

# БИОРЕМЕДИАЦИЯ ПОЧВ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

## М.И. Янкевич<sup>1\*</sup>, В.В. Хадеева<sup>1</sup>, В.П. Мурыгина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «НПК ИЛМА ЭКО» Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Кафедра химической энзимологии МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия

\* Эл. почта: info@ilmaeco.ru

Статья поступила в редакцию 30.09.2014; принята к печати 09.06.2014

Процессы самовосстановления и самоочищения природы уже не справляются с поступающими в нее загрязняющими веществами, которые из атмосферы и водной среды переходят в почву и аккумулируются в ней. Соответственно растет востребованность технологий очистки почв. Их выбор определяется не только тем, что требующие очистки территории отличаются друг от друга по количеству загрязнений, почвенным и климатическим условиям, но и целями и задачами очистки, то есть планируемому использованию очищенной территории. Преимущества биоремедиационных технологий связаны с возможностями живых систем, особенно микроорганизмов, метаболизировать большое число различных органических веществ, с мягкостью воздействия на очищаемую среду, не приводящую к существенным изменениям основных почвенных показателей, и с относительно низкой стоимостью работ. К недостаткам биоремедиации почв относится низкая скорость биодеградации токсикантов и необходимость проведения тщательного предварительного обследования загрязненного участка для уточнения режимов биотехнологических работ. В статье приводятся конкретные примеры успешного применения биоремедиации почв, загрязненных нефтепродуктами и химическими токсикантами.

**Ключевые слова:** почвенные токсиканты, биоремедиация, нефтезагрязнения, фиторемедиация.

## BIOREMEDIATION OF SOILS: YESTERDAY, TODAY AND TOMORROW



M.I. Yankevich<sup>1\*</sup>, V.V. Khadeyeva<sup>1</sup>, V.P. Murygina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО NPK Ilma-Eco and, Saint Petersburg, Russia; <sup>2</sup> Department of Chemical Enzymology, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

\* E-mail: info@ilmaeco.ru

The processes of self-healing and self-purification of nature are no longer sufficient to cope with pollutants that travel through the air and water into the soil and accumulate there. That is why the demand for soil decontamination technologies is growing now. The choice of a technology is determined by the surface characteristics of the contaminated area, the severity of its contamination, the conditions of soil, and the meteorological parameters, as well as by the intended use of the area. The advantages of bioremediation are associated with the ability of living systems, especially microorganisms, to metabolize a great variety of organic compounds with but a minor impact on the environment and insignificant changes in the main characteristics of soil and at a relatively low operational cost. The disadvantages of bioremediation of soils include low rates of biodegradation of toxic substances and the need for a preliminary examination of the contaminated area in order to clarify the details and modes of bioremediation works. The present paper provides some concrete examples of successful application of bioremediation technologies to soils contaminated with petroleum and chemical toxicants.

**Keywords:** soil toxicants, bioremediation, phytoremediation, pollution with oil.

Функции микр  в природе специализированы, для каждой работы  есть свой специалист, приспособивший к ней весь химизм своего существования, в любой точке земного шара.

С.Н. Виноградский, 1896 г.

### Введение

XXI в. – время рассвета биологических технологий в мире. Уверенно используются биотехнологические процессы и в области защиты среды [1–4, 8]. Биологическая очистка сточных вод – яркий пример успешного применения биотехнологических процессов, научные и практические основы которых сформировались еще в начале прошлого века и совершенствуются поныне.

Природные процессы самовосстановления и самоочищения, которые тысячелетиями поддерживали и обеспечивали жизнеспособность природной системы, уже не справляются с колоссальным количеством поступающих в нее загрязнений, и дестабилизация окружающей среды стала заметной в изменениях слагающих ее сред, в том числе водной, воздушной и почвенной.

Озабоченность состоянием воздушной среды и гидросферы усилилась с начала прошлого века. Необходимость защиты, очистки и восстановления почвенного покрова осознана человечеством сравнительно недавно. Между тем почва – основной компонент наземных экосистем – имеет жизненно важное значение как для людей, так и для благополучного состояния окружающей нас среды. Загрязнители, поступающие в атмосферу, аккумулируются почвой, и именно она является той депонирующей средой, в которой накапливаются токсиканты, представляющие гигиеническую и экологическую опасность для человека, животных, растений, тормозящие и останавливающие очистку и восстановление окружающей среды.

Принятая в 1970-х гг. Европейская почвенная хартия [16] определила, что любая биологическая, физи-

ческая или химическая деградация почвы признается первоочередной опасностью, и соответствующие меры для защиты почв должны быть проведены незамедлительно.

Если не останавливаться на редких специфических загрязнителях, то самыми массовыми загрязнителями почв, особенно городских, являются углеводороды, тяжелые металлы, полициклические ароматические углеводороды, хлорорганические соединения (растворители, пестициды). Присутствие этих токсикантов в почве ухудшает экологическую обстановку, например, происходит угнетение газонной, парковой растительности, подавляется ризосферная биота, почвенные токсиканты влияют на здоровье населения, особенно в больших городах. Огромную опасность загрязненные почвы несут животному миру.

Тяжелые металлы накапливаются в почве, где они связываются с ее минеральными компонентами и могут переходить в почвенный раствор при закислении почвы и далее потребляются растениями и почвенными организмами, влияя на их развитие, а также вымываться в грунтовые воды. Почвенные токсиканты попадают и в сельскохозяйственную продукцию, загрязняют пищевые цепочки и, что очень важно, ухудшают качество питьевой воды.

По оценкам Агентства по защите окружающей среды США (EPA USA), объем загрязненной почвы превышает 1 млрд кубических метров. Только в ЕС имеется более полутора миллионов загрязненных участков, на очистку которых необходимо более 85 млрд евро [11, 17]. Потребность в восстановлении загрязненных территорий практически утраивается каждые десять лет. В Евросоюзе в 2000 г. расходы на очистку почв составили приблизительно 9 млрд евро, при оценке рынка в 85 млрд евро [17]. В России такие масштабные оценки не делались.

В Санкт-Петербурге в 2005–2007 гг. были проведены исследования состояния почв в городе. В результате анализа и обобщения полученных сведений было выполнено зонирование городских территорий по основным факторам экологического и потенциальных рисков от существующих предприятий и санкционированных и несанкционированных свалок. Выявлено, что 13,34% (191,6 кв. км) городских территорий заняты зонами повышенного экологического риска, а зоны чрезвычайной степени риска занимают 10,7 кв. км [7].

### Общий обзор методов ремедиации почв

Наличие, разработка и совершенствование технологий очистки почв определяется их растущей востребованностью как практических инструментов решения конкретных экологических и гигиенических задач. Следует отметить, что требующие очистки территории отличаются друг от друга по качеству и количеству загрязнений, почвенным и климатическим условиям и, главное, целям и задачам очистки, то есть планируемому использованию очищенной территории.

Для ремедиации почв успешно применяют технологии, которые воздействуют на сам загрязнитель, при этом происходит деструкция или окисление токсичных веществ или их трансформация в менее токсичные соединения.

Методы ремедиации, основанные на обработке токсикантов, классифицируются как физические, в том

числе термические методы, химические, в том числе отверждение и стабилизация, и биологические методы – биоремедиация [8].

Биоремедиация – это комплекс методов очистки почв и вод, основанный на использовании биохимического потенциала микроорганизмов (бактерий, грибов), водорослей, высших растений. Важнейшее преимущество этих технологий заключается в их безопасности для окружающей среды: они основаны на процессах самоочищения живой природы, и, как правило, при этом отсутствуют вторичные отходы, образующиеся при других методах ремедиации [1, 10]. Биоремедиация – лечение жизнью (bios – жизнь, remedatio – лечение), очистка, восстановление с помощью живых организмов.

Успешное развитие биоремедиационных технологий для восстановления загрязненных почв началось в 1970-е гг., прежде всего, в связи с очисткой земель, остающихся после нефтедобычи, аварий при транспортировке и переработке нефти и применения нефтепродуктов.

В этих биотехнологиях используют как стимулирование местной почвенной микрофлоры, обладающей способностью к окислению нефтяных углеводородов, так и внесение в места загрязнения биопрепаратов-нефтедеструкторов (аугментация) [1, 3]. Разрабатываются новые микробные препараты-деструкторы, специфичные к определенным видам углеводородных субстратов (мазуты, креозоты, битумы, полиароматические соединения), и новые технологические решения, позволяющие полностью ликвидировать последствия аварийных и систематических углеводородных загрязнений воды и почвы и восстановить природную, окружающую среду.

Преимущество биоремедиационных технологий связано с широчайшими возможностями живых систем, особенно микроорганизмов, метаболизировать в той или другой степени огромное число различных органических веществ (табл. 1) [8, 10]. Кроме того, очень важно, что применение биоремедиационных технологий предполагает мягкое воздействие на очищаемую среду, не приводящую к существенным изменениям основных почвенных показателей. Важным моментом также является меньшая стоимость биоремедиации.

К недостаткам биологических процессов очистки и восстановления почв относятся низкая скорость биодеградации токсиканта и необходимость проведения предварительного обследования загрязненного участка для уточнения технологических режимов биотехнологических работ.

Табл. 1

#### Биодеструкция органических токсикантов [8]

Технология биоремедиации	Органические токсиканты
Биокomпостирование	НУГВ, ПЛОС, ЛОС, ПАУ, пестициды, ПХБ
Биоventилирование	ПЛОС, ЛОС
Обработка загрязненной почвы на территории (ландфарминг)	НУГВ, ПЛОС, ЛОС, пестициды, ПХБ
Фитовосстановление территорий	ПЛОС, ЛОС, тяжелые металлы

Примечание: НУГВ – нефтяные углеводороды; ЛОС – летучие органические соединения; ПЛОС – полунлетучие органические соединения; ПАУ – полиароматические углеводороды; ПХБ – полихлорированные бифенилы.

По принятой международной классификации биоремедиационные технологии делятся на три группы.

#### Биоремедиация *ex situ*:

- извлечение загрязненной почвы, перемещение ее на площадки обезвреживания, агротехнические работы;
- отмывание извлеченной почвы от загрязнения (в основном от нефти), возвращение на прежнее место и проведение мелиорации;
- экскавация почвы и проведение жидкофазной или твердофазной ферментации в биореакторах с добавлением биогенных элементов в аэробных или анаэробных условиях (несколько дней или месяцев, снижение концентрации ксенобиотика на 90–99%).

#### Биоремедиация *on site*:

- загрязненная почва остается на месте;
- проводятся мелиорация, биостимулирование, фиторемедиация (1–2 года, снижение концентрации токсиканта на 60–90%);
- загрязненная почва остается на месте, только при необходимости механически снимается верхний, сильно загрязненный слой почвы, далее проводятся обработка биопрепаратами-деструкторами и весь комплекс агротехнических работ (2–4 года или больше, снижение концентрации ксенобиотика до 90%).

Биоремедиация *in situ* (загрязнение находится под поверхностью почвы):

- биоventилирование – закачка воздуха, продолжительность – от нескольких дней до месяца, снижение концентрации ксенобиотика на 90–99%;
- биобарботирование – закачка питательных растворов, продолжительность – от нескольких дней до месяца, снижение концентрации ксенобиотика на 90–99%;
- биодеструкция при откачке жидкой фазы загрязнителя под вакуумом (продолжительность – от нескольких дней до месяца и года).

Большое распространение получили технологии с применением различных биопрепаратов, содержащих микроорганизмы, способные разрушать токсикант.

Такие биопрепараты первого поколения (1980–1990-е гг.), как правило, содержали микроорганизмы-деструкторы одного вида и рода, например, известные в России бактериальные препараты «Путидойл», «Руден», или консорциум микроорганизмов, такие как препарат «Деворойл» (5 бактериальных культур и 2 дрожжевые), препарат серии «Биодеструктор» (два штамма бактерий), «Родер» (2 штамма бактерий).

Дальнейшие исследования и испытания разработанных препаратов позволили определить направление развития и конструирования биопрепаратов. Было показано, что эффективность биопрепаратов повышается при иммобилизации микроорганизмов-деструкторов на материалах, обладающих средством к загрязнителю. Преимуществом биопрепаратов, состоящих из иммобилизованных на носителях микроорганизмов-деструкторов (в том числе биосорбентов), является более высокая выживаемость клеток микроорганизмов, что существенно увеличивает сроки хранения препаратов; носители могут содержать питательные компоненты, необходимые для поддержания деструктивной активности клеток,

что упрощает технологический процесс применения биопрепаратов. Разработано много биопрепаратов, включающих и сорбенты, и микроорганизмы-деструкторы. Такие биосорбированные препараты можно отнести ко второму поколению. Это, например, препараты «Экойл», «Эколан», семейство препаратов «БАК» и другие. Они более технологичны, не требуют предварительной подготовки для применения, хотя и выявились сложности в производстве и поддержании их в производственных и лабораторных условиях.

Третье поколение современных биопрепаратов на основе смешанных культур и ассоциаций микроорганизмов имеет более широкие адаптационные возможности для использования. Они применяются не только для очистки почв и грунтов, но и для обезвреживания таких органических отходов, как креозот, сланцевые масла, отработанные машинные и моторные масла, смазочно-охлаждающие жидкости и другие углеводородные загрязнения [2]. Для расширения сферы применения и эффективности в современные биопрепараты добавляют различные эмульгаторы, биодобавки, поверхностно-активные вещества и другие стимуляторы биологических процессов. Происходит дальнейшее усложнение как методов получения таких биопрепаратов, так и технологий применения.

### Биоремедиация *on site*

По этим технологиям, биоремедиация проводится прямо на месте загрязнения, что позволяет обрабатывать почву без ее извлечения и транспортировки и тем самым существенно снизить затраты на очистку.

Суть таких методов состоит либо в активизации природной микрофлоры, разлагающей токсикант в месте загрязнения, либо во внесении биопрепаратов-деструкторов, специфичных именно к целевому загрязнителю.

Следует отметить определенный недостаток таких технологических решений, связанный с низкой скоростью массопереноса в столь гетерогенной среде, как почва. Очистка обычно происходит в течение недель и месяцев, что может приводить к изменению сроков дальнейшего использования очищаемой территории. Поэтому прежде всего проводятся работы по изучению состава почвы, состава загрязнения, уровня и направления тока (состава) грунтовых вод, и далее, уже на основе полученных данных, уточняется технологический регламент проведения биоремедиации.

Основное внимание при использовании биоремедиационных технологий уделяется обеспечению процесса кислородом для микробиологического окисления токсиканта.

Невозможна биоремедиация загрязненных почв и грунтов в присутствии элементов питания, необходимых для роста и размножения клеток. Как правило, процессы деструкции осуществляются в определенном диапазоне величин pH. Например, при окислении углеводов образуются промежуточные продукты метаболизма – органические кислоты, сдвигающие величины pH почвы в кислую сторону. Поэтому применяются раскислители почвы и стабилизаторы pH почвенного раствора.

При снижении температуры происходит замедление процессов, обеспечиваемых активностью микро-



организмов, что является определяющим для северных регионов, хотя микроорганизмы-деструкторы, как правило, остаются жизнеспособными и при температуре ниже точки замерзания воды и восстанавливают активность при повышении температуры окружающей среды.

Следует отметить важность присутствия воды в почве при проведении биоремедиации, так как только она является той транспортной средой, через которую и загрязнитель, и элементы питания поступают в клетку, а также выводят продукты метаболизма.

Как правило, завершающим этапом очистки и восстановления почв загрязненных территорий является фиторемедиация – посев устойчивых к нефтяному загрязнению трав.

Примером успешного использования биоремедиационных технологий *on site* являются проведенные в республике Коми работы по очистке и восстановлению природных территорий, загрязненных нефтью в результате аварий на магистральном нефтепроводе [6, 14] (рис. 1–4).

Иллюстрацией реализации комплексной биоремедиационной технологии на загрязненной нефтешламами акватории могут служить работы по очистке и

восстановлению «Треугольного болота» на территории железнодорожного депо ст. Бологое Октябрьской железной дороги (рис. 5–8). Поступление нефтеотходов в болото происходило более десяти лет, практически оно превратилось в промышленный нефтестойник.

После первичного сбора и удаления нефтешлама, плавающего на поверхности воды, были проведены обработки зеркала воды и прибрежной зоны биопрепаратом «БАК-Л» и биогенными элементами, активизирующими местную микрофлору и водную растительность.

В течение одного вегетативного сезона в водоеме сформировались очищающие биоматы, состоящие из цианобактерий, водорослей и нефтеокисляющей микрофлоры, присутствующей в воде. Окончательная очистка акватории завершилась на следующий год, о чем свидетельствовало появление водоплавающих птиц и лягушек.

### Биоремедиация *ex situ*

К таким способам биоремедиации относятся технологии лэндфарминга, биокомпостирования в буртах на площадках и обработка загрязненной почвы в биореакторах.

#### Биоремедиация нефтяного разлива в республике Коми ООО «ЛУКОЙЛ КОМИ» с применением биопрепаратов-нефтедеструкторов, 2002 г.



**Рис. 1.** До начала биоремедиационных работ, июнь 2002 г.



**Рис. 2.** Через 2,5 месяца после проведения работ



**Рис. 3.** Делянка, на которой применяли препарат «Родер», сентябрь 2002 г.



**Рис. 4.** Та же делянка, на которой применяли препарат «Родер», в сентябре 2006 г.

Лэндфарминг – это очистка извлеченной загрязненной почвы, распределенной на поверхности земли слоем 0,3–0,5 м, за счет биостимулирования аборигенной микрофлоры агротехническими приемами, такими как рыхление и внесение минеральных удобрений, для обеспечения сбалансированного питания микрофлоры, а также полив и обработка биопрепаратами-деструкторами одновременно с поливом и внесением удобрением на фоне проводимых мероприятий.

Эта довольно простая и недорогая технология позволяет очистить почву за время от 2–3 месяцев до нескольких лет, но требует значительных площадей. Используется для очистки почвы с невысоким уровнем загрязнения веществами, деструкция которых происходит медленно, такими как полиароматические углеводороды, хлорированные растворители (перхлорэтилен, трихлорэтилен, дихлорэтилен), диоксины. Существует положительный опыт биоремедиации лэндфармингом шламов из шламовых амбаров, выполненной ООО «Природа-Пермь» на территории Пермского края. Двухлетний лэндфарминг на этой территории с применением биопрепаратов-нефтедеструкторов позволил избавиться от грунтов и почв, пропитанных нефтью буровых площадок,

и получить почвогрунты с очень высоким потенциалом самовосстановления (рис. 9–14).

В составе полученных почвогрунтов были отмечены все группы почвенных микроорганизмов, участвующих в круговороте углерода и азота. Присутствие азотфиксирующих бактерий создало благоприятные условия для произрастания растений, к 2005 г. произошло полное самозаращение технологической площадки.

Успех биокomпостирования в буртах (рис. 15–18) на площадках обезвреживания сильнозагрязненных почв и грунтов (20%-е загрязнение) зависит от применяемых агротехнических решений и эффективности биопрепаратов-деструкторов токсиканта.

Складирование загрязненных почв и грунтов в бурты позволяет осуществить процесс биоремедиации в более контролируемых условиях, чем при лэндфарминге. Если биокomпостирование проводится в буртах с принудительной аэрацией, то высота бурта достигает нескольких метров, внутри размещается система перфорированных труб, через которые насосом прокачивается воздух. Если аэрация осуществляется естественным образом, то организуется бурт не более 0,5 м высоты и с регулярным перемешиванием компоста. Для проведения биоокисления токсиканта

**Комплексная биоремедиация замазученного экотопа, ст. Бологое, Октябрьской железной дороги**



**Рис. 5.** «Треугольное болото» весна 2008 г. перед началом работ



**Рис. 6.** Август 2008 г. После двух биообработок препаратом «БАК Л» растительность и зеркало воды практически свободны от нефтяных загрязнений



**Рис. 7.** Май 2009 г. Прибрежный участок. Самый действенный природный инструментальный процесс очищения – биоматы, состоящие из консорциума микроводорослей и иммобилизованных на них бактерий-деструкторов углеводов



**Рис. 8.** Осень 2012 г. На поверхности воды нет нефтяных пленок, озерные илы также чистые



кантов бурты периодически увлажняют и вносят элементы питания. Очень часто, особенно при высоком уровне загрязнения, почвы смешивают с объемным разбавителем (сидераты, торф, опилки, лиственный опад). Как правило, биокомпостирование почв, грунтов, отходов с углеводородным загрязнением проводится от нескольких месяцев до 1–2 вегетативных се-

зон, при тщательном соблюдении регламентных работ на площадке.

Обработка загрязненной почвы в биореакторах наиболее эффективна и дает возможность достичь высокой степени очистки в минимальные сроки, но экономически этот способ самый дорогой. Наибольшие расходы при его применении связаны с энергозатра-

**Лэндфарминг нефтешламов на технологической площадке в нефтепромысловом районе Пермской области**



**Рис. 9.** Организация технологической площадки, 2001



**Рис. 10.** Завоз нефтешлама на площадку, 2002 г.



**Рис. 11.** Обработка подготовленной технологической площадки суспензией биопрепарата, 2002 г.



**Рис. 12.** Площадка после агротехнических работ, 2002 г.



**Рис. 13.** Площадка после агротехнических работ, 2003 г.



**Рис. 14.** Площадка в 2005 г., полное самозарастание



тами на перемешивание и аэрирование очищаемой суспензии водного раствора и почвы.

### Биоремедиация *in situ*

Проблемы деконтаминации загрязнений территорий на глубину, особенно под объектами городской застройки, возникают в больших городах, когда идет перепрофилирование территорий промпредприятий, находящихся в городской черте, развитие и расширение городской застройки. От эффективной ликвидации таких загрязнений зависят градостроительные решения.

Новыми и успешными в Европе и США являются методы биовентилирования, биобарботирования и откачки жидкой фазы под вакуумом для удаления адсорбированных летучих и полуметучих токсикантов и загрязнителей в жидком состоянии. Для интенсивного протекания микробиологических процессов проводят нагнетание воздуха через инжекционные скважины. Движение воздуха стимулирует жизнедеятельность почвенных микроорганизмов и миграцию загрязнителей в зону дерна и корневой ризосферы. Отработанный воздух дополнительно очищается в установках каталитического дожигания, фильтрах, биофильтрах. При реализации этих методов, кроме на-

сыщения воздухом, применяют биопрепараты и биогенные элементы и добавки (обычно биологически совместимые поверхностно-активные агенты) способствующие десорбции адсорбированных на частицах почвы загрязняющих веществ и увеличению их биодоступности аборигенной или интродуцированной микрофлоре.

### Фиторемедиация

Накопленный за последние десятилетия опыт применения биоремедиационных технологий позволил определить наряду с очевидными экологическими и экономическими их преимуществами также и ряд недостатков, главный из которых – проблема приживаемости штаммов-деструкторов в открытой экосистеме. Так как именно микроорганизмы – это те биологические системы, которые обеспечивают минерализацию сложных органических молекул, в том числе поллютантов, то основной задачей биоремедиационных технологий является обеспечение их стабильного функционирования в очищаемой почве [13]. Наиболее эффективно использовать для этого растения, так как их ризосфера, как естественная экосистема, может обеспечить и высокую численность микробной популяции, и ее поддержание [5, 9].

### Биокомпостирование загрязненных грунтов на площадке обезвреживания на территории Локомотивного депо Октябрьской железной дороги



**Рис. 15.** Подготовка площадки для обезвреживания



**Рис. 16.** Грунт для биокомпостирования



**Рис. 17.** Регламентные работы по биокомпостированию



**Рис. 18.** Почвогрунт после биокомпостирования для планировки территории

Доказано, что растения можно применять для очистки почв, грунтовых и сточных вод как от неорганических (тяжелые металлы, радионуклиды), так и от органических (углеводородные загрязнения, пестициды) токсикантов.

Выделяют несколько основных механизмов фиторемидации [4].

**Фитоэкстракция** – это поглощение, транслокация и аккумуляция загрязнителя в растениях. Процесс лежит в основе очистки почв от тяжелых металлов и радионуклидов.

При **ризотифльтрации** происходит сорбция загрязнителя на корнях или других частях растений, что также актуально при ликвидации неорганических загрязнений.

Процессы **фитодегградации** органических поллютантов находятся в стадии интенсивного исследования, а **ризодегградация** – это деструкция загрязнений в корневой зоне растения под действием корневых экссудатов и активности ризосферной микрофлоры. Широкий спектр поллютантов, в том числе и стойких органических загрязнителей (СОЗ), можно разрушить с участием интродуцированных микроорганизмов-деструкторов СОЗ и растений, обладающих активной ризосферной микрофлорой, создавая новые растительно-микробные очищающие комплексы.

Экспериментальные и практические работы показали, что фитоэкстракция, возможно, станет эф-

фективным инструментом для удаления металлов из почвы. В идеальном случае для фитоэкстракции нужны растения быстрорастущие, с большой биомассой и обладающие способностью к гипераккумуляции ионов металлов (в том числе изотопов) в зеленой массе. Способность растения к гипераккумуляции определяется коэффициентом бионакопления – отношением концентрации токсиканта в побегах к концентрации в почве. Гипераккумуляторы способны поглощать определенные металлы в количестве, составляющем несколько процентов от веса их сухой биомассы. Собранная растительная биомасса может быть ликвидирована путем сжигания и последующей утилизации золы на полигонах. Если токсические элементы представляют коммерческую ценность, их можно извлечь с использованием процедуры экстракции. Растения, образующие достаточно большое количество наземной биомассы, которые могут скашиваться несколько раз за сезон для удаления токсических элементов, – наилучшие кандидаты для фитоэкстракции. Чтобы быть наиболее полезными для фиторемидации, эти растения должны также аккумулировать в растительных тканях токсические элементы в количестве порядка 2–5% сухой массы.

В базе данных PHYTOREM, созданной отделом по использованию экологических биотехнологий в г. Хал (Квебек, Канада) [12], собрано огромное коли-

Табл. 2

**Перечень элементов, включенных в базу данных PHYTOREM**

Алюминий (Al)	Медь (Cu)	Платина (Pt)	Уран (U)
Бериллий (Be)	Молибден (Mo)	Радий (Ra)	Хром (Cr)
Кадмий (Cd)	Мышьяк (As)	Ртуть (Hg)	Цезий (Cs)
Кобальт (Co)	Никель (Ni)	Свинец (Pb)	Цинк (Zn)
Марганец (Mn)	Палладий (Pd)	Стронций (Sr)	

Табл. 3

**Список растений с наиболее высокими величинами аккумуляции металлов в базе данных PHYTOREM [12]**

Элемент	Растение с наиболее высокой зафиксированной концентрацией	Происхождение растения	Максимальная аккумулируемая концентрация (мг/кг сухой массы)
Al	<i>Solidago hispida</i>	Канада	6820
As	<i>Agrostic tenuis (capillaries)</i>	Культивируемое	2000
Cd	<i>Vallisneria spiralis</i>	Индия	6242
Co	<i>Haumanistrum robertii</i>	Африка	10200
Cr	<i>Medicago sativa</i>	Культивируемое	7700
Cs	<i>Heliantus annuus</i>	Культивируемое	Высокое поглощение
Cu	<i>Larrea tridentate</i>	США	23700 биопоглощение
Hg	<i>Pistia stratiotes</i>	Повсеместно в тропиках	1100
Mn	<i>Macdemia neurophylla</i>	Новая Каледония	51800
Mo	<i>Thlaspi caerulescens</i>	Европа	1500–1800
Ni	<i>Psychotria douarrei</i> <i>Hybanthus floribundus</i>	Новая Каледония Австралия	4500; 22% всей золы
Pb	<i>Brassica juncea</i>	Культивируемое	26200
Sr	<i>Helianthus annuus</i>	Культивируемое	Высокое поглощение
U	<i>Helianthus annus</i>	Культивируемое	>15000
Zn	<i>Thlaspi caerulescens</i>	Европа	52000



чество информации по наземным и водным растениям со всего мира, которые обладают потенциалом для использования их в фиторемедиации участков, загрязненных металлами.

Эта база данных была создана с использованием широкого компьютерного поиска опубликованных доступных баз данных и реферированных коммерческих услуг с применением поиска по ключевому слову и перекрестными ссылками с 19 элементами, для которых были необходимы данные.

Предварительная база данных, полученная с использованием указанных поисков, содержит 775 зарегистрированных видов растений, принадлежащих к 76 семействам, 39 порядкам и 9 подклассам. В ней имеются не только сосудистые растения, дополнительно подразделяющиеся на цветущие растения, хвойные, папоротники и родственные им виды, но также и другие организмы, такие как бактерии, водоросли, лишайники, грибы и бриофиты (мхи и печеночники), которые, в частности, пригодны к использованию в качестве дополнительных сорбентов.

В случае сосудистых растений база данных включает как дикие, так и культурные растительные виды и разновидности. Кроме того, приводится информация по биологии и экофизиологии, если она есть. Эта информация включает происхождение растений, таксономию, распределение, биологию, влияние на экологию и здоровье, использование видов, приемы культивирования, источники материала для исследованных видов, дикие или другие значимые родственные виды, режим использования в фиторемедиации (то есть устойчивость к токсиканту и/или аккумуляцию или гипераккумуляцию загрязнителя).

В базе данных растения далее распределяются по их способностям аккумулировать, гипераккумулировать, осаждают или проявляют устойчивость по отношению к определенным тяжелым металлам. По большей части растения рассматриваются как аккумуляторы, если они накапливают металлы в концентрации 100–200 мг/кг сухой массы. Растительные виды считаются гипераккумуляторами, если они поглощают более 1000 мг/кг сухой массы большинство металлов, 10000 мг/кг Mn или 100 мг/кг Cd. Было обнаружено, что 465 видов растений проявляют некоторые способности к ремедиации от какого-либо одного элемента. Кроме того, было найдено, что 66 видов обладают способностью поглощать два элемента, тогда как 25 видов проявляют способность аккумулировать три элемента. Наиболее широкие способности к аккумуляции металлов – до четырех элементов и более – проявляют 15 видов, перечисленных в таблице 3. Ссылок, касающихся бериллия, палладия, платины или радия, не было обнаружено.

Кроме того, было обнаружено, что некоторые растения, представленные в табл. 3, способны поглощать очень высокие уровни металлов. Некоторые гипераккумуляторы, такие как подсолнечник или люцерна, представляют собой важные агенты с наиболее высоким потенциалом к фиторемедиации, так как они являются также возделываемыми растениями с хорошо отрегулированными приемами культивирования.

Успехи ризосферной деградации органических токсикантов, таких как ПАУ [2, 13, 15], нефтяные углеводороды, связаны с увеличением численности почвенных микроорганизмов и повышением деградации токсиканта в ризосфере растений. Изучение потенциала растительно-микробных комплексов для разработки современной биотехнологии фиторемедиации активно проводится в настоящее время.

Интерес к созданию эффективных ризосферных технологий только увеличивается в связи с тем, что растительно-микробные ассоциации, обладающие гибким метаболизмом и уникальными ферментными системами, имеют большие преимущества при выживании в неблагоприятных условиях окружающей среды [13, 15].

Будущие технологии биоремедиации загрязненных территорий будут связаны с развитием наших знаний в области изучения взаимного влияния токсиканта, аборигенных или интродуцированных микроорганизмов-деструкторов и растений-ремедиантов.

Технология биоремедиации *on site*, к которой относится фиторемедиация, является самой дешевой для восстановления больших площадей. При первичных затратах на подготовку территории к высеву растений затраты на поддержание процесса минимальны. Технологический регламент фиторемедиации довольно прост и обеспечивает стабильную и продолжительную очистку почвенного слоя. Преимуществом этих процессов является обеспечение почвы кислородом, органикой, что способствует улучшению качества и структуры очищаемых земель. Создание растительного покрова уменьшает эрозию. Стоит отметить, что применение фиторемедиационных систем имеет и общественное одобрение, и привлекательность для пользователей и регулирующих органов.

### Заключение.

Мы рассмотрели основные современные технологии биоремедиации почв, считающиеся самыми экономичными и экологичными. Реально существует множество конкретных ремедиационных технологий, которые отдельно или в комплексе применяются для решения конкретных задач восстановления загрязненных почв.

Для очистки и восстановления почв необходимо создание интегрированных технологических процессов на основе достижений фундаментальных, прикладных, междисциплинарных наук и практического опыта.

Биоремедиационные технологии очистки и восстановления почв основаны на усилении естественных процессов самоочистки и самовосстановления окружающей среды.

Здоровье и качество жизни населения и особенно городского, качество городской среды в большой степени зависят от экологического состояния почв как аккумулирующей среды и источника важнейшего жизненного ресурса.

Спасение человека находится в его руках, и одним из главнейших источников его благополучия является восстановление почв, загрязненных им же самим.

## ЛИТЕРАТУРА

## Список русскоязычной литературы

1. Вельков В.В. Биоремедиация: принципы, проблемы, подходы. Биотехнология. 1995;(34):20-7.

2. Егорова А.В., Мамонтова В.Н., Афти И.А., Никифоров В.А., Янкевич М.И., Жаковская З.А. Бактериальная деградация полициклических ароматических углеводородов в городских почвах. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института. 2014;(23):75-8.

3. Киреева Н.А., Тарасенко Е.М., Онегова Т.С., Бакаева М.Д. Комплексная биоремедиация нефтезагрязненных почв для снижения токсичности. Биотехнология. 2004;(6):63-70.

4. Кузнецов А.Е., Градова Н.Б., Лушников С.В. Прикладная экобиотехнология. М.: БИНОМ; 2010.

5. Муратова А.Ю., Бондаренкова А.Д., Панченко Л.В., Турковская О.В. Использование комплексной фиторемедиации для очистки почвы, загрязненной нефтешламом. Биотехнология. 2010;(1):77-84.

6. Мuryгина В.П., Калужный С.В. Биоремедиация загрязненных углеводородами территорий в северных регионах России. Мир нефтепродуктов. 2009;(4):30-36.

7. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 2007 году. Под редакцией ДА Голубева, НД Сорокина. Санкт-Петербург; 2008.

8. Ступин Д.Ю. Загрязнение почв и новейшие технологии их восстановления. Санкт-Петербург; 2009.

9. Турковская О.В., Муратова А.Ю. Биодegradация органических поллютантов в корневой зоне растений. В кн.: Молекулярные основы взаимоотношений ассоциативных микроорганизмов с растениями. М.: Наука; 2005. с. 180-208.

## Общий список литературы / References

1. Velkov V.V. [Bioremediation: principles, problems, and approaches]. Biotekhnologiya. 1995;(34):20-7. (In Russ.)

2. Yegorova A.V., Mamontova V.N., Afti I.A., Nikiforov V.A., Yankevich M.I., Zackowski Z.A. [Bacterial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils]. Izvestia Sankt-Peterburgskogo Technologicheskogo Instituta. 2014;(23):75-8. (In Russ.)

3. Kireyeva N.A., Tarasenko E.M., Onegova T.S., Bakayev M.D. [Integrated bioremediation of oil-contaminated soil to reduce toxicity]. Biotekhnologiya. 2004;(6):63-70. (In Russ.)

4. Kuznetsov Aye., Gradova I.B., Lushnikov S.T. Prikladnaya Ekobiotechnologia [Applied Ecobiotechnology]. M: BINOM, 2010. (In Russ.)

5. Muratova A.Yu., Bondarenkovo B.P., Panchenko L.V., Turkovskaya O.V. [Using integrated phytoremediation to clean up soil contaminated with oil sludge]. Biotekhnologiya. 2010;(1):77-84. (In Russ.)

6. Murygina V.I., Kalyuzhny S.V. [Bioremediation of hydrocarbon-contaminated areas in the northern regions of Russia]. Mir Nefteproduktov. 2009;(4):0-36. (In Russ.)

7. Golubev D.A., Sorokin N.D., editors. Okhrana Okruzhayushey Sredy, Prirodopolzovaniye i Obespecheniye Ekologicheskoy Bezopasnosti v Sankt-Peterbutrge v 2007 Godu [Protection of the Environment, Natural Resources and Environmental Safety in St. Petersburg in 2007]. Saint Petersburg; 2008. (In Russ.)

8. Stupin D.Y. Zagriazneniye Pochv i Noveyshiye Tekhnologii Ikh Vosstanovleniya [Soil Pollution and the Latest Technologies for Soil Recovery]. Saint Petersburg; 2009. (In Russ.)

9. Turkovskaya O.B., Muratova A.I.O. Biodegradation of organic pollutants in the root zone of plants. In: Molekularnye Onovy Vzaimodeystviya Assosiativnyks Mikroorganizmov s Rasteniyami. Moscow: Nauka; 2005. p. 180-208. (In Russ.)

10. Alexander M. Biodegradation and Bioremediation. New-York: Academic Press; 1999.

11. Carrera P. Soil clean up in Europe – Feasibility and Cost. Kluwer Academic Publisher; 1993. p. 733-57.

12. McIntyre T.C. PHYTOREM: A Global Data Base on Aquatic and Terrestrial Plants Known to Sequester, Accumulate, or Hyperaccumulate Metals in the Environment. Ottawa: Environment Canada; 2001.

13. Muratova A., Panchenco L., Dubrovskaya Ye. Phytoremediation of oil-sludge-contaminated soil: from laboratory to field experience. In: Trends in Bioremediation and Phytoremediation. Plaza G, editor. Kerala: Research Signpost; 2010. P. 403-27.

14. Murygina V., Gaidamaka S., Yankevich M., Tumasyanz A. Bioremediation of railway sludge and old black mineral oil polluted soil with the oil-degrading preparation "Rhoder". Progr Environ Sci Technol. 2011;3:791-8.

15. Yemashova N.A., Murygina V.P., Zhukov D.V., Zakharyantz A.A., Gladchenko M.A., Appanna V., Kalyuzhnyi S.V. Biodeterioration of crude oil and oil derived products: a review. Rev Environ Sci Biotechnol. 2007;6:315-37.

16. Revised European Charter for the Protection and Sustainable Management of Soil, Adopted by the Committee of Ministers of the Council of Europe at its 840<sup>th</sup> meeting on 28 May. Strasbourg; 2003.

17. Vik E.A., Bardos P., editors. Remediation of Contaminated Land Technology Implementation in Europe: A Report from the Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies (CLARINET) 2002. [http://www.clarinet.at/library/WG7\\_Final\\_Report.pdf](http://www.clarinet.at/library/WG7_Final_Report.pdf).