

Мелиорация и рекультивация, экология

УДК 502/504:631.416.9

И. В. АНДРЕЕВА, Р. Ф. БАЙБЕКОВ, М. В. ЗЛОВИНА

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

Приводятся различные аспекты применения методов фиторемедиации для очистки почв, загрязненных тяжелыми металлами. Обсуждаются данные вегетационного опыта по выявлению фиторемедиационного потенциала некоторых сельскохозяйственных культур, а также ряда дикорастущих и декоративных растений при разном уровне комплексного загрязнения дерново-подзолистой почвы кадмием, никелем и свинцом.

Методы фиторемедиации, тяжелые металлы, комплексное загрязнение дерново-подзолистой почвы, кадмий, никель, свинец, биоремедиация, фитодегградация, фитоистварение, фитозкстракция, растения-гипераккумуляторы.

There are given various aspects of application of phytoremediation methods for soils treatment contaminated with heavy metals. The data of the vegetation experience on identification of the phytoremediatory potential of some agricultural crops as well as a number of wild and ornamental plants are considered at a different level of complex pollution of the turf – podzol soil with cadmium, nickel and lead.

Methods of phytoremediation, heavy metals, complex contamination of turf – podzol soil, cadmium, nickel, lead, bioremediation, phytodegradation, phytovaporation, phytoextraction, plants – hyperaccumulators.

По информации Министерства природных ресурсов Российской Федерации, в последние годы на территории России усиливается техногенная нагрузка на окружающую природную среду в связи с ростом потребления природных ресурсов и поступлением в

нее различных токсичных веществ с выбросами промышленных предприятий, сточными водами и отходами различных производств. Данные мониторинга почв вблизи городов и крупных промышленных центров указывают на их интенсивное загрязнение тяжелыми

металлами (ТМ). Присутствие в пахотных почвах солей тяжелых металлов, поступающих с промышленными выбросами, в результате применения осадков сточных вод, функционирования вблизи сельскохозяйственных угодий крупных транспортных магистралей, представляет особенно большую опасность. Ранее риск попадания тяжелых металлов из загрязненных почв в сельскохозяйственную продукцию снижали в основном путем использования таких агротехнических приемов, как известкование и внесение в почву фосфорных удобрений, сокращающих подвижность металлов и их доступность для поглощения растениями. Проблема загрязнения при этом не решалась – металлы накапливались в почве, и она становилась источником вторичного загрязнения прилегающих территорий и подземных вод. В большинстве случаев для очистки загрязненных тяжелых металлов почв применяли методы *ex-situ*, например: физическое удаление загрязненной почвы; деконтаминация почвы посредством обработки химическими реагентами и возвращение ее на первоначальное место [1]. В случае очистки почв с невысоким уровнем загрязнения стоимость применения подобных методов оказывалась неоправданно завышенной.

В последнее время исследователи из многих стран активно обсуждают новый, биологический способ деконтаминации загрязненных почв и водных сред как достойную альтернативу традиционным способам очистки, основанный на использовании биологической продуктивности организмов. В общем виде этот способ получил название *биоремедиация*. *Фиторемедиация* – это приемы очистки, основанные на использовании зеленых растений [2]. Существуют различные подходы для реализации данного способа очистки. Под *фитодеградацией* понимают разложение высокомолекулярных, по большей части органических, соединений в почве до веществ, не представляющих опасности. Термином *фитостабилизация*, или *фитоиммобилизация* характери-

зуют применение растений для снижения биодоступности контаминантов в почве. *Фитоиспарение* включает использование растений для выноса контаминантов из почвы, трансформации их в летучую форму и транспирации в атмосферу. *Ризофильтрацию* применяют для очистки загрязненных вод посредством поглощения загрязняющих веществ корнями растений. Для очистки загрязненных тяжелыми металлами почв наиболее подходящим способом является *фитоэкстракция*. Для проведения фитоэкстракции применяют растения, способные к выраженной аккумуляции тяжелых металлов в наземной биомассе, которая впоследствии может быть удалена с поля [2]. По мнению многих исследователей, фитоэкстракция могла бы привести к революции в санации почв, так как она обладает рядом конкурентных преимуществ. Данная технология значительно дешевле по сравнению с традиционными методами очистки, характеризуется эффективностью и относительной простотой исполнения (с помощью традиционных агротехнических приемов), не наносит вреда окружающей среде [3, 4]. По некоторым оценкам, затраты на проведение очистки почвы методом фитоэкстракции составляют около 0,05 долл. на 1 м³ почвы, тогда как стоимость традиционных методов деконтаминации – 10...1000 долл. на 1 м³ почвы [5]. После уборки загрязненная растительная биомасса подлежит утилизации.

Основы технологий фиторемедиации были разработаны американскими учеными в начале 80-х гг. прошлого века. К настоящему времени достигнут определенный прогресс в практическом применении ремедиационных технологий в США, Великобритании, Австралии, Канаде, Финляндии, Болгарии, Чехии и других странах. Это технологии по очистке почв, грунтовых и поверхностных вод от нефтепродуктов (в том числе летучих), тяжелых металлов, радионуклидов, пестицидов, различных азотных и фосфорных соединений, солей,

муниципальных отходов, сточных вод.

Приведенные методы фиторемедиации могут быть использованы комплексно. Их основные достоинства и недостатки представлены в табл. 1 [5].

Ключевую роль в успешном проведении очистки загрязненных тяжелыми металлами почв методом фитоэкстракции имеет правильный подбор растений среди культурных или диких

Таблица 1

Достоинства и недостатки метода фиторемедиации

Достоинства	Недостатки и ограничения
Применимость к широкому ряду органических и неорганических соединений	В большинстве случаев эффективен для устранения поверхностного загрязнения почв в пределах корневой зоны растений – фиторемедиантов
Возможно применение как in-situ, так и ex-situ на водных и почвенных субстратах	Процесс очистки загрязненного участка может занять несколько лет
Применение in-situ снижает повреждение почвы и ландшафтов по сравнению с традиционными методами очистки	Применяется в основном для очистки загрязненных сред с низкой и средней концентрацией контаминантов
Снижение количества отходов, захороняемых в свалках	Проблемы с утилизацией загрязненной растительной биомассы
Применение in-situ снижает дальнейшее распространение контаминанта водным и воздушным путем	Лимитирующим фактором являются климатические условия
Не требуется дорогостоящего оборудования и специально обученного персонала	Введение видов растений, обычно произрастающих в других районах, может нарушить биоразнообразие
Запасенная в растительной биомассе потенциальная энергия может быть использована для производства традиционных видов энергии	Необходимо контролировать процесс сжигания (утилизации) загрязненной растительной биомассы

видов, характерных для данных почвенно-климатических условий и типа загрязнения. Растения-фиторемедианты соответствуют следующим параметрам: обладают высокой биологической продуктивностью, поглощают в больших концентрациях тяжелые металлы, основная часть которых должна аккумулироваться в надземных частях растений, отчуждаемых при уборке. По мнению многих исследователей, особенно высоким потенциалом для целей фитоэкстракции обладают так называемые растения-гипераккумуляторы, которые способны концентрировать металлы в надземной биомассе в концентрациях, намного превышающих таковые в почве. К гипераккумуляторам принято относить растения, содержащие свыше 0,01 % кадмия и других редких металлов, или 0,1 % меди, кадмия, хрома, свинца, никеля, кобальта, или 1% цинка и марганца в пересчете на сухую массу [6]. Исследователи идентифицируют гипераккумуляторные виды путем сбора

растений в районах, где почвы геогенно обогащены одним или несколькими металлами либо антропогенно загрязнены ими. В настоящее время в мире идентифицировано порядка 400 видов гипераккумуляторов различных металлов из 22 семейств [7]. Семейство «крестоцветных» содержит наибольшее количество растений-гипераккумуляторов по отношению к широкому спектру тяжелых металлов. В настоящее время исследователи продолжают поиски растений, пригодных для целей фиторемедиации.

В нашей стране исследования фиторемедиационных технологий, включая идентификацию и отбор растений-фиторемедиантов для очистки загрязненных тяжелыми металлами почв, не получили широкого распространения. В связи с этим цель проводимых авторами исследований заключалась в изучении фиторемедиационного потенциала ряда сельскохозяйственных культур, дикорастущих и декоративных растений в условиях комплексного загрязнения

дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы кадмием, свинцом и никелем. Программа исследований предусматривала проведение вегетационного опыта в почвенной культуре на базе вегетационного домика кафедры агрохимии РГАУ – МСХА. Комплексное загрязнение почвы имитировали путем внесения в нее химически чистых сернокислых солей кадмия, никеля и свинца. Выбор доз проводили по шкале нормирования уровня загрязнения почв тяжелыми металлами: допустимый (ниже предельно допустимой концентрации), низкий (на уровне 1 ПДК), средний (на уровне 3 ПДК), высокий (на уровне 5 ПДК). Для исследования были отобраны следующие сельскохозяйственные культуры, дикорастущие и декоративные растения, охватывающие разные семейства: «амарант» (*Amaranthus candatus*), «львиный зев» (*Antirrhinum majus*), «просо волосовидное» (*Panicum capillare*), «марь белая» (*Chenopodium album*), «донник желтый» (*Melilotus officinalis*), «горчица белая» (*Sinapis alba*), «редька масличная» (*Raphanus sativus*).

Согласно полученным данным по накоплению биологической массы, исследуемые растения в разной степени реагировали на присутствие в почве тяжелых металлов в диапазоне их средних и высоких концентраций. Более чем двукратное снижение накопления общей биологической массы в варианте с внесением тяжелых металлов на уровне 5 ПДК наблюдалось у следующих растений: «мари белой», «амаранта», «проса волосовидного» и «горчицы белой». Наибольшую толерантность из исследуемых растений как к среднему, так и к высокому уровню загрязнения почвы тяжелыми металлами проявили растения «редьки масличной», накопление надземной биомассы которых не только не снизилось, но в диапазоне концентраций 1...3 ПДК повысилось на 30...47 % по сравнению с контрольным вариантом.

Показатель уровня накопления биологической массы — одна из наиболее значимых характеристик фиторе-

медиантов, поскольку растения (при одинаковом содержании металла в тканях), развивающие большую надземную биомассу, отличаются более высокими показателями его выноса. В контрольном варианте уровень накопления надземной биомассы «амаранта» и «проса волосовидного» оказался в 1,5–2,7 раза выше, чем у других растений. По данному показателю можно составить следующий ранжированный ряд: «амарант» > «просо волосовидное» > «марь белая» > «горчица белая» > «редька масличная» > «львиный зев» > «донник желтый». Однако при повышении загрязнения почвы тяжелыми металлами ситуация меняется и в варианте с внесением тяжелых металлов на уровне 5 ПДК приведенный выше ранжированный ряд приобретает следующий вид: «редька масличная» > «львиный зев» > «амарант» > «донник желтый» > «просо волосовидное» > «марь белая» > «горчица белая». Таким образом, при анализе пригодности растения для целей фиторемедиации необходимо принимать во внимание также уровень его толерантности к повышенным концентрациям металла в среде произрастания.

Данные по содержанию кадмия, свинца, никеля и цинка в исследуемых растениях свидетельствуют, с одной стороны, о существовании значительных видовых отличий в их накоплении и распределении по органам, а с другой стороны, о разном характере поступления и поведения металлов в пределах одного растения (табл. 2).

При рассмотрении характера накопления и распределения кадмия в исследуемых растениях прослеживаются следующие закономерности: низкое содержание элемента в растениях контрольного варианта (кроме представителей семейства «крестоцветных») и высокий уровень его накопления при загрязнении почвы (на 1...4 порядка в зависимости от вида и части растения по сравнению с контрольным вариантом). В особенности это проявляется в

Таблица 2

Содержание Cd, Pb и Ni в различных сельскохозяйственных, дикорастущих и декоративных растениях (числитель – надземная часть, знаменатель – корни), мг/кг сухой массы

Культура	Вариант											
	Контроль			1 ПДК			3 ПДК			5 ПДК		
	Cd	Pb	Ni	Cd	Pb	Ni	Cd	Pb	Ni	Cd	Pb	Ni
Марь белая	<u>0,05</u>	<u>1,7</u>	<u>1,5</u>	<u>5,6</u>	<u>2,2</u>	<u>2,7</u>	<u>47,5</u>		<u>25,0</u>	<u>8,4</u>	<u>сл.</u>	<u>162,1</u>
	3,4	6,4	15,6	34,5	16,3	20,4	38,6	н.д.	278,7	165,5	21,9	118,7
Львиный зев	<u>0,07</u>	<u>2,2</u>	<u>1,8</u>	<u>1,3</u>	<u>4,5</u>	<u>2,0</u>	<u>2,7</u>	<u>1,3</u>	<u>33,7</u>	<u>103,9</u>	<u>12,1</u>	<u>103,5</u>
	2,1	1,1	4,3	11,4	4,9	5,3	25,8	5,2	33,1	68,0	7,6	115,7
Амарант	<u>0,2</u>	<u>1,9</u>	<u>2,0</u>	<u>19,2</u>	<u>3,6</u>	<u>8,6</u>	<u>19,1</u>	<u>3,6</u>	<u>50,3</u>	<u>104,1</u>	<u>сл.</u>	<u>219,6</u>
	1,6	1,8	5,8	22,1	9,3	25,7	29,8	48,8	66,8	70,2	30,3	368,0
Просо волосовидное	<u>0,4</u>	<u>1,4</u>	<u>1,7</u>	<u>4,2</u>	<u>8,5</u>	<u>1,1</u>	<u>15,7</u>	<u>5,9</u>	<u>6,3</u>	<u>15,4</u>	<u>0,4</u>	<u>58,8</u>
	0,4	5,5	6,5	5,6	9,6	12,5	58,4	5,3	69,5	37,6	10,4	1086,2
Донник желтый	<u>0,5</u>	<u>1,7</u>	<u>4,0</u>	<u>1,6</u>	<u>2,5</u>	<u>3,1</u>	<u>2,6</u>	<u>2,8</u>	<u>20,4</u>	<u>19,6</u>	<u>сл.</u>	<u>59,8</u>
	1,3	2,4	16,4	20,4	6,1	94,1	79,7	11,6	96,8	152,1	49,6	363,1
Горчица белая	<u>1,9</u>	<u>6,2</u>	<u>2,3</u>	<u>1,2</u>	<u>5,7</u>	<u>3,5</u>	<u>18,7</u>	<u>4,5</u>	<u>12,3</u>	<u>17,1</u>	<u>3,9</u>	<u>102,8</u>
	0,4	1,5	4,2	7,5	9,4	6,7	3,8	6,4	30,0	62,3	11,4	24,3
Редька масличная	<u>0,9</u>	<u>3,9</u>	<u>7,6</u>	<u>1,0</u>	<u>4,2</u>	<u>3,7</u>	<u>23,3</u>	<u>3,2</u>	<u>12,9</u>	<u>8,0</u>	<u>0,3</u>	<u>67,2</u>
	0,3	2,9	3,5	3,2	15,4	5,1	34,2	20,1	26,5	55,3	2,5	19,0

Примечание: н.д. – нет данных.

надземной части растений «львиного зева» и «амаранта». Заслуживает внимания повышенное по сравнению с другими растениями содержание кадмия в надземной части растений «горчицы белой» в контрольном варианте – в 4,8 раза выше, чем в корнях. При повышении концентрации экзогенного кадмия в почве его содержание в растениях последовательно возрастает и достигает максимальных значений в надземной части растений «амаранта» и «львиного зева» (более 100 мг/кг сухой массы), корнях «мари белой» и «донника желтого» (более 150 мг/кг сухой массы) в варианте 5 ПДК. Согласно расчетам, у «амаранта» во всех вариантах с комплексным загрязнением почвы доля кадмия в надземных органах составляет 81...85 % от его общего выноса, у «донника желтого» 85...93 % поступившего в растения элемента обнаружено в корнях.

Данные по содержанию и выносу никеля растениями свидетельствуют о том, что по мере увеличения концентраций элемента во внешней среде он активно поступает не только в корневую систему растений, но и в надземную часть. Так, при комплексном

внесении тяжелых металлов в почву на уровне 5 ПДК его содержание в надземной части «амаранта» возросло в 110 раз, «мари белой» – в 108 раз, «львиного зева» – в 58 раз по сравнению с контрольным вариантом, в корнях – в 63; 27 и 8 раз соответственно. Максимальное содержание никеля обнаружено в надземных органах «амаранта» – 219,6 мг/кг сухой массы в варианте с внесением тяжелых металлов на уровне 5 ПДК. По характеру распределения никеля по органам экспериментальные растения можно разделить на две группы: в первую вошли «львиный зев», «амарант», «горчица белая» и «редька масличная», во вторую – «донник желтый» и «просо волосовидное». Независимо от концентраций экзогенного никеля растения первой группы активно транспортировали его из корней в надземные органы (65...94 % от общего выноса), растения второй группы удерживали элемент в корнях (70...94 % от общего выноса).

В отличие от никеля и кадмия четкой закономерности в повышении накопления свинца экспериментальными растениями при увеличении его концентрации в почве не наблюдалось.

Отличительной особенностью данного элемента явился тот факт, что в условиях сильного загрязнения почвы тяжелыми металлами корни растений «мари белой», «амаранта» и «донника желтого» практически полностью удерживали элемент от дальнейшего перемещения в надземную часть, что подтверждает сложившееся мнение о данном элементе как о малоподвижном не только в почвах, но и в растениях. Однако представители семейства «крестоцветных», как и в случае с никелем, при низком и среднем уровне содержания свинца в почве проявили способность к его активному транспортированию в надземные органы. Максимальное значение общего выноса свинца в вариантах с его внесением в почву отмечено у растений «амаранта» и «проса волосовидного» (0,2...0,4 мг Pb/сосуд), а в варианте с внесением тяжелых металлов на уровне 5 ПДК – в надземной части растений «львиного зева» и корнях «донника желтого» – 0,16 и 0,27 мг Pb /сосуд соответственно. Таким образом, в диапазоне низких и средних концентраций свинца в почве «амарант» и «просо волосовидное» накапливали наибольшее количество свинца, но при высоких концентрациях элемента в среде произрастания активнее накапливали и транспортировали его в надземную часть растения «львиного зева».

По совокупности показателей, включая расчеты коэффициента биологического поглощения (КБП) и транслокационного коэффициента (ТК), можно сделать вывод о том, что среди изученных растений в условиях высокого уровня загрязнения почвы тяжелыми металлами наибольшей способностью к накоплению и перемещению кадмия в надземные органы обладали растения «амаранта» и «львиного зева» (КБП 14,7 и 14,6; ТК 1,48 и 1,53 соответственно). Наибольший потенциал в накоплении и транспортировании никеля из корней в надземную часть при высоком уровне загрязнения почвы выявлен у растений «львиного зева»;

«амарант» и «марь белая» накапливали большое количество никеля в корнях (66,8 и 118,7 мг/кг воздушно-сухой массы соответственно), в связи с чем их можно использовать для деконтаминации загрязненных данным элементом почв методом фитоиммобилизации, что позволит предотвратить миграцию никеля по почвенному профилю и его попадание в различные звенья экосистемы. Аналогичный вывод можно сделать по отношению к свинцу, накопление которого у большинства экспериментальных растений преобладало в корнях. Наибольший потенциал для фитоиммобилизации свинца в загрязненной данным элементом почве проявили «донник желтый», «амарант» и «марь белая».

Таким образом, несмотря на то что, согласно общепринятым критериям, ни одно из исследуемых растений не является гипераккумулятором в отношении кадмия, никеля и свинца, установленные закономерности в их накоплении и распределении по органам растений, а также значения расчетных коэффициентов свидетельствуют о том, что для деконтаминации почв, загрязненных кадмием и никелем, методом фитоэкстракции наибольшим потенциалом из изученных растений обладают «амарант» и «львиный зев».

Список литературы

1. **Cunningham, S.** Promises and prospects of phytoremediation [Text] / S. Cunningham, D. Ow // Plant Physiology. – 1996. – V. 110. – P. 715–719.
2. **Salt, D. E.** Phytoremediation [Text] / D. E. Salt, R. D. Smith, I. Raskin // Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. – 1998. – V. 49. – P. 643–668.
3. **Brown, K. S.** The green clean – The emerging field of phytoremediation takes root [Text] / K. S. Brown // Bioscience. – 1995. – V. 45. – P. 579–582.
4. **Cunningham, S. D.** Phytoremediation of contaminated soils [Text] / S. D. Cunningham, W. R. Berti, J. W. Huang // Trends in Biotechnology. – 1995. – V. 13. – P. 393–397.
5. **Ghosh, M.** A review on phytoremediation

of heavy metals and utilization of its byproducts [Text] / M. Ghosh, S. P. Singh // Applied Ecology and Environmental Research. – 2005. – V. 3 (1). – P. 1–18.

6. **Baker, A. J. M.** Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry [Text] / A. J. M. Baker, R. R. Brooks // Biorecovery. – V. 1. – P. 81–126.

7. **Brooks, R. R.** Plant that hyperaccumulate heavy metals (their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining) [Text] /

R. R. Brooks. – Wallingford : CAB International, 1998. – 380 p.

Материал поступил в редакцию 28.05.09.

Андреева Ирина Викторовна, кандидат биологических наук, руководитель бизнес-инкубатора

Тел. 8 (495) 977-78-94

Байбеков Равиль Файзрахманович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор

Тел. 8 (495) 976-47-89

Злобина Мария Владимировна, младший научный сотрудник лаборатории почвенных исследований

Тел. 8 (495) 976-12-48

УДК 502/504 : 631.4

Ю. П. ДОБРАЧЕВ, А. Н. КУЛИКОВ, К. Н. ЕВСЕНКИН

Государственное научное учреждение

«Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова»

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ АГРОЦЕНОЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ АГРОСИСТЕМЫ

В работе показана возможность использования имитационной модели агроценоза при анализе временных рядов урожайности яровой пшеницы для оценки и выявления деградации почвенного покрова, приводящей к снижению мощности корнеобитаемой зоны. На основе анализа этих данных по Рязанской области выделены районы, для которых коэффициент вариации временного ряда урожайности выше по сравнению с другими. Выборочные обследования полей подтвердили наличие уплотнения и слитизации почв.

Имитационная модель, уплотнение почвы, деградация, мониторинг, яровая пшеница.

The research shows the possibility of using agrocenosis simulation model for the time series analysis of the spring wheat yield with a purpose of estimation and revelation of the soil cover degradation leading to reduction of the root zone capacity. On the basis of these data on the Ryazan region there are special regions for which the variation coefficient of the time series productivity is higher in comparison with others. Field selective investigations confirmed the availability of soil compaction and packing.

A simulation model, soil compaction, degradation, monitoring, spring wheat

Использование имитационных моделей агроценозов в системах управления технологиями выращивания сельскохозяйственных культур представляет несомненный интерес для оценки состояния сельскохозяйственных угодий. Такая оценка может быть

сделана путем сопоставления фактической и расчетной продуктивности.

Возможность использования в сценарных исследованиях консервативной составляющей (характеристики почвы) и динамичной составляющей (многолетний ряд погодных условий) входной