

ПРОРАСТАНИЕ СЕМЯН И РАЗВИТИЕ ПРОРОСТКОВ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА *BIDENS* (ASTERACEAE) В РАСТВОРАХ СУЛЬФАТА МЕДИ

Изучено влияние сульфата меди (0,1–50 мг/л) на прорастание семян и начальные этапы развития проростков растений влажных местообитаний: череды трехраздельной (*Bidens tripartita* L.), череды поникшей (*B. cernua* L.) и череды олиственной (*B. frondosa* L.). Семена *B. frondosa* обладают наибольшей чувствительностью к исследуемым растворам, достоверное снижение их лабораторной всхожести показано при всех концентрациях сульфата меди. Подобное уменьшение этого показателя отмечено и для *B. cernua*, но только при воздействии самой высокой концентрации. В отличие от этого, прорастание семян *B. tripartita* устойчиво к действию растворов сульфата меди во всем указанном интервале концентраций. Максимальное токсическое действие сульфат меди оказывает на корневую систему проростков всех исследуемых видов, их надземная часть в меньшей степени реагирует на повышенные концентрации меди в среде. По устойчивости к действию сульфата меди исследуемые виды располагаются в следующем убывающем ряду: *B. tripartita* > *B. cernua* > *B. frondosa*.

Ключевые слова: сульфат меди; растения влажных местообитаний; прорастание семян; развитие проростков; *Bidens tripartita*; *Bidens cernua*; *Bidens frondosa*.

Тяжелые металлы (ТМ) и их соединения образуют группу токсикантов, определяющую антропогенное воздействие на окружающую среду. Часть техногенных выбросов ТМ, поступающих в атмосферу в виде аэрозолей, переносится на значительное расстояние и вызывает глобальное загрязнение. Другая часть с гидрхимическим стоком попадает в бессточные водоемы, где накапливается в водах и донных отложениях и может стать источником вторичного загрязнения, так как их соединения быстро распространяются по объемам водного объекта. Со сточными водами предприятий растворимые соединения ТМ попадают в воды рек, озер, водохранилищ. В водных средах металлы присутствуют в трех формах: взвешенные частицы, коллоидные частицы и растворенные соединения: органические (гуминовые и фульвокислоты) и неорганические (галогениды, сульфаты, фосфаты, карбонаты). Возникает особо напряженная ситуация, когда повышается кислотность воды, наблюдается сильное зарастание водоемов, активируется деятельность микроорганизмов [1, 2].

При концентрациях, превышающих физиологические потребности растений, ТМ оказывают токсическое действие на их рост и развитие. Незначительное повышение активности меди в среде может приводить к морфологическим и метаболическим нарушениям и поэтому рассматривается как стрессовый фактор [3]. Для большинства высших растений граница толерантности к меди составляет 10^{-6} моль Cu^{2+} /л. Под действием избытка меди снижается уровень биосинтеза хлорофилла, изменяется белковый состав хлоропластов, ингибируется транспорт электронов по фотосинтетической цепи. При подавлении дыхания ингибируется ферментативный аппарат. Толерантность у растений к ТМ связана с модификациями на клеточном, тканевом и органном уровнях. Изменяются наружные клеточные мембраны, что приводит к снижению их проницаемости и чувствительности к ТМ; идет биосинтез веществ, связывающих металлы снаружи и внутри клетки; повышается выкачивание ТМ из цитоплазмы во внеклеточное пространство.

Особенно восприимчивы к избытку меди молодые ткани и органы [4]. Вопросы, касающиеся влияния ТМ на прорастание семян и развитие проростков водных и прибрежно-водных растений, в литературе освещены недостаточно [5–8].

Объектами нашего изучения были череда трехраздельная (*Bidens tripartita* L.), череда поникшая (*B. cernua* L.) и череда олиственная (*B. frondosa* L.). *B. tripartita* и *B. cernua* – аборигенные гигрофиты, встречающиеся на влажных лугах, в болотно-луговых и прибрежно-водных сообществах. *B. frondosa* – инвазионный вид, растущий по берегам водоемов в сообществах гигрофитов. Негативными последствиями внедрения заносных видов растений являются конкуренция и гибридизация с аборигенными видами, вытеснение их из естественных растительных сообществ, что приводит к упрощению структуры ценозов. *B. frondosa* в последнее время быстро расселяется и вытесняет из природных сообществ *B. tripartita* и *B. cernua* [9, 10]. В связи с этим нами поставлена задача изучения толерантности перечисленных видов к действию ТМ и выявления наиболее устойчивого из них.

Целью работы была оценка действия различных концентраций сульфата меди на прорастание семян, рост и развитие проростков трех видов рода *Bidens* L.

Материалы и методики исследования

Семена *B. tripartita* и *B. cernua* собирали в Ярославской области в окрестностях д. Копань, *B. frondosa* – в окрестностях г. Кострома. Все семена собраны в сентябре 2009 г. После холодной влажной стратификации в дистиллированной воде при температуре +4–8°C в течение 4–5 месяцев их проращивали в люминостате в чашках Петри диаметром 35 мм при температуре 20–25°C на фильтровальной бумаге, смоченной растворами $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ в объеме 5 мл на каждую чашку в разных концентрациях меди (0,1; 1; 10; 25; 50 мг/л). Контроль – дистиллированная вода. Исследуемые растворы меди также готовились на дистиллированной воде. Параллельно был поставлен контроль на отстоявшейся водопроводной воде. Статистически достоверных различий лабораторной всхожести и морфометрических показателей развития проростков в разных контролях не наблюдали. Повторность опытов трехкратная, освещенность 3 200 лк, фотопериод 9/15 (свет:темнота), продолжительность опытов 15 дней. Определяли следующие показатели: лабораторная всхожесть – доля проросших семян в конце эксперимента от их общего числа, %; лаг-время – время в днях между началом эксперимента и началом прорастания; период прорастания –

время, в течение которого семена прорастали, а также проводили наблюдения за развитием проростков. По окончании опыта у 10 проростков из каждого варианта измеряли длину главного корня, гипокотилия, семядолей, 1-го настоящего листа, ширину семядолей, а также подсчитывали число придаточных корней.

Данные обрабатывали с использованием программы «Statsoft Statistica for Windows 6.0», построение графиков выполнено в программе «Microsoft Office Excel 2003». Результаты экспериментов представлены в таблице в виде средних арифметических и их стандартных отклонений.

Результаты исследования и обсуждение

Влияние сульфата меди на прорастание семян.

В контроле все исследуемые виды имели высокую лабораторную всхожесть (рис. 1). Семена *B. tripartita* и *B. cernua* начинали прорастать на 2-е сутки опыта, семена *B. frondosa* – на 3-и. Период прорастания для первых двух видов составил 7–8 дней, для *B. frondosa* – 10–12 дней. По нашему мнению, различия по этим показателям объясняются биологическими особенностями видов.

Растворы сульфата меди не оказали существенного влияния на лабораторную всхожесть семян *B. tripartita*, во всех вариантах опыта значимые различия по этому показателю с контролем отсутствовали (см. рис. 1, А). Подобные результаты были получены А.Г. Лапиновым (2008) при действии на семена *B. tripartita* растворов свинца и кадмия (от 0,01 до 25 мг/л). Для семян *B. cernua* уменьшение лабораторной всхожести наблюдали лишь при самой высокой концентрации, тогда как для семян *B. frondosa* достоверное снижение всхожести по сравнению с контрольным значением отмечали при всех исследуемых концентрациях меди (рис. 1, Б и В).

Данные по динамике прорастания семян в контроле и в опытных растворах показали, что основная их часть прорастает на 2–3-и сутки для *B. cernua* и на 4–5-е сутки для *B. tripartita* и *B. frondosa*. Следует отметить принципиальные различия в динамике прорастания семян трех родственных видов *Bidens*: семена *B. tripartita* на растворах сульфата меди прорастали более дружно, чем в контроле, т.е. наблюдали стимуляцию прорастания семян этого вида ионами меди. Для семян *B. frondosa*, напротив, все исследованные концентрации меди в растворе тормозили их прорастание, что в конечном итоге привело к достоверно более низким значениям лабораторной всхожести. На динамику прорастания семян *B. cernua* сульфат меди оказывал значительное воздействие только при концентрации 50 мг/л (см. рис. 1).

Таким образом, наиболее устойчивыми к действию различных концентраций сульфата меди оказались семена *B. tripartita*, наименее устойчивыми – *B. frondosa*. Ю.К. Виноградова показала, что в искусственных популяциях *B. frondosa* по темпам прорастания семян и скорости роста имеет преимущества перед *B. tripartita* [11]. Однако для *B. tripartita* выявлена лучшая всхожесть семян в экстремальных (неблагоприятных) условиях [12]. Это нашло подтверждение и в нашем опыте.

Влияние сульфата меди на развитие проростков.

В контроле наименьшая длина главного корня была

отмечена у проростков *B. cernua*, в то время как длина гипокотилия была максимальной у проростков *B. tripartita*, а минимальная – у *B. cernua* (см. таблицу).

Действие сульфата меди на рост и развитие проростков исследуемых видов различалось в зависимости от его концентрации в среде и видовой принадлежности проростков. Одинаковый токсический эффект сульфата меди был отмечен у *B. cernua* и *B. frondosa*. Уже при концентрации меди 10 мг/л в растворе у проростков *B. cernua* отсутствовал главный корень, но количество придаточных корней (частично некротизированных при концентрациях 10–50 мг/л) и большинство морфометрических показателей надземной части проростков достоверно не отличались от контроля при всех концентрациях (см. таблицу). Достоверно отличалась от контроля при максимальной концентрации лишь длина гипокотилия. У *B. frondosa* длина главного корня достоверно снижалась при концентрации меди в среде 10 мг/л, а при концентрациях 25 и 50 мг/л он отсутствовал, придаточных корней не было при наибольшей концентрации, а морфометрические показатели надземной части проростков достоверно не отличались от контроля при всех концентрациях (см. таблицу). Полного угнетения развития проростков этих видов ни одна из исследуемых концентраций меди не вызвала.

Наиболее устойчивыми к действию сульфата меди оказались проростки *B. tripartita*. Аналогично первым двум видам р. *Bidens* токсический эффект в большей мере проявился на росте и развитии корневой системы проростков. Уже при концентрации меди в растворе 10 мг/л длина главного корня достоверно снизилась по отношению к контролю, однако число придаточных корней было даже больше, чем в контроле (см. таблицу). Торможение роста надземной части проростков отмечалось лишь при максимальной концентрации меди в среде (50 мг/л), в этом случае достоверно снизилась длина первого листа. Ранее А.Г. Лапиновым (2008) была показана высокая устойчивость *B. tripartita* к действию нитрата свинца (в концентрациях 0,01–25 мг/л) на ранних этапах онтогенеза. При этом у проростков уменьшалась лишь длина главного корня и первого настоящего листа. По-видимому, медь более токсична, чем свинец, так как достоверное снижение длины главного корня отмечалось уже при концентрации меди 10 мг/л, при этом наблюдался частичный некроз придаточных корней.

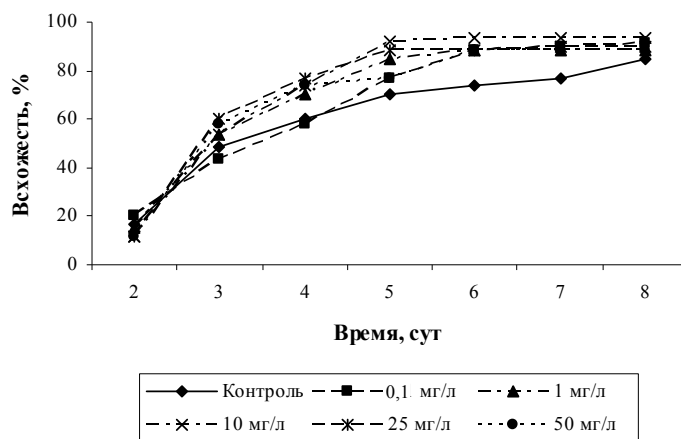
Невысокие концентрации меди способствовали развитию настоящих листьев у *B. tripartita* при концентрациях 0,1 и 1 мг/л, у *B. cernua* и *B. frondosa* – при концентрациях 1 и 10 мг/л. У последних двух видов не только увеличивалось количество развивающихся настоящих листьев, но и у 30% проростков формировался эпикотиль. Подобное действие меди было показано ранее на проростках частухи подорожниковой при действии ее в концентрациях 0,001 и 0,01 мг/л А.Г. Лапиновым и Т.Ф. Микряковой (2006). Полного подавления развития настоящих листьев нами не наблюдалось даже при максимальной концентрации меди. В целом к концу опыта по развитию проростков исследуемые виды можно расположить в убывающем ряду: *B. tripartita* > *B. cernua* > *B. frondosa*.

Таким образом, наиболее чувствительной у проростков видов р. *Bidens* к действию сульфата меди оказа-

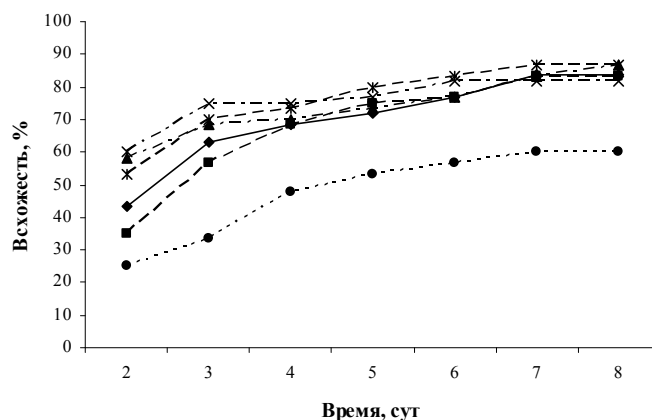
лась корневая система. Однако токсический эффект у исследуемых видов проявлялся по-разному: некроза главного корня проростков всех видов не наблюдалось. Некроз придаточных корней у *B. tripartita* и *B. cernua* наблюдался при концентрациях меди 10–50 мг/л, тогда как у *B. frondosa* при концентрации 10 мг/л придаточные корни были нормальные, при концентрации 25 мг/л они находились в зачаточном состоянии и отсутствовали при максимальной концентрации.

Некроз гипокотилия начинался у проростков *B. cernua* при концентрации меди 50 мг/л, в то время как у проростков *B. tripartita* и *B. frondosa* некроза не наблюдали. Однако у всех видов отмечен частичный некроз семядолей при максимальной концентрации меди. Хлороза семядолей и листьев у проростков всех исследуемых видов не наблюдалось, что, по-видимому, свидетельствует об отсутствии подавления фотосинтеза.

А



Б



В

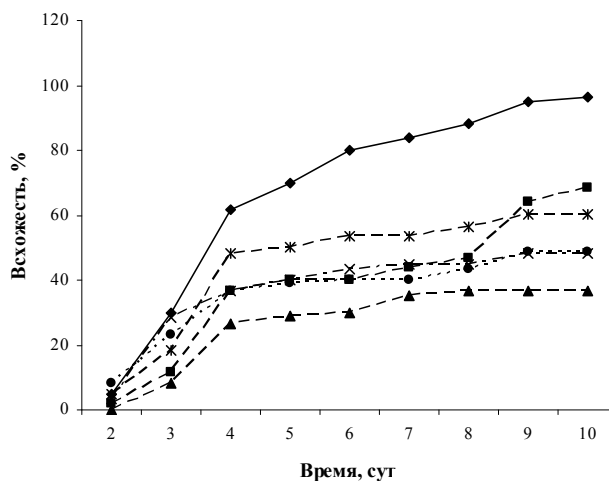


Рис. 1. Динамика прорастания семян *Bidens tripartita* (А), *B. cernua* (Б) и *B. frondosa* (В)

**Морфометрические показатели проростков *Bidens tripartita*, *B. cernua* и *B. frondosa*,
выращенных при различных концентрациях сульфата меди в среде**

Показатель	Вид	Контроль	Концентрация меди, мг/л				
			0,1	1	10	25	50
Длина главного корня, мм	1	47,6±5,2	42,2±9,0	35,9±14,7	12,7±15,2	Нет	Нет
	2	23,2±1,7	31,5±5,5	28,0±6,8	Нет	Нет	Нет
	3	55,7±5,6	59,3±13,6	75,7±11,0	19,5±16,8	Нет	Нет
Количество придаточных корней, шт.	1	4,8±0,5	4,2±1,9	4,8±1,4	6,2±1,6	6,8±1,0	6,8±1,7
	2	2,0±0,3	2,0±0,6	2,8±0,5	4,8±0,8	4,2±1,4	1,7±1,0
	3	4,0±0,3	4,2±1,5	4,0±1,4	6,4±1,8	8,0±1,6	Нет
Длина гипокотили, мм	1	34,8±2,5	26,7±5,7	38,7±5,2	36,1±5,9	33,7±5,0	25,2±3,5
	2	22,9±1,5	24,6±4,0	24,4±2,8	24,0±3,6	16,2±8,5	2,7±1,6
	3	26,7±1,6	23,4±3,2	29,6±3,3	30,2±3,3	26,9±3,5	18,0±3,8
Длина семядоли, мм	1	8,1±0,3	7,3±0,9	8,1±1,3	7,6±1,2	6,4±0,8	6,6±0,9
	2	5,3±0,2	5,6±0,7	6,0±0,8	5,6±0,5	5,2±0,6	3,8±0,8
	3	8,8±0,3	8,7±0,8	10,5±1,8	9,6±1,0	7,8±1,0	7,5±1,1
Ширина семядоли, мм	1	3,3±0,1	3,0±0,2	3,4±0,3	3,3±0,4	3,2±0,4	3,1±0,4
	2	2,7±0,1	2,9±0,2	3,2±0,4	3,1±0,3	3,0±0,3	2,4±0,5
	3	2,4±0,1	2,1±0,1	2,3±0,4	2,2±0,3	2,1±0,3	2,1±0,1
Длина 1-го листа, мм	1	1,7±0,3	1,1±0,8	1,6±1,0	1,0±0,7	0,8±0,1	0,2±0,2
	2	0,7±0,1	0,8±0,5	1,0±0,5	1,1±0,6	0,8±0,3	0,9±0,7
	3	0,9±0,1	0,8±0,3	1,1±0,3	1,1±0,2	0,9±0,6	0,3±0,2

Примечание. 1 – *Bidens tripartita*; 2 – *B. cernua*; 3 – *B. frondosa*; нет – отсутствие.

В заключение можно сказать, что семена череды трехраздельной (*Bidens tripartita* L.), череды поникшей (*B. cernua* L.) и череды олистенной (*B. frondosa* L.) обладают высокой жизнеспособностью, в контроле они имеют лабораторную всхожесть 83–97%. Растворы сульфата меди стимулируют прорастание семян *B. tripartita*, однако не оказывают существенного влияния на лабораторную всхожесть. Для семян *B. frondosa* все исследованные концентрации меди в растворе тормозили их прорастание, что привело к достоверно более низкому по сравнению с контрольными значениями лабораторной всхожести. На динамику прорастания и лабораторную всхожесть семян *B. cernua* сульфат меди оказывал значительное воздействие только при концентрации 50 мг/л.

Одинаковый токсический эффект сульфата меди на развитие проростков был отмечен у *B. cernua* и *B. frondosa*, однако полного подавления их формирования ни одна из исследуемых концентраций не вызвала. По развитию проростков исследуемые виды располагаются в убывающем ряду: *B. tripartita* > *B. cernua* > *B. frondosa*. Наибольший токсический эффект ионы меди оказали на рост и развитие корневой системы проростков всех исследуемых видов *Bidens*. Достоверное снижение длины главного корня проростков *B. tripartita* и *B. frondosa* зарегистрировано при концентрации меди 10 мг/л, у проростков *B. cernua* при этой концентрации главный корень отсутствовал. У *B. frondosa* главный корень не развивался при концентрациях 25 и 50 мг/л.

ЛИТЕРАТУРА

- Добровольский В.В. Тяжелые металлы: загрязнение окружающей среды и глобальное рассеяние // Тяжелые металлы в окружающей среде. М. : Изд-во МГУ, 1980. С. 3–12.
- Мур Дж.В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. М. : Мир, 1987. С. 177–203.
- Косицин А.В., Алексеева-Попова Н.В. Растения в экстремальных условиях минерального питания. Эколого-физиологические исследования. Л. : Наука, 1983. С. 5.
- Демидчик В.В., Соколик А.И., Юрин В.М. Токсичность избытка меди и толерантность к нему растений // Успехи современной биологии. 2001. Т. 121, № 5. С. 511–525.
- Лапиров А.Г., Микрякова Т.Ф. Влияние меди на формирование проростков частухи подорожниковой (*Alisma plantago-aquatica* L.) // Биология внутренних вод. 2006. № 4. С. 72–76.
- Лапиров А.Г. Влияние некоторых тяжелых металлов на прорастание семян и развитие проростков *Alisma plantago-aquatica* (*Alismataceae*) и *Bidens tripartita* (*Asteraceae*) // Растительные ресурсы. 2008. Вып. 4. С. 98–106.
- Лапиров А.Г., Лебедева О.А. Влияние азотно-кислых солей некоторых тяжелых металлов на начальные этапы онтогенеза шелковника волосистого (*Batrachium trichophyllum* (Chaix) Bosch.) // Вестник Томского государственного университета. 2009. № 323. С. 364–369.
- Крылова Е.Г. Токсичность солей никеля и меди для семян и проростков рдеста гребенчатого (*Potamogeton pectinatus* L.), частухи подорожниковой (*Alisma plantago-aquatica* L.), поручейника широколистного (*Sium latifolium* L.) и ситника скупенного (*Juncus conglomerates* L.) // Токсикологический вестник. 2010. № 1. С. 41–44.
- Щербаков А.В. Атлас флоры водоемов Тульской области. М., 1999. 44 с.
- Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Хорун Л.В. Черная книга флоры Средней России: чужеродные виды растений в экосистемах Средней России. М. : ГЕОС, 2010. 512 с.
- Виноградова Ю.К. Экспериментальное изучение растительных инвазий (на примере рода *Bidens*) // Проблемы изучения адвентивной и синантропной флоры в регионах СНГ : материалы науч. конф. Тула, 2003. С. 31–33.
- Виноградова Ю.К., Возна Л.И. Инвазивность естественных фитоценозов и конкурентные отношения между аборигенными и инвазивными видами // Биоразнообразие: проблемы и перспективы сохранения : материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 135-летию И.И. Савицына. Пенза, 2008. Ч. 1. С. 17–19.

Статья представлена научной редакцией «Биология» 22 сентября 2011 г.