

Технология фиторемедиации почв

Авторы:

Атабаева С.Д., д.б.н., профессор

Асрандина С.Ш., к.б.н., и.о. профессора

КазНУ им. Аль-Фараби, кафедра биотехнологии

Тяжелые металлы, попадающие в почву различными путями при хозяйственной деятельности человека, относятся к опасным загрязнителям окружающей среды. Количество тяжелых металлов, накопленных таким путем, может во много раз превосходить их естественное содержание в почве. Рассеивание техногенных загрязнений тяжелых металлов в атмосфере приобретает глобальный характер. Основными источниками меди, свинца, кадмия и цинка в окружающей среде являются горнодобывающая, металлургическая и химическая промышленность, теплоэнергетика, автотранспорт и химические ядохимикаты, а также бытовые отходы. Загрязнение атмосферы, почв, растений и вод тяжелыми металлами в окрестностях крупных промышленных центров стало одной из наиболее актуальных экологических проблем. В почвах вблизи промышленных предприятий содержание тяжелых металлов в десятки и сотни раз превышает фоновое содержание в аналогичных почвах. Высокая концентрация ряда тяжелых металлов в почве адекватно отражается на урожайности и качестве растительной продукции, выращенной в черте промышленных центров, на садовых участках. В значительной части растительных проб содержание тяжелых металлов превышает допустимую концентрацию в 2-3,5 раза. Чрезмерная концентрация тяжелых металлов в растениях нарушает естественный ход физиолого-биохимических процессов, подавляет рост и развитие растительного организма, снижает качество получаемой продукции. Таким образом, усиливающееся техногенное загрязнение среды тяжелых металлов, мигрируя по трофическим связям, приводит к различным неблагоприятным последствиям в живых организмах.

Одним из необходимых шагов на пути предотвращения токсического действия тяжелых металлов на животных и человека является очистка почв. Наиболее эффективным способом в настоящее время является фиторемедиация почв, т.е. очистка почв с помощью растений-гипераккумуляторов тяжелых металлов. По сравнению с физическими и химическими методами, этот способ является менее дорогостоящим, эффективным и безо-

пасным. По литературным данным стоимость консервативных способов (химические и физические методы) очистки почвы составляет от \$30 до \$350 на гектар, а стоимость очистки почв с помощью растений составляет около \$160 на гектар.

Виды фиторемедиации

Технология фиторемедиации имеет различные направления. Технология фиторемедиации включает фитоэкстракцию (использование растений для извлечения металлов из почвы), фитоволитализацию (использование растений для улетучивания химических элементов), ризофилтрацию (использование корней растений для извлечения металлов из проточных вод) и фитостабилизацию (использование растений для перевода металлов в менее токсические формы, но не извлекая их из почвы).

Фитоэкстракция – использование растений, накапливающих металлы преимущественно в надземных органах, и дальнейшая уборка надземной части для сжигания и извлечения металлов из золы растений. Преимуществом данного метода является возможность извлечения из почвы большого количества металлов надземными органами растений-гипераккумуляторов. Недостаток метода заключается в том, что растения-гипераккумуляторы, пригодные для этого вида фиторемедиации, как правило, имеют мелкие размеры, низкую биомассу, что может влиять на эффективность метода. Поэтому в настоящее время исследователями ведется работа по применению методов традиционной селекции и биоинженерии растений для создания новых форм растений, имеющих высокую способность к аккумуляции металлов и большую биомассу.

Фитоволитализация может применяться для Hg и Se и, возможно, для As. Модифицированный ген Hg-редуктазы (mercury-reductase) был перенесен из бактерии в растения *Arabidopsis thaliana* L.(резушка Таля). Трансгенные растения были способны улетучивать Hg из водной среды и из почвы. Ведутся исследования в направлении получения экспрессии генов из бактерий в высших растениях, которые способны к гидролизу метил-Hg и диметил-Hg. Органические соединения ртути являются основным источником опасности, так как липофильные компоненты

аккумулируются в организме хищных птиц и животных. Недостаток данного метода заключается в возможном загрязнении атмосферы летучими токсическими соединениями. Поэтому данный метод может применяться для участков, находящихся вдали от посевов и населенных пунктов.

Фиторемедиация

1. Посев семян растений
2. Сбор урожая
3. Высушивание и хранение собранных растений
4. Отправка биомассы для сжигания

Завод по переработке растительных образцов

1. Сжигание биомассы
2. Генерация электричества
3. Сбор золы

Извлечение металлов из золы (фитодобыча)

Рисунок 1 - Схема фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами

Фитостабилизация возможна для двух элементов: свинца (Pb) и хрома (Cr). Эффективны растения с длинной и мощной корневой системой. Корни *Agrostis capillaris* L. (полевица волосовидная), растущих на сильно загрязненной Pb/Zn почве, образуют пироморфиты из почвенного Pb и P, но механизм образования их еще неизвестен. Хотя считается, что *T. rotundifolium* L. (ярутка круглолистная) является аккумулятором Pb, *Zea mays* (кукуруза) может накапливать намного больше свинца при низких pH и низкой концентрации фосфора. Добавление хелатирующих агентов (НЕДТА, ЕДТА) увеличивает растворимость Pb и мобильность внутри растения; содержание Pb в надземных органах может достигать 1%, что позволяет извлекать достаточное количество Pb. Raskin с сотр. определил методы использования растений для проведения «ризофилтрации» Pb на загрязненных почвах. Растения, которые аккумулируют Pb в корнях, могли бы удерживать его от выщелачивания вниз по почвенному профилю. Следовательно, инактивация почвенного Pb с использованием почвенных добавок (гидроксид Fe, оксиды Mn, фосфаты, известняк) и растений для предотвращения эрозии является одним из способов фиторемедиации для Pb-загрязненных почв. Недостатком данного метода является то, что металлы не извлекаются полностью из почвы надземными органами, а остаются связанными в корнях растений. Данный метод не пригоден для почв, которые в дальнейшем будут использоваться для выращивания сельскохозяйственных культур.

Метод ризофилтрации может быть применен для Cr. Почвы, содержащие 10 000 мг Cr/kg в виде Cr³⁺, не представляют потенциальной опасности, в то время как почвы, содержащие хром в виде Cr⁶⁺, являются токсичными для растений и других организмов. Корни растений могли бы играть важную роль в восстановлении Cr⁶⁺ до Cr³⁺ в почве, позволяя токсичной форме иммобилизоваться в инертную форму, которая не представляет потенциального риска. Недостаток метода заключается в необходимости периодической уборки загрязненных частей растений и

утилизации их.

Для эффективного развития фиторемедиации, каждый элемент должен рассматриваться отдельно. Необходим агрономический подход с учетом генетических свойств растений, считают авторы. Некоторые элементы могут поглощаться корнями растений и превращаться в летучую форму, как диметилселенид или ртуть. Хотя многие растения способны улетучивать диметилселенид, сопутствующее загрязнение сульфатами и засоление Se-загрязненных почв ингибируют этот процесс. Следовательно, необходимо улучшить почвенные условия с помощью добавок для достижения наилучшего эффекта фиторемедиации.

Растения-гипераккумуляторы тяжелых металлов

Для фитоэкстракции тяжелых металлов из почвы наиболее выгодным является использование растений-гипераккумуляторов тяжелых металлов. Термин «гипераккумулятор» относится к видам растений, которые аккумулируют в 10-100 раз больше металлов, чем обычные растения. Гипераккумуляторы вызывают значительный интерес с точки зрения фиторемедиации, фитодобычи и биофортификации (улучшения) сельскохозяйственных культур. Эти растения могут быть использованы для извлечения токсикантов из почвы и таким образом могут способствовать восстановлению плодородия загрязненных земель. Растения-гипераккумуляторы являются эндемичными для тех почв, которые загрязнены тяжелыми металлами и не конкурируют с другими видами на незагрязненных почвах. Аккумуляция металлов растениями в нетоксической форме является одной из стратегий, используемых растениями для выживания в условиях сильного загрязнения среды. К наиболее известным растениям-гипераккумуляторам тяжелых металлов относятся: *Ambrosia artemisiifolia* L. (амброзия полыннолистная), *Thlaspi rotundifolium* L., *Thlaspi caerulescens* L. (ярутка), поглощающие в значительном количестве Zn, Cd, Pb. К гипераккумуляторам Ni

относятся *Alyssum L.* (бурачок) и *Arabi-dopsis L.* (резушка). Последний считается удобным объектом для исследований, так как имеет короткий жизненный цикл и малое количество хромосом.

Обычно растения-гипераккумуляторы тяжелых металлов в большинстве своем являются низкорослыми сорняками с низким урожаем. В настоящее время известны улучшенные с помощью генетической биоинженерии формы растений, как *Alpine repucress L.* с высоким урожаем, который может поглощать около 500 кг/га цинка и 6-8 кг кадмия в год.

Применяемые в качестве фитомелиорантов почв, загрязненных Cd и Zn, растения *T. caerulescens* могут накапливать в своем составе Zn и Cd в количестве 2,5 и 0,2% от сухого веса, соответственно. С помощью этих растений с каждого гектара можно извлечь 125 кг Zn и 10 кг Cd (рисунки 1, 2).

Стоимость данных металлов, извлеченных из растений с 1 гектара будет составлять на рынке \$200 при рыночной цене цинка - \$1,33, кадмия - \$4,6 за килограмм.

Исследователи определили несколько наиболее характерных признаков для гипераккумуляторов:

1) Растения должны быть устойчивы к высокой концентрации элемента в корнях и надземных органах. Гиперустойчивость является ключевым свойством, которое делает возможным гипераккумуляцию. Сверхустойчивость является результатом вакуолярной компартментации и хелатирования, считают авторы. Это было продемонстрировано на изолированных вакуолях протопластов клеток табака, которые аккумулировали высокие концентрации Cd и Zn. Электронно-микроскопический анализ листьев *Thlaspi caerulescens* говорит также в пользу вакуолярной компартментации Zn.

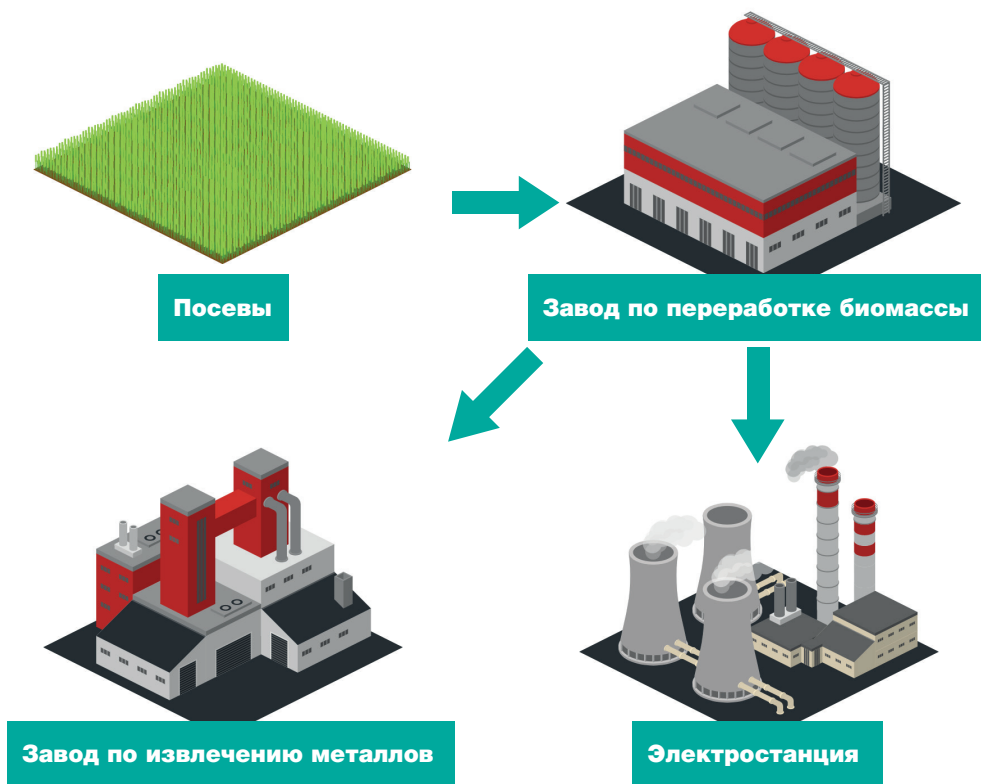


Рисунок 2 - Схема фитодобычи тяжелых металлов

2) Растения должны быть способны к транслокации элементов из корней в надземные органы. В норме содержание Zn, Cd или Ni в корнях в 10 или более раз выше, чем в надземных органах. Отношение содержания металла в надземных органах к его содержанию в корнях должно быть больше единицы, что говорит о потенциальной способности гипераккумуляторов перераспределять ионы тяжелые металлы в надземные органы.

3) Растения должны поглощать металлы в больших количествах. *T. caerulescens* в природных условиях содержит 1-4% Zn, в то время как другие виды - менее 0.05% Zn. Исследования показали, что Zn-гипертолерантные генотипы *T. caerulescens* требуют намного больше Zn в питательном растворе (в 104 раз) для нормального роста, чем неаккумуляторы. Высокоэффективная компартментация металлов для снижения токсичности Zn и Cd как бы требует от растений накапливать большое количество металлов для адекватного снабжения.

В настоящее время общепринято определение R.Brooks (1998), согласно которому гипераккумуляторами тяжелыми металлами считаются те растения, которые накапливают в надземных органах цинк (Zn) >10 000, свинец (Pb) > 1000, кадмий (Cd) > 100 мкг/г. Растения-неаккумуляторы тяжелых металлов должны накапливать на незагрязненной почве Zn, Pb и Cd < 100, < 10 и < 1 мкг/г, соответственно; на загрязненной почве - Zn<1000, Pb<100 и Cd<10 мкг/г, соответственно (таблица 1).

Растения-неаккумуляторы тяжелых металлов должны накапливать на незагрязненной почве Zn, Pb и Cd < 100, < 10 и < 1 мкг/г, соответственно; на загрязненной почве – Zn < 1000, Pb < 100 и Cd < 10 мкг/г, соответственно

Металл	%	>мкг/г
Cd	0.01	100
Co	0.1	1000
Cu	0.1	1000
Pb	0.1	1000
Ni	0.1	1000
Mn	1.0	10000
Zn	1.0	10000

Таблица 1 – Пороги концентраций металлов в органах растений-гипераккумуляторов

При сравнении гипераккумуляционной способности растений различных видов нужно учитывать не только концентрацию металла в растениях (содержание металла на единицу массы растения), а также количество металла, извлеченное данным видом с определенной площади. Так, если у одного вида сильно подавляется накопление биомассы надземных органов, а у другого - в меньшей степени, то концентрация металла в надземных органах последнего может оказаться ниже, чем у первого за счет эффекта разбавления. Абсолютное значение содержания металла в растениях в пересчете на определенную площадь даст более правильную картину для оценки гипераккумулирующей активности растений при сравнительном анализе.

Еще одним важным моментом является отношение содержания металлов в надземных органах растений к содержанию в почве. Как правило, у растений-гипераккумуляторов это значение велико (до 40 и более) . Наиболее точное определение статуса гипераккумуляторов может быть установлено, считают авторы, только на гидропонной среде, где проявляется способность растений выносить большие концентрации металлов.

В Казахстане еще не обнаружены истинные растения-гипераккумуляторы. Это предмет будущих исследований биотехнологов.