

С. П. Высоцкий, д-р техн. наук<sup>1</sup>, О. В. Фрунзе<sup>2</sup>

1 – ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка,

2 – ГОУВПО «Донецкий национальный университет», г. Донецк

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ, МЕТОДОМ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ

*Загрязнение почв тяжелыми металлами является одной из основных экологических проблем всего мира, которая представляет угрозу как для растений, животных, так и для человека. Тяжелые металлы обладают высокой токсичностью, часто не поддаются биохимическому распаду и могут оказывать негативный эффект на почвенные микроорганизмы, тем самым замедляя процессы биоремедиации.*

*Тяжелые металлы легко поглощаются растениями из почвы через ризосферу и увеличение их концентрации в тканях растений может привести к нарушению ростовых, физиологических, биохимических и молекулярных процессов в растениях. Поэтому фиторемедиация может выступить важным методом очистки урбанизированных территорий, загрязненных тяжелыми металлами. Технология фиторемедиации использует растения для рекультивации участков, загрязненных органическими и неорганическими веществами, а также ионами тяжелых металлов, которые используются в промышленности.*

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, токсичность, загрязнение окружающей среды, фиторемедиация

### **Введение**

Индустриализация и урбанизация привели к загрязнению окружающей среды различными токсичными и опасными веществами, что является основной проблемой века. Загрязнение почв тяжелыми металлами является одной из основных экологических проблем вследствие их прямого негативного воздействия на продуктивность растений.

Большие площади земель во многих странах подвержены загрязнению как органическими, так и неорганическими веществами. Органические загрязнители имеют в основном антропогенное происхождение и попадают в окружающую среду при аварийном разливе топлива, проведении военных операций, ведении сельского хозяйства и промышленной деятельности. Неорганические загрязняющие вещества встречаются в виде природных элементов в земной коре. Неорганические загрязняющие вещества могут быть необходимыми для растений макроэлементами, такими как нитраты и фосфаты, микроэлементами, такими как хром (Cr), медь (Cu), железо (Fe), марганец (Mn), молибден (Mo), никель (Ni), цинк (Zn); элементами, физиологическая роль которых для растений не определена, такие как мышьяк (As), кадмий (Cd), кобальт (Co), ртуть (Hg), свинец (Pb), ванадий (V) и т. д. [1, 2]. Загрязнение окружающей среды как органическими, так и неорганическими веществами, напрямую или косвенно негативно влияет на здоровье человека.

Обширное загрязнение сельскохозяйственных угодий во всем мире значительно снижает продуктивность пахотных земель при выращивании сельскохозяйственных культур.

Таким образом, общемировая проблема загрязнения окружающей среды требует немедленного решения, направленного на детоксикацию токсичных и опасных загрязнителей, с целью восстановления чистой, зеленой и безопасной окружающей среды.

В настоящее время предприняты все меры для поиска менее загрязняющих окружающую среду и экономически эффективных экологически чистых технологий. В связи с этим в последние годы технология фиторемедиации может рассматриваться как эффективная, менее затратная альтернатива общепринятым рекультивационным технологиям восстановления окружающей среды, загрязненной широким спектром токсичных и вредных веществ [3, 4].

Современные технологии восстановления почв, загрязненных такими тяжелыми металлами, как Cd, Cr, Ni, Co, Mn, Hg и As и т. д. используют сорбционные свойства растений [5–7]. В развивающихся странах очищенные и неочищенные сточные воды обычно используются для орошения сельскохозяйственных угодий, что приводит к накоплению в почвах тяжелых металлов, что негативно сказывается на качестве пахотных земель. Сорбция тяжелых металлов из загрязненных участков почвы с помощью зеленых технологий является приемлемым подходом [8].

Природная геологическая и антропогенная деятельность являются основными источниками загрязнения почв тяжелыми металлами. Тяжелые металлы легко поглощаются растениями через корни и транспортируются в надземные части органов. Поглощение ионов тяжелых металлов зависит от нескольких факторов, таких как pH почвы, температура, содержание органического компонента, наличие хелатирующих агентов и т. д. Среди различных почвенных факторов pH почвы является наиболее важным, влияющим на подвижность ионов тяжелых металлов.

Выделяют несколько категорий технологии фитоочистки почв:

1. Фитоэкстракция или фитоаккумуляция. Процесс, при котором используют растения для сорбции загрязняющих веществ из почвы в корень и надземные части – стебель и листья (процент накопления ионов тяжелых металлов может варьировать от 0,01 % до 1 % сухой массы растения, в зависимости от металла). Эта технология дает возможность сорбировать металлы в растительном материале, который затем можно легко транспортировать для надлежащей утилизации в специальных установках для сжигания, с последующим восстановлением металлов. Таким образом отработанный растительный материал может служить дополнительным источником ионов тяжелых металлов, которые можно использовать в производстве.

2. Фитодеградация или фитотрансформация. Процесс поглощения растениями загрязнителей из почвы вследствие их трансформации в более стабильные, менее токсичные или менее подвижные формы, под действием различных ферментов, вырабатываемых растительными тканями [5].

3. Фитостимуляция. Процесс биоремедиации загрязняющих веществ растениями при помощи почвенных микроорганизмов, которые при взаимодействии с ризосферой растений стимулируют поглощение ионов тяжелых металлов растениями. В основном в данной технологии используют почвенные бактерии рода *Pseudomonas* [6].

4. Ризофилтрация. Процесс, который включает в себя восстановление загрязненных почв путем адсорбции тяжелых металлов корнями растений. Ризофилтрация похожа на фитоэкстракцию, но используется в основном для очищения не почв, а загрязненных грунтовых вод. Растения, которые будут использоваться для очистки, выращиваются в теплицах методом гидропоники.

5. Фитостабилизация. Процесс, при котором растения снижают мобильность и способность к миграции тяжелых металлов из загрязненной почвы за счет их поглощения и осаждения тканями растения, таким образом снижая их биологическую доступность. Этот процесс уменьшает подвижность тяжелых металлов и предотвращает их миграцию в грунтовые воды или воздух, что уменьшает их биодоступность для включения в пищевые цепи.

Эффективность процесса сорбции ионов тяжелых металлов зависит от вида растений, которые способны накапливать высокие концентрации металла в их надземной части без каких-либо видимых признаков угнетения ростовых показателей. Эти растения называют гипераккумуляторами, а явление – гипераккумуляцией. Около 500 видов растений являются гипераккумуляторами. Среди них примерно 0,2 % принадлежат к покрытосеменным [9, 10]. Идеальные для фиторемедиации растения должны обладать способностью накапливать высокие концентрации металла, выдерживать высокие концентрации соли, обладать высокой скоростью роста, быстро накапливать биомассу, эффективно накапливать металл в их

надземных частях [6]. Поэтому **целью исследования** является оценка сорбционной способности ионов кобальта, марганца и хрома некоторыми видами декоративных травянистых растений.

### **Методика выполнения экспериментов**

Для выбора видов растений для фиторемедиации измеряют соотношение между содержанием металла в почве и частях растений (фактор переноса металла) и это соотношение должно быть больше единицы. Это означает более высокое накопление ионов металла в частях растений, нежели его содержание в почве [11].

Изучена способность фиторемедиации Co, Mn и Cr у шестнадцати видов травянистых растений: *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica naps* L., *Dahlia variabilis* Desf., *Echinacea purpurea*, *Cosmos sulphureus* Cav., *Agrostemma githago* L., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L., *Calendula officinalis* L., *Petunia Hybrida Grandiflora*, *Silene coeli rosa*, *Phacelia tanacetifolia* L., *Zinnia aqnustifolla* H., *Tagetes erectus* L., *Salvia splendens*.

Исследование накопления тяжелых металлов проростками декоративных травянистых растений в условиях загрязнения почвы ионами кобальта и марганца проводились по схеме полного двухфакторного трехуровневого эксперимента. В качестве загрязнителей использовались сульфат кобальта и сульфат марганца по стехиометрическому отношению. Концентрации марганца составляли 0–3 г/кг, кобальта: 0–10 мг/кг, хрома: 0–6 мг/кг. Семена растений проращивали согласно их биологическим особенностям. Выращивание вели на протяжении тридцати дней, при продолжительности светового дня 14 часов и температуре +20–22 °С, влажности почвы около 70 % полной влажности. В каждый сосуд вносилось по 350 г почвы, просеянной через почвенное сито с диаметром отверстий 3 мм, в который предварительно вносились сульфат кобальта и сульфат марганца согласно схеме эксперимента.

Содержание марганца и кобальта в растительном материале определяли по методу атомно-адсорбционной спектроскопии по В. Прайсу на атомно-адсорбционном 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.

### **Изложение основного материала исследований**

Проведенные исследования показали, что способность растений накапливать в своих органах тяжелые металлы зависит как от металла, так и от специфических особенностей вида растений.

Так, в вариантах внесения в почву ионов кобальта в концентрации 1 ПДК наблюдалось повышение содержания данного металла в вегетативных органах *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L. в 2–6 раз, по сравнению с растениями, выращенными на незагрязненной почве. При дальнейшем повышении концентрации поллютанта до 2 ПДК также увеличивалась концентрация ионов кобальта в вегетативных органах данных растений в 6–10 раз (рисунок 1).

У проростков *Echinacea purpurea* L., *Agrostemma githago* L., *Silene coeli rosa*, *Phacelia tanacetifolia* L., *Zinnia aqnustifolla* H., *Tagetes erectus* L. так же наблюдали способность сорбировать ионы кобальта на 50–90 %, в сравнении с контролем (в условиях загрязнения почвы ионами Co в концентрации 1 ПДК). При увеличении концентрации кобальта до 2 ПДК сорбционная способность проростков несколько снижалась, но все равно оставалась на достоверном уровне.

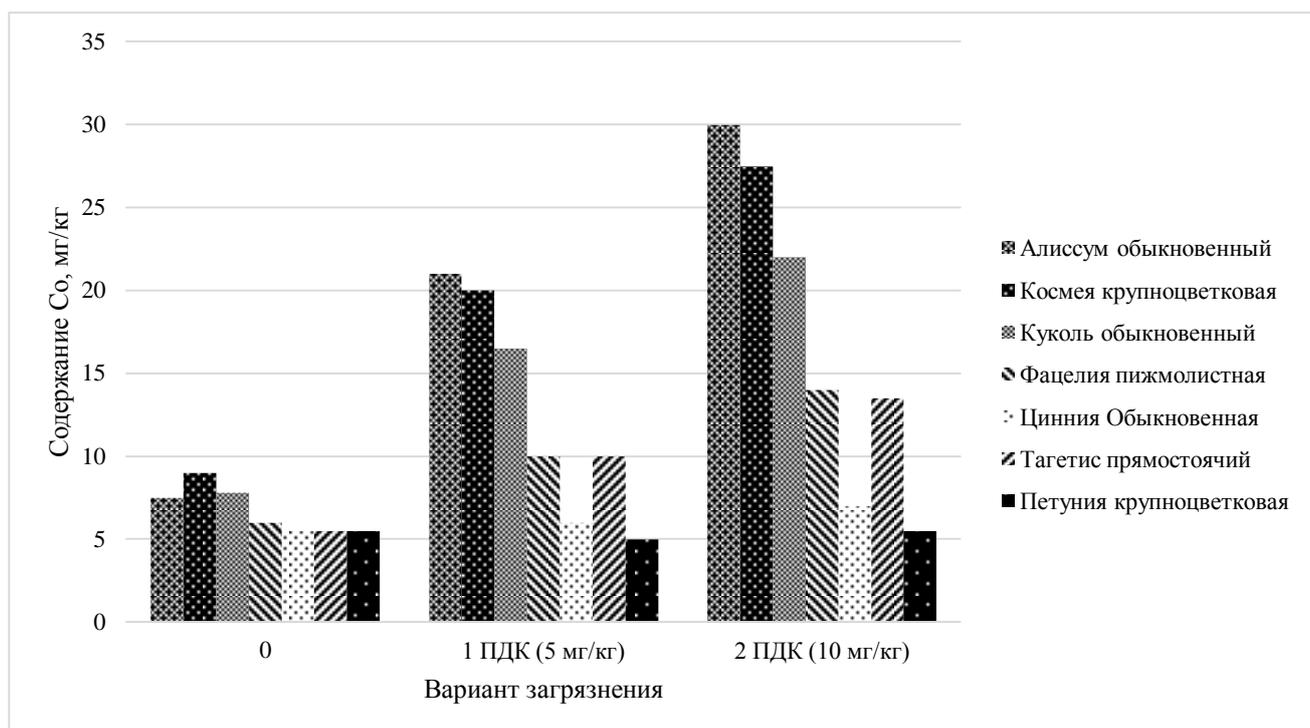


Рисунок 1 – Сорбция Co вегетативными органами некоторых видов декоративных травянистых растений

У проростков *Salvia splendens* L., *Petunia Hybrida Grandiflora*, *Calendula officinalis* L., *Dahlia variabilis* Desf. при внесении в почву ионов кобальта в концентрации 1 ПДК практически не прослеживалось достоверного увеличения металла в вегетативных органах растений, что говорит о низкой сорбционной способности данных видов. С увеличением концентрации кобальта до 2 ПДК сорбционная способность снижалась или оставалась на прежнем уровне. Данный факт можно объяснить защитной реакцией растения на пагубное воздействие поллютанта.

При внесении в почву ионов марганца прослеживалась похожая картина. При внесении в почву марганца концентрации 1 ПДК наблюдалось повышение содержания данного металла в вегетативных органах *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L. практически в 4–6 раз, по сравнению с растениями, выращенными на незагрязненной почве. При дальнейшем повышении концентрации поллютанта до 2 ПДК так же увеличивалась концентрация ионов марганца в вегетативных органах данных растений в 6–10 раз (рисунок 2).

У проростков *Echinacea purpurea* L., *Agrostemma githago* L., *Silene coeli rosa*, *Phacelia tanacetifolia* L., *Zinnia aqnostifolla* H., *Tagetes erectus* L. при внесении в почву 1 ПДК Mn так же наблюдали способность сорбировать ионы марганца в 2–3 раза, в сравнении с контролем. При увеличении концентрации марганца до 2 ПДК сорбционная способность проростков несколько снижалась, но все равно оставалась на достоверном уровне.

У проростков *Salvia splendens* L., *Petunia Hybrida Grandiflora*, *Calendula officinalis* L., *Dahlia variabilis* Desf. при внесении в почву ионов марганца в концентрации 1 ПДК практически не прослеживалось достоверного увеличения металла в вегетативных органах растений, что говорит о низкой сорбционной способности данных видов.

Фиторемедиация является экологически стабильной и экономически эффективной зеленой стратегией в отличие от традиционных очистных технологий, которые часто требуют больших инвестиций, огромных затрат энергии и труда. Ее можно рассматривать в качестве долгосрочной перспективы рекультивации загрязненных земель.

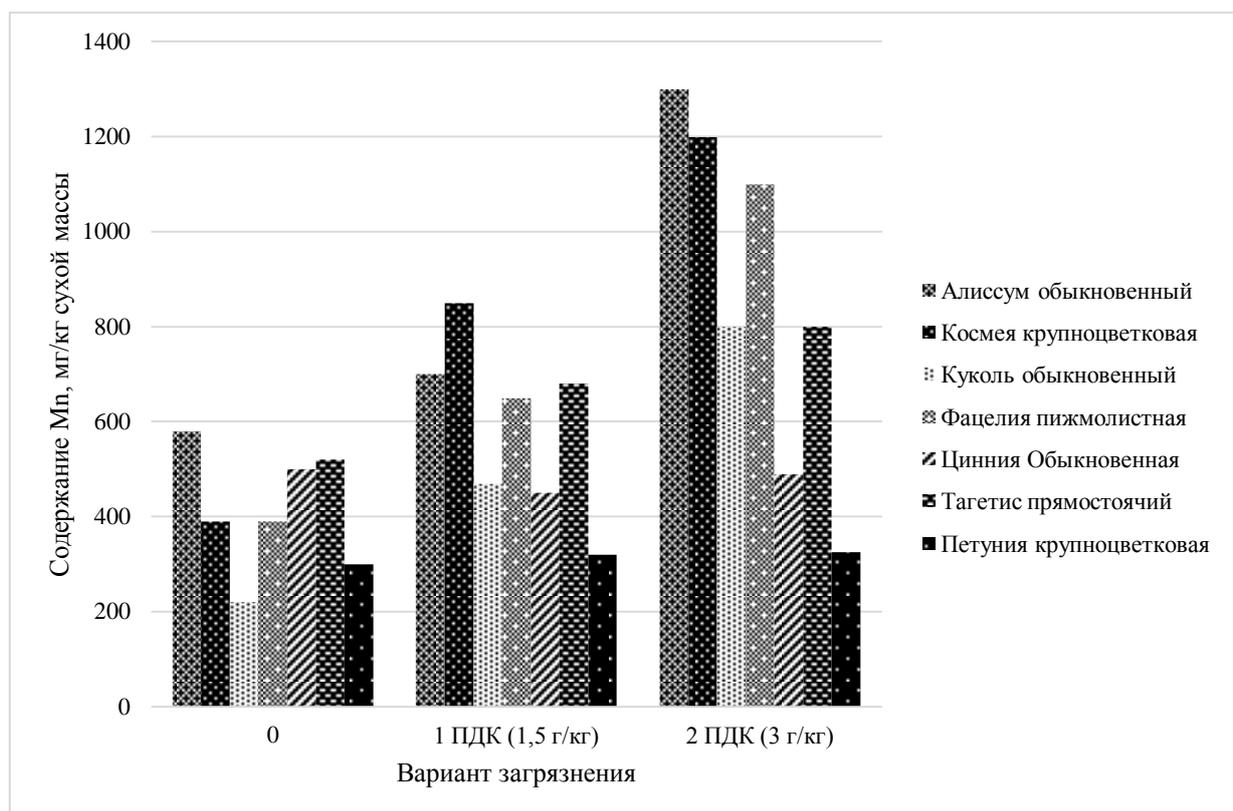


Рисунок 2 – Сорбция Mn вегетативными органами некоторых видов декоративных травянистых растений

Подобная закономерность прослеживалась и при внесении в почву ионов хрома. Данные исследования представлены на рисунке 3.

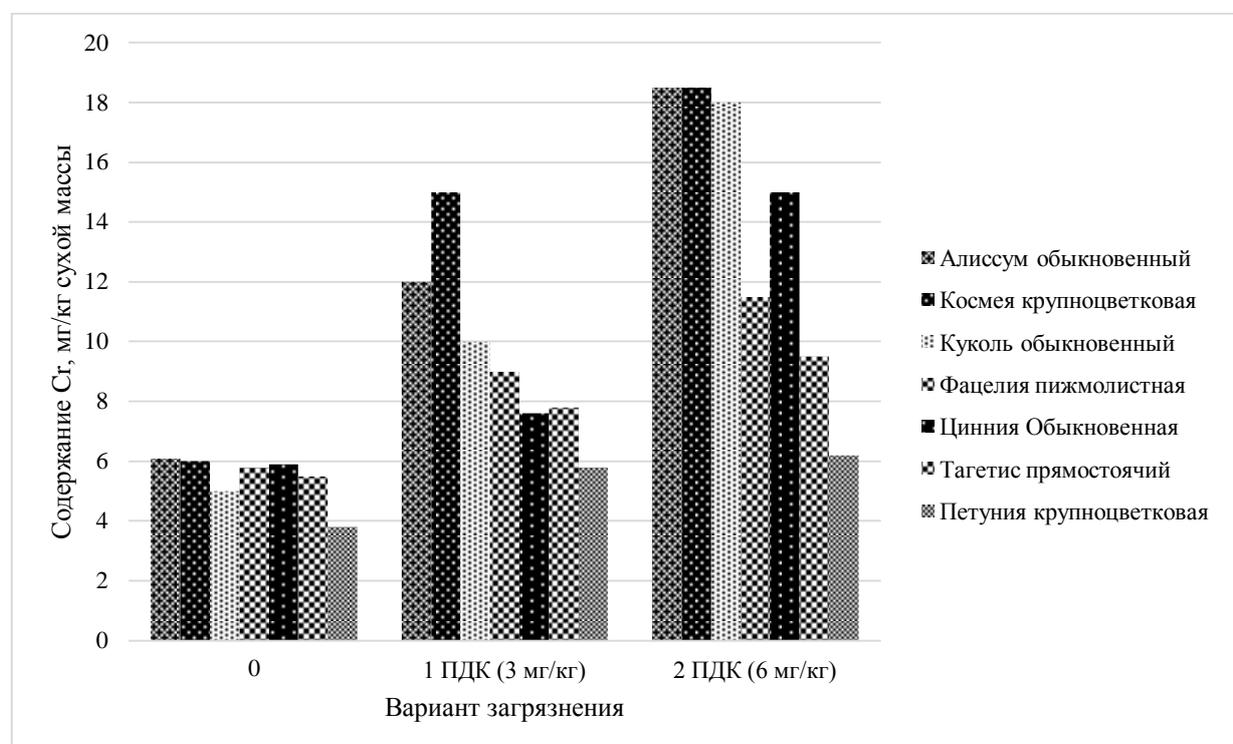


Рисунок 3 – Сорбция Cr вегетативными органами некоторых видов декоративных травянистых растений

Сорбция металлов зависит от видовой специфики растений, химической характеристики металлов и характеристики почвы. Проведенные исследования показали, что представители растений-гипераккумуляторов принадлежат к различным семействам, таким как Asteraceae, Brassicaceae, Cunouniaceae, Fabaceae, Flacourtiaceae, Lamiaceae, Poaceae, Violaceae, Amaranthaceae, Boraginaceae и т. д.

В таблице 1 представлены данные фактора переноса ионов Co, Mn, Cr некоторых травянистых растений.

Таблица 1 – Фактор переноса Co, Mn, Cr некоторых видов травянистых растений

№ п/п	Вид растения	Семейство	Фактор переноса		
			Co	Mn	Cr
1	<i>Ageratum houstonianum</i> cv. <i>Bule Lagoon</i>	Asteraceae	15,1	15,2	15,2
2	<i>Alyssum maritimum</i> Lam.	Brassicaceae	15,1	15,5	15,1
3	<i>Brassica napus</i> L.	Brassicaceae	14,0	14,2	14,0
4	<i>Cosmos sulphureus</i> Cav.	Asteraceae	14,8	14,0	14,0
5	<i>Linum usitatissimum</i> L.	Linaceae	13,8	13,0	13,0
6	<i>Atriplex hortense</i> L.	Amaranthaceae	6,6	6,8	6,5
7	<i>Echinacea purpurea</i> L.	Asteraceae	5,5	5,5	5,6
8	<i>Agrostemma githago</i> L.	Caryophyllaceae	5,3	5,5	5,5
9	<i>Silene coeli rosa</i>	Caryophyllaceae	5,3	4,5	4,5
10	<i>Phacelia tanacetifolia</i> L.	Boraginaceae	4,3	4,2	4,2
11	<i>Zinnia aqnostifolia</i> H.	Asteraceae	3,2	3,2	3,2
12	<i>Tagetes erectus</i> L.	Asteraceae	2,2	2,1	2,1
13	<i>Salvia splendens</i> L.	Lamiaceae	1,1	1,0	1,0
14	<i>Petunia Hybrida Grandiflora</i>	Solanaceae	1,0	1,0	1,0
15	<i>Calendula officinalis</i> L.	Asteraceae	1,0	1,0	1,0
16	<i>Dahlia variabilis</i> Desf.	Asteraceae	1,0	1,0	1,0

Исследования показали, что у *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav. и *Linum usitatissimum* L. фактор переноса металла превысил 15 для Co, Mn и Cr, что говорит о высокой способности данных видов растений накапливать ионы тяжелых металлов в вегетативных органах. У *Atriplex hortense* L., *Echinacea purpurea* L., *Agrostemma githago* L., *Silene coeli rosa*, *Phacelia tanacetifolia* L., *Zinnia aqnostifolia* H., *Tagetes erectus* L. фактор переноса металла колебался от 6,5 до 3,2, что так же показывает значительную способность данных видов растений к накоплению ионов Co, Mn и Cr. Наименьшую способность накапливать ионы тяжелых металлов показали проростки *Salvia splendens* L., *Petunia Hybrida Grandiflora*, *Calendula officinalis* L., *Dahlia variabilis* Desf., фактор переноса металла которых не превысил 1,0.

Технология фиторемедиации заключается в использовании определенного особого вида растений для восстановления почвы путем деактивации ионов металлов в ризосфере или транслокации их в надземных частях. Новая технология фитосорбции имеет ряд преимуществ, таких, как малозатратность и высокая эстетика проведения технологии [2].

### Выводы

1. Технология фиторемедиации имеет ряд преимуществ, таких, как высокая экономическая эффективность, экологичность, эстетичность, применима к широкому спектру тяжелых металлов.

2. Фиторемедиация имеет ряд недостатков:

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

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

4. Проростки *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L. благодаря устойчивости к условиям металлопрессинга, интенсивному уровню накопления биомассы, обладают высокой сорбционной способностью, что дает возможность рекомендовать данные виды к использованию в технологии восстановления почв, загрязненных ионами тяжелых металлов.

### Список литературы

1. Агротехногенное загрязнение почвенного покрова тяжелыми металлами: источники, масштабы, рекультивация / В. А. Большаков, Н. М. Краснова, Т. И. Борисочкина [и др.]. – Москва. – 1993. – 91 с.
2. Высоцкий, С. П. Пути решения проблем экологической безопасности автотранспорта / С. П. Высоцкий, Н. В. Игнатенко, Н. А. Столярова // Екологічні проблеми паливно-енергетичного комплексу. II регіональна наукова конференція аспірантів і студентів, 26–27 квітня 2011 р. – Донецьк : ДонНТУ. – 2011. – С.16–18.
3. Высоцкий, С. П. Пути снижения влияния автотранспорта на окружающую среду / С. П. Высоцкий, Н. А. Столярова, А. В. Фаткулина, К. С. Широких // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. – 2012. – № 1 (14). – С. 139–145.
4. Гуральчук, Ж. З. Фітотоксичність важких металів та стійкість рослин до їх дії / Ж. З. Гуральчук. – Київ : Логос. – 2006. – 208 с. – ISBN 966-581-754-X.
5. Давыдова, С. Л. Тяжелые металлы как супертоксиканты XXI века / С. Л. Давыдова. – Москва : Изд-во РУДН, 2002. – 140 с. – ISBN 5-209-01318-9.
6. Ильин, В. Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение / В. Б. Ильин. – Новосибирск : Наука, 1991. – 151 с. – ISBN 5020294225.
7. Фрунзе, О. В. Содержание кобальта и марганца в проростках декоративных травянистых растений в условиях контролируемого загрязнения / О. В. Фрунзе, М. Н. Конопленко // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2018. – № 3–4. – С. 132–136.
8. Glick, B. R. Phytoremediation: Synergistic Use of Plants and Bacteria to Clean Up the Environment / B. R. Glick // Biotechnology Advances. – 2010. – Vol. 21, № 5. – P. 383–393.
9. Junior, A. M. D. Dispersal Pattern of Airborne Emissions From an Aluminium Smelter in Ouro Preto, Brasil, as Expressed by foliar fluoride accumulation in eight plant species / A. M. D. Junior, M. A. Oliva, F. A. Ferreira // Ecological Indicators. – 2012. – Vol. 8, № 5. – P. 454–461.
10. Assessment of Landfill Leachate Volume and Concentration of Cyanide and Fluoride during Phytoremediation / D.-H. Kang, D. Tsao, F. Wang-Cahill [et al.] // Bioremediation Journal. – 2012. – Vol. 12, № 1. – P. 32–45.
11. Kramer, U. Phytoremediation: Novel Approaches to Cleaning Up Polluted Soils / U. Kramer // Current Opinion in Biotechnology. – 2008. – Vol. 16, № 2. – P. 133–141.

*С. П. Высоцкий<sup>1</sup>, О. В. Фрунзе<sup>2</sup>*

*1 – ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
г. Макеевка,*

*2 – ГОУВПО «Донецкий национальный университет», г. Донецк*

### **Восстановление почв, загрязненных тяжелыми металлами, методом фиторемедиации**

Большие площади земель во многих странах подвержены загрязнению как органическими, так и неорганическими веществами. Органические загрязнители имеют в основном антропогенное происхождение и попадают в окружающую среду при аварийном разливе топлива, проведении военных операций, ведении сельского хозяйства и промышленной деятельности. Неорганические загрязняющие вещества встречаются в виде природных элементов в земной коре. Неорганические загрязняющие вещества могут быть необходимыми для растений макроэлементами, такими как нитраты и фосфаты, микроэлементами, такими как хром (Cr), медь (Cu), железо (Fe), марганец (Mn), молибден (Mo), никель (Ni), цинк (Zn); элементами, физиологическая роль которых для растений не определена, такие как мышьяк (As), кадмий (Cd), кобальт (Co), ртуть (Hg), свинец (Pb), ванадий (V) и т. д.

В настоящее время предприняты все меры для поиска менее загрязняющих окружающую среду и экономически эффективных экологически чистых технологий. В связи с этим в последние годы технология фиторемедиации может рассматриваться как эффективная, менее затратная альтернатива общепринятым рекультивационным технологиям восстановления окружающей среды, загрязненной широким спектром токсичных и вредных веществ.

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

Эффективность процесса сорбции ионов тяжелых металлов зависит от вида растений, которые способны накапливать высокие концентрации металла в их надземной части без каких-либо видимых признаков угнетения ростовых показателей. Эти растения называют гипераккумуляторами, а явление – гипераккумуляцией. Около 500 видов растений являются гипераккумуляторами.

Фиторемедиация является экологически стабильной и экономически эффективной зеленой стратегией в отличие от традиционных очистных технологий, которые часто требуют больших инвестиций, огромных затрат энергии и труда. Ее можно рассматривать в качестве долгосрочной перспективы рекультивации загрязненных земель.

Сорбция металлов зависит от видовой специфики растений, химической характеристики металлов и характеристики почвы. Проведенные исследования показали, что представители растений-гипераккумуляторов принадлежат к различным семействам, таким как Asteraceae, Brassicaceae, Cunouniaceae, Fabaceae, Flacourtiaceae, Lamiaceae, Poaceae, Violaceae, Amaranthaceae, Boraginaceae и т. д.

Технология фиторемедиации имеет такие преимущества, как высокая экономическая эффективность, экологичность, эстетичность, применима к широкому спектру тяжелых металлов.

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

Проростки *Ageratum houstonianum* cv. Bule Lagoon, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L. благодаря устойчивости к условиям металлопресинга и интенсивному уровню накопления биомассы обладают высокой сорбционной способностью, что дает возможность рекомендовать данные виды к использованию в технологии восстановления почв, загрязненных ионами тяжелых металлов.

**ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ, ТОКСИЧНОСТЬ, ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ**

*S. P. Vysotskiy<sup>1</sup>, O. V. Frunze<sup>2</sup>*

*1 – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka,*

*2 – Donetsk National Technical University, Donetsk*

### **Recovery of Soils Contaminated by Heavy Metals by Phytoremediation**

Large areas of land in many countries are subject to pollution by both organic and inorganic substances. Organic pollutants are mainly of anthropogenic origin and enter the environment during accidental fuel spill, military operations, agricultural and industrial activities. Inorganic pollutants are found as natural elements in the Earth's crust. Inorganic pollutants may be necessary macrocells for plants, such as nitrates and phosphates, trace elements such as chromium (Cr), copper (Cu), iron (Fe), manganese (Mn), molybdenum (Mo), nickel (Ni), zinc (Zn); elements whose physiological role for plants is not defined, such as arsenic (As), cadmium (Cd), cobalt (Co), mercury (Hg), lead (Pb), vanadium (V), etc.

Currently, all measures have been taken to search for less polluting and economically efficient environmentally friendly technologies. In this regard, in recent years, phytoremediation technology can be considered as an effective, less costly alternative to generally accepted remediation technologies for restoration of the environment, contaminated with a wide range of toxic and harmful substances.

Modern technologies for the restoration of soils contaminated with such heavy metals as Cd, Cr, Ni, Co, Mn, Hg and As, etc., use the sorption properties of plants. In developing countries, treated and untreated wastewater is commonly used for irrigation of agricultural land. It leads to the accumulation of heavy metals in soils, which negatively affects the quality of arable lands. Sorption of heavy metals from contaminated soil using green technology is an acceptable approach.

The efficiency of the sorption process of heavy metal ions depends on the type of plants which are capable of accumulating high concentrations of metal in their aerial parts without any visible signs of inhibition of growth indicators. These plants are called hyperaccumulators, and the phenomenon is called hyperaccumulation. About 500 plant species are hyperaccumulators.

Phytoremediation is an environmentally sustainable and cost-effective green strategy in contrast to traditional treatment technologies which often require large investments, huge expenditures of energy and labor. It can be considered as a long-term prospect for the restoration of contaminated land.

Sorption of metals depends on the specific character of plants, the chemical characteristics of metals and soil characteristics. Studies have shown that representatives of hyperaccumulator plants belong to different families, such as Asteraceae, Brassicaceae, Cunouniaceae, Fabaceae, Flacourtiaceae, Lamiaceae, Poaceae, Violaceae, Amaranthaceae, Boraginaceae, etc.

Phytoremediation technology has such advantages as high economic efficiency, environmental friendliness, aesthetics applicable to a wide range of heavy metals.

The disadvantages of phytoremediation are: the presence of a complex of several types of heavy metals and organic pollutants may present difficulty in accumulation; climatic and hydrological conditions may limit the growth of plants used for reclamation; this is a long process that can take several years, and it applies only to the upper layers of the soil; biomass accumulated by plants can turn into hazardous waste, which will require proper disposal.

Sprouts of *Ageratum houstonianum* cv. Bule Lagoon, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L. due to their resistance to metal pressing conditions and the intense level of biomass accumulation, have high sorption capacity, which makes it possible to recommend these species for use in the technology of restoration of soils contaminated with heavy metal ions.

HEAVY METALS, TOXICITY, ENVIRONMENTAL POLLUTION, PHYTOREMEDIATION

#### **Сведения об авторах:**

##### **С. П. Высоцкий**

SPIN-код: 7497-0100  
Scopus Author ID: 7004891012  
ORCID ID: 0000-0002-2988-7245  
Телефон: +38 (071) 391-35-97  
Эл. почта: sp.vysotsky@gmail.com

##### **О. В. Фрунзе**

Телефон: +38 (071) 394-18-25  
Эл. почта: hromyh82@mail.ru

*Статья поступила 16.09.2019*

*© С. П. Высоцкий, О. В. Фрунзе, 2019*

*Рецензент: М. В. Коновальчик, канд. техн. наук, АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»*