мг/л. Под действием более высоких концентраций отмечено значительное уменьшение показателей всхожести. Достоверные отличия от контрольных значений отмечены при 50 мг/л и выше (в 1.2–1.7 раза). Под влиянием ацетата меди достоверное уменьшение лабораторной всхожести в 1.1–6.1 раза отмечено при более высоких концентрациях (100 мг/л). При 1–10 мг/л отмечено превышение контрольных значений количества проросших семян. Наши данные подтверждают имеющиеся в литературе сообщения о стимуляции прорастания семян низкими концентрациями ТМ, что, вероятнее всего, связано с активацией клеточного деления и увеличением размеров клеток (Серегин и др., 2003; Титов и др., 2011). Несмотря на изменения в некоторых показателях, предела токсичности меди для прорастания семян *B. sermua* не выявлено. Результаты эксперимента показывают, что ацетат меди токсичнее хлорида меди для прорастания семян исследованного вида при высоких концентрациях (250–1000 мг/л), о чем свидетельствует значительное уменьшение лабораторной всхожести.

При сравнении действия ацетатов никеля и меди с хлоридами этих ТМ можно однозначно сделать вывод, что ацетаты токсичнее хлоридов. Следует также отметить, что в обоих случаях соли меди токсичнее солей никеля (при 250–1000 мг/л), возможно, по причине способности меди вытеснять функциональные металлы из ферментов, взаимодействовать с биологическими мембранами и восстанавливать молекулярный кислород до его активных форм. Медь обладает средней степенью поглощения и может вызывать нарушение мембранных барьеров клетки, что служит причиной большего токсического эффекта по сравнению с никелем (Демидчик и др., 2001). Подобная закономерность характерна и для других видов водных растений, например, для *Alisma plantago-aquatica* L., 1753 (Крылова, 2013) (Рис. 3).

В целом прорастание семян устойчиво к действию исследованных ТМ. Подобное отмечено также другими авторами и связано, по-видимому, с низкой проницаемостью для ТМ семенной кожуры большинства видов, поэтому период от начала набухания семени до прорыва кончиком корня семенной кожуры наименее подвержен их токсическому воздействию (Лянгузова, 1999; Серегин и др., 2006; Холодова и др., 2005).

Табл. 1. Влияние разных солей никеля на морфобиологические показатели проростков *V. setgla*. Жирным шрифтом выделены значения, достоверно отличающиеся от контрольных.

Концентрация ТМ, мг/л	NiCl ₂						Ni(CH ₃ COO) ₂								
	Длина органа, мм						Длина органа, мм								
	Главный корень	Придаточные корни	Гипо- котиль	Семя- доля	Настоящий лист	Главный корень	Придаточные корни	Гипо- котиль	Семя- доля	Настоящий лист	Главный корень	Придаточные корни	Гипо- котиль	Семя- доля	Настоящий лист
Контроль	26.6 ± 4.8	2.1 ± 1.0	29.8 ± 3.5	4.2 ± 0.9	0.9 ± 0.5	47.8 ± 13.2	8.0 ± 6.7	20.1 ± 4.2	4.7 ± 0.6	1.2 ± 0.5					
1	2.1 ± 0.6	0	17.2 ± 4.4	4.3 ± 1.0	0	21.0 ± 7.2	3.6 ± 2.8	20.2 ± 2.4	4.4 ± 0.5	1.1 ± 0.2					
10	3.6 ± 1.1	1.0 ± 0.9	27.4 ± 4.3	4.7 ± 1.0	1.5 ± 0.4	2.2 ± 0.7	0.3 ± 0.1	15.3 ± 2.4	4.6 ± 0.4	0.9 ± 0.1					
25	3.7 ± 1.1	1.0 ± 0.8	26.0 ± 3.9	5.0 ± 0.6	1.6 ± 0.7	1.0 ± 0.2	0	4.2 ± 1.2	4.3 ± 0.4	0					

Табл. 2. Влияние разных солей меди на морфобиологические показатели проростков *V. setgla*. Жирным шрифтом выделены значения, достоверно отличающиеся от контрольных. «-» – данные отсутствуют.

Концентрация ТМ, мг/л	CuCl ₂						Cu(CH ₃ COO) ₂								
	Длина органа, мм						Длина органа, мм								
	Главный корень	Придаточные корни	Гипо- котиль	Семя- доля	Настоящий лист	Главный корень	Придаточные корни	Гипо- котиль	Семя- доля	Настоящий лист	Главный корень	Придаточные корни	Гипо- котиль	Семя- доля	Настоящий лист
Контроль	26.6 ± 4.8	2.1 ± 1.0	29.8 ± 3.5	4.2 ± 0.9	0.9 ± 0.5	47.8 ± 13.2	8.0 ± 6.7	20.1 ± 4.2	4.7 ± 0.6	1.2 ± 0.5					
1	8.4 ± 6.6	2.8 ± 1.6	29.9 ± 4.1	5.0 ± 0.9	1.9 ± 0.7	40.5 ± 11.8	8.1 ± 5.6	19.7 ± 2.8	4.5 ± 0.4	1.1 ± 0.2					
10	1.2 ± 0.4	0.6 ± 0.7	16.4 ± 3.4	4.4 ± 0.6	1.5 ± 0.5	0.7 ± 0.2	1.5 ± 1.2	12.9 ± 2.9	4.3 ± 0.4	1.3 ± 0.5					
25	1.1 ± 0.3	0.05 ± 0.4	17.2 ± 3.1	4.3 ± 0.7	1.6 ± 0.6	0.4 ± 0.1	0.7 ± 0.6	10.4 ± 1.9	4.1 ± 0.3	1.0 ± 0.3					
50	-	-	-	-	-	0.4 ± 0.1	0.3 ± 0.1	3.8 ± 1.4	3.5 ± 0.5	0.8 ± 0.2					
100	-	-	-	-	-	0.3 ± 0.1	0	1.7 ± 0.6	3.0 ± 0.4	0					

Влияние хлоридов и ацетатов никеля и меди на рост и развитие проростков

При использовании солей никеля рост и развитие проростков нами наблюдались только при концентрации 1–25 мг/л (Табл. 1). Наибольшее токсическое действие оба металла оказали на главный корень, достоверные отличия от контрольных значений отмечены при всех концентрациях. Корень первым испытывает воздействие ТМ и является барьером на пути поступления их в надземные органы (Нестерова, 1989). Придаточные корни отсутствовали при 1 мг/л в случае действия хлорида и при 25 мг/л под влиянием ацетата. Развитие гипокотилия значительно угнеталось ацетатом. Рост надземной части проростков более устойчив к действию никеля, чем подземной части. Достоверного уменьшения размеров семядолей не отмечалось. При действии хлорида их морфометрические показатели увеличивались. Длина первого листа достоверно не изменялась, но при действии хлорида в концентрации 1 мг/л и ацетата в концентрации 25 мг/л он не развивался. В целом явно прослеживается большее токсическое действие ацетата никеля, чем хлорида.

В случае применения солей меди наблюдалось различие в токсическом влиянии между хлоридами и ацетатами, выраженное в большей степени, чем у никеля (Табл. 2). Под действием хлорида меди проростки также развивались при 1–25 мг/л, под действием ацетата – при 1–100 мг/л. На длину главного корня обе соли оказывали одинаковое действие, длина придаточных корней достоверно уменьшалась при высоких концентрациях обеих солей. При этом возрастало количество придаточных корней, что свидетельствует о стимулировании защитной реакции растений путем увеличения общей площади придаточных корней и, таким образом, снижения влияния ТМ. Медь вызывала достоверное уменьшение длины гипокотилия, что, вместе с заметным его искривлением, приводило к изменению ориентации в пространстве главного побега проростка. Линейные размеры семядолей достоверно уменьшались под действием ацетата меди в концентрации 50 и 100 мг/л. Однако в целом хлорид меди оказался токсичнее ацетата. К концу эксперимента при действии меди, в отличие от никеля, отмечено отмирание листьев. Ввиду меньшей подвижности меди некоторые авторы отмечали ее задержку в нижних листьях, что позже приводило к их отмиранию (Иванова и др., 2010).

Несмотря на то, что рост надземной части оказался устойчивее к действию ТМ по сравнению с ростом главного корня, с увеличением концентрации ТМ их содержание в надземной части заметно увеличивается, так как защитные барьеры корня не справляются с большим потоком токсичных

ионов (Титов и др., 2003). Это может привести к гибели проростков.

При сравнении действия ацетатов и хлоридов никеля и меди на рост и развитие проростков однозначного ответа на вопрос, что токсичнее, дать нельзя. Так, ацетат никеля токсичнее его хлорида, однако токсическое действие проявлялось по-разному. Хлорид никеля в концентрации 1 мг/л значительно угнетал рост и развитие проростков, однако ее повышение до 25 мг/л вызывало рост изученных показателей. В случае действия ацетата никеля угнетение шло постепенно и к концу эксперимента проявилось в большей степени. Хлорид меди токсичнее ацетата, при его действии развитие проростков наблюдалось лишь при концентрациях 1–25 мг/л. Действие обеих солей происходило постепенно.

Заключение

Проведенное исследование влияния разных солей никеля и меди (1–1000 мг/л) на прорастание семян и начальные этапы развития проростков *V. setuia* позволило сделать следующие выводы:

1. Предела токсичности исследованных солей ТМ для прорастания семян не выявлено, что позволяет говорить о высокой устойчивости этого вида по сравнению с другими представителями водных растений.

2. Ацетаты обоих металлов токсичнее хлоридов для прорастания семян при высоких концентрациях (500–1000 мг/л), о чем свидетельствует значительное уменьшение лабораторной всхожести.

3. Для роста проростков ацетат никеля токсичнее хлорида (при 10–25 мг/л), о чем свидетельствует достоверное изменение длины главного корня и гипокотилия.

4. Хлорид меди токсичнее его ацетата для роста и развития проростков (при 10–100 мг/л).

Считается, что использованная нами группа солей является производными биологически активных катионов и относительно малоактивных кислотных остатков (Cl^- , NO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} и др.), и собственной токсичностью анионов можно пренебречь (Коршун и Краснокутская, 2011). Однако наши эксперименты подтверждают вывод, который был сделан и другими авторами, что для токсического действия солей важны оба иона (Левина, 1972). Это свидетельствует о необходимости учитывать анионы при сравнении действия солей ТМ на растения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы «Растительный покров водоемов и водотоков России: структура и динамика» (№ ААА-А-18-118012690099-2). Автор выражает глубокую признательность старшему научному сотруднику

Ботанического института им. В.Л. Комарова, доктору биологических наук И.В. Лянгузовой за рекомендации по постановке опыта, а также А.Г. Лапирову и К.А. Бердник за сотрудничество при подготовке материала.

Список литературы

- Демидчик, В.В., Соколик, А.И., Юрин, В.М., 2001. Токсичность избытка меди и толерантность к нему растений. *Успехи современной биологии* **121** (5), 511–525.
- Дмитриева, А.Г., Кожанова, О.Н., Дроница, Н.Л., 2002. Физиология растительных организмов и роль металлов. МГУ, Москва, Россия, 160 с.
- Иванова, Т.В., 2006. Изучение адаптивных механизмов самоподдержания в популяциях однолетников. В: Воскресенская, О.Л. (ред.), *Поливариантность развития организмов, популяций, сообществ*. МарГУ, Йошкар-Ола, Россия, 112–117.
- Иванова, Е.М., Холодова, В.П., Кузнецов, В.В., 2010. Биологические эффекты высоких концентраций солей меди и цинка и характер их взаимодействия в растениях рапса. *Физиология растений* **57** (6), 864–873.
- Коршун, М.М., Краснокутская, Л.М., 2011. Соли как объект гигиенического нормирования в воздухе рабочей зоны. *Український журнал з проблем медицини праці* **1** (25), 35–41.
- Косицына, А.А., Макурина, О.М., Нестеров, В.Н., Розенцвиг, О.А., 2010. Влияние ионов меди и кадмия на пигментный комплекс растений семейства Hydrocharitaceae. *Известия Самарского научного центра РАН* **12** (1), 156–161.
- Крылова, Е.Г., 2012. Влияние сульфатов никеля и меди на начальные этапы онтогенеза представителей рода *Scirpus* (Cyperaceae). *Токсикологический вестник* **6**, 39–42.
- Крылова, Е.Г., 2013. Прорастание семян и развитие проростков частухи подорожниковой (*Alisma plantago-aquatica* L.) в растворах солей тяжелых металлов. *Вода: химия и экология* **10**, 107–111.
- Крылова, Е.Г., Бердник, К.А., Лапиров, А.Г., 2014. Влияние хлоридов никеля и меди на начальные этапы онтогенеза *Bidens cernua* (Asteraceae). *Растительные ресурсы* **50** (2), 227–235.
- 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**, 66–74.
- Лисицына, Л.И., Папченков, В.Г., Артеменко, В.И., 2009. Флора водоемов волжского бассейна. Определитель сосудистых растений. Товарищество научных изданий КМК, Москва, Россия, 219 с.
- Левина, Э.М., 1972. Общая токсикология металлов. Медицина, Ленинград, СССР, 184 с.
- Лянгузова, И.В., 1999. Влияние никеля и меди на прорастание семян и формирование проростков черники. *Физиология растений* **46** (3), 500–502.
- Малева, М.Г., Некрасова, Г.Ф., Борисова, Г.Г., Чукина, Н.В., Ушакова, О.С., 2012. Влияние тяжелых металлов на фотосинтетический аппарат и антиоксидантный статус элодеи. *Физиология растений* **59** (2), 216–224.
- Международные правила определения качества семян, 1969. Леурда, И.Г. (ред.). Наука, Москва, СССР, 182 с.
- Нестерова, А.Н., 1989. Действие тяжелых металлов на корни растений. *Биологические науки* **9** (309), 72–76.
- Розенцвиг, О.А., Мурзаева, С.В., Гущина, И.А., 2003. Аккумуляция меди и ее влияние на метаболизм белков, липидов и фотосинтетических пигментов в листьях *Potamogeton perfoliatus* L. *Известия Самарского научного центра РАН* **5** (2), 305–311.
- Серегин, И.В., Кожевникова, А.Д., 2006. Физиологическая роль никеля и его токсическое действие на высшие растения. *Физиология растений* **53** (2), 285–308.
- Серегин, И.В., Кожевникова, А.Д., Казюмина, Е.М., Иванов В.Б., 2003. Токсическое действие и распределение никеля в корнях кукурузы. *Физиология растений* **50** (5), 793–800.
- Титов, А.Ф., Таланова, В.В., Лайдинен, Г.Ф., Казнина, Н.М., 2003. Влияние тяжелых металлов на растения: эколого-физиологические аспекты. *Материалы Международной конференции «Наземные и водные экосистемы Северной Европы: Управление и охрана»*. Петрозаводск, Россия, 152–157.
- Титов, А.Ф., Таланова, В.В., Казнина, Н.М., 2011. Физиологические основы устойчивости расте-

- ний к тяжелым металлам. Учебное пособие. Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, Россия, 77 с.
- Холодова, В.П., Волкова, К.С., Кузнецов, В.В., 2005. Адаптация к высоким концентрациям солей меди и цинка растений хрустальной травки и возможность их использования в целях фиторемедиации. *Физиология растений* **52** (6), 848–858.
- Чукина, Н.В., Борисова, Г.Г., 2010. Структурно-функциональные показатели высших водных растений из местообитаний с разным уровнем антропогенного воздействия. *Биология внутренних вод* **1**, 49–56.
- Brändel, M., 2004. The role of temperature in the regulation of dormancy and germination of two related summer-annual mudflat species. *Aquatic Botany* **79**, 15–32.
- Shiple, B., Parent, M., 1991. Germination responses of 64 wetland species in relation to seed size, minimum time to reproduction and seedling relative growth rate. *Functional Ecology* **5** (1), 111–118.
- Yruea, I., 2009. Copper in plants: acquisition, transport and interactions. *Functional Plant Biology* **36** (5), 409–430.
- Yruea, I., 2013. Transition metals in plant photosynthesis. *Metallomics* **5** (9), 1090–1109.
- Yusuf, M., Fariduddin, Q., Hayat, S., Ahmad, A., 2011. Nickel: an overview of uptake, essentiality and toxicity in plants. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **86** (1), 1–17.

The effect of heavy metal salt anions on their toxicity to higher aquatic plants

Elena G. Krylova

Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok 109, Nekouz District, Yaroslavl Region, 152742 Russia

*panovaeg@mail.ru

The toxic effects of nickel and copper salts with different anions were compared at the initial stages of the ontogenesis of *Bidens cernua*. No toxicity limits of the studied salts for the seed germination have been found, which suggested a high resistance of this species to the effect of HM in comparison with other representatives of aquatic plants. It has been shown that acetates of both metals are more toxic than chlorides for seed germination at high concentrations (500–1000 mg·L⁻¹), as evidenced by a significant decrease in laboratory germination. For the seedling growth, nickel acetate was more toxic than its chloride, as evidenced by a significantly shorter main root and hypocotyl comparing to control. Meantime, copper chloride turned out to be more toxic than copper acetate, which was observed for the development of seedlings. The study indicated the need to take into account anions when comparing the effects of HM salts on plants during the experiments.

Keywords: nickel, copper, chloride, acetate, seed germination, seedling development, *Bidens cernua*.