

# ФИЗИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ

## НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВИДЫ РАСТЕНИЙ В ФИТОРЕМЕДАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ МЕДЬЮ ТЕРРИТОРИЙ\*

Е.М. Иванова<sup>1</sup>, К.С. Волков<sup>1</sup>,  
В.П. Холодова<sup>1</sup>, Вл.В. Кузнецов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН  
ул. Ботаническая, 35, Москва, Россия, 127276

<sup>2</sup>Кафедра ботаники, физиологии растений и агробиотехнологии  
Российский университет дружбы народов  
ул. Миклухо-Маклая, 8/2, Москва, Россия, 117198

В настоящей работе представлены данные, полученные в ходе сравнительного исследования устойчивости к меди трех видов растений — хрустальной травки (*Mesembryanthemum cristallinum* L.), клевера лугового (*Trifolium pratense* L.) и рапса (*Brassica napus* L.). Различия в устойчивости к избыточным концентрациям сульфата меди проявились уже на стадии прорастания: наибольшую устойчивость проявляли растения клевера. Исследованные культуры могут быть рекомендованы для очистки умеренно загрязненных сельскохозяйственных территорий в рамках проведения фиторемедиационных мероприятий в различных по степени загрязненности ценозах.

**Ключевые слова:** фиторемедиация, тяжелые металлы, медь, устойчивость растений.

**Введение.** В настоящее время все больший научный и практический интерес вызывают проблемы адаптации растений к действию повреждающих абиотических факторов природного и антропогенного происхождения, среди них наибольшее внимание привлекает токсическое действие высоких концентраций тяжелых металлов (ТМ). Особое место среди ТМ занимает медь, поскольку ее избыточное содержание в почве (до 2000 мг/кг почвы) может быть результатом не только хозяйственной деятельности человека, но и естественных почвообразовательных процессов, так как она содержится в высоких концентрациях в составе некоторых почвообразующих пород [1].

Медь в микроколичествах является эссенциальным элементом, вовлеченным во множество физиолого-биохимических процессов в живых организмах. Однако

---

\* Работа выполнена при поддержке грантов 10-04-00799-а, 10-04-90456-Укр\_а и программы президиума РАН «Молекулярная и клеточная биология».

в более высоких концентрациях она становится токсичной для растений и приводит к нарушению метаболизма и интегральных физиологических функций, таких, как фотосинтез, следствием чего является падение количества и снижение качества урожая [2]. Токсичность меди во многом определяется ее способностью связываться с SH-группами белков (что приводит к изменению нативной конформации макромолекул и инактивации ферментов) и легко менять свой окислительно-восстановительный статус, генерируя при этом активные формы кислорода и вызывая состояние окислительного стресса [3; 4].

Адаптация растений к токсическому действию тяжелых металлов связана с функционированием как специализированных (хелатирование, секвестрация и компартментация ТМ), так и общих механизмов устойчивости (низкомолекулярные органические стресс-протекторные соединения, защитные макромолекулы и антиоксидантные системы) [5; 6]. И те и другие к настоящему времени относительно изучены, однако данные, характеризующие устойчивость различных таксонов растений, в особенности сельскохозяйственных, к повреждающему действию ТМ, крайне немногочисленны.

Между тем исследования в этой области представляются весьма актуальными, поскольку позволят в будущем создавать информационные базы растений по критериям устойчивости, что, в свою очередь, значительно облегчит решение как чисто фундаментальных задач — выявления таксономической специфичности устойчивости, специфичности или специализированности механизмов детоксикации физиологически опасных поллютантов растениями отдельных семейств, так и прикладных — подбор эффективных с точки зрения фиторемедиации видов и сортов растений (с сокращением объема дополнительных трудоемких биохимических исследований).

Первоначальным шагом к реализации подобной программы служит скрининг растений на предмет устойчивости к действию стрессоров, а также выяснение потенциального диапазона концентраций ТМ, в пределах которого конкретный вид способен расти в течение периода, необходимого для наиболее эффективной реализации программы очистки загрязненных почв. Кроме того, важнейшими параметрами, характеризующими фиторемедиационный потенциал растений, являются показатели уровня накопления металлов в надземных органах, биомассе.

Несмотря на то, что наибольшей устойчивостью и аккумулярующей способностью, вне сомнения, обладают растения металлофиты-гипераккумуляторы, крайне низкая продукция их вегетативной массы приводит к тому, что по показателям суммарного выноса ТМ из почвы такие растения зачастую проигрывают менее устойчивой, но более продуктивной группе неметаллофитной флоры, в том числе сельскохозяйственным культурам. Конечно, это справедливо лишь в том случае, когда последние обладают более или менее высокой устойчивостью к действию поллютантов.

В данной работе представлены результаты исследования степени устойчивости и способности к аккумуляции меди надземными органами трех различных видов растений — хрустальной травки, клевера лугового и рапса, принадлежащих к разным семействам. Известно, что представители семейства капустных,

к которым принадлежит рапс, характеризуются довольно высокой устойчивостью к ТМ, в то время как бобовые и айзовые в этом плане изучены недостаточно. Полученные в настоящем исследовании данные позволяют выявить наиболее эффективные и удобные с точки зрения фиторемедиации виды растений и заложить методические основы для поиска перспективных культур.

**Методика.** Работа выполнена на растениях рапса — *Brassica napus* L. (сем. *Brassicaceae*), клевера лугового — *Trifolium pratense* L. (сем. *Fabaceae*) и хрустальной травки — *Mesembryanthemum crystallinum* L. (сем. *Aizoaceae*). Это однолетние (рапс и хрустальная травка) и многолетние (клевер) травянистые растения. К настоящему времени все они (в том числе и факультативный галофит — хрустальная травка) введены в культуру.

**Оценка всхожести и интенсивности роста проростков.** Семена дезинфицировали в течение 30 минут слабо розовым раствором перманганата калия; после промывки дистиллированной водой по 100 семян каждой культуры помещали в чашки Петри на фильтровальную бумагу, которую в последующем увлажняли либо водой (в контрольном варианте), либо растворами  $\text{CuSO}_4$  (10—500 мкМ). Проращивание семян проводили в термостате при температуре 25 °С в течение 5 суток, затем определяли процент проросших семян и измеряли длину корня проростков.

**Выращивание растений.** Дальнейшие эксперименты проводили на молодых растениях рапса, клевера и хрустальной травки. Семена культур высевали в кюветы с перлитом, которые помещали в камеры фитотрона, где поддерживались постоянные температурный и световой режимы: 23—25 °С/18—20 °С, 12-часовой фотопериод при освещенности 450 мкмоль/м<sup>2</sup> · сек. В качестве источника света использовали металлогалогеновые лампы (фирма Philips, Корея) мощностью 400 Вт (по 2 лампы на 1,5 м<sup>2</sup>).

В возрасте 3-х недель растения пересаживали по 3 экземпляра в литровые сосуды на модифицированный питательный раствор Хогланда-Снайдерс с железом в нитратной форме (5 мг  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3/\text{л}$ ). Каждые семь дней производили полную замену питательной среды в сосудах.

В сосуды растений опытных вариантов  $\text{CuSO}_4$  вносили в среднем через 3—5 недель после пересадки. Таким образом, время начала опыта определялось спецификой конкретной культуры. В данной серии экспериментов использовали концентрации сернокислой меди 10—400 мкМ. Через 7 и 14 дней после начала воздействия растительный материал (листья) фиксировали и в дальнейшем использовали для определения биомассы и содержания меди.

**Определение содержания меди в растительном материале.** Предварительно высушенную до постоянного веса листовую массу (50 мг) заливали смесью концентрированных  $\text{HNO}_3$  и  $\text{HClO}_4$  (1,5 мл : 0,6 мл) и оставляли на сутки. Затем пробы подвергали мокрому озолению при 140° в течение часа и при 180 °С в течение двух часов; после остывания вносили по 5—6 капель концентрированной  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Озоление проводили в термостате типа “Dry-block” TDB-A-400 (фирма BioSan, Латвия). Через 24 часа объем каждой пробы доводили дистиллированной

водой до 15 мл. Определение содержания меди в образцах проводили на атомно-абсорбционном спектрофотометре ААС Лабист-400 (фирма Лабист, Россия).

### Результаты и обсуждение

**Влияние меди на прорастание семян и начальные стадии роста проростков.** Важными первичными параметрами, которые позволяют составить представление об уровне устойчивости растения к токсическому действию ТМ, являются показатели всхожести семян и роста проростков на начальных стадиях развития.

На первом этапе работы оценивали влияние избытка меди на прорастание семян трех изучаемых культур, при этом учитывали лишь те проростки, корень которых превышал длину 5 мм. В опытах использовали растворы  $\text{CuSO}_4$  в концентрации от 0,25 мкМ (контроль) до 500 мкМ: максимальная концентрация превосходила стандартную концентрацию питательного раствора в 2000 раз (табл. 1). Заметное торможение прорастания семян началось с концентрации 50 мкМ  $\text{CuSO}_4$ , усиливаясь до полной потери всхожести у семян рапса при 500 мкМ  $\text{CuSO}_4$ , тогда как при этой же концентрации 9% семян хрустальной травки и 43% семян клевера сохраняли жизнеспособность.

Таблица 1

**Влияние различных концентраций  $\text{CuSO}_4$  на прорастание семян, 5-е сутки воздействия.**  
Результаты приведены в % от общего количества семян.  
Стандартное отклонение не превышало 3%

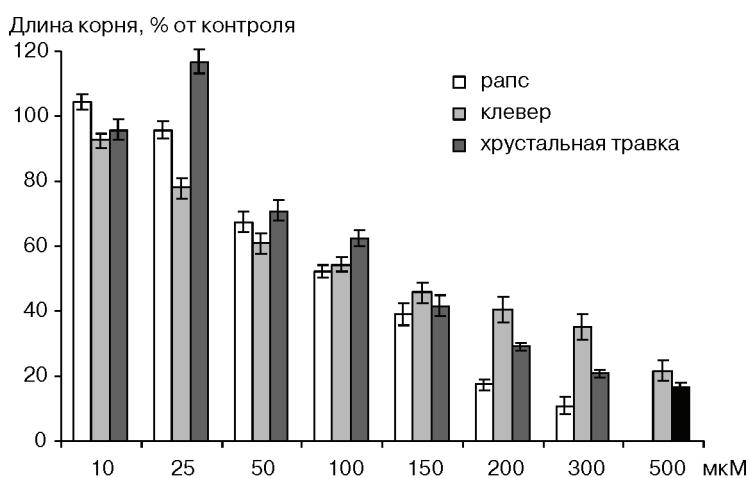
Концентрация $\text{CuSO}_4$ , мкМ	Рапс	Клевер	Хрустальная травка
0,25	95	80	55
10	96	80	59
25	92	77	61
50	85	70	50
100	75	69	45
150	38	67	40
200	17	60	31
300	7	53	15
500	0	43	9

Однако вполне очевидно, что из-за большой разницы в их исходной всхожести — от 95% у семян рапса до 55% у хрустальной травки — невозможно было корректно провести сравнительный анализ ответных реакций исследуемых культур на избыток меди, основываясь лишь на абсолютном проценте проросших семян. Учитывая это обстоятельство, мы провели сравнение токсического действия меди на прорастание семян по отношению к данным контрольного варианта каждой из изучаемых культур.

Таким образом, 10 и 25 мкМ  $\text{CuSO}_4$  не влияли на прорастание семян рапса и клевера и даже повышали процент всхожих семян хрустальной травки. При 50 мкМ ингибирование прорастания было статистически одинаковым у всех культур, составляя 5—10% от исходных величин. Различия между культурами становились очевидными, начиная со 100 мкМ  $\text{CuSO}_4$ , и усиливались с повышением концентрации сульфата меди в среде. Наименее устойчивым среди изучаемых

культур оказался рапс, при 300 мкМ всхожесть составила лишь 7% от контроля, при 500 мкМ проростков не было совсем. Несколько более устойчивой оказалась хрустальная травка, но лучшие показатели принадлежали семенам клевера, прорастание которых снизилось менее чем наполовину при 500 мкМ  $\text{CuSO}_4$ , максимальной из испытанных концентраций сульфата меди.

Для оценки действия высоких концентраций меди на проростки был использован еще один показатель — рост корня; измерения проводили на 5-е сутки опыта (рис. 1). Ни для одного из исследованных видов растений негативного влияния меди в диапазоне концентраций 10—25 мкМ на этот показатель выявлено не было. Более того, 25 мкМ  $\text{CuSO}_4$  оказывали стимулирующее действие на рост корней проростков хрустальной травки. При 150 мкМ  $\text{CuSO}_4$  ингибирование роста корня избытком меди было одинаковым у проростков рапса и хрустальной травки (39 и 42% соответственно), но при более высоких концентрациях меди торможение роста корня рапса происходило особенно быстро. Преимущество клевера отчетливо проявлялось при наивысших из исследованных концентраций сульфата меди — 200—300 мкМ: длина корней проростков сохранялась на уровне 41—35% от контроля. Более того, при действии максимальной из исследованных концентраций — 500 мкМ — ингибирование роста корня клевера составило лишь 22%.

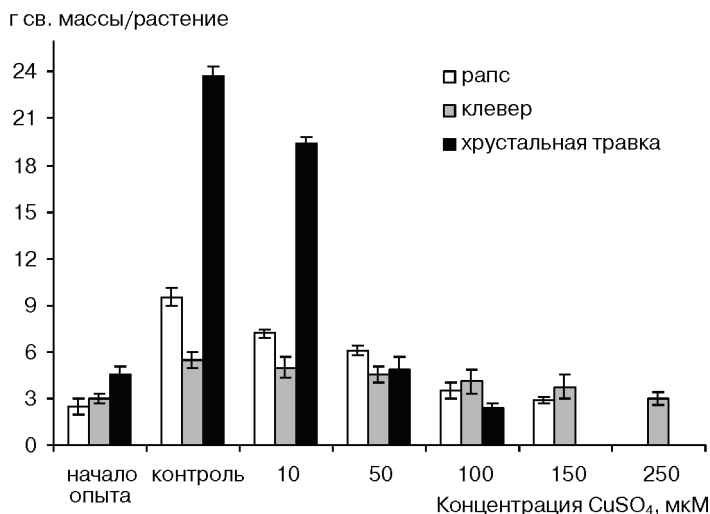


**Рис. 1.** Длина корня проростков рапса, клевера и хрустальной травки % от контроля (вертикальная ось) в зависимости от концентрации  $\text{CuSO}_4$  (горизонтальная ось). Бары показывают стандартное отклонение

Как оказалось, повышение концентрации сульфата меди в среде до 300—500 мкМ приводило практически к полному прекращению роста корней проростков. Тут следует отметить, что подобные экстремально высокие концентрации меди крайне редко встречаются в естественных условиях; они характерны в основном для почв, сформированных на природно-богатых медью породах [7]. Такие почвы непригодны для использования в качестве сельскохозяйственных угодий и не рассматриваются в качестве объектов фиторемедиации.

**Накопление биомассы молодыми растениями.** Важным показателем, характеризующим рост растений, является накопление биомассы. Свежую биомассу

листьев и корней изучаемых растений оценивали перед началом воздействия и на 14-е сутки действия различных концентраций меди. За 2 недели роста свежая масса растений хрустальной травки контрольного варианта достигала 23,74 г/растение, биомасса растений рапса и клевера составляла 9,53 и 5,48 г соответственно (рис. 2).



**Рис. 2.** Влияние 2-х недельного воздействия солей меди на свежую массу листьев и корней растений рапса, клевера и хрустальной травки.

Начало опыта — биомасса растений на начало воздействия, контроль — биомасса растений контрольного варианта на 14-е сутки воздействия CuSO<sub>4</sub>

Минимальная концентрация — 10 мкМ — практически не влияла на накопление биомассы листьев и корней клевера, тогда как снижение массы листьев хрустальной травки и рапса составило 18—25% и корней — 40—47%. При действии более высоких концентраций меди происходило практически линейное снижение сырой массы отдельных органов всех изучаемых культур. Уже 50 мкМ CuSO<sub>4</sub> приводило к 50% ингибированию накопления массы листьев растениями рапса и 80% — хрустальной травки. Высокую устойчивость демонстрировали растения клевера, снижение свежей массы листьев которого составило всего 18% от контрольного варианта. Высокие концентрации сульфата меди (100 мкМ и выше) приводили практически к полной остановке накопления биомассы листьев и корней у хрустальной травки, поэтому для данной культуры концентрация 100 мкМ была максимальной из использованных. Растения рапса несколько лучше адаптировались к действию меди, однако концентрация 150 мкМ подавляла накопление массы листьев и корней на 70 и 84% соответственно. Наиболее устойчивыми по данному показателю оказались растения клевера, биомасса листьев и корней которых снизилась на 42 и 51% соответственно.

Кроме того, растения клевера были жизнеспособны и при более высоких концентрациях сульфата меди, например, при действии концентрации 400 мкМ снижение надземной и корневой массы составило 65 и 82% (данные не представлены). Концентрация серноокислой меди 600 мкМ приводила к летальному исходу.

Подобранные в ходе первичного скрининга концентрации меди использовали в дальнейшей работе. Несмотря на относительно высокую способность к накоплению биомассы, хрустальная травка оказалась наиболее чувствительной к действию  $\text{CuSO}_4$  и не выдерживала концентраций свыше 100 мкМ. Большую устойчивость демонстрировали растения рапса: значительное подавление накопления биомассы наблюдалось лишь при действии 150 мкМ сульфата меди. Наиболее устойчивыми по данному параметру оказались растения клевера, которые не только успешно адаптировались к действию 150 мкМ сульфата меди и выше, но и в меньшей степени теряли способность к аккумуляции биомассы.

**Накопление ионов меди растениями.** Накопление меди в вегетативных органах растений — один из важнейших параметров, определяющих фиторемедиационный потенциал культуры, поскольку он является решающим для отнесения того или иного вида к какой-либо из основных экологических групп — исключателей, индикаторов или аккумуляторов тяжелых металлов [8]. Поэтому важно было оценить способность исследуемых культур к накоплению меди в надземных органах.

Было установлено, что при росте на стандартной среде, содержащей 0,25 мкМ  $\text{CuSO}_4$ , концентрация меди в надземных органах молодых растений всех трех исследованных видов практически не различалась, находясь в диапазоне 9—14 мкг/г сухой массы (табл. 2). Вместе с тем внесение в питательный раствор большого избытка меди приводило к накоплению ее в надземной массе всех растений в значительных концентрациях. Учитывая ранее установленные различия по устойчивости изучаемых культур к избытку меди, для каждой из культур были подобраны соответствующие концентрации  $\text{CuSO}_4$ , не вызывавшие за время опыта (2 недели) летального эффекта.

Таблица 2

**Содержание меди в листьях клевера, рапса и хрустальной травки, мкг Cu на 1 г сухой массы**

$\text{CuSO}_4$ , мкМ	Клевер		Рапс		Хрустальная травка	
	7 суток	14 суток	7 суток	14 суток	7 суток	14 суток
0,25	12,9 ± 1,3	12,5 ± 1,7	13,9 ± 1,5	44,3 ± 1,9	12,1 ± 1,9	12,3 ± 2,2
10	43,2 ± 4,6	54,5 ± 3,5	39,6 ± 5,8	67,1 ± 4,3	64,2 ± 5,2	78,8 ± 9,1
25	49,4 ± 3,1	62,8 ± 2,8	60,2 ± 6,8	83,9 ± 5,4	103,8 ± 8,7	120,3 ± 10,4
50	57,8 ± 4,2	77,1 ± 4,5	85,5 ± 9,7	107,9 ± 7,8	118,9 ± 10,3	128,2 ± 9,5
100	74,3 ± 5,3	86,9 ± 4,9	127 ± 7,3	153 ± 4,5	191,2 ± 12,2	204,8 ± 8,3
150	83,2 ± 5,0	89,4 ± 5,7	169,3 ± 11,4	223,1 ± 10,2	—	—
250	94,4 ± 6,8	97,5 ± 4,1	—	—	—	—

Прежде всего, обратило на себя внимание значительное различие исследованных культур по концентрации меди, аккумулируемой при одинаковых уровнях содержания последней в среде и одинаковом времени воздействия. Так, при 50 мкМ  $\text{CuSO}_4$  хрустальная травка к 14-м суткам занимала лидирующую позицию по этому параметру — накопление меди в варианте доходило до 130 мкг/г сухой массы, несколько меньше — 110 мкг/г сухой массы — составила концентрация меди у рапса. Напротив, у растений клевера в тех же условиях накапливалось всего

лишь 80 мкг меди на 1 г сухой массы, то есть в 1,3—1,6 раза меньше, чем у других исследованных культур (см. табл. 2).

Еще одна особенность состояла в неравномерной динамике поглощения меди растениями: после быстрого, интенсивного накопления металла к 7-м суткам эксперимента дальнейшее поглощение заметно замедлялось (табл. 2). У хрустальной травки поступление меди в надземные органы после 7-ми суток воздействия практически прекратилось, при 50 и 100 мкМ  $\text{CuSO}_4$  в среде повышение концентрации меди в надземных органах составило всего 7,8—7,1% от накопленного за первую неделю. В меньшей мере было заторможено поступление меди в надземные органы рапса. Подобное торможение аккумуляции меди в надземных органах растений клевера в ходе опыта в основном проявилось при высоких концентрациях меди — 150—200 мкМ, а при действии 250 мкМ происходило 2-кратное снижение накопления меди по сравнению с концентрацией 50 мкМ  $\text{CuSO}_4$  в среде (табл. 2). Одна из основных причин этого явления — сильное торможение роста и повреждение корневой системы в жестких стрессорных условиях, не приводящее, однако, к гибели растений клевера даже в случае действия крайне высоких концентраций  $\text{CuSO}_4$  — 300—400 мкМ (данные не представлены).

Учитывая отмеченные сложности при проведении сравнительного анализа изучаемых культур, в качестве основных показателей при оценке устойчивости к избытку было решено использовать вместе с максимальной «переносимой» концентрацией меди в среде также и максимальную концентрацию меди, аккумулируемую в надземных органах растения. По этим параметрам рапс несколько превосходил хрустальную травку, выдерживая 150 мкМ  $\text{CuSO}_4$  (против 100 мкМ хрустальной травки), но по аккумуляции в надземной массе они практически не различались между собой, накапливая несколько более 200 мкг/г сухой массы. Несомненно, более устойчивой среди исследованных культур к действию высоких концентраций меди оказался клевер. Растения клевера выдерживали длительное воздействие 400 мкМ  $\text{CuSO}_4$ , при этом в надземных органах аккумулировали менее 100 мкг  $\text{Cu}$ /г сухой массы.

Практически единственной технологией, пригодной для очистки сельскохозяйственных земель от тяжелых металлов, является фиторемедиация — высокотехнологичная стратегия, основанная на способности некоторых растений накапливать ТМ в высоких концентрациях в надземных органах [8]. Среди устойчивых к ТМ растений особое место занимают растения-гипераккумуляторы, способные не только произрастать на сильно обогащенных ТМ почвах, но и накапливать их в надземной массе в концентрациях, в десять и более раз превосходящих средние показатели для растений, не относящихся к этой группе [8; 9].

К настоящему времени найдено более 400 видов растений-гипераккумуляторов ТМ, однако большинство из них являются гипераккумуляторами никеля, и лишь для 10—15 видов установлена аккумуляция меди в надземных органах в концентрациях выше 1000 мг/кг сухой растительной массы, что является для меди критерием гипераккумуляции [9]. При этом большая часть гипераккумуляторов меди представлена видами дикой флоры африканского континента, сформирова-



ровавшимися в зоне «соррег агс», так называемой «медной дуги» в Африке [7], и возможность их использования для целей фиторемедиации в нашем регионе представляется весьма сомнительной.

Высокая устойчивость к избытку меди в почве и повышенное накопление меди в листовой массе установлена также у нескольких представителей флоры европейского континента, однако водное растение *Crassula helmsii* технологически непригодно для очистки сельскохозяйственных угодий. Кроме того, виды растений-гипераккумуляторов представлены мелкими формами, с очень небольшой надземной биомассой, их прямое использование для целей фиторемедиации неперспективно, хотя они весьма полезны для изучения механизмов адаптации и аккумуляции ТМ. Значительно эффективнее могут оказаться устойчивые растения, сочетающие хорошо развитую листовую массу с умеренным накоплением ТМ (меди).

Наше исследование показало, что ни один из изученных видов не может быть отнесен к группе гипераккумуляторов, что, однако, с точки зрения фиторемедиации не является отрицательным моментом, поскольку, как отмечалось выше, растения-гипераккумуляторы характеризуются крайне низкой способностью к накоплению биомассы и мало подходят для целей фитоэкстракции.

Растения, подобранные для нашей работы, обладали способностью к формированию большой биомассы надземных органов. Хотя по степени устойчивости к токсическому действию меди исследуемые культуры значительно различаются. Наибольшую адаптивную способность, несомненно, показали растения клевера, способные расти даже при столь высоких концентрациях  $\text{CuSO}_4$ , как 400 мкМ. Растения хрустальной травки и рапса по степени аккумуляции  $\text{Cu}$  различаются незначительно, однако немаловажен тот факт, что растения рапса способны успешно расти и развиваться при концентрациях сульфата меди до 150 мкМ, в то время как сопоставимый по интенсивности токсический эффект у растений хрустальной травки вызывают уже 50 мкМ  $\text{CuSO}_4$ .

Если же сравнивать потенциальную способность двух последних культур к выносу ТМ из прикорневой среды, то растения рапса, вне всякого сомнения, тут занимают лидирующую позицию, что определяется способностью к высокой аккумуляции биомассы даже в жестких стрессорных условиях. Полученные нами результаты позволяют рассматривать представленные растения скорее как принадлежащие к иной экологической группе — растениям-индикаторам. Представители последней характеризуются выраженной способностью к аккумуляции металлов, однако, в отличие от аккумуляторов, накопление металлов индикаторами находится в прямо пропорциональной зависимости от его содержания в среде.

Результаты настоящего исследования позволяют рекомендовать растения рапса для очистки умеренно загрязненных сельскохозяйственных угодий.

Обладающие высоким уровнем накопления биомассы растения рапса в сочетании со способностью к значительной аккумуляции меди в вегетативных органах могут с успехом применяться не только на почвах сельскохозяйственного использования, но и на некоторых заводских территориях. Растение хорошо адап-

тируется к присутствию в среде значительных количеств токсичных ТМ, и, что особенно важно, относительно легко может быть убрано и в последующем утилизировано.

Кроме того, в подходящих по климатическим условиям регионах можно проводить несколько уроков биомассы за сезон, поскольку в случае проведения фиторемедиационных работ нет необходимости давать растениям пройти полный онтогенез. Такой подход позволяет значительно повысить фиторемедиационную эффективность растений рапса.

Несмотря на относительно низкую способность к аккумуляции ионов меди в надземных органах, растения клевера вполне могут быть использованы в качестве культуры, позволяющей создавать устойчивый травянистый покров на землях с высокой степенью загрязненности, что, в свою очередь, обеспечивает надежную защиту от эрозии.

Действительно, сильно загрязненные почвы, как правило, лишены устойчивой растительности, активность почвенной биоты характеризуется низкой интенсивностью. Совокупность этих факторов препятствует надежной фиксации ионов металлов лигандами почвенного поглощающего комплекса, что, в конечном счете, приводит к интенсивной горизонтальной и вертикальной миграции ионов и увеличению контаминированных площадей. Проведение фиторемедиационных мероприятий на таких территориях сопряжено с очевидными техническими трудностями. Однако создание устойчивого растительного покрова способно кардинально изменить ситуацию.

Кроме того, растения клевера показали высокую способность к аккумуляции биомассы в условиях токсического действия меди, характеризуются быстрым ростом и хорошо адаптируются к регулярному скашиванию. Все это позволяет рассматривать данную культуру как неотъемлемый компонент комплекса экологических мероприятий на территориях с высокой степенью контаминированности.

С недавнего времени хрустальную травку возделывают как декоративное растение, выведен ряд сортов с различной окраской венчика. Именно такое растение отвечает требованиям эстетичности и может с успехом применяться в озеленении загрязненных городских территорий.

По результатам представленного исследования нельзя выявить однозначного лидера с точки зрения фиторемедиационного потенциала среди исследованных видов растений, напротив, обнаруженные различия в уровне накопления металлов, массе вегетативных органов и адаптивной способности этих культур позволяют разработать наиболее эффективные методы очистки контаминированных почв исходя из конкретных потребностей.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yruela I. Copper in plants: acquisition, transport and interactions // *Function Plant Biology*. — 2009. — V. 36. — P. 409—430.
- [2] Kramer U., Clemens S. Functions and homeostasis of zinc, copper, and nickel in plants / In: Tamas M., Martinoia E. (eds.). *Molecular Biology of Metal Homeostasis and Detoxification from Microbes to Man*. — Berlin, Springer, 2006. — P. 214—272.

- [3] Puig S., Andres-Colas N., Garcia-Molina A., Penarrubia L. Copper and iron homeostasis in *Arabidopsis*: responses to metal deficiencies, interactions and biotechnological applications // *Plant Cell and Environment*. — 2007. — V. 30. — P. 271—290.
- [4] Холодова В.П., Волков К.С., Кузнецов Вл.В. Адаптация к высоким концентрациям солей меди и цинка растений хрустальной травки и возможность их использования в целях фиторемедиации // *Физиология растений*. — 2005. — Т. 52. — С. 848—858.
- [5] Clemens S. Toxic Metal Accumulation, Responses to Exposure and Mechanisms of Tolerance in Plants // *Biochem*. — 2006. — V. 88. — P. 1707—1719.
- [6] Hall J.L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance // *Journal of Exp. Botany*. — 2002. — V. 53. — P. 1—11.
- [7] Faucon M.-P., Colinet G., Mahy G. Soil influence on Cu and Co uptake and plant size in the cuprophytes *Crepidiorhpalon perennis* and *C. tenuis* (Scrophulariaceae) in SC Africa // *Plant Soil*. — 2009. — V. 317. — P. 201—212.
- [8] Reeves R.D., Baker A.J.M. Metal accumulating plants // In: Raskin I., Ensley B.D. (Eds.). *Phytoremediation of Toxic Metals Using Plants to Clean Up the Environment*. — John Wiley and Son Inc., New York, USA, 2000. — P. 193—229.
- [9] Krämer U. Metal hyperaccumulation in plants // *Annu. Rev. Plant Biol.* — 2010. — V. 61. — P. 517—534.
- [10] Boyd R.S. The defense hypothesis of elemental hyperaccumulation: status, challenges and new directions // *Plant Soil*. — 2007. — V. 293. — P. 153—176.

## NEW VALUABLE PLANT SPECIES IN PHYTOREMEDIATION OF COPPER POLLUTED LANDS

E.M. Ivanova<sup>1</sup>, K.S. Volkov<sup>1</sup>,  
V.P. Kholodova<sup>1</sup>, V.I.V. Kuznetsov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Timirjazev Institute of Plant Physiology, Russian Academy of Science  
*Botanicheskaya str., 35, Moscow, Russia, 127276*

<sup>2</sup>Department of botany, plant physiology and agrobiotechnology  
Russian People's Friendship University  
*Miklucho-Maklay str., 8/2, Moscow, Russia, 117198*

The data obtained during screening among several plant species from three different families are present here. It was shown that in seedling stage all of three species (common ice plant, rape and vica) were characterized as relatively high tolerant plants when incubated under excess copper. All of investigated species could be recommended as highly effective phytoremediators for territories with medium to high level of toxic metals.

**Key words:** phytoremediation, heavy metals, copper, tolerance of plants.