

УДК 504.45.054-034

Устойчивость представителей рода *Bidens* (Asteraceae) к действию сульфата цинка на начальных этапах онтогенеза

Е.Г. Крылова*

Институт биологии внутренних вод
им. И.Д. Папанина Российской академии наук,
Россия 152742, Ярославская область, пос. Борок

Received 07.08.2012, received in revised form 13.09.2012, accepted 22.04.2013

Изучено влияние сульфата цинка (0.1 – 50 мг/л) на прорастание семян и начальные этапы развития проростков трех видов рода *Bidens* L. Растворы сульфата цинка во всем указанном интервале концентраций не оказали существенного влияния на лабораторную всхожесть семян *B. tripartita* L. При 50 мг/л отмечено достоверное снижение лабораторной всхожести семян *B. frondosa* L. Цинк (50 мг/л) оказал токсический эффект на рост и развитие корневой системы проростков всех исследованных видов, а именно у *B. cernua* и *B. frondosa* отсутствовал главный корень, у *B. tripartita* достоверно снижалась его длина. Надземная часть проростков меньше реагировала на действие повышенных концентраций цинка в среде. Исследуемые виды располагаются в ряду в порядке уменьшения устойчивости к действию сульфата цинка: *B. tripartita* > *B. frondosa* > *B. cernua*.

Ключевые слова: сульфат цинка, прорастание семян, развитие проростков, *Bidens tripartita*, *B. cernua*, *B. frondosa*.

Введение

Тяжелые металлы (ТМ) представляют серьезную угрозу для растений и животных вследствие их острой токсичности и постепенного накопления в окружающей среде до опасных уровней, зависящих от химических особенностей металла и его биохимического цикла (Розенцвиг, 2006). Характерная черта распределения ТМ в природных средах – значительные колебания концентраций. На-

ходясь в рассеянном состоянии, они могут образовывать локальные аккумуляции, где их концентрации во многие сотни раз превышают ПДК.

Цинк относится к числу необходимых микроэлементов (эссенциальных элементов), влияющих на рост и нормальное развитие растений, входит в состав активных центров многих ферментов и выполняет разнообразные физиологические функции (Устойчивость...

1991). Наряду с этим высокие концентрации цинка замедляют рост и развитие растений, ингибируют накопление биомассы надземных и подземных органов, вызывают хлороз молодых листьев и нарушают фотосинтез, дыхание, транспирацию, снижают усвоение меди и железа (Ильин и др., 1985; Холодова и др., 2005; Khudsar et al., 2004; Wang et al., 2009). Биохимическая активность и комплексобразующая способность цинка высокие, подвижность умеренная, он не канцерогенен (Вредные..., 1988).

Токсичность цинка для семян и проростков гигрофитов не изучена. Имеются некоторые данные, касающиеся гидрофитов, однако авторы не исследовали высокие концентрации металла (Лапиров, Лебедева, 2009). В связи с вышеизложенными фактами целью работы была оценка действия различных концентраций сульфата цинка на прорастание семян, рост и развитие проростков трех видов рода *Bidens* L.: череды трехраздельной (*Bidens tripartita* L.), череды поникшей (*B. cernua* L.) и череды олиственной (*B. frondosa* L.). *B. tripartita* и *B. cernua* – аборигенные для средней полосы европейской части России гигрофиты, встречающиеся на влажных лугах, в болотно-луговых и прибрежно-водных сообществах. *B. frondosa* – инвазивный вид, растущий по берегам водоемов в сообществах гигрофитов. *B. frondosa* в последнее время быстро расселяется и вытесняет из природных сообществ *B. tripartita* и *B. cernua* (Виноградова, 2003; Виноградова и др., 2010).

Материалы и методы

Семена *B. tripartita* и *B. cernua* собирали в Ярославской области в окрестностях села Копань, *B. frondosa* – в окрестностях г. Костромы, в сентябре 2009 г. После холодной влажной стратификации при температуре

4–8 °С в течение 4–5 месяцев семена проращивали в люминостате в чашках Петри при температуре 20–25 °С на фильтровальной бумаге, смоченной растворами $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, в объеме 15 мл на каждую чашку. Исследуемые концентрации были 0,1, 1, 10, 25, 50 мг/л из расчета на ион цинка Zn^{2+} . Растворы готовили на дистиллированной воде. Использовали два варианта контроля: дистиллированную воду и отстоянную водопроводную воду. Опыты выполняли в трех повторностях при освещенности 3200 люкс, фотопериоде 9 ч / 15 ч (свет : темнота), продолжительность опытов 15 сут. Определяли следующие показатели: лабораторную всхожесть – долю проросших семян в конце эксперимента от их общего числа в %; лаг-время – время (сут) между началом эксперимента и началом прорастания; период прорастания (сут), а также проводили наблюдения за развитием проростков. По окончании опыта у 10 проростков из каждого варианта измеряли длину главного корня, гипокотыля, семядолей, 1-го настоящего листа, ширину семядолей, а также число придаточных корней.

Данные обрабатывали с использованием программ Excel, Statistica (StatSoft Inc., Tulsa, USA).

Результаты и обсуждение

Влияние сульфата цинка на прорастание семян

Статистически достоверных различий лабораторной всхожести контрольных семян в дистиллированной и отстоянной водопроводной воде не обнаружено. Этот показатель был высоким у всех исследованных видов (табл. 1). Семена *B. tripartita* и *B. cernua* начинали прорастать на 2-е сутки опыта, *B. frondosa* – на 3-и сутки, период прорастания для всех видов составил 7–8 дней. Дружное прорастание семян свидетельствует об их нор-

Таблица 1. Лабораторная всхожесть семян *Bidens tripartita*, *B. cernua* и *B. frondosa* под влиянием сульфата цинка, % проросших семян в конце эксперимента от их общего числа

Вид	Контроль	Концентрация цинка, мг/л				
		0.1	1	10	25	50
<i>B. tripartita</i>	9.7±5.8	96.7±5.8	86.7±10.4	90.0±8.7	85.0±1.0	86.7±14.4
<i>B. cernua</i>	83.3±1.7	95.0±5.0	96.7±5.8	80.0±5.0	95.0±5.0	68.3±18.9
<i>B. frondosa</i>	96.6±3.3	88.3±7.6	93.0±8.7	96.7±2.9	93.3±7.6	68.3±16.1*

* Достоверные различия между контрольным и опытным вариантами (t-критерий Стьюдента, $p < 0.05$).

мальном дозревании и способности к прорастанию.

Растворы сульфата цинка не оказали существенного влияния на лабораторную всхожесть семян *B. tripartita*, во всех вариантах опыта достоверные различия по этому показателю отсутствовали (табл. 1). Для семян *B. cernua* отмечали незначительное изменение, а для семян *B. frondosa* достоверное уменьшение этого показателя при 50 мг/л.

Данные по динамике прорастания демонстрируют, что основная часть семян прорастала на 3–4-е сутки для *B. cernua* и на 5–6-е сутки для *B. tripartita* и *B. frondosa* (рис.). В растворах, содержащих ионы цинка, семена *B. tripartita* и *B. frondosa* прорастали немного медленнее, чем в контроле. Следует отметить тормозящее для прорастания действие концентрации 50 мг/л у последнего вида. На динамику прорастания семян *B. cernua* сульфат цинка оказал различное влияние: концентрации 0.1 и 1 мг/л стимулировали прорастание, а концентрация 50 мг/л значительно угнетала этот процесс.

Подобные результаты при использовании низких концентраций цинка были получены А.Г. Лапировым и О.А. Лебедевой (2009) для шелковника волосистолыстного *Batrachium trichophyllum* (Chaix) Bosch., у семян которого увеличивались лабораторная всхожесть и период прорастания. Н.М. Каз-

нина с соавторами (2009) в лабораторных опытах отмечали, что концентрации цинка 10^{-6} – 10^{-3} М не влияли на энергию прорастания и всхожесть семян щетинника зеленого *Setaria viridis* L.

По-видимому, ионы цинка не проникают через семенные оболочки, токсическое действие этого металла начинается после нарушения их целостности в момент проклевывания корешка, что отмечено и в литературе (Rengel, 2000).

Таким образом, наиболее устойчивыми к действию различных концентраций сульфата цинка оказались семена *B. tripartita*. Как мы упоминали, этот вид также более устойчив к действию сульфатов никеля и меди (Крылова и др., 2011). Выявлена лучшая всхожесть семян *B. tripartita* в экстремальных (неблагоприятных) условиях (Виноградова и др., 2008). Наши опыты подтверждают эту закономерность.

Влияние сульфата цинка на развитие проростков

Статистически достоверных различий морфометрических показателей у контрольных проростков в дистиллированной и отстоянной водопроводной воде не обнаружено. В контроле наибольшая длина главного корня была отмечена у проростков *B. frondosa*, наименьшая – *B. cernua*, в то время как длина гипокотилия была максимальной у пророст-

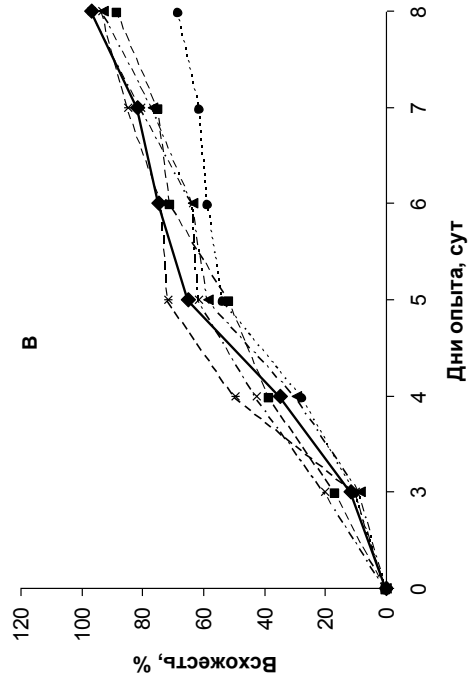
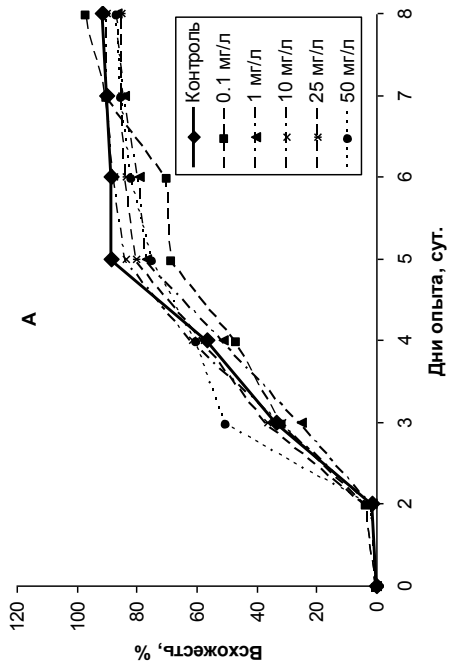
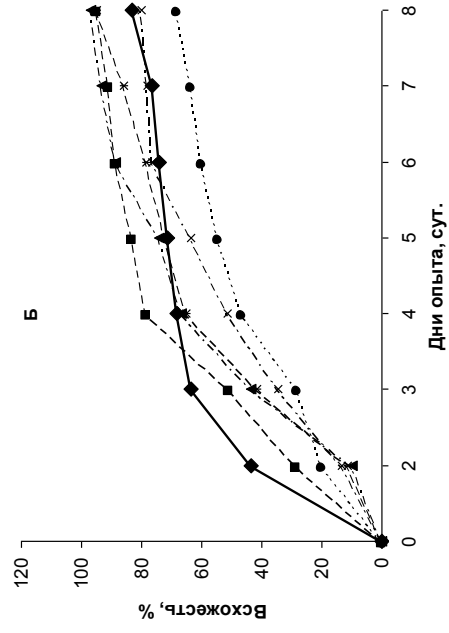


Рис. Динамика прорастания семян *Videns trispicata* (А), *V. serotia* (Б) и *V. frondosa* (В), по оси ординат – всхожесть, % проросших семян в конце эксперимента от их общего числа

Таблица 2. Морфометрические показатели проростков *Bidens tripartita*, *B. cernua* и *B. frondosa*, выращенных при различных концентрациях ионов цинка в среде

Показатель	Вид	Контроль	Концентрация цинка, мг/л				
			0.1	1	10	25	50
Длина главного корня, мм	Bt	47.6±5.2	33.2±12.8	42.8±8.4	34.2±25.2	18.7±11.23	3.1±0.8*
	Vc	23.2±1.7	30.1±5.7	29.6±6.3	22.2±6.8	0*	0*
	Bf	55.7±5.6	45.6±11.6	64.2±28.6	70.5±12.3	26.1±8.9	0*
Количество придаточных корней, шт	Bt	4.8±0.5	4.5±1.5	4.3±1.9	5.6±2.5	7.0±2.4	4.5±1.9
	Vc	2.0±0.3	1.6±0.5	2.0±0.2	2.2±0.7	2.9±0.9	0.5±0.3
	Bf	4.0±0.3	3.7±1.3	3.9±1.1	4.2±1.2	6.8±2.2	5.6±0.9
Длина гипокотыля, мм	Bt	34.8±2.5	39.8±7.4	36.7±5.9	39.6±5.3	35.8±6.7	39.4±7.6
	Vc	22.9±1.5	23.7±3.6	22.2±4.2	22.7±4.6	20.1±1.7	9.8±5.5
	Bf	26.7±1.6	25.5±2.0	25.8±5.9	27.4±4.8	25.7±3.5	26.7±3.3
Длина семядоли, мм	Bt	8.1±0.3	8.9±1.4	8.9±1.3	8.9±1.6	8.2±0.9	8.4±0.7
	Vc	5.3±0.2	5.1±0.6	5.5±0.7	5.6±0.6	5.3±0.5	5.1±0.8
	Bf	8.8±0.3	8.4±0.8	8.8±1.0	8.8±0.9	9.8±1.4	8.7±1.4
Ширина семядоли, мм	Bt	3.3±0.1	4.1±0.4	3.5±0.5	3.7±0.5	3.2±0.3	3.0±0.3
	Vc	2.7±0.1	2.8±0.4	2.9±0.4	2.9±0.5	2.6±0.3	2.8±0.4
	Bf	2.4±0.1	2.1±0.3	2.5±0.3	2.5±0.3	2.4±0.2	2.2±0.2
Длина 1-го листа, мм	Bt	1.7±0.3	1.5 ±1.3	1.3±0.5	1.6±0.8	1.3±0.8	1.0±0.4
	Vc	0.7±0.1	0.7±0.2	1.3±0.6	1.3±0.5	0.9±0.3	0.5±0.4
	Bf	0.9±0.1	0.7±0.4	0.7±0.5	1.2±0.5	0.9±0.2	0.7±0.2

Bt – *Bidens tripartita*, Vc – *B. cernua*, Bf – *B. frondosa*; * – достоверные различия между контрольным и опытным вариантами (t-критерий Стьюдента, $p < 0.05$).

ков *B. tripartita*, а минимальной – у *B. cernua* (табл. 2).

Действие сульфата цинка на рост и развитие проростков исследуемых видов различалось в зависимости от его концентрации в среде. Наибольший токсический эффект сульфата цинка был отмечен у *B. cernua*. При концентрации цинка 25 мг/л в растворе главный корень у проростков этого вида отсутствовал, но количество придаточных корней (находящихся в зачаточном состоянии при 25 и 50 мг/л) и большинство морфометрических показателей надземной части проростков достоверно не отличались от контроля при всех концентрациях. Отличия от контроля наблюдались при макси-

мальной концентрации лишь у гипокотыля (табл. 2).

B. frondosa оказался более устойчивым к действию сульфата цинка видом по сравнению с *B. cernua*. У этого вида длина главного корня достоверно снижалась при концентрации цинка в среде 25 мг/л, а при 50 мг/л корень отсутствовал. Количество придаточных корней не снижалось, а морфометрические показатели надземной части проростков достоверно не отличались от контроля при всех изученных концентрациях (табл. 2). Ингибирование роста корней, как известно, идет за счет угнетения растяжения их клеток (Ruano et al., 1988). Вместе с тем полного подавления формирования проростков этих видов ни

одна из исследуемых концентраций цинка не вызвала.

Наиболее устойчивыми к действию сульфата цинка оказались проростки *B. tripartita*. Аналогично первым двум видам р. *Bidens* токсический эффект в большей мере проявился на росте и развитии корневой системы проростков. Однако достоверное снижение длины главного корня по отношению к контролю отмечалось лишь при 50 мг/л, а количество придаточных корней практически не изменялось (табл. 2). Торможения роста надземной части проростков не было ни при одной концентрации. Следует отметить также, что сульфат цинка стимулировал развитие эпикотилия у *B. tripartita* при концентрации 1 мг/л, у *B. cernua* – при 1 и 10 мг/л. Подобным образом действовал на те же виды гигрофитов и сульфат меди (Крылова и др., 2011).

Ранее А.Г. Лапириным (2008) была показана высокая устойчивость *B. tripartita* к действию нитрата свинца (в концентрациях 0.01–25 мг/л) на ранних этапах онтогенеза. При этом не снижалась лабораторная всхожесть, как и в нашем опыте, а у проростков уменьшалась лишь длина главного корня и первого настоящего листа. Снижение массы корней при действии концентрации Zn 21 мг/л у урути колосистой *Myriophyllum spicatum* L. и его угнетающее действие на развитие корней у шелковника волосистолистного, но при меньших концентрациях (0.01–0.1 мг/л) указываются и в других работах (Лапиринов, Лебедева, 2009; Stoyanova et al., 1997).

Частичный некроз гипокотилия и семядолей наблюдался у проростков *B. cernua* при концентрации цинка 50 мг/л, в то время как у проростков *B. tripartita* и *B. frondosa* некроза не наблюдали. Хлороза семядолей и листьев у проростков всех исследуемых видов не наблюдалось, что, по-видимому, свидетельствует об отсутствии снижения содержания фотосин-

тетических пигментов. Н.М. Казнина с соавторами (2009) показали, что у *Setaria viridis* общее содержание хлорофиллов, эффективность работы фотосистемы II даже при высоких концентрациях цинка (160 и 320 мг/кг почвы) не изменялись, а низкие концентрации повышали количество зеленых пигментов. Однако есть работы, подтверждающие токсический эффект цинка для наземных растений, проявляющийся в хлорозе листьев (за счет нарушения синтеза хлорофилла), сменяющемся некрозами, а также в снижении скорости фотосинтеза (Singh, 1988; Ruano et al., 1988). По-видимому, гигрофиты более устойчивы к действию сульфата цинка по сравнению с мезофитами и другими группами наземных растений.

Таким образом, наиболее чувствительной у проростков видов р. *Bidens* к действию сульфата цинка оказалась корневая система. Однако токсический эффект у исследуемых видов проявлялся по-разному: частичный некроз главного корня проростков наблюдался только у *B. tripartita* при концентрациях 25 и 50 мг/л. Некроз придаточных корней отмечен также у *B. tripartita* при концентрации цинка 50 мг/л, тогда как у *B. cernua* и *B. frondosa* при этой концентрации придаточные корни находились в зачаточном состоянии.

В целом сульфат цинка менее токсичен для начальных этапов онтогенеза представителей р. *Biden*, чем сульфаты никеля и меди. Наши данные подтверждают результаты исследования Е.М. Ивановой с соавторами (2010) на семенах рапса, которые показали, что ингибирование прорастания семян цинком начиналось при концентрации, в 30 раз превышавшей наименьшую концентрацию меди, а 50 %-ное ингибирование прорастания семян и летальный эффект цинк вызывал в концентрации в 20 раз большей, чем медь.

Заключение

Семена череды трехраздельной (*B. tripartita*), череды поникшей (*B. cernua*) и череды олиственной (*B. frondosa*) обладали высокой жизнеспособностью, в контроле они имели лабораторную всхожесть 83–96 %. Растворы сульфата цинка не оказали существенного влияния на лабораторную всхожесть семян *B. tripartita*. У *B. frondosa* наблюдалось достоверное уменьшение лабораторной всхожести при концентрации 50 мг/л. Ингибирование роста и развития проростков зависело от видовой принадлежности и концентрации цинка в среде. Наибольший токсический эффект ионы цинка оказали на рост и развитие корневой системы проростков всех исследуемых видов. У *B. cernua* и *B. frondosa* при концентрации 50 мг/л главный корень отсутствовал, у *B. tripartita* достоверно снижалась

его длина. По степени торможения роста и развития проростков исследуемые виды располагаются в убывающем ряду: *B. tripartita* > *B. frondosa* > *B. cernua*. Полного подавления формирования проростков этих видов ни одна из исследуемых концентраций цинка не вызвала.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность старшему научному сотруднику Ботанического института им. В.Л. Комарова, доктору биологических наук И.В. Лянгузовой за методические рекомендации и помощь в статистической обработке материала и научному сотруднику Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, кандидату биологических наук Н.В. Васильевой за помощь в постановке опытов.

Список литературы

1. Виноградова Ю.К. (2003) Экспериментальное изучение растительных инвазий (на примере рода *Bidens*) В: Проблемы изучения адвентивной и синантропной флоры в регионах СНГ. Материалы научн. конф. Тула, с. 31–33.
2. Виноградова Ю.К., Возна Л.И. (2008) Инвазибельность естественных фитоценозов и конкурентные отношения между аборигенными и инвазионными видами В: Биоразнообразие: проблемы и перспективы сохранения. Материалы межд. научн. конф., посвящ. 135-летию И.И. Сапрыгина, Ч. 1. Пенза, с. 17–19.
3. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Хорун Л.В. (2010) Черная книга флоры Средней России: чужеродные виды растений в экосистемах Средней России. М.: ГЕОС, 512 с.
4. Вредные химические вещества. Неорганические соединения I-IV групп: Справ. изд. (1988) Под ред. В.А. Филова и др. Л.: Химия, с. 18-34.
5. 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.
6. Ильин В.Б., Гармаш Г.А., Гармаш Н.Ю. (1985) Влияние тяжелых металлов на рост, развитие и урожайность сельскохозяйственных культур. Агрехимия 6: 90-100.
7. Казнина Н.М., Титов А.Ф., Лайдинен Г.Ф., Таланов А.В. (2009) Устойчивость щетинника зеленого к повышенным концентрациям цинка. Известия РАН. Серия биологическая 6: 677-684.
8. Крылова Е.Г., Васильева Н.В. (2011) Действие сульфата никеля на начальные этапы онтогенеза растений трех видов рода *Bidens* (Asteraceae). Растительные ресурсы 1: 65-71.

9. Крылова Е.Г., Васильева Н.В. (2011) Прорастание семян и развитие проростков представителей рода *Bidens* (Asteraceae) в растворах сульфата меди. Вестник Томского государственного университета 352: 207-210.
10. Лапиров А.Г. (2008) Влияние некоторых тяжелых металлов на прорастание семян и развитие проростков *Alisma plantago-aquatica* (Alismataceae) и *Bidens tripartita* (Asteraceae). Раст. ресурсы 4: 98–106.
11. Лапиров А.Г., Лебедева О.А. (2009) Влияние азотнокислых солей некоторых тяжелых металлов на начальные этапы онтогенеза шелковника волосистолыстного (*Batrachium trichophyllum*) (Chaix) Bosch.). Вестник Томского государственного университета 323: 364-369.
12. Розенцвет О.А. (2006) Изучение особенностей аккумуляции ионов тяжелых металлов водными растениями и роли липидов в адаптации к ним. Изв. Самар. НЦ РАН 8(1): 332-340.
13. Устойчивость к тяжелым металлам дикорастущих видов (1991) Под ред. Н.В. Алексеевой-Поповой. Л.: Наука, 214 с.
14. Холодова В.П., Волкова К.С., Кузнецов Вл.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.
15. Khudsar T., Mahmooduzzafar N., Jqbal M., Sairam R.K. (2004) Zinc-induced changes in morpho-physiological and biochemical parameters in *Artemisia annua*. Biol. Plant. 48: 255-260.
16. Rengel Z. (2000) Ecotypes of *Holcus lanatus* tolerant to zinc toxicity also tolerate zinc deficiency. Ann. Bot. 86: 1119-1126.
17. Ruano A., Poschenrieder Ch., Boacelo J. (1988) Growth and biomass partitioning in zinc-toxic bush beans. J. Plant Nutr. 11(5): 577-588.
18. Singh M.V. (1988) Response of rice (*Oryza sativa*) and wheat (*Triticum aestivum*) to phosphorus and zinc fertilization on sodic soils. Indian J. Agr. Sci. 58(11): 823-826.
19. Stoyanova D.P., Tchakolova E.S. (1997) Cadmium-induced ultrastructural changes in chloroplasts of the leaves and stems parenchyma in *Myriophyllum spicatum*. Physiol. Plant. 34: 241-248.
20. Wang C., Zhang S.H., Wang P.F., Hou J., Zhang W.J., Li W., Lin Z.P. (2009) The Effect of excess Zn on mineral nutrition and antioxidative response in rapeseed seedling. Chemosphere 75: 1468-1476.

Stability of the Genus *Bidens* (Asteraceae) to Action of Zinc Sulfate in the Early Stages of Ontogeny

Elena G. Krylova

*Institute for Biology of Inland Waters RAS,
Borok, Yaroslavl region, 152742 Russia*

*The effect of zinc sulfate (0.1 – 50 mg/L) on seed germination and early stages of development of seedlings of three species of the genus *Bidens* L. Zinc sulfate solution in the whole range of concentrations indicated no significant effect on laboratory germination *B. tripartita* L. A significant decrease of laboratory germination *B. frondosa* L. was found at 50 mg/L. Zinc (50 mg/L) had a toxic effect on the growth and root development of seedlings of all species studied: namely, *B. cernua* and *B. frondosa* missed the main root, while *B. tripartita* had the root which was significantly reduced in length. The above-ground portion of seedlings was less responsive to the elevated concentrations of zinc in the medium. Investigated species are located in the following series in order of decreasing resistance to zinc sulfate: *B. tripartita* > *B. frondosa* > *B. cernua*.*

*Keywords: zinc sulfate, seed germination, seedling growth, *Bidens tripartita*, *B. cernua*, *B. frondosa*.*
