

А. В. МАРТЬЯНЫЧЕВ

## ПРИМЕНЕНИЕ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ПОЧВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**Ключевые слова:** фиторемедиация, загрязнение почв, поллютанты почв, биологическая очистка почв, специальный севооборот.

**Аннотация.** Показаны преимущества и недостатки применения методов биологической очистки и, в частности, фиторемедиации почв земель сельскохозяйственного назначения. Предложено использование специальных севооборотов для очистки от антропогенных поллютантов почв земель сельскохозяйственного назначения.

К концу прошлого века на предприятиях различных отраслей промышленности России накопилось около 1500 млн. тонн токсичных отходов производства и потребления. При условии сохранения темпов образования отходов, набранных к концу девяностых годов, ежегодно на предприятиях Российской Федерации создается около 90 млн. т токсичных промышленных отходов (ПО), из которых 87 млн. т относятся к III и IV классам опасности (табл. 1) [1, с. 1].

Количество твердых бытовых отходов (ТБО) ежегодно возрастает в России на 30 млн. т. Путем применения в собственном производстве предприятиями используется порядка 40 % и полностью обезвреживается не более 10 % от общего количества образующихся отходов [1, с. 1]. Остальные отходы, как правило, передаются на полигоны для захоронения. Состав этих продуктов весьма разнообразен, и это затрудняет создание универсальной технологии утилизации твердых и жидких ПО и ТБО. Не углубляясь в подробный перечень веществ, входящих в состав промышленных и бытовых отходов, можно сказать, что большинство из них являются вредными и опасными уже в силу своего антропогенного, то есть не естественного, происхождения.

Рост количества накапливаемых отходов объясняется не только ростом промышленного производства, но и отсутствием массовых простых и достаточно эффективных технологий возврата в природу

элементов, прошедших реформацию в ходе хозяйственных процессов и ставших таким образом загрязнителями. Основным источником поступления токсиканта в организм человека является почва, т.к. она представляет собой главную среду обитания растительных сообществ. Накопившиеся в растениях элементы по цепи питания поступают в организм человека непосредственно с употребляемой в пищу сельскохозяйственной продукцией (свежие овощи, фрукты, зелень и т.д.), или опосредованно через продукты питания животного происхождения, полученные на базе использования растительного корма.

Таблица 1 – Классы гигиенической опасности и значения ПДК некоторых элементов в почве и воде

| Элемент  | Класс опасности | ПДК<br>в почве, мг/кг   |
|----------|-----------------|-------------------------|
| Ртуть    | +++++           | 2,2                     |
| Свинец   | +++++           | 20                      |
| Кадмий   | +++++           | 3-5                     |
| Мышьяк   | +++++           | 2,0                     |
| Фтор     | +++++           | 10,0                    |
| Фосфор   | +++             | 200 (P,0 <sub>5</sub> ) |
| Кобальт  | +++             | 5,0                     |
| Сурьма   | +++             | 4,5                     |
| Медь     | +++             | 3,0                     |
| Никель   | +++             | 4,0                     |
| Хром     | +++             | 0,05                    |
| Марганец | +               | 2,0                     |
| Ванадий  | +               | 150                     |
| Цинк     | +++             | 23                      |

+++++ 1 кл., +++ 2 кл., + 3 кл.

Для решения проблемы утилизации и обеззараживания отходов разработано множество технологий, часть из них более или менее успешно применяется и, в ряде случаев, даёт положительный экологический и экономический эффект. В европейских государствах 40 % отходов превращают биологической обработкой в органические удобрения, 10 % уничтожают на мусоросжигательных заводах, 40 % отходов захоранивают в третьих странах мира, а оставшиеся 10 %, в основном, активный ил, сбрасывают в моря [1, с. 1].

Все это имеет смысл лишь в случае сбора и накопления отходов. Однако известно, что значительная часть загрязнителей теряется и бесконтрольно распространяется в процессе добычи сырья, при транспортировке, производстве и хранении. И в этих случаях можно говорить о десятках квадратных километров земель, в том числе и сельскохозяйственного назначения, подвергающихся загрязнению вблизи мест ведения хозяйственной деятельности. На этих территориях наиболее предпочтительными методами очистки почв нам представляются биологические и, в первую очередь, фиторемедиация – от греческого «фитон» (растение) и латинского «ремедиум» (восстанавливать).

Значительную часть загрязнителей сельскохозяйственных земель составляют неорганические поллютанты, которые не могут быть деградированы. Однако фиторемедиация может привести к очистке среды от этих веществ путём их стабилизации или изолирования в тканях растения. Фиторемедиация может быть успешно применена для очистки от ряда неорганических поллютантов, включая макроэлементы растений (нитраты, фосфаты), микроэлементы (Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn), несущественные для растения элементы (Cd, Co, F, Hg, Se, Pb, V, W) и радиоактивные изотопы (U238, Cs137 и Sr90).

Особо следует рассматривать группу поллютантов, представленных так называемыми тяжелыми металлами. До сих пор не существует широко применяемых технологий очистки земель сельскохозяйственного назначения от этих токсикантов. Проблема загрязнения этими веществами окружающей среды стоит очень остро и требует своего решения. Тяжелые металлы – это условно названная группа металлов и металлоидов с атомным весом более 50 у.е. При дефицитном или нормальном их содержании в почвах и живых организмах они выступают как микроэлементы, при избытке – как ядовитые вещества.

В естественных условиях почвы содержат определенное количество тяжелых металлов, которое называется фоновым содержанием. Тяжелые металлы возникли из горных пород, на продуктах выветривания которых сформировался почвенный покров. Горная порода состоит примерно из 90 элементов, на долю девяти из них (алюминий, кальций, железо, магний, кислород, калий, кремний, натрий и титан) приходится около 99 % массы. Микроэлементы составляют всего лишь порядка 0,14 %.

Фоновое содержание тяжелых металлов в почвах зависит от почвообразующей породы. Данные табл. 2 показывают, что наименьшее содержание их присуще флювиогляциальным пескам и супесям. Напротив, моренные, покровные и лессовидные суглинки содержат значительно большее количество тяжелых металлов.

Таблица 2 – Среднее содержание тяжелых металлов  
в основных почвообразующих породах

| Почвообразующие породы              | Содержание, мг/кг сухой навески |      |      |     |
|-------------------------------------|---------------------------------|------|------|-----|
|                                     |                                 |      |      |     |
| Моренные суглинки                   | 50,4                            | 10,3 | 20,0 | 2,9 |
| Покровные суглинки                  | 51,0                            | 10,5 | 20,4 | 3,4 |
| Лессовидные суглинки                | 81,1                            | 8,0  | 24,3 | 3,6 |
| Флювиогляциальные пески<br>и супеси | 12,3                            | 1,5  | 5,6  | 1,1 |

В природных средах тяжелые металлы существуют в двух формах: подвижной и неподвижной. Подвижная форма элемента доступна для поглощения растениями, а потому экологически наиболее опасна. Неподвижная форма элемента недоступна для поглощения живыми растениями, но имеет потенциальную опасность, поскольку в определенных условиях неподвижные формы переходят в подвижные и наоборот. Общее содержание элемента в природной среде представляет собой валовое содержание.

Попавшие в почву тяжелые металлы, прежде всего их подвижная форма, претерпевают различные изменения. Это закрепление гумусовым веществом с образованием комплексных органоминеральных соединений, адсорбция ионов на поверхности органических коллоидных систем, фиксация тонкодисперсными минеральными частицами, поглощение гидроксидами и оксидами алюминия, железа и марганца. Подвижность тяжелых металлов значительно снижается при уменьшении кислотности почвы (за исключением молибдена и хрома). Таким образом, хорошо окультуренные, тяжелые по механическому составу почвы обладают большей способностью закреплять тяжелые металлы, чем неоккультуренные легкие [4, с. 191].

Обогащение почвы тяжелыми металлами происходит и при применении фосфорных удобрений. Например, при внесении 60-90 кг/га  $P_2O_5$  в почву поступает 6-8 кг фтора [5, с. 77].

Тяжелые металлы в окружающей среде динамичны как в пространстве, так и во времени. В профиле почвы их распределение неравномерно: больше тяжелых металлов содержится в гумусовом слое, незначительное количество их наблюдается в иллювиальном и карбонатном горизонтах и совсем мало – в подзолистом. Дерновый процесс почвообразования способствует накоплению, а подзолистый процесс – вымыванию элементов и закреплению их в иллювиальном горизонте.

При поступлении тяжелых металлов в почву значительное количество их переходит в малоподвижное состояние. Однако защитные

свойства почвы небеспредельны. При достижении определенного уровня загрязнения техногенные выбросы не могут быть нейтрализованы благодаря самоочищающейся способности почвы и избыточные тяжелые металлы угнетающе действуют на почвенную биоту. При этом затормаживается деятельность нитрификаторов, азотофиксаторов, целлюлозоразрушающих и других микроорганизмов, ухудшаются физические и химические свойства почвы, снижается её плодородие.

Механизм поглощения и перемещения по тканям растений поллютантов пока не выяснен полностью. Но можно предположить, что накопление ионов веществ-загрязнителей, в том числе тяжелых металлов, является проявлением попытки растения защитить жизненно важные структуры от отравления. Начальным органом защиты растительного организма от токсикантов является корковая система. Защита сводится, в основном, к задержке избыточных ионов в корнях, к ограничению их поступления в метаболические важные центры, репродуктивные и запасующие органы.

В результате содержание тяжелых металлов в корнях может быть в десятки раз больше, чем в наземных органах. Здесь также должна учитываться и специфика самих растений. Например, для клевера соотношение между содержанием тяжелых металлов в корнях и наземной части значительно меньше, чем для ячменя. В овощных культурах (капуста, свекла) – наоборот, загрязненность в наземной части в 3-5 раз выше, чем в корнях. По отношению к разным тяжелым металлам защитные возможности растений проявляются неодинаково. Так свинец в основном задерживается уже в корнях, а кадмий – сравнительно легко проникает в наземные органы.

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.

Например, в качестве аккумуляторов соединений тяжелых металлов рекомендуются такие распространенные культуры, как горчица (количество накопленной меди 190 мкг/г, цинка – 100 мг/г, свинца –

9,4 мг/г), клевер (количество накопленной меди 180 мкг/г, цинка – 42 мг/г, свинца – 3,6 мг/г) и овёс (количество накопленной меди – 185 мкг/г, цинка – 125 мг/г, свинца – 1,4 мг/г) [6, с. 3].

В настоящее время на фиторемедиацию в США затрачивается порядка 150 млн. \$ в год, что составляет 0,5 % всех затрат на очистку окружающей среды. В Европе фиторемедиация пока не имеет широкого применения, однако ситуация может измениться в ближайшем будущем в связи с повышением к ней интереса, а также по причине наличия большого количества загрязнённых районов на территории восточно-европейских государств – членов Евросоюза. Фиторемедиация также может получить широкое применение в развивающихся странах в связи с низкой себестоимостью и простотой применения.

Очевидно, что наряду с преимуществами, по сравнению с другими методами, фиторемедиация имеет ряд недостатков. Глубина очистки субстрата ограничивается глубиной проникновения в почву корневой системы растений, ареал применения растений ограничивается пределами зоны переносимого ими климата, процессы экстракции и аккумуляции поллютантов растениями относительно медленные, поллютант может содержаться в почве в состоянии ограниченной химической доступности растению. При сильном загрязнении почвы корни не способны полностью перекрыть попадание избытка загрязнителя в растение и оно проявляет признаки угнетения: торможение роста, хлороз листьев, некрозы верхушек и краев листьев, отмирание корней, снижение урожая, ухудшение качества продукции. Неблагоприятные погодные условия, особенно засуха, значительно ослабляют защитные возможности растений. Однако большинство из перечисленных недостатков могут быть преодолены или оптимизированы. Кроме того, для достижения максимальной эффективности очистки фиторемедиация может использоваться в сочетании с другими методами биоремедиации и небιологическими технологиями очистки.

По нашему мнению, для использования фиторемедиации в качестве метода очистки значительных площадей целесообразно применять специальные севообороты, включающие возделывание гипераккумуляторов, технологии стимулирования почвенной микрофлоры, возделывание культуры-предшественника гипераккумулятора.

Известно, что в большинстве случаев севооборот эффективнее возделывания монокультуры. Севооборотом отчасти решаются вопросы засоренности поля. Использованием севооборота можно решать проблемы борьбы с вредителями и болезнями сельскохозяйственных растений. Введение в севооборот сидератов, промежуточных культур, активных паров способствует активизации почвенной микрофлоры.

Если основной целью севооборота считать удаление из почвы избытка поллютанта, а не получение продовольственного или фуражного урожая, то с учетом климатических и почвенных условий, состава основных загрязнителей, технологий дальнейшего использования урожая, содержащего фитоекстрагированные загрязнители, можно разработать оптимальный севооборот практически для любого поля. Например, для очистки широко распространенной в Волго-Вятском регионе России светло-серой лесной почвы от соединений тяжелых металлов можно чередовать клевер, овес, кормовую свеклу, горчицу в качестве сидерата и чистый пар с внесением минеральных удобрений для активизации почвенной микрофлоры и борьбы с сорняками, вредителями и болезнями культур.

Естественно, весь вегетативный урожай должен удаляться. В дальнейшем полученная растительная масса может быть использована как топливо, как сырье для получения биогаза или любым другим способом, но с учетом исключения возможности возврата содержащихся в ней загрязнителей в окружающую среду.

Применение специальных севооборотов, создающих наиболее благоприятные условия для фиторемедиации растениями антропогенных поллютантов, является рациональной технологией очистки земель сельскохозяйственного назначения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бельков В. М. Методы, технологии и концепции утилизации углеродосодержащих промышленных и твердых отходов // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы» – Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ). 2007. №11. С. 15-17
2. Гамм Т. А. Управление процессами массопереноса в природно-технической системе: монография. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2010. 236 с.
3. Зырин Н. Г., Садовникова Л. К. Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах Издательство: МГУ, 1985. 213 с.
4. Саэт Ю. Е., Ревич Е. П. и др. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
5. Орлов Д. С. Садовникова Д. С., Лозановская И. Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. Учеб. пособие для хим., хим-технол. и биол. спец. вузов М.: Высш. шк., 2002. 334 с.

## APPLICATION OF SOILS PHYTOREMEDIATION FOR CLEANING OF LAND AGRICULTURAL USAGE

*Keywords:* phytoremediation, soil pollution, soil pollutants, bioremediation of soils, a special rotation

*Annotation.* The advantages and disadvantages of application of methods of biological treatment and, in particular, phytoremediation of agricultural land. It is proposed use of the specific rotations for removal of man-made soil pollutants of land agricultural.

---

**МАРТЪЯНЫЧЕВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Основы сельского хозяйства, химии и экологии», Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, Россия, Княгинино, (mav59@list.ru).

**MARTYANYCHEV ALEXANDER VLADIMIROVICH** – the candidate of agricultural sciences, the docent of the chair of bases of agriculture, chemistry and ecology, the Nizhny Novgorod state engineering-economic, Russia, Knyaginino, (mav59@list.ru).

---