

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i1.07>

The use of phytoremediation technologies for the purification of soils contaminated with heavy metals

A.M. Sagymbayeva^{1*}, N.B. Tomlekova², B.B. Anapiyayev³

¹RGE «Research Institute for Biological Safety Problems» CS MES RK, Gvardeiskiy, Kazakhstan

²Maritsa Vegetable Crops Research Institute, Plovdiv, Bulgaria

³Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: aikerimka_s_m@mail.ru

Abstract. Heavy metals are among the most toxic pollutants in the environment. This paper presents data on contaminated soils with heavy metals of the Republic of Kazakhstan. The ways of their solution are proposed and characterized. Soil contamination with heavy metals is one of the urgent problems of geoecology, they will be transferred to the soil around the storage facility and pose a great threat to the ecosystem, agricultural system and human health. Several methods are already being used to clean the environment of these types of pollutants, but most of them are expensive and far from their optimal performance. The use of plants for cleaning the environment became an effective and cost-effective method only after hyperaccumulative plants were discovered, capable of accumulating up to 5% of nickel, zinc or copper in their tissues in terms of dry weight, that is, tens of times more than ordinary plants.

The article provides an overview of phytoremediation technology as an improved method of soil purification. Different types of plants are considered as hyperaccumulators. Hyperaccumulating plants are found in different families and each of them plays an important role in phytoremediation. Since each of them is unique in its own way and each has its own response to the presence of heavy metals in the soil. The increased interest in this new technology is also explained by the fact that plants are hyperaccumulators of heavy metals, with high efficiency can be used on large areas. This property increases the efficiency of this technology and increases the demand.

Keywords: heavy metals, environment, soil-plants, geoecology, phytomediation, hyperaccumulators.

1. Введение

Одной из важных проблем современной экологии является загрязнение почв тяжелыми металлами, отражающееся практически на всех компонентах биосферы. Тяжелые металлы, попав в атмосферу, почву или водоемы, включаются в природный круговорот веществ и удаляются очень медленно при выщелачивании, эрозии и дефляции, а также при миграции в экологической цепи «почва-растение» [1].

Загрязнение земель нефтепродуктами и тяжелыми металлами (ТМ) является одной из глобальных экологических проблем, представляющих серьезную угрозу для окружающей среды, продовольственной безопасности и здоровья человека [2]. ТМ уже сейчас занимают второе место по степени опасности, уступая пестицидам и значительно опережая такие широко известные загрязнители, как двуокись углерода и серы. В перспективе они могут стать более опасными, чем отходы атомных электростанций и твердые отходы.

Почва является основной средой, в которую попадают ТМ, в том числе из атмосферы и водной среды. Она же служит источником вторичного загрязнения приземного воздуха и вод, попадающих из нее в Мировой океан. Из почвы ТМ усваиваются растениями, которые затем попадают в пищу [3]. Агропромышленный комплекс

также способствует загрязнению почвы тяжелыми металлами, которые входят в состав используемых минеральных удобрений и пестицидов. Длительное и в больших дозах применение удобрений, в первую очередь фосфорных, сопряжено с риском увеличения содержания содержания ТМ как в почве, так и в растениях [4].

2. Состояние загрязнения почв тяжёлыми металлами на территории Республики Казахстан

В последнее время все больший интерес представляет изучение токсического воздействия тяжелых металлов на растения, животных и людей в связи с катастрофически возросшим уровнем загрязнения окружающей среды. Эта проблема особенно актуальна для Казахстана [5].

Основными источниками загрязнения почвенного покрова на территории Казахстана тяжелыми металлами являются предприятия перерабатывающей промышленности, тепловые электростанции, транспорт и др. При оценке экологического состояния окружающей среды большую роль играет изучение почвенного покрова как места основного депо поллютантов [2].

В ходе проведения экологического мониторинга экспертами РГП «Казгидромет» в 2021 году наблюдения за состоянием загрязнения почв проведены в 102 населенных пунктах 14 областей республики и в городах Нур-

Султан, Алматы. Пробы почвы отбирались в пяти точках населенного пункта весной 2021 года. Выбор точек был обусловлен наиболее полным охватом населенного пункта, с учетом загруженных автомагистралей, промышленных объектов, а также школ и рекреационных зон [6]. Результаты экологического мониторинга представлены в таблице 1.

Таблица 1. Анализ данных по результатам экологического мониторинга

Месторождения	Превышения ПДК				
	по хрому	по свинцу	по кадмию	по меди	по цинку
Мангистауская обл	1.56				
г.Актобе	1.5				
г.Атырау	2.2				
г.Уральск	1.4				
г.Талдыкорган	110	17.54	14.30		
г.Текели	11.20	14.82	4.80		
г.Жаркент	13.80	1.75			
г.Шымкент	26.60	23.63	41.40	7.07	
г.Туркестан	4.40	3.92			
г.Кентау	22.00		21.48		11.77
г.Алматы		1.2			

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.

3. Фиторемедиация и его основные механизмы

Термин фиторемедиация является относительно новым, он появился в 1991 году. Термин "фиторемедиация" состоит из греческого приставки "фито", что означает "растение", и латинского корня "ремедиум", что означает "исправлять или устранять зло". Основная информация для фиторемедиации поступает из различных областей исследований, включая построенные водноболотные угодья, разливы нефти и накопление тяжелых металлов в сельскохозяйственных растениях. Этот термин широко использовался с момента его создания, имея множество специфических значений [7].

Общими природными механизмами фиторемедиации почвы являются: фитостабилизация загрязняющих почву веществ в форму, которая будет недоступна для живых организмов; фитоэкстракция и аккумуляция загрязняющих веществ в надземных органах растений для их дальнейшей переработки и извлечения в промышленных целях или менее дорогой утилизации; ризодеградация сложных органических загрязнителей в зоне корневой системы; и фитодеградация поглощенных загрязняющих веществ с помощью механизмов метаболизма растений

или фиторассеивание микроэлементов почвы через листья растений [8-11].

Исследователи дали много определений фиторемедиации. В соответствии с этими определениями пришли к выводу и дали общее определение фиторемедиации как новой технологии очистки загрязненной окружающей среды от опасных загрязняющих веществ с использованием выбранных растений для улучшения качества окружающей среды

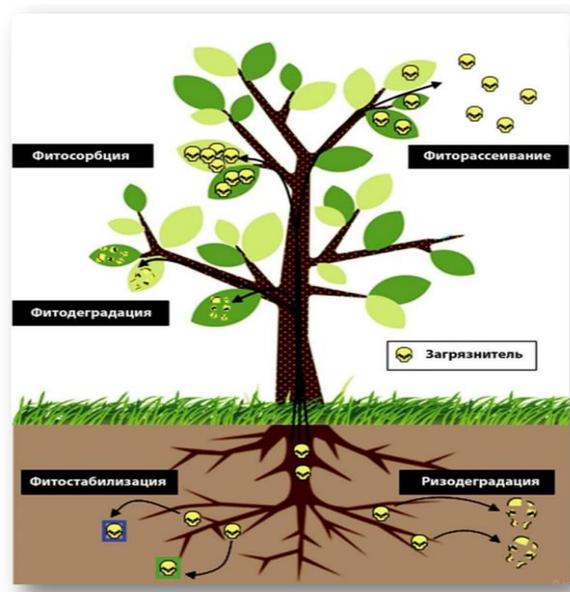


Рисунок 1. Основные механизмы фиторемедиации

В фиторемедиации представлены многочисленные растительные механизмы для удаления загрязнений тяжелыми металлами из окружающей среды. Поскольку он функционирует для удаления загрязняющих веществ из почв и воды, по крайней мере, существует шесть механизмов фиторемедиации растений, включая фитоэкстракцию, фитофильтрацию, фитостабилизацию, фитоволатилизацию, ризодеградацию. Краткое описание механизмов фиторемедиации показано на рисунке 1 [12].

Зеленые растения способны извлекать из окружающей среды и концентрировать в своих тканях различные элементы, в том числе, тяжелые металлы – мышьяк, кадмий, медь, ртуть, селен, свинец, а также радиоактивные изотопы стронция, цезия, урана и другие радионуклиды. Растительную массу не составляет особого труда собрать и сжечь, а образовавшийся пепел или захоронить, или использовать как вторичное сырье. Применение для очистки среды растений стало эффективным и экономически выгодным методом только после того, как были обнаружены растения-гипераккумуляторы поллютантов, способные накапливать в своих тканях до 5% никеля, цинка или меди в пересчете на сухой вес, то есть в десятки раз больше, чем обычные растения [13].

Исследователями [14] в условиях лабораторного опыта был изучен фиторемедиационный потенциал цветковых растений по отношению к ионам свинца. В качестве тестовых культур для определения их фиторемедиационного потенциала по отношению к ионам свинца были выбраны следующие цветковые растения: фацелия пажмо-

лиственная (*Phacelia tanacetifolia* Benth.), горчица белая (*Sinapis alba* L.), бархатцы мелкоцветные (*Tagetes patula* L.) и смесь злаковых трав, состоящая из овсяницы красной 40% (*Festuca rubra* L.), райграса пастбищного 50% (*Lolium perenne* L.) и мятлика лугового 10% (*Poa pratensis* L.).

Максимальный эффект фиторемедиации почвы выявлен на варианте со злаковой смесью (содержание ионов свинца в почве при внесении 2 ПДК снижается на 32.8%, при внесении 10 ПДК – на 23.6%). По способности к аккумуляции ионов свинца тестовые культуры образуют ряд: фацелия <бархатцы<горчица<смесь злаковых трав.

Опыт с использованием рапса ярового (*Brassica napus*) в качестве фиторемедианта, показал снижение в почве содержания подвижных форм цинка, меди, свинца и мышьяка в фазе полной спелости культуры. Однако содержание этих элементов в растительных образцах рапса ярового в фазе бутонизации значительно возросло, по сравнению с фазой желто-зеленого стручка и фазой полной спелости. Таким образом, рапс яровой при уборке в фазе бутонизации накапливал значительные количества ТМ, что можно использовать при рекультивации загрязненных ими земель [15].

Другие исследователи показали, что использование растений (суданская трава – *Sorghum sudanense*, райграс пастбищный – *Lolium perenne*, рапс яровой – *Brassica napus*, сорго зерновое – *Sorghum bicolor* и подсолнечник однолетний – *Helianthus annuus*) для очистки почвы от ТМ стимулировало активность дегидрогеназ во всех вариантах загрязненной почвы, пероксидаз – во многих вариантах, что коррелировало с убылью загрязнителей и свидетельствовало об интенсификации процессов восстановления почвы.

Показано, что максимальная убыль ТМ (свинца, кадмия и никеля) наблюдалась в почве при культивировании рапса. Рапс яровой (*Brassica napus*), как показали исследования, наибольшим образом стимулировал активность дегидрогеназ и пероксидаз в почве. Содержание мышьяка в почве заметнее снижалось при культивировании сорго зернового [16].

Также был определен круг растений, которые можно было бы использовать в качестве растений-аккумуляторов из семейств крестоцветных, злаковых и бобовых, способных в больших количествах извлекать ТМ, а именно, свинец и кадмий, как одни из наиболее опасных для живых организмов тяжелых металлов, из загрязненной почвы: кресс-салат (*Lepidium sativum*) и горчица полевая (*Urtica dioica*), рожь посевная (*Secale cereale*), овес посевной (*Avena sativa*), горох посевной (*Pisum sativum*), мятлик луговой (*Poa pratensis*) [17].

Исходя из результатов данной работы [17], в качестве индикаторов техногенной нагрузки на окружающую среду по фактору миграционных процессов ТМ в системе «вода – почва – растение» можно рекомендовать овсяницу луговую и крапиву двудомную. В связи с высоким показателем устойчивости к воздействию поллютантов и способностью к накоплению их в своей биомассе овес посевной и горчицу полевую можно использовать для обезвреживания почв, подвергшихся экологическим ЧС, как наиболее устойчивых и в большом количестве накапливающих ТМ.

Для фитодезактивации техногенно загрязненных земель возможно использование гречихи (*Fagopyrum*), однако количество ТМ, накапливающихся в биомассе, отно-

сительно невелико, а при высоких уровнях загрязнения эффективность «извлечения» металлов снижается [18].

По данным [19], горчица сарептская (*Brassica juncea*) является мощным аккумулятором ТМ.

А по результатам данной работы [20], максимальной аккумуляющей способностью по отношению к меди обладают *P.major*, *T.officinale*, *T.farfara*. Высокое содержание цинка в листьях характерно для *P.major* и *T.officinale*, железа – для *M.albus* и *T.officinale*, кобальта больше всего в листьях *M.albus* и *T.farfara*, хрома – у *T.farfara*, *P.major*, *M.albus*. В градиенте увеличивающейся токсической нагрузки наблюдается сближение индивидуальных особенностей видов к накоплению ионов металлов.

Растения гипераккумуляторы поллютантов, способные накапливать в своих тканях до 5% никеля, цинка или меди в пересчете на сухой вес, то есть в десятки раз больше, чем обычные растения.

Например, в качестве аккумуляторов соединений тяжелых металлов рекомендуются такие распространенные культуры, как горчица (количество накопленной меди 1920 мкг/г, цинка - 100 мг/г, свинца 9.4 мг/г), клевер (количество накопленной меди - 185 мкг/г, цинка - 125 мг/г, свинца - 1.4 мг/г) [21].

Исследования [22], выполненные на *Calendula officinales* и *Cineraria maritime*, показали, что календула, как и бархатцы, достаточно эффективно переносит Zn в надземные органы, тогда как цинерарию отличает более интенсивный в сравнении с другими растениями перенос меди в побег, что нашло подтверждение и при анализе районах города. При этом были также выявлены некоторые закономерности сезонного распределения и перераспределения тяжелых металлов в органах декоративных растений. Так, установлено резкое, до 10-20 раз снижение содержания Cu в корнях растений *Tagetes patula* и *Cineraria maritime* в период с июня до начала сентября при одновременном возрастании содержания в них Fe (в 2-4 раза), возможно, обусловленном его оттоком из листьев в корни в конце вегетационного периода. Иная закономерность наблюдалась в распределении Zn, уровни концентрации которого сезонно возрастали как в корнях *T.patula* и *C.maritime*, в среднем, в 2 раза, так и в листьях этих растений.

4. Заключение

Поскольку загрязнение почв и вод токсичными тяжелыми металлами является серьезной экологической проблемой, необходимы эффективные методы рекультивации. Физико-химические методы очистки и восстановления почв, загрязненных тяжелыми металлами, имеют серьезные ограничения, такие как высокая стоимость, необратимое изменение свойств почв, разрушение аборигенной почвенной микрофлоры и создание вторичной растительности проблемы загрязнения.

Фиторемедиация является лучшим решением проблемы. Фиторемедиация – это экологически чистая и экологически ответственная технология, основанная на солнечной энергии, получившая широкое признание общественности. Это относительно новая технология, и в основном она находится на стадии исследований. Его исследования носят в высшей степени междисциплинарный характер и требуют базовых знаний в области химии почвы, биоло-

гии растений, экологии и почвенной микробиологии, а также инженерной защиты окружающей среды.

Исследования поведения тяжелых металлов в системе «почва-растения» позволяют ученым выявить новые подходы в отношении оценки экологических рисков, связанных с накоплением этих элементов в почвах и путей их устранения. Стремление сельхозпроизводителей к получению экологически чистой продукции делает еще более актуальной проблему оценки санитарно-химического состояния почв и, при необходимости, их оздоровления.

Исходя из вышеизложенного, технология фиторемедиации может быть представлена как эффективный и экологически чистый метод. Метод фиторемедиации - одна из доступных технологий, и этот метод очень эффективен.

Литература / References

- [1] Aidarkhanova, G.S., Kozhina, Zh.M. & Tursynbek, A.M. (2016). Technogenic disturbed soil pollution of central Kazakhstan with heavy metals. *Intellect, idea, innovation*, (2), 85-90
- [2] Pavlov, P.D., Reshetnikov, M.V. & Erjomin, V.N. (2016). Ocenka sostojanija zagrijaznenija pochvennogo pokrova tjazhelymi metallami (na primere Aleksandrovskogo poligona zahoroneniya TBO g.Saratova). *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*, (1), 21-23
- [3] Dzhuvelikjan, H.A., Shheglov, D.I. & Gorbunova, N.S. (2009). Zagrijaznenie pochv tjazhelymi metallami. Sposoby kontrolja i normirovanija zagrijaznennyh pochv. *Izdatel'sko-poligraficheskij centr Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta*
- [4] Medvedev, I.F., Derevjagin, S.S. (2017). Tjzhelye metally v jekosistemah. *Saratov: Rakurs*
- [5] Zhetkizgenova, D.B., Salimbaeva, R.A. (2016). The toxic effect of heavy metals on the environment and the development of technology to clean up heavy metals. *Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik*, (6), 1-10
- [6] Ministry of Ecology, geology and natural resources of the Republic of Kazakhstan. RSE Kazhydromet. (2021). Informacionnyj bjulleten' o sostojanii okruzhajushhej sredy Respubliki Kazahstan. Retrieved from https://ecogofond.kz/wp-content/uploads/2021/05/60a38f5e694f6byulleten-rk_aprel_2021-voda-1.pdf
- [7] U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Introduction to Phytoremediation. Ohio: State Environmental Protection Agency. Retrieved from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30003T7G.PDF?Dockey=30003T7G.PDF>
- [8] Kramer, U. (2008). Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils. *Current Opinion in Biotechnology*, 2(16), 133-141
- [9] Pilon-Smits, E. (2014). Phytoremediation of Metals Using Transgenic Plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 5(21), 439-456. <https://doi.org/10.1080/0735-260291044313>
- [10] Vysotskii, S.P., Frunze, O.V. (2019). Phytoremediation of contaminated with heavy metals soils with cereals. *Vestnik Akademii grazhdanskoj zashhity*, 3(19), 117-123
- [11] Kang, D.H. (2012). Assessment of Landfill Leachate Volume and Concentration of Cyanide and Fluoride during Phytoremediation. *Bioremediation Journal*, 1(12), 32-45
- [12] Sumiahadi, A., Acar, R. (2018). A review of phytoremediation technology: heavy metals uptake by plants. *OP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 3-5
- [13] Vityaz, S.N., Kolosova, M.M., Dremova, M.S., Kazakova, M.A. & Rotkina, E.B. (2021). Phytoremediation potential of flowering plants in relation to lead. *Samara journal of science*, 1(10), 41-46. <https://doi.org/10.17816/snv2021101105>
- [14] Martyanychev, A.V. (2012). Application of soils phytoremediation for cleaning of land agricultural usage. *Bulletin NGIE*, 10(56), 56-63
- [15] Drichko, V.F. (2006). Ocenka skorosti ochishhenija zagrijaznennyh pochv metodom fitomelioracii. *Pochvovedenie*, (9), 1144-1149
- [16] Siskevich, Ju.I., Nikolaeva, G.N. (2008). Ispol'zovanie rapsa jarovogo v kachestve fitomelioranta. *AgroXXI*, (4-6), 67-69
- [17] Lindiman, A.V., Kupriyanovskaya, A.P. (2015). Monitoring and phyto purification of spring water ecosystems contaminated with heavy metal pollution as a result of emergencies. *Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situation*, (2), 69-71. <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2015-0-2-68-73>
- [18] Basov, Ju.V., Basov, A.Ju. (2010). Osobennosti akumuljacji tjazhelyh metallov grechihoj v uslovijah tehnogeneza. *Vestnik OrelGAU*, 4(10), 39 – 43. (in Russ.)
- [19] Trofimova, T.A. (2009). Primenenie posevov gorchicy sarepskoj v celjah fitoremediacii tehnogenno zagrijaznennyh tjazhelymi metallami svetlo-kashtanovyh pochv juzhnoj prigorodnoj agropromzony g. Volgograda (PhD thesis). *Volgograd*
- [20] Zhuykova, T. V., Zinnatova, E. R. (2014). Accumulating capability of plants in areas anthropogenically polluted with heavy metals. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2(13), 196-207
- [21] Martyanychev, A.V. (2012). Application of soils phytoremediation for cleaning of land agricultural usage. *Bulletin NGIE*, 10(17), 56-63
- [22] Osmolovskaja, N.G., Samuta, V.Ju., Bogomazova, M.V., Kuzina, O.N., Kurilenko, V.V. (2018). Fitoremedicijnyj potencial nekotoryh dekorativnyh rastenij v uslovijah zagrijaznenija gorodskih pochv tjazhelyh metallami. *Vserossijskaja nauchnaja konferencija s mezhdunarodnym uchastiem i shkol molodyh uchenyh «Mehanizmy ustojchivosti rastenij i mikroorganizmov k neblagoprijatnym faktoram vneshnej sredy»*, 1104-1105

Ауыр металдармен ластанған топырақтарды тазарту үшін фиторемедиация технологияларын қолдану

А.М. Сагимбаева^{1*}, Н.Б.Томлекова², Б.Б. Анапияев³

¹ҚР БҒМ ҒК «Биологиялық қауіпсіздік проблемаларының ғылыми-зерттеу институты» РМК, Гвардейский қтп., Қазақстан

²Өсімдік шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты, Пловдив, Болгария

³Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: aikerimka_s_m@mail.ru

Андатпа. Ауыр металдар қоршаған ортадағы ең улы ластаушы заттардың қатарына жатады. Бұл жұмыста Қазақстан Республикасының ауыр металдарымен ластанған топырақтар туралы мәліметтер келтірілген. Оларды шешу жолдары ұсынылды және сипатталды. Топырақтың ауыр металдармен ластануы жаһандық проблема болып табылады, олар қойманың айналасындағы топыраққа еніп, экожүйеге, агрожүйеге және адам денсаулығына үлкен қауіп төндіреді. Қоршаған ортаны ластағыштардың осы түрлерінен тазарту үшін бірнеше әдістер қолданылады, бірақ олардың көпшілігі қымбат және оңтайлы өнімділіктен алыс. Өсімдік ортасын тазарту үшін қолдану құрғақ салмақ бойынша өз тіндерінде 5%-ға дейін никель, мырыш немесе мыс жинауға қабілетті гипераккумулятор өсімдіктер табылғаннан кейін ғана тиімді және экономикалық тиімді әдіске айналды, яғни қарапайым өсімдіктерге қарағанда он есе көп. Мақалада топырақты тазартудың жетілдірілген әдісі ретінде фиторемедиация технологиясына шолу жасалады. Өсімдіктің әртүрлі түрлері гипераккумулятор ретінде қарастырылады. Гипераккумуляциялық өсімдіктер әртүрлі отбасыларда кездеседі және олардың әрқайсысы фиторемедиацияда маңызды рөл атқарады. Өйткені, олардың әрқайсысы ерекше және олардың әрқайсысы топырақта ауыр металдардың болуына жауап береді. Бұл жаңа технологияға деген қызығушылықтың артуы ауыр металдардың гипераккумуляторлы өсімдіктерін үлкен аудандарда қолдануға болатындығымен түсіндіріледі. Бұл қасиет осы технологияның тиімділігін арттырады және сұранысты арттырады.

Негізгі сөздер: ауыр металдар, қоршаған орта, топырақ-өсімдіктер, фиторемедиация, гипераккумуляторлар.

Использование технологий фиторемедиации для очистки почв загрязненных тяжелыми металлами

А.М. Сагимбаева^{1*}, Н.Б. Томлекова², Б.Б. Анапияев³

¹РГП «Научно-исследовательский институт проблем биологической безопасности» КН МОН РК, Гвардейский, Казахстан

²Научно-исследовательский институт растениеводства, Пловдив, Болгария

³Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: aikerimka_s_m@mail.ru

Аннотация. Тяжелые металлы являются одними из самых токсичных загрязняющих веществ в окружающей среде. В данной работе представлены данные по загрязненным почвам тяжелыми металлами Республики Казахстан. Предложены и охарактеризованы пути их решения. Загрязнение почвы тяжелыми металлами является глобальной проблемой, они будут переноситься в почву вокруг хранилища и представлять большую угрозу для экосистемы, агросистемы и здоровья людей. Несколько методов уже используются для очистки окружающей среды от этих видов загрязнителей, но большинство они дороги и далеки от их оптимальной производительности. Применение для очистки среды растений-гипераккумуляторов, способные накапливать в своих тканях до 5% никеля, цинка или меди в пересчете на сухой вес, то есть в десятки раз больше, чем обычные растения. В статье дается обзор технологии фиторемедиации как улучшенный метод очистки почв. Рассматриваются разные виды растения, как гипераккумуляторы. Гипераккумуляторные растения обнаружены в разных семействах, и каждая из них играет важную роль в фиторемедиации. Так как, каждая из них по-своему уникально и у каждого своя ответная реакция на присутствие в почве тяжелых металлов. Повышенный интерес к этой новой технологии объясняется еще тем, что растения-гипераккумуляторы тяжелых металлов, с высокой эффективностью могут быть использованы на больших площадях. Это свойство повышает эффективность данной технологии и повышает востребованность.

Ключевые слова: тяжелые металлы, окружающая среда, почва-растения, фиторемедиация, гипераккумуляторы.