

УДК 502.572: 504.05

## Сорбционная способность декоративных травянистых растений в условиях загрязнения почвы ионами хрома

Фрунзе О. В.

Донецкий национальный университет  
Донецк, Донецкая Народная Республика  
[o.frunze@donnu.ru](mailto:o.frunze@donnu.ru)

Тяжелые металлы входят в число основных загрязнителей окружающей среды, и их токсичность становится проблемой, приобретающей все большее экологическое значение. Хром присутствует в почвах техногенного региона в дозах, превышающих предельно допустимые концентрации, и оказывает токсичный эффект на растительные и животные организмы, напрямую или косвенно негативно влияет на здоровье человека. Традиционно извлечение ионов хрома из почв проводится химическим осаждением. Однако этот метод не позволяет уменьшить концентрацию хрома до такого низкого уровня, как того требует экологическое законодательство. Биосорбция – это процесс, при котором биологические объекты используются для поглощения ионов тяжелых металлов. Это перспективный альтернативный метод очистки почв городской среды и агропромышленного комплекса, благодаря его низкой стоимости и высокой способности поглощать металлы. Большая часть ионов хрома представлена в почвах в трёхвалентной [Cr(III)] и шестивалентной [Cr(VI)] формах. Поведение хрома в почве, перенос из почвы в растение и накопление в различных частях растений зависят от его химической формы, типа растения и физико-химических свойств почвы. Изучалась сорбционная способность некоторых видов декоративных травянистых растений в условиях загрязнения почвы ионами хрома. Константа адсорбции была найдена по изотерме Ленгмюра. Рассчитан фактор переноса металла. По результатам исследований выделены виды декоративных травянистых растений – гипераккумуляторы ионов тяжелых металлов, которые можно рекомендовать для технологии фиторемедиации почв техногенного региона.

*Ключевые слова:* биосорбция, хром, декоративные травянистые растения, фиторемедиация, Донбасс, техногенно трансформированная среда.

### ВВЕДЕНИЕ

Химические соединения, которые поступают в экосистемы в результате деятельности человека, могут накапливаться в почве, водной среде, атмосфере. Почва может аккумулировать множество токсичных соединений, которые в результате биологических процессов поступают в пищевые цепи или грунтовые воды (Алемасова, 2019). Неправильная и небрежная утилизация промышленных отходов часто приводит к загрязнению окружающей среды (Лязгунова, 2017). Загрязнение включает точечные источники, такие как выбросы, стоки и твердые сбросы промышленных предприятий, выхлопные газы автомобилей, выплавка металлов или добыча полезных ископаемых, а также неточечные источники (например, использование пестицидов или чрезмерное использование удобрений) (Глухов, 2001; Глухов и др., 2002; Глухов и др., 2016). Каждый из источников оказывает свое пагубное воздействие на жизнедеятельность растений и животных, здоровье человека, но те источники, которые загрязняют почву ионами тяжелых металлов, вызывают серьезную озабоченность в связи с высокой степенью аккумуляции этих элементов в почве. Они не могут быть инактивированы, а лишь переходят из одного состояния в другое.

Хром – это тяжелый металл, который встречается в окружающей среде в трехвалентной Cr(III) и шестивалентной Cr(VI) формах (Dakiky и др., 2002). В трехвалентной форме хром [Cr(III)], как микроэлемент, необходим для углеводного обмена животных и человека, тогда как шестивалентный хром [Cr(VI)] является очень токсичным (Saha, 2011). Шестивалентный хром в 100 раз более токсичен, чем трехвалентная форма хрома (Saha, 2011). Это связано с тем, что шестивалентный хром – сильный окислитель, способный высвобождать свободные радикалы, которые могут оказывать канцерогенное воздействие на живые клетки (Panidi, 2016). Соединения, содержащие шестивалентный хром, широко используются в различных

отраслях промышленности, таких как кожевенная, гальванопокрытие, порошковая металлургия, текстильная промышленность, а также изготовление и обработка сплавов (Ernst, 2006).

Рекультивация почв техногенного региона, загрязненных ионами тяжелых металлов, с помощью химических и физических методов, как правило, требует серьезные капиталовложения и имеет побочные экологические эффекты поэтому лучшим методом защиты окружающей среды от загрязнения является его предотвращение (Мандра и др., 2019). Тем не менее, это не всегда возможно, и как только металлы попадают в почву и связываются ее органическими комплексами. В отличие от органических загрязнителей на основе углерода, тяжелые металлы не могут быть разложены или полностью удалены, поэтому традиционные методы очистки почв, загрязненных тяжелыми металлами, являются сложными и дорогостоящими (Сафонов, 2020; Сафонов и др., 2021).

Фиторемедиация является одним из наиболее оптимальных методов очистки загрязненных тяжелыми металлами почв. Это технология *in situ*, в которой используется растительность и связанная с ней микробиота. Она основана на использовании растений-гипераккумуляторов ионов тяжелых металлов для восстановления почвы путем связывания металлов в ризосфере или их переноса в надземную часть растений, некоторым растениям свойственны механизмы избирательного поглощения ионов тяжелых металлов из почвы. Технология фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами включает фитоэкстракцию, фитостабилизацию и ризофильтрацию (Meena, 2020).

При фитоэкстракции используются растения-гипераккумуляторы, которые поглощают из почвы ионы тяжелых металлов и накапливают их в корнях и побегах. Однолетние растения затем могут быть собраны с участка и впоследствии храниться как опасные отходы или использоваться для извлечения металлов. Идеальное для фитоэкстракции растение должно быстро расти, производить большое количество биомассы и быть способным сорбировать и накапливать высокие концентрации металлов в вегетативных органах. По сравнению с традиционными методами рекультивации почв, фитоэкстракция экономически эффективна и менее трудоемка (Safonov, 2021).

Цель работы – изучить сорбционную способность некоторых видов декоративных травянистых растений в условиях загрязнения почвы ионами хрома, определить фактор переноса металлов и выявить виды-гипераккумуляторы ионов тяжелых металлов.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследований при проведении эксперимента были использованы декоративные травянистые растения: Клещевина обыкновенная (*Ricinus communis* L.), Рапс обыкновенный (*Brassica napus* L.) Фацелия пижмолистная (*Phacelia tanacetifolia* Benth.).

Исследование по влиянию загрязнения почва ионами хрома проводилось по схеме полного однофакторного пятиуровневого эксперимента (табл. 1).

В качестве загрязнителей использовался нитрат хрома Cr(III) по стехиометрическому отношению. Концентрации хрома составляли 0 ПДК, 0,5 ПДК, 1 ПДК, 1,5 ПДК, 2 ПДК. Семена растений проращивались согласно их биологическим особенностям.

Выращивание велось на протяжении тридцати дней, продолжительности светового дня 14 часов, температуре 20–22 °С и влажности почвы около 70 % общей влажности. В каждый сосуд вносилось по 350 г почвы, просеянной через почвенное сито с диаметром отверстий 3 мм, в который предварительно вносился нитрат хрома согласно схеме эксперимента.

Содержание хрома в растительном материале определяли по методу атомно-абсорбционной спектроскопии по В. Прайсу на атомно-абсорбционном спектрофотометре «Сатурн-3». Метод основан на кислотном вскрытии растительного сырья, распылении полученных растворов в пламя ацетилен-воздух или введении в графитовую печь спектрофотометра полученного раствора с последующей электротермической атомизацией.

Полученные данные обрабатывали статистически с помощью специально разработанных программ по методу Даннета.

Таблица 1

Схема эксперимента влияния загрязнения почвы ионами хрома на сорбционную способность некоторых видов декоративных травянистых растений

Вариант загрязнения	Концентрации загрязнителя
	Cr(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> , мг/кг (в перерасчете на Cr <sup>3+</sup> )
1	0 (контроль)
2	1,5 (0,5 ПДК)
3	3 (1 ПДК)
4	4,5 (1,5 ПДК)
5	6 (2 ПДК)

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что способность растений накапливать в своих органах ионы хрома зависит как от концентрации металла, так и от видоспецифических особенностей растений (рис. 1–3).

Современные технологии восстановления почв, загрязнённых такими тяжелыми металлами как Pb, Cd, Cr, Ni, Co, Mn, Hg и As и так далее используют сорбционные свойства растений. В развивающихся странах очищенные и неочищенные сточные воды обычно используются для орошения сельскохозяйственных угодий, что приводит к накоплению в почвах тяжёлых металлов. Это негативно сказывается на качестве пехотных земель. Сорбция тяжелых металлов из загрязненных участков почвы с помощью зеленых технологий является приемлемым подходом.

Исследования сорбционной способности некоторых видов декоративных травянистых растений в условиях загрязнения почвы ионами хрома показали, что в вариантах внесения в почву ионов хрома в концентрации 0,5 ПДК наблюдалось некоторое уменьшение содержания данного металла в корнях проростков *R. commúnis* на 9,5 %, по сравнению с растениями, выращенными на незагрязненной почве. При увеличении концентрации поллютанта до 1 ПДК мы отметили увеличение концентрация ионов хрома в корнях на 12,8 %. В условиях внесения ионов хрома в концентрации 1,5 ПДК, концентрация токсиканта в корневой системе увеличилась на 68 %, а при внесении хрома в концентрации 2 ПДК концентрация ионов хрома в корнях увеличилась практически в два раза.

Обработка экспериментальных данных показала, что степень сорбции хрома корневой системой клещевины описывается уравнением Вагелера – Ленгмюра. На рисунке 1 изображена линеаризованная зависимость содержания хрома в корнях растений *R. commúnis* от содержания хрома в почве. Уравнение зависимости имеет вид:

$$y = 0,46x + 1,74, R^2 = 0,8505, \quad (1)$$

где  $R^2$  – достоверность аппроксимации  $R^{\wedge}1$ .

При внесении в почву ионов хрома в концентрации 0,5 ПДК прослеживалось уменьшение концентрации данного металла в надземной части проростков *R. commúnis* на 9,1 % в сравнении с контролем. При дальнейшем увеличении концентрации хрома в почве

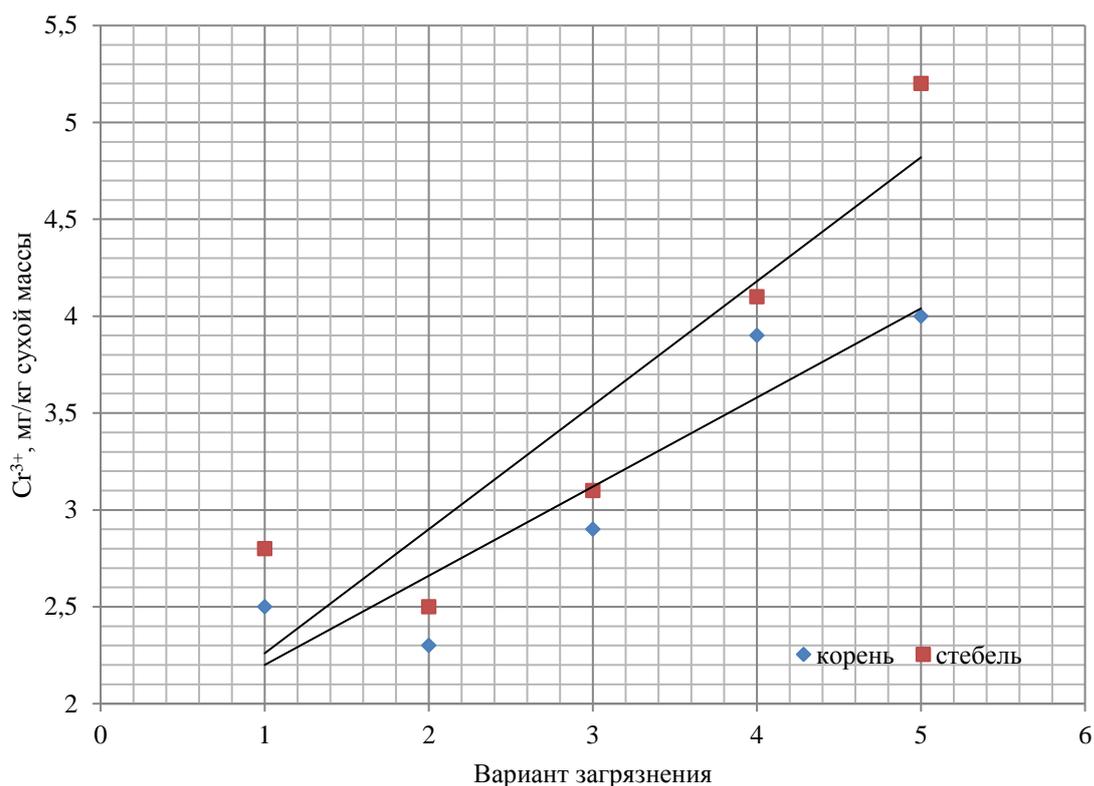


Рис. 1. Сорбция ионов хрома вегетативными органами проростков *Ricinus communis*

до 1 ПДК, содержание токсиканта в стеблях растений увеличилось на 45 %. Аналогичное увеличение концентрации ионов хрома в надземной части наблюдали и при увеличении концентрации токсиканта в почве на 1,5 ПДК, в условиях которого содержание металла в стеблях увеличилось на 56 % в сравнении с растениями, выращенными на незагрязненной почве.

На рисунке 1 изображена линеаризованная зависимость содержания хрома в стеблях растений *R. communis* от содержания хрома в почве. Уравнение зависимости имеет вид:

$$y = 0,64x + 1,62 \quad R^2 = 0,8373, \quad (2)$$

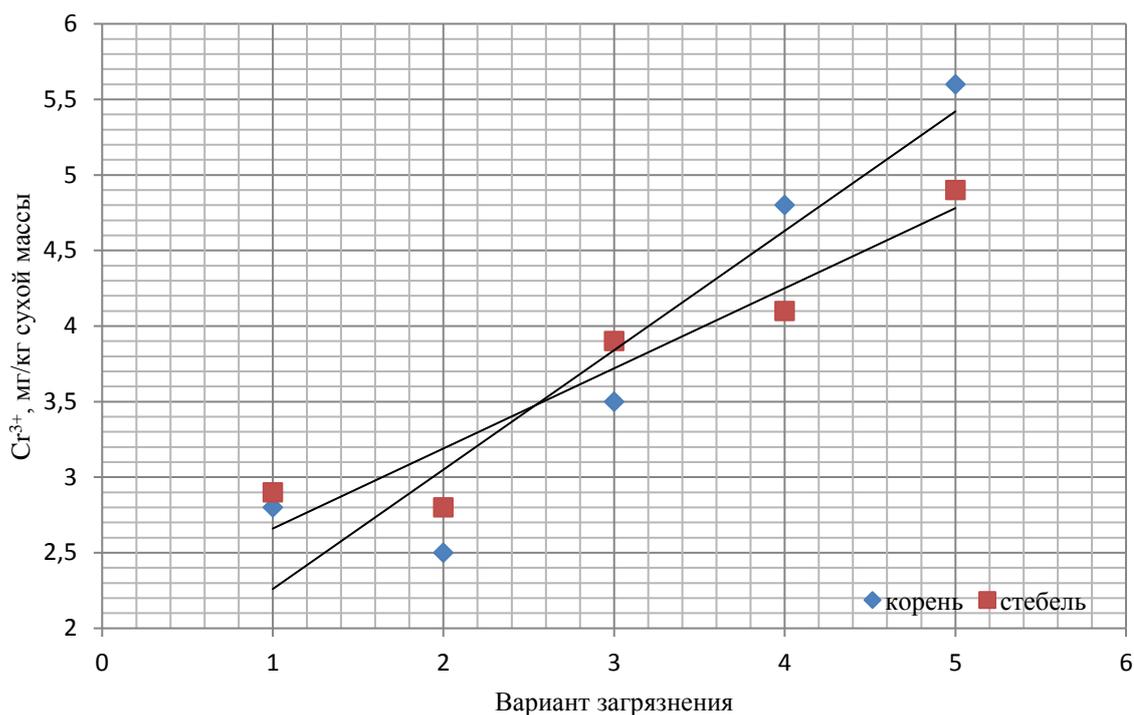
где  $R^2$  – достоверность аппроксимации  $R^{\wedge}1$ .

В вариантах внесения в почву ионов хрома в концентрации 0,5 ПДК наблюдалось уменьшение содержания данного металла в корневой системе проростков *B. nápus* на 7,8 % (рис. 2). При дальнейшем повышении концентрации поллютанта до 1 ПДК его концентрация в корнях данных растений увеличилась на 28%. В условиях внесения в почву ионов хрома в концентрации 1,5 ПДК, концентрация токсиканта в корневой системе увеличилась практически на 70 %, а при дальнейшем увеличении хрома до 2 ПДК, его концентрация в корнях проростков увеличилась практически на 97 %.

Обработка экспериментальных данных показала, что степень сорбции хрома корневой системой *B. nápus* также описывается линеаризованной зависимостью Вагелера – Ленгмюра. Уравнение зависимости имеет вид:

$$y = 0,79x + 1,47, \quad R^2 = 0,89, \quad (3)$$

где  $R^2$  – достоверность аппроксимации  $R^{\wedge}1$ .

Рис. 2. Сорбция ионов хрома органами проростков *Brassica napus*

При внесении в почву ионов хрома в концентрации 0,5 ПДК не прослеживалось увеличения данного металла в надземной части проростков *B. napus*, а наблюдалось некоторое уменьшение концентрации токсиканта в сравнении с контролем. При дальнейшем увеличении концентрации хрома в почве до 1 ПДК, содержание токсиканта в стеблях растений увеличилось практически на 34 %. Аналогичное увеличение концентрации ионов хрома в надземной части наблюдали и при увеличении концентрации токсиканта в почве до 1,5 и 2 ПДК, в условиях которого содержание металла в стеблях увеличилось на 41–68 % в сравнении с растениями, выращенными на незагрязненной почве.

На рисунке 2 изображена линеаризованная зависимость содержания хрома в стеблях растений от содержания хрома в почве.

Уравнение зависимости имеет вид:

$$y = 0,53x + 2,13, R^2 = 0,9097, \quad (4)$$

где  $R^2$  – достоверность аппроксимации  $R^2$ .

В вариантах внесения в почву ионов хрома в концентрации 0,5 ПДК наблюдалось повышение содержания данного металла в корневой системе проростков *Ph. tanacetifolia* на 25 %, по сравнению с растениями, выращенными на незагрязненной почве (рис. 3). При дальнейшем повышении концентрации поллютанта до 1 ПДК так же увеличивалась концентрация ионов хрома в корнях данных растений практически на 66 %. Но в условиях внесения ионов хрома в концентрации 1,5 ПДК, концентрация токсиканта в корневой системе снизилась, а при дальнейшем увеличении свинца до 2 ПДК, его концентрация в корнях проростков так же продолжала уменьшаться. Обработка экспериментальных данных показала, что степень сорбции хрома корневой системой *Ph. tanacetifolia* описывается логарифмической зависимостью.

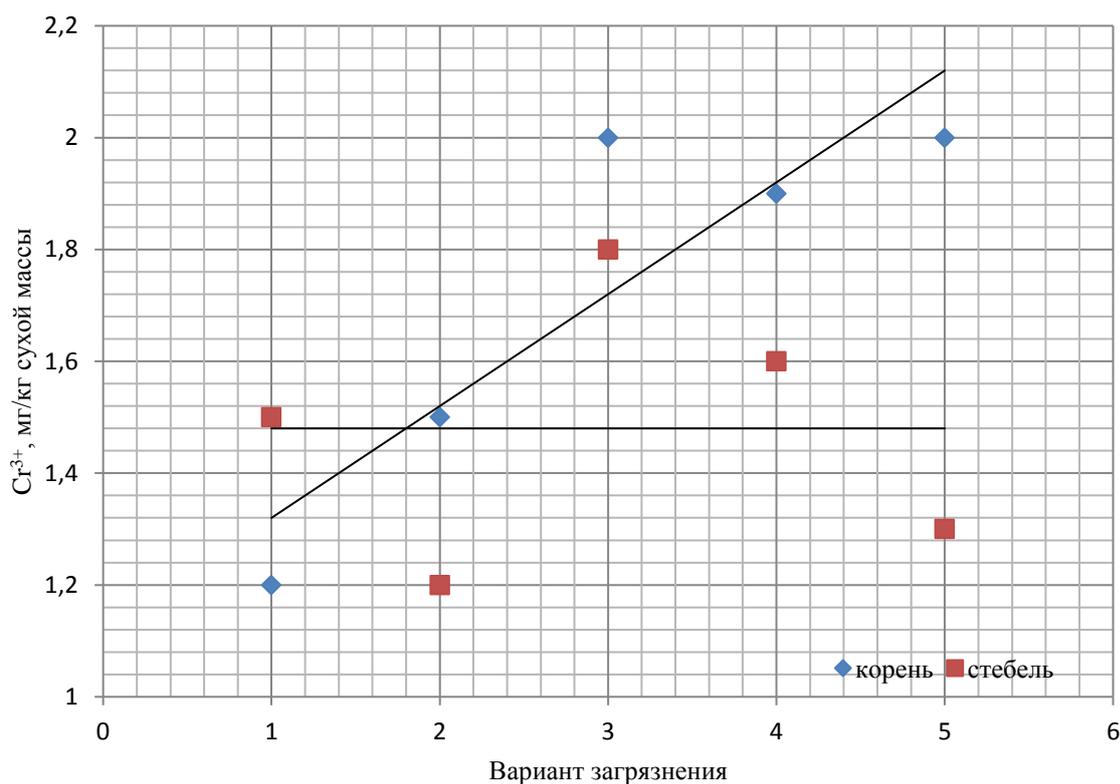


Рис. 3. Сорбция ионов хрома органами проростков *Phacelia tanacetifolia*

Уравнение зависимости имеет вид:

$$y = 0,5294\ln(x) + 1,2131, R^2 = 0,8914, \quad (5)$$

где  $R^2$  – достоверность аппроксимации  $R^{\wedge}1$ .

При внесении в почву ионов хрома в концентрации 0,5 ПДК прослеживалось уменьшение концентрации данного металла в надземной части проростков *Ph. tanacetifolia* на 25 % в сравнении с контролем. Но в условиях внесения ионов хрома в концентрации 1 ПДК, концентрация токсиканта в надземной части проростков резко возросла. При дальнейшем увеличении концентрации ионов хрома в почве до 1,5 ПДК его концентрация в стеблях растений уменьшилась, но превышала контрольные показатели и при внесении в почву 2 ПДК хрома, его концентрация в надземной части продолжала снижаться. Степень сорбции хрома надземной частью проростков *Ph. tanacetifolia* описывается линейной зависимостью.

Уравнение зависимости имеет вид:

$$y = 16x + 1,48, R^2 = 0,098, \quad (6)$$

где  $R^2$  – достоверность аппроксимации  $R^{\wedge}1$ .

Сорбция металлов зависит от видовой специфики растений, химической характеристики металлов и характеристики почвы. Проведённые исследования показали, что представители растений-гипераккумуляторов принадлежат к различным семействам, таким как Asteraceae, Brassicaceae, Linaceae, Amaranthaceae, Caryophyllaceae, Boraginaceae, Lamiaceae, Solanaceae и так далее.

Одним из показателей сорбционной способности растений является фактор переноса металла – это отношение концентрации металла в органах растений к концентрации

металла в почве, подверженной фиторемедиации. В таблице 2 представлены данные фактора переноса ионов хрома для изученных видов декоративных травянистых растений.

Исследования показали, что у *B. napus* и *R. communis* фактор переноса металла для хрома практически равен 1, что говорит о высокой способности данных видов растений накапливать ионы тяжелых металлов в вегетативных органах. Наименьшую способность накапливать ионы тяжелых металлов показали проростки *Ph. tanacetifolia*, фактор переноса металла которых составил 0,75.

Таблица 2

## Фактор переноса ионов хрома растениями

№ п/п	Вид растения	Семейство	Фактор переноса Cr <sup>3+</sup>
1	<i>Brassica napus</i>	Brassicaceae	0,99
2	<i>Ricinus communis</i>	Euphorbiaceae	1,00
3	<i>Phacelia tanacetifolia</i>	Boraginaceae	0,75

Технология фиторемедиации заключается в использовании определённого конкретного вида растений для восстановления почвы путём деактивации ионов металлов в ризосфере или транслокации их в надземные части. Новая технология фитосорбции имеет ряд преимуществ, таких как малозатратность и высокая эстетика проведения технологии (Безель, 2019; Васильева, 2019).

Фиторемедиация имеет ряд некоторых недостатков: 1) наличие комплекса нескольких типов тяжелых металлов и органических загрязнителей могут представить сложность в накоплении; 2) климатические и гидрологические условия могут ограничить рост растений, используемых для рекультивации; 3) это длительный процесс, который может занять несколько лет, и он применим только к верхним слоям почвы; 4) накопленная растениями биомасса может превратиться в опасные отходы, для которых будет необходима надлежащая утилизация.

Эффективность выбранной технологии зависит от видов растений, устойчивых к абиотическим и антропогенным факторам, их способности сорбировать более высокие концентрации тяжёлых металлов. Подбор растений осуществляется с учётом высоких темпов роста, степени накопления биомассы и скорости поглощения ионов тяжелых металлов.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Исследования показали, что наибольшая сорбционная способность отмечена у проростков *Brassica napus* и *Ricinus communis*, наименьшая сорбционная способность отмечена проростки *Phacelia tanacetifolia* Benth.

У проростков *B. napus* и *R. communis* фактор переноса металла для хрома равен 1, что позволяет отнести данные растения к гипераккумуляторам тяжелых металлов и использовать их в технологии фиторемедиации почв, загрязненных ионами тяжелых металлов. Наименьшую способность накапливать ионы тяжелых металлов показали проростки *Ph. tanacetifolia* фактор переноса металла которых не превысил 1,0.

**Список литературы**

Алемасова А. С. Накопление тяжелых металлов мохообразными в различных экотопах Донбасса // Трансформация экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов: Материалы Международной научной конференции (Киров, 16-18 апреля 2019 г.). – Киров: ВятГУ, 2019. – С. 60–65.

Безель В. С., Жуйкова Т. В., Дуля О. В., Бальбердина Н. С. Внутривидовая изменчивость металлоустойчивости семенного потомства *Taraxacum officinale* Wigg. s.l.: анализ на основе зависимостей «доза – эффект» // Экология. – 2019. – № 4. – С. 263–269.

- Васильев А. Г. Эволюционная экология в XXI веке: новые концепции и перспективы развития // Экология. 2019. – № 2. – С. 88–100.
- Глухов А. З., Хархота А. И. Растения в антропогенно трансформированной среде // Промышленная ботаника. – 2001. – Т. 1. – С. 5–10.
- Глухов А. З., Сафонов А. И. Перспективы проведения фитоиндикационного мониторинга техногенно трансформированных экотопов // Промышленная ботаника. – 2002. – Т. 2. – С. 7–14.
- Глухов А. З., Сафонов А. И. Экосистемное нормирование по данным фитоиндикационного мониторинга // Донецкие чтения 2016: образование, наука и вызовы современности: Материалы I Международной научной конференции (Донецк, 16-18 мая 2016 г.). – Т. 1. – Донецк: Изд-во ЮФУ, 2016. – С. 311–312.
- Лянгузова И. В. Динамические тренды содержания тяжелых металлов в растениях и почвах при разном режиме аэротехногенной нагрузки // Экология. – 2017. – № 4. – С. 250–260.
- Мандра Ю. А., Есаулко А. Н., Ключин П. В. Экологическая оценка городских территорий с использованием растений различных таксонов в качестве индикаторов // Юг России: экология, развитие. – 2019. – Т. 14, № 4. – С. 134–146. DOI: 10.18470/1992-1098-2019-4-134-146.
- Сафонов А. И. Новые виды растений в экологическом мониторинге Донбасса // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2020. – № 1. – С. 96–100.
- Сафонов А. И., Глухов А. З. Экологический фитомониторинг в Донбассе: эмпирические блоки методологии // Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики. Материалы XVIII Международной научно-практической конференции. – Тольятти, 2021. – С. 225–227.
- Dakiky M., Manassra A., Mer'eb M. Selective adsorption of chromium (VI) in industrial wastewater using low-cost abundantly available adsorbents // Advances in Environmental Research. – 2002. – Vol. 6. – P. 533–540.
- Ernst W. H. O. Evolution of metal tolerance in higher plants // Forest Snow and Landscape Research. – 2006. – Vol. 80, N 3. – P. 251–274.
- Meena M. K. Impact of arsenic-polluted groundwater on soil and produce quality: a food chain study // Environmental Monitoring and Assessment. – 2020. – Vol. 192, N 12. – P. 785.
- Panidi E., Trofimez L., Sokolova J. Application of phyto-indication and radiocesium indicative methods for microrelief mapping // IOP Conf. Series Earth and Environmental Science. – 2016. – N 34. – P. 12–29.
- Saha R., Nandi R., Saha B. Sources and toxicity of hexavalent chromium // Journal of Coordination Chemistry – 2011. – Vol. 64. – P. 1782–1806.
- Safonov A., Glukhov A. Ecological phytomonitoring in Donbass using geoinformational analysis // Problems of Industrial Botany of Industrially Developed Regions 2021. VI International Scientific Conference. BIO Web Conf. – Vol. 31, 00020. – 2021. – 4 p. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213100020>.

**Frunze O.V. Sorption capacity of ornamental herbaceous plants in conditions of soil contamination with chromium ions** // Ekosistemy. 2023. Iss. 33. P. 152–159.

Heavy metals are among the main environmental pollutants, and their toxicity is becoming a problem of increasing ecological importance. Chromium is present in the soils of the technogenic region in doses exceeding the maximum permissible concentrations, and has a toxic effect on plant and animal organisms, directly or indirectly negatively affects human health. Traditionally, the extraction of chromium ions from soils is carried out by chemical precipitation. However, this method does not allow to reduce the concentration of chromium to such a low level, as required by environmental legislation. Biosorption is a process in which biological objects are used to absorb heavy metal ions. This is a promising alternative method of cleaning the soils of the urban environment and the agro-industrial complex, due to its low cost and high ability to absorb metals. Most chromium ions are present in soils in trivalent [Cr(III)] and hexavalent [Cr(VI)] forms. The behavior of chromium in the soil, transfer from soil to plant and accumulation in various parts of plants depend on its chemical form, plant type and physico-chemical properties of the soil. The sorption capacity of some types of ornamental herbaceous plants was studied under conditions of soil contamination with chromium ions. The adsorption constant was found from the Langmuir isotherm. The metal transfer factor is calculated. According to the results of the research, the types of ornamental herbaceous plants – hyperaccumulators of heavy metal ions, which can be recommended for the technology of phytoremediation of soils in a technogenic region, have been identified.

*Key words:* biosorption, chromium, ornamental herbaceous plants, phytoremediation, Donbass, technogenically transformed environment.

*Поступила в редакцию 14.01.23  
Принята к печати 20.03.23*