

Фиторемедиация: зеленая революция

Александр Иванович Попов



*Санкт-Петербургский государственный
университет
Институт наук о Земле
Кафедра почвоведения и экологии почв
Российская академия естественных наук*



В связи с возрастающим антропогенным воздействием на окружающую среду проблема ее загрязнения соединениями тяжелых металлов (ТМ) становится все более актуальной.

В число тяжелых металлов входят: Pb, Cd, Zn, Ni, Cr и другие.

Поступая различными путями в атмосферу и почву, соединения ТМ с дождевыми осадками, переходят в ионную биологически доступную форму.

Развитие промышленного производства, увеличение автомобильного транспорта приводит к росту содержания соединений ТМ в воде дождевых стоков, в воде поверхностных водоёмов расположенных на территории города.

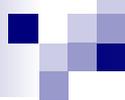
В настоящее время разработан целый ряд мероприятий по физической, химической и биологической детоксикации почв, загрязненных подвижными формами ТМ, благодаря которым токсичность данных загрязнителей может быть существенно снижена или устранена.

Общепринятые технологии очистки почв вызывают целый ряд проблем:

- большие капиталовложения (внесение сорбент-мелиорантов);**
- возникновение нежелательных побочных эффектов (формирование фронта рН при электрохимической ремедиации);**
- опасность вторичного загрязнения окружающей среды (промывка загрязненного слоя почвы может привести к попаданию ТМ в грунтовые воды).**

Большинство методов по физической и химической детоксикации ТМ в почве затруднительно использовать для очистки территорий, где плодородие почв имеет большое значение.

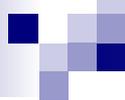
В районах с пересекающимися промышленностью и сельскохозяйственной деятельностью более выгодно использовать фиторемедиацию.



**Фиторемедиация окружающей среды –
восстановление антропогенно нарушенных
экосистем с помощью растений, способных
поглощать различные соединения через
корни, расщеплять их и использовать для
построения организма.**



Фиторемедиационная технология основана на способности растений и ассоциированных с ними микроорганизмов удалять токсичные вещества из окружающей среды или превращать их в экологически безопасные соединения.



**Современные технологии по
фиторемедиации почвы могут
основываться на разных методологических
подходах:**

- **фитоэкстракция,**
- **ризофилтрация,**
- **фитодеградация,**
- **фитостабилизация,**
- **фитоволотализация,**
- **и др.**

Выбор той или иной технологии обуславливается результатами анализа:

- места подлежащего восстановлению (источниками загрязнения, типом почвы, наличием грунтовых вод, количеством осадков в период вегетации и за год),**
- загрязнителем (типом токсичного соединения, концентрацией, глубиной проникновения по почвенному профилю).**

Фитоэкстракция – технология непрерывного выращивания растений, способных извлекать и концентрировать в надземной биомассе значительное количество ТМ с последующей их переработкой, путём озоления собранной фитомассы и тогда зола растений становится источником цветных металлов или же, если извлечение из золы обходится дороже их себестоимости, – компостированием.

Фитоэкстракция имеет свои особенности:

- содержание ТМ в почве загрязненного участка должно быть приемлемым для растений, т. е. не вызывать у всходов выраженных фитотоксических эффектов (обесцвечивание, пигментация и потемнение листьев, задержка роста);**

Фитоэкстракция имеет свои особенности:

- растения, используемые для очистки почвы, должны отличаться высокой скоростью роста и производить большую надземную биомассу, иметь глубоко разрастающуюся корневую систему, высокую сопротивляемость к болезням и вредителям, быть отзывчивыми к обычной агротехнике, не привлекательными для животных и людей во избежание случаев отравления;**

Фитоэкстракция имеет свои особенности:

- для повышения степени накопления ТМ в надземной биомассе растения следует применять эффекторы фитоэкстракции (ЭДТА, ДДДА, ДТПА и др., а также ГВ), которые за счет образования прочных водорастворимых внутрикомплексных соединений их с металлами будут повышать их подвижность в почве, что особенно актуально для таких высокобуферных почв, как черноземы;**

Фитоэкстракция имеет свои особенности:

- очистку почвы следует проводить до соответствия содержания ТМ в восстановленной почве нормам ПДК.**

В настоящее время удалось выявить растения–гипераккумуляторы соединений тяжёлых металлов, способные накапливать в своей надземной биомассе до 5 % металла в пересчете на сухое вещество.

Большинство дикорастущих гипераккумуляторов относится к семейству капустных (*Brassicaceae* Burnett) – близких родственников капусты и горчицы; так сарептская горчица является эффективным накопителем Pb, Cu и Ni, в значительных количествах свинец способны выносить из почвы кукуруза и сорное растение – амброзия.



**Растения-
гипераккумуляторы
тяжелых металлов:**
а – индийская
(сарептская) горчица;
б – кукуруза;
в – амброзия

Хорошими фитозэкстрагентами ТМ являются одуванчик лекарственный, полынь обыкновенная, люцерна, подсолнечник, сорго, среди злаков – яровой ячмень и овес, овощных культур – петрушка, укроп, салат.



Растения фитоэкстрагенты ТМ:
одуванчик лекарственный,
полынь обыкновенная,
подсолнечник



Растения фитозкстрагенты ТМ:
люцерна, сорго





**Растения фитоэкстрагенты ТМ:
яровой ячмень и овес**





**Растения
фитоэкстрагенты ТМ:
петрушка, укроп, салат**

При загрязнении почвы соединениями тяжёлых металлов свыше 5 ПДК и подвижности 60–70 % от валового их содержания целесообразно выращивать растения-гипераккумуляторы в сочетании с внесением эжекторов фитоэкстракции.

Ризофилльтрация основана на биологических особенностях растений создавать вокруг корневой системы микросреду, способствующую увеличению концентрации и проникновению веществ в растительный организм.

Требованиям ризофилтрации (быстрый рост, интенсивное накопление биомассы, мощная корневая система) хорошо отвечают широколиственные, однодольные многолетние растения, хорошо растущие в условиях теплого и холодного климата.

Этим требованиям отвечают многие водные и болотные растения.

Фитодеградация или фитотрансформация - основана на возможности растений совместно с почвенной биотой осуществлять ферментативное расщепление органических токсикантов почвы.

В процессе деградации органических веществ возможно удаление из почвы и неорганических токсических загрязнителей, таких как тяжелые металлы и радионуклиды.

Хорошими фитодеградаторами алифатических, ароматических и полициклических углеводородов, пестицидов и фенолов являются среди однолетних травянистых растений – овсянница, хрен, люцерна; а среди древесных – дуб, тополь, ива, кипарис.

Многие водоросли так же активно метаболизируют органические токсиканты.

По отношению к ТМ исследование следует сосредоточить на совмещении выращивания фитодegradатора со стимуляцией активности кислотообразующих бактерий с целью понижения рН почвенной среды и увеличения подвижности ТМ.

Фитодеградацию следует применять при средней степени загрязнения в 2,0–5,0 ПДК при относительно небольшой подвижности ТМ, например в урбаноэмах до 30 % от валового содержания.

Ученые Вашингтонского университета штата Орегон и университета Пердью (штат Индиана) работающие под руководством доктора Шэрон Доти (Sharon Doty), утверждают, что созданные ими генетически модифицированные тополя в лабораторных условиях поглощают до 91 % трихлорэтилена – наиболее частого загрязнителя грунтовых вод в США. Обычные растения поглощают не более 3 % соединения.

Растущие в пробирках экспериментальные тополя, высота которых составляет всего несколько дюймов, расщепляют трихлорэтилен до безопасных соединений в 100 раз быстрее растений группы контроля.



Ферменты семейства цитохромов P450, расщепляющие органические токсины, синтезируются клетками растений и животных.

Авторы добились продемонстрированных ими результатов путем встраивания в геном тополя ген, кодирующий цитохромы P450, синтезирующиеся печенью кролика.



Тополя являются удачным выбором в плане возможности загрязнения природных лесов трансгенными растениями.

Эти деревья растут очень быстро и могут впервые зацвести только через нескольких лет, когда их можно ликвидировать для предотвращения формирования семян.

Кроме того, в отличие от других деревьев, ветви тополя не укореняются при попадании в почву.

Несколько особняком стоит способность растений к ризодеградации, ещё называемой ризосферно усиленной биodeградацией или растительно усиленной биodeградацией.

Принцип этого механизма состоит в том, что разложение загрязняющих углеводов производится не непосредственным самим растением, а микроорганизмами, обитающими в непосредственной близости к его корням, т. е. в ризосфере.

Роль растения заключается в значительном усилении эффективности работы микроорганизмов за счет биологически активных корневых выделений, хотя результаты отдельных исследований показали, что растения помимо стимуляции микробов могут и сами принимать непосредственное участие в разложении углеводов.

Фитостабилизация – выращивание толерантных к ТМ растений с целью уменьшения подвижности металлов и, как следствие, снижение риска дальнейшего загрязнения окружающей среды путём выщелачивания ТМ в грунтовые воды или распространение их ветровой и водной эрозией почв.

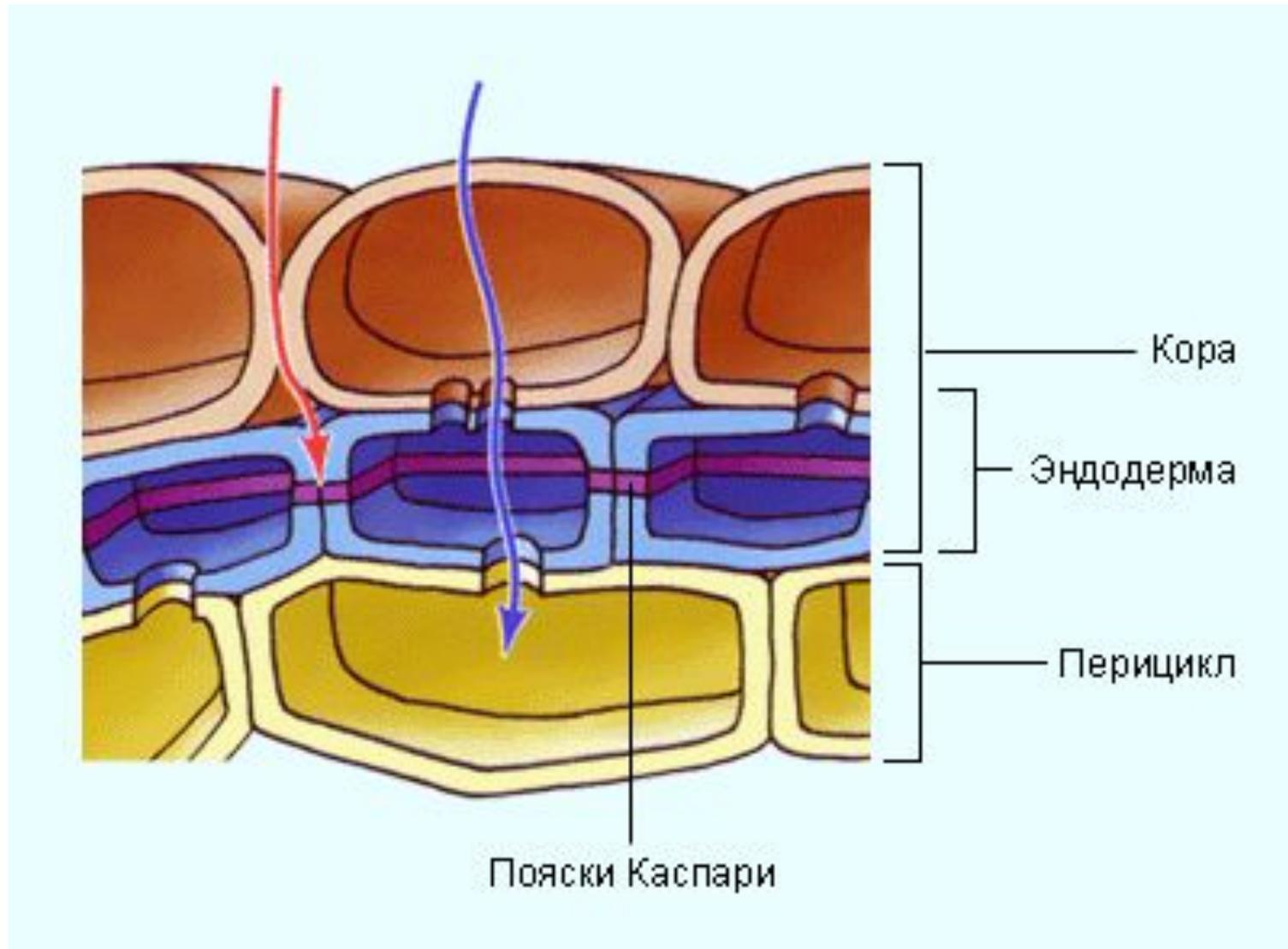
Толерантность растений к ТМ связана с активизацией у них комплекса защитных механизмов, среди которых выделяют внешние – не связанные с жизнедеятельностью растительного организма, а являющиеся следствием свойств почвы, способных уменьшать поток ионов ТМ в растение и внутренние, т. е. те, которыми обладает само растение.

Толерантность сельскохозяйственных культур определяется как их биологическими особенностями, так и степенью токсичности ТМ.

Характер распределения ТМ в биомассе растений корни – надземная часть – зерно свидетельствует о наличии следующих защитных механизмов: на границе корень – стебель и стебель – органы запасаания ассимилятов.

Способность корневой системы задерживать избыточное количество ионов ТМ обусловлена совокупным действием морфологических структур и химических реакций неспецифической природы, таких как поясок Каспари, обменная ёмкость корней, инактивация органическими соединениями, способными образовывать с ТМ малоподвижные соединения, депонированные в вакуоли.

Поясок Каспари



Разные уровни накопления ТМ в корнях, стеблях, листьях и репродуктивных органах могут объясняться разными путями поступления, а именно:

в вегетативные органы – апопластическим путём,

а в репродуктивные органы – симпластическим.

Апопластическое поступление проходит по свободному пространству клеточных оболочек и межклеточников по принципу диффузии и с потоком влаги с растворенными в ней веществами, а **симпластическое** поступление носит случайный характер и проходит по непрерывной **симплазме** между клетками по **плазмодесмам**.

Биофильтр симплазмы защищает растения от бесконтрольного накопления ТМ в зерне.

Корневой
волосок

Путь по апопласту

Путь по симпласту

Эпидермис

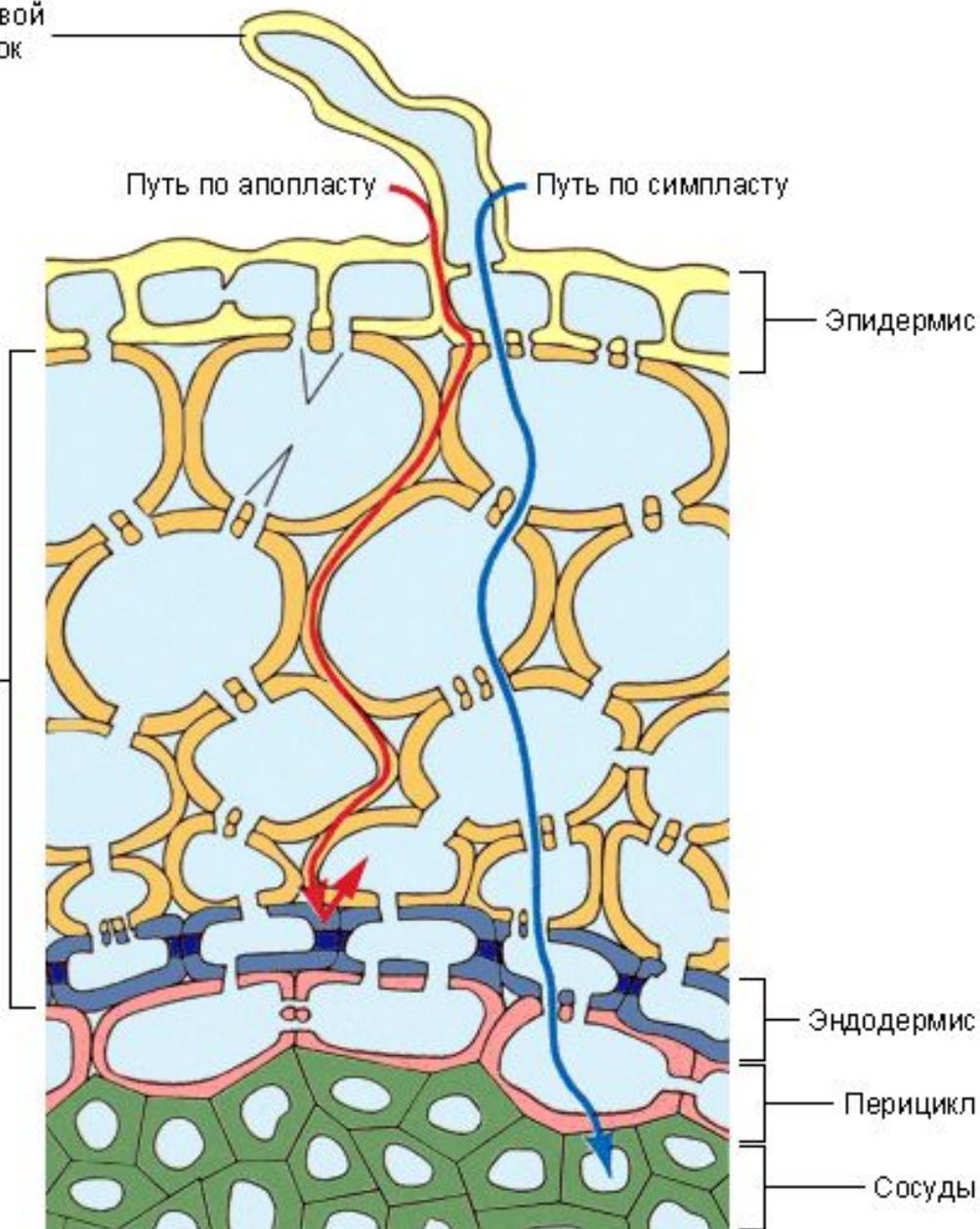
Кора

Эндодермис

Перицикл

Сосуды

**Апопласти-
ческое и
симплас-
тическое
поступление.**



Механизм толерантности растений (внутренние защитные приспособления по Дж. Антоновичу, 1971)

- компартментация ТМ в клеточных стенках или вакуолях, связывание их тиолсодержащими белками, пептидами и органическими кислотами;
- связывание $TМ^{2+}$ металлотioneинами и фитохелатинами, которые посредством меркаптидных комплексов осуществляют детоксикацию;

Механизм толерантности растений (внутренние защитные приспособления по Дж. Антоновичу, 1971)

- усиление экскреции TM^{2+} из растений при гуттации и отторжении вегетативных органов;
- развитие в организме растений адаптивных изменений, а именно: поиск альтернативных метаболических реакций, изменение структуры ферментов.

Внешние защитные приспособления не связаны с жизнедеятельностью растительного организма и являются следствием буферных свойств почвы, способных уменьшить поток ионов TM^{2+} из почвенного раствора в растения, в случае с черноземом обыкновенным это наличие органического вещества, содержание подвижного фосфора, pH и т. д.

Создание агрохимических фонов, обеспечивающих реакцию среды в почве, близкую к нейтральной, и увеличивающих содержание подвижных форм фосфора и калия, так же усиливает физиологические барьерные функции растений по отношению к ТМ.

Фитостабилизация является идеальным вариантом при слабой степени загрязнения почв ТМ и невысокой подвижности, например до 7 %.

Хорошими фитостабилизаторами являются просо и некоторые кормовые травы, однако в условиях урбанизированной среды следует отдать предпочтение декоративной растительности.

Сущность фитоволотализации (фитоиспарения) – способность растений к газообмену и транспирации, т. е. испарению воды листьями.

При этом токсиканты, поступившие через корневую систему, выделяются в атмосферу с транспирационным током.

Эта технология оказалась весьма пригодной для очистки почв и водоёмов от органических и даже неорганических соединений на основе селена и ртути.



Однако у этой технологии в ряде случаев имеются серьезные ограничения.

Выделившиеся в атмосферу нетрансформированные токсиканты могут быть вовлечены в пищевую цепь и явиться причиной вторичного загрязнения окружающей среды.



Технология фиторемедиации почв, загрязненных нефтью, достаточно проста в применении, но требует высококвалифицированных специалистов.

Она складывается из нескольких этапов.

Этапы технологии фиторемедиации почвы, загрязненной нефтью:

- **Оценка характера загрязнения участка (химический состав разлива, степень проникновения нефти в почву, картирование).**

Этапы технологии фиторемедиации почвы, загрязненной нефтью:

- **Разработка оптимальной схемы фиторемедиации (подбор видового состава растений, которые оптимальным образом подходят для устранения данного типа загрязнения и соответствуют данным почвенно-климатическим условиям, определение схемы посадки, выбор необходимых агротехнических мероприятий, в т. ч. оптимизация питания и химическая защита растений).**

Этапы технологии фиторемедиации почвы, загрязненной нефтью:

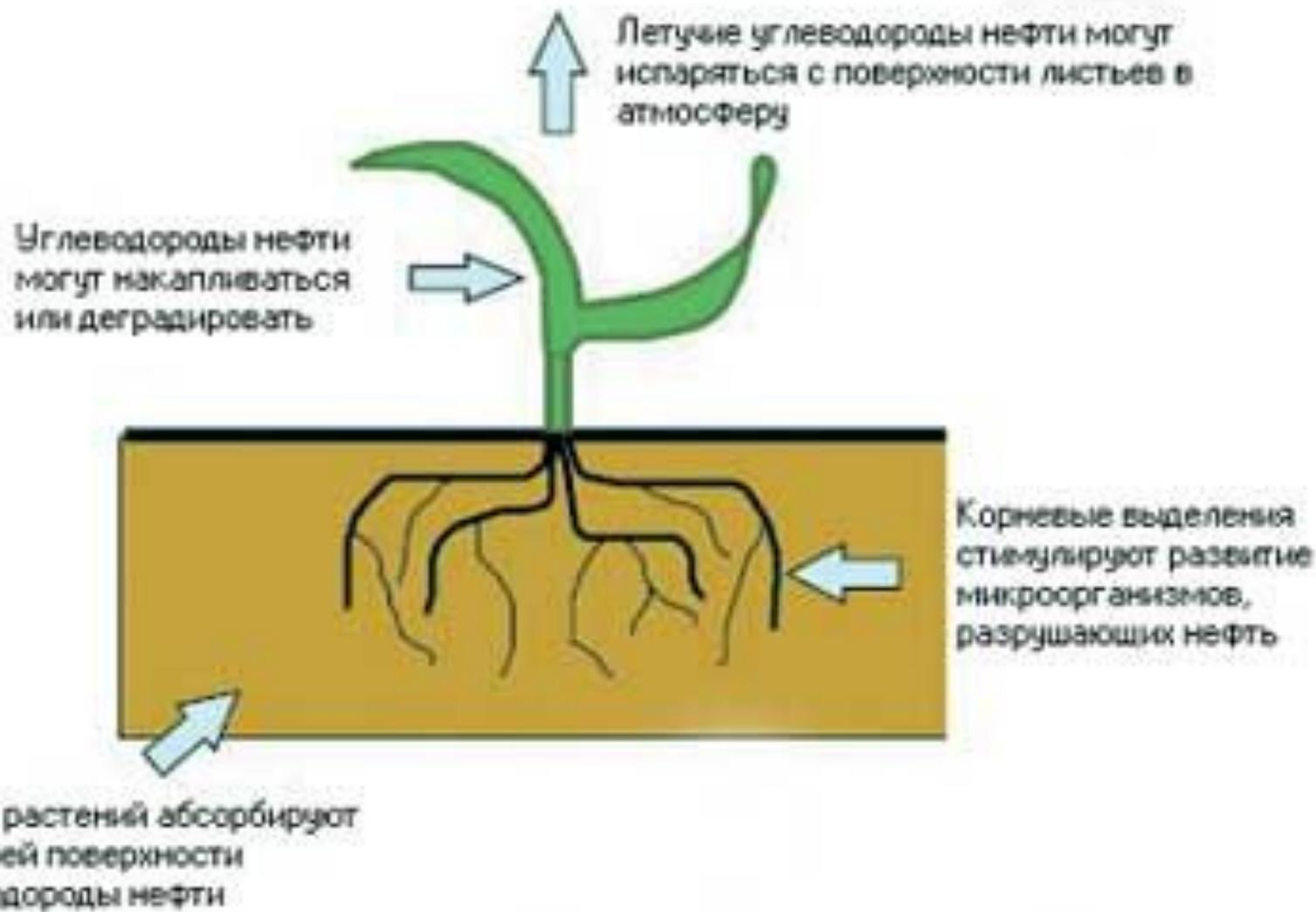
- **Выращивание растений (проведение комплекса агротехнических мероприятий, в т.ч. подготовка семенного материала, подготовка почвы, внесение минеральных удобрений, использование средств защиты).**

Этапы технологии фиторемедиации почвы, загрязненной нефтью:

- **Мониторинг участка (определение концентрации и распространения химических компонентов нефти, отслеживание путей биodeградации нефти, проведение информационного анализа и прогнозирования).**

Для очистки почв, загрязнённых нефтью и нефтепродуктами можно использовать и фитоиспарение – способность растения поглощать нефть или нефтепродукты в процессе поддержания своего водного баланса, т. е. вместе с водой «выкачивать» из почвы загрязняющее вещество.

Основные механизмы фиторемедиации почвы, загрязненной нефтью или нефтепродуктами



Листья растения испаряют воду, тем самым выполняя функцию насоса, выкачивающего из почвы при помощи корней воду с растворенными в ней веществами.

Углеводороды, из которых состоит нефть, абсорбируются на поверхности корней (что снижает подвижность и токсичность нефти), поглощаются корнями, поступают в надземные части растений, где разрушаются (деградируют), накапливаются или испаряются в атмосферу.

Эта способность хотя и может быть использована для очистки загрязнений, вместе с тем является полумерой, потому что в данном случае загрязняющее вещество выводится в атмосферу в процессе транспирации.

Более эффективным является очистка, когда растение совмещает способность и к фитоиспарению, и к фитодеградации, тогда в воздух выводятся только безопасные продукты разложения нефтепродуктов.

Фиторемедиация – наиболее эффективной и экономически выгодной метод очистки почв урбанизированных территорий от ТМ, т. к. она способствует не только удалению или консервации на длительный период времени загрязнителей, но и препятствует выщелачиванию почв и улучшению их плодородия.

Подходить к методу фиторемедиации следует дифференцировано степени загрязнения и подвижности ТМ в почве.

С экономической точки зрения фиторемедиация выгоднее альтернативных технологий, она не предполагает крупных единовременных капиталовложений, связанные с ней издержки могут быть распределены на несколько лет.

Фиторемедиация не требует экскавации почвы и может применяться на больших площадях, что особенно важно для нефтяной промышленности.

Фиторемедиация способствует сохранению и улучшению окружающей среды, поскольку связана с выращиванием растений, улучшением почв и защитой их от эрозии.

Это наиболее эстетичная технология очистки почвы.

Наконец, в глазах государства и общества это наиболее приемлемая технология очистки почвы от нефти.

Основная проблема фиторемедиации заключается в том, что процесс очищения протекает очень медленно и полностью останавливается в зимний период.

Поэтому во многих случаях использование растений не имеет смысла, т. к. регуляторные органы устанавливают достаточно жесткие сроки очищения загрязненных территорий.



**Благодарю
за внимание!**