

# ПРОШЛЫЙ (НАКОПЛЕННЫЙ) ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ УЩЕРБ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

## 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В США И СТРАНАХ ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЫ



А.А. Соловьянов

Территории или объекты значительной деградации природных экосистем, обусловленной длительным негативным воздействием хозяйственной деятельности, принято называть объектами прошлого или накопленного экологического ущерба (НЭУ). К настоящему времени, по мнению Росприроднадзора, на территории Российской Федерации имеется не менее 340 таких объектов. Для их ликвидации требуется разработка и реализация целого комплекса организационных, нормативных правовых и технологических мероприятий. Так, в течение 2014 года по заказу Минприроды России был проведен НИР 13-Н4-05 «Разработка справочника технологических решений, направленных на ликвидацию загрязнений и восстановление нарушенных свойств и характеристик окружающей среды», в которой был проведен анализ международного и отечественного опыта по ликвидации объектов НЭУ.

Как научный руководитель и основной исполнитель вышеназванной работы, автор настоящей статьи в ряде публикаций будет знакомить читателей журнала ЭВР с некоторыми результатами проведенного научного поиска.

**1. Введение**  
Проблеме ликвидации объектов накопленного экологического ущерба (НЭУ) в странах Северной Америки и Европы уделяется значительное внимание. Именно поэтому на сайтах органов государственного управления в сфере охраны окружающей среды, специализированных агентств и просто крупных фирм можно найти многочисленные описания того, как можно удалить из природных и техногенных объектов практически все виды загрязняющих веществ.

Если проанализировать имеющиеся зарубежные источники данных по технологиям, которые можно использовать для ремедиации (реабилитации, рекультивации), то их условно можно разбить на две группы. Первая группа относится к технологиям, которые можно реализовать по месту размещения объекта (отвала, хвостохранилища, загрязненной территории,

линзы загрязненных подземных вод и др.), иначе технологические решения in situ. В свою очередь, группу технологий in situ можно разделить на две подгруппы.

Одна подгруппа технологий охватывает инженерные решения, цель которых сводится к изоляции загрязняющих веществ путем создания вокруг них (снизу, сверху, сбоку) ограждающего (или полупроницаемого) барьера или путем отверждения фрагмента среды (воды, почвы, грунта, донного осадка), содержащего загрязнители. Другая подгруппа объединяет технологии, которые позволяют либо удалить на месте загрязняющие вещества из обрабатываемого фрагмента среды либо их обезвредить (расщепить на безвредные компоненты).

Вторая группа технологий, или решений ex situ, охватывает операции, в которых есть по крайней две стадии. Первой стадией является

извлечение (экскавацию) фрагмента среды, подлежащего обработке, с места расположения и перемещение его на место, где должно происходить обезвреживание.

Обработка вещества среды in situ и ex situ может осуществляться одними и теми же методами. Среди них есть методы, которые можно назвать биологическими, для обезвреживания загрязняющих веществ в них используются микроорганизмы или растительные организмы. Они либо разрушают загрязняющие вещества, либо извлекают их среды.

Достаточно многочисленны методы, основанные на физическом, химическом или физико-химическом воздействии на среду. Весьма часто высокотемпературное воздействие на среду (выжигание, расплавление и др.) рассматривается как отдельный вид воздействия и классифицируется как класс термических технологий.

Александр Александрович Соловьянов, профессор, директор Института экономики природопользования и экологической политики НИУ «Высшая школа экономики». Продолжение. Начало в ЭВР № 3, 2015.

Таблица 1. Классификация технологий ремедиации (Defra Research Project Final Report, 2010)

| Технологии, применяемые на месте нахождения загрязненного материала без его извлечения (in situ)  |                              |                                       |                        |
|---|------------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| Биологические технологии  | Физические технологии        | Химические технологии                 | Термические технологии |
| Водопроницаемые реактивные барьеры  |                              |                                       | Термообработка         |
| Промывка (отмывка)  |                              |                                       |                        |
| Интенсифицируемая биремедиация  |                              | Химическое окисление и восстановление |                        |
| Фиторемедиация  | Электроремедиация            |                                       |                        |
| Контролируемая естественная ремедиация  | Стабилизация/отверждение     |                                       |                        |
| Разбрызгивание (рассеивание)  |                              |                                       |                        |
| Вентилирование (продувка)   |                              |                                       |                        |
| Остекловывание  |                              |                                       |                        |
| Технологии, применяемые для обработки загрязненного материала (грунт, поверхностные или подземные воды) после его извлечения с места нахождения (ex situ) |                              |                                       |                        |
| Биологические технологии  | Физические технологии        | Химические технологии                 | Термические технологии |
| Биологическая обработка   | Отмывка и сепарация почвы    |                                       | Термообработка         |
|   | Стабилизация/отверждение     |                                       |                        |
|   | Вентилирование (продувка)    |                                       |                        |
|   |                              | Химическое окисление и восстановление |                        |
|   | Остекловывание               |                                       |                        |
|   | Обработка водой, газом/паром |                                       |                        |
| Инженерные методы - например, экскавация, захоронение, размещение на рельефе  |                              |                                       |                        |

В некоторых случаях биологические и, например, химические виды воздействия объединяют в единую технологию, например эффективность деятельности микроорганизмов повышают путем подачи каких-либо химических реагентов.

**2. Классификация и описание технологий (Европейское Сообщество)**

Наиболее проработанная классификация и описание технологий, предназначенных для удаления различных загрязняющих веществ из различных сред, основанное на опыте как Европейских стран, так и, частично, США, предложены Defra (Defra Research Project Final Report, 2010).

При продувке (venting) in situ удаление загрязняющих веществ происходит за счет их вытеснения воздухом, подаваемым через скважины в насыщенную зону загрязненного материала. На поверхности газовая фаза при необходимости улавливается и подвергается очистке. Загрязняющие вещества по мере движения к поверхности

могут разлагаться азобными бактериями, активность которых повышается за счет поступления кислорода. Если такой вид очистки является самоцелью, то он получает наименование биопродувки (bioventing).

Для продувки ex situ грунт или загрязненный материал размещают над системой вентиляционных труб на поверхности земли или в специальной емкости. Продувка может осуществляться воздухом или паром, другими газообразными веществами, в том числе подогретыми. Обработка материала в изолированном объеме позволяет эффективно улавливать и направлять на очистку все выделяющиеся газообразные вещества. При обработке ex situ доминирующим способом обезвреживания загрязняющих веществ может быть их биодеструкция, или биопродувка.

При промывке почв in situ загрязняющие вещества извлекаются из почвы с помощью воды или водного раствора, которые подаются в почву и после растворения загрязнителей

извлекаются из нее различными способами. При промывке почв ex situ обработка извлеченного загрязненного грунта или другого материала (твердых отходов, донных осадков) происходит в реакторе, после чего происходит отделение и очистка раствора, содержащего загрязняющие (вредные) вещества.

При химическом окислении-восстановлении in situ реагенты смешиваются с загрязненными материалами (грунтами, жидкими или твердыми отходами и т.д.), после чего происходит деградацию загрязнителей. В зависимости от поставленной задачи (окисление в жидкой или в газообразной фазе, окисление на поверхности) в качестве окислителя могут быть использованы самые разные вещества. Наиболее часто в качестве окислителей используются такие вещества как озон, пероксиды, кислоты (азотная, серная, соляная), перманганат калия.

Химическое окисление-восстановление может осуществляться также ex

**Таблица 2. Ориентировочная продолжительность операций по очистке загрязненного грунта при ее проведении in situ (Defra Research Project Final Report, 2010)**

| Технология                            | Время, необходимое для ремедиации (годы)                                   |
|---------------------------------------|--|
| Химическое окисление и восстановление | <1   |
| Электроремедиация                     | 1 - 3  |
| Интенсифицируемая биоремедиация       | 0,5 - 3  |
| Промывка                              | 1 - 3  |
| Термообработка                        | <1   |
| Регулируемая естественная ремедиация  | 1 - 30<br>Существенно зависит от загрязняющего вещества и схемы ремедиации |
| Водопроницаемые реактивные барьеры    | > 10   |
| Фиторемедиация                        | > 10   |
| Разбрызгивание                        | 0,5 - 3  |
| Стабилизация/отверждение              | <1   |
| Вентилирование                        | 1 - 3  |
| Остекловывание                        | <1   |

**Таблица 3. Классификация химических веществ, на удаление которых ориентированы технологии (Defra Research Project Final Report, 2010)**

| Органические вещества  | Конкретные примеры веществ  |
|--|---|
| Галоидированные летучие органические соединения (ЛОС)*       | Тетрахлорэтилен, хлороформ, винилхлорид                           |
| Галоидированные полуметучие органические соединения (ПЛОС)** | Тетрахлорфенол, 2-хлорнафталин                                    |
| Негалоидированные летучие органические соединения (ЛОС)      | Бензол, ксилол, толуол, этилбензол, ацетон, сероуглерод           |
| Негалоидированные полуметучие органические соединения (ПЛОС) | Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), фенол           |
| Органические агрессивные вещества                            | Уксусная кислота, анилин  |
| Органические цианиды   | Органические нитрилы  |
| Полихлорированные бифенилы (ПХБ)                             | (Арохлор)-1016  |
| Пестициды/гербициды  | 4,4-ДДТ, гептахлор  |
| Диоксины/фураны  | 2,3,7,8-тетрахлордibenзо-п-диоксин, 2,3,7,8-тетрахлордibenзофуран |
| Неорганические вещества                                      | Конкретные примеры веществ  |
| Металлы  | Свинец, ртуть, хром, цинк   |
| Радионуклиды   | Радиоактивные изотопы урана, радона                               |
| Неорганические агрессивные вещества                          | Соляная кислота, серная кислота                                   |
| Цианиды  | Цианиды металлов  |
| Асбест   | Синий, коричневый, белый  |
| Другие вещества  | Конкретные примеры веществ  |
| Взрывчатые вещества  | 2,4,6 тринитротолуол (TNT), гидразин                              |

\*ЛОС (англ. VOC) - органическое соединение, точка кипения которого ниже точки кипения воды и которое может легко испариться или переходить в газовую фазу.  
 \*\*ПЛОС (англ. SVOC) - органическое соединение, точка кипения которого выше точки кипения воды и которое может испаряться при температуре выше комнатной.  
 (Определение VOC и SVOC в соответствии с USEPA Mid-Atlantic Brownfields & Land Revitalization website, 2010).

situ. В этом случае загрязненный грунт или другой материал извлекается и обрабатывается реагентом в реакторе (очистной установке).

Постоянное электрическое поле, приложенное к водонасыщенному грунту, почве, или другой загрязненной поверхности инициирует электрохимические и электрокинетические процессы, в ходе которых происходит разложение загрязняющих веществ.

К электрохимическим процессам относятся: электролиз, электрофлотация, электрокоагуляция, электродеструкция, электрохимическое обеззараживание, ионный обмен, электрохимическое окисление и выщелачивание, электродиализ, а к электрокинетическим - электроосмос, электрофорез, электромиграция.

Разложению загрязняющих веществ в зависимости от метода сопутствуют различные физико-химические процессы, например - выделение газообразных компонентов разложения (электрофлотация), агрегация и осаждение продуктов разложения (электрокоагуляция), высаливание загрязнений (электрохимическое выщелачивание) и др.

При термической обработке in situ загрязненных слоев или поверхности почвы, донных осадков, отвала с помощью горячего воздуха или пара, высокочастотного излучения, электрической энергии могут происходить различные процессы, способствующие очищению обрабатываемой массы. К ним могут относиться выпаривание загрязняющих веществ, улучшение их растворимости, снижение адсорбции или вязкости, усиление проницаемости загрязненного материала, ускорение химических реакций, в том числе ведущих к деструкции загрязнителей.

При термической обработке ex situ происходит то же самое, что и при термической обработке in situ, однако есть и принципиальные различия. Термическую обработку извлеченного грунта или иного загрязненного материала можно проводить в специальной емкости (контейнере). Тем самым появляется возможность эффективно улавливать и очищать отходящие газообразные продукты.

Одним из вариантов термической обработки ex situ является просто сжигание загрязненного материала с последующей очисткой отходящих газов и захоронением образующихся твердых остатков.

Отверждение/стабилизация используется для физического связывания или химической иммобилизации загрязняющих веществ за счет обработки загрязненного участка (вариант in situ) или изъятых грунтов (вариант ex situ) связующим веществом, таким как цемент, битум/асфальт, известь, соединения фосфора, кремния и пр. в целях образования прочной массы с низкой скоростью выщелачивания.

Для обезвреживания органических или неорганических загрязняющих веществ методом остекловывания in situ загрязненный грунт или другой материал нагревается до температуры 1400–2000 °С. При этом органические вещества разлагаются, а неорганические вещества иммобилизуются внутри образующейся стеклоподобной массы.

Нагрев осуществляется при пропуске через очищаемый материал электрического тока или с помощью плазменной дуги.

При остекловывании ex situ загрязненный грунт извлекают и помещают в футерованную емкость (контейнер). Как и при остекловывании in situ, разогрев материала осуществляется с помощью электрического тока. После охлаждения расплава контейнер отправляют на захоронение.

Биологическая обработка (biological treatment) загрязненной почвы или других материалов может осуществляться как in situ, так ex situ. Для реализации этой технологии используются в первую очередь штаммы микроорганизмов. Различают несколько вариантов биологической обработки. В методе биоячейки (biopile) ex situ загрязненную почву перемешивают с микробной культурой и обрабатывают в реакторе, куда для повышения эффективности процесса подают воздух и/или химические препараты, меняющие, например, кислотность среды.

В компостировании ex situ в емкость с загрязненной почвой вводят

различные добавки, в том числе органические и неорганические вещества, которые способствуют активному размножению микрофлоры.

При ворошении и земледелии (landfarming) ex situ обработка загрязненной почвы происходит на специальной площадке, где ее относительно тонкий слой подвергается различным видам воздействия - перемешиванию, поливу, вентилированию и др.

При природном самоочищении среды in situ разрушение или нейтрализация (обезвреживание) загрязняющих веществ происходит в ходе естественных физических, химических и биологических процессов. Задача оператора состоит в мобилизации внутренних ресурсов экосистем на восстановление своих первоначальных функций такими мероприятиями, как орошение, рыхление почвы и создание искусственного микрорельефа, внесение торфа, извести, минеральных удобрений, окисляющих микроорганизмов, высев трав-мелиорантов и т.д.

**Фиторемедиация** (phytoremediation) - метод, в котором используется способность живых растений в процессе поглощения воды и питательных веществ из загрязненной почвы, осадочных пород или грунтовых вод экстрагировать, накапливать, хранить или разлагать некоторые органические и неорганические загрязнители.

Фиторемедиация имеет несколько разновидностей:

- при фитоэкстракции или фито-концентрации загрязняющие вещества накапливаются в корневой системе, стебле и листе растения;
- при фитодеградации - молекулы загрязняющего вещества разлагаются под действием ферментов растения;
- при фитостимуляции бактериальная активность почвы в разложении загрязняющих веществ усиливается за счет микроорганизмов, ассоциированных с корневой системой;
- при фитоиспарении остатки органических удобрений, селена и ртути испаряются через листья.
- при фитотрансформации загрязняющие вещества преобразуются в форму, поддающуюся биологическому усвоению.

**Таблица 4. Технологии ремедиации, рекомендуемые по удалению различных загрязняющих веществ из «бурых полей» (G – грунтовые, сточные и поверхностные воды, утечки химических веществ; S – грунты, осадки сточных вод, шламы)**

| Технология                                    | Негалогидрированные ЛОС | Галогидрированные ЛОС | Галогидрированные ПЛОС | Негалогидрированные ПЛОС | Моторные топлива | Неорганические вещества | Взрывчатые вещества |
|---|-------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|------------------|-------------------------|---------------------|
| Барботирование                                | G                       | G                     |                        |                          | G                |                         |                     |
| Биоремедиация                                 | G/S                     | G/S                   | G/S                    | G/S                      | G/S              |                         | G/S                 |
| Химические методы (окисление, восстановление) | G/S                     | G/S                   | G/S                    | G/S                      | G/S              | G/S                     | G/S                 |
| Электрокинетика                               | G/S                     | G/S                   | G/S                    | G/S                      |                  | G/S                     |                     |
| Гидродинамическая промывка                    | G/S                     | G/S                   | G/S                    | G/S                      | G/S              | G/S                     |                     |
| Сжигание                                      | S                       | S                     | S                      | S                        | S                |                         | S                   |
| Отгонка воздухом в скважине                   | G                       | G                     |                        |                          |                  |                         |                     |
| Механическая аэрация почвы (ворошение)        | S                       |                       |                        |                          |                  |                         |                     |
| Многофазная экстракция                        | G/S                     | G/S                   | G/S                    | G/S                      | G/S              |                         |                     |
| Горение/Детонация                             |                         |                       |                        |                          |                  |                         | S                   |
| ПРБ   | G                       | G                     | G                      | G                        | G                | G                       | G                   |
| Физическая сепарация                          |                         |                       | S                      | S                        |                  | S                       |                     |
| Фиторемедиация                                | G/S                     | G/S                   | G/S                    | G/S                      | G/S              | G/S                     | G/S                 |
| Откачка загрязнителей и их переработка        | G                       | G                     | G                      | G                        | G                | G                       | G                   |
| Мелиорация                                    | S                       |                       | S                      | S                        | S                | S                       | S                   |
| Паровая экстракция почвы                      | S                       | S                     |                        |                          | S                |                         |                     |
| Промывка почвы                                | S                       | S                     | S                      | S                        | S                | S                       | S                   |
| Отверждение/Стабилизация                      | S                       | S                     | S                      | S                        | S                | S                       | S                   |
| Экстракция растворителями                     | S                       | S                     | S                      | S                        | S                | S                       | S                   |
| Термическая десорбция                         | S                       | S                     | S                      | S                        | S                |                         | S                   |
| Термические методы in situ                    | G/S                     | G/S                   | G/S                    | G/S                      | G/S              |                         |                     |
| Остеклование                                  | S                       | S                     | S                      | S                        | S                | S                       |                     |

• при ризофильтрации токсичные вещества поглощаются и удерживаются корневой системой.

При барботировании in situ осуществляется нагнетание воздуха (или другого газа) в грунт ниже уровня подпочвенных вод с тем, чтобы повысить летучесть загрязняющих веществ, а также способствовать их биодegradации.

Биоремедиация, интенсифицируемая веществами, инициирующими окислительно-восстановительные реакции (enhanced bioremediation

using redox amendments) in situ представляет собой метод разложения органических загрязняющих веществ при одновременном введении в загрязненный грунт микроорганизмов, бактерий или грибов и окислительно-восстановительных реагентов (пероксидов кальция, магния, водорода и др.)

С помощью инженерных методов загрязнения устраняются путем экскавации или изоляции. При экскавации загрязненный грунт извлекается и транспортируется на место времен-

ного хранения в ожидании дальнейшей обработки или на полигон для постоянного размещения.

Изоляция загрязнений осуществляется за счет горизонтальных или вертикальных барьеров, устраиваемых путем закачки специальных веществ соответственно под загрязненный грунт/загрязненные почвенные воды или по периметру загрязненного участка. Эти барьеры могут быть проницаемыми для воды, но непроницаемыми для загрязняющих веществ. Закачка в оконтуренный

участок химических препаратов, а также штаммов микроорганизмов, способных нейтрализовать или разлагать загрязняющие вещества представляет собой технологическое решение, называемое проницаемым реакционным барьером (ПРБ) in situ.

Конструкция ПРБ может быть различна в зависимости от ландшафта, характера залегания загрязненного водного горизонта, вида загрязняющего вещества и т.д. ПРБ могут также включать дополнительные элементы, повышающие эффективность обработки загрязненных подземных потоков. Это могут быть реакторы, отводящие скважины, гравийные каналы и т.д.

В других вариантах реализации инженерных методов загрязненный участок может быть изолирован полностью непроницаемыми экранами, а загрязненные грунтовые воды откачиваются через специальные скважины и подвергаться очистке (откачка с очисткой).

Классификация технологий ремедиации, которые можно использовать как по месту нахождения объекта НЭУ (in situ), так и с вывозом материала для обработки в другом месте (ex situ), представлена в Таблице 1. В ней технологии сгруппированы в четыре группы – биологические, физические, химические и термические.

Для того, чтобы оценить, может ли данная технология использоваться на загрязненном участке, необходимо иметь сведения о характере загрязняющих веществ, об их присутствии в подземных водах, о материале (грунте) над загрязненным фрагментом и под ним. В том случае, если загрязняющие вещества относятся к различным типам, необходимо проводить оценку приемлемости одной технологии или подбирать несколько технологий.

Оценка продолжительности ремедиации при обработке in situ приводится в Таблице 2.

Продолжительности операций, которые должны привести к очистке загрязненной почвы (грунта), варьирует в достаточно широких пределах, и в этом нет ничего удивительного, поскольку скорость разложения, откачки, выделения

загрязняющих веществ зависит от многих природных факторов. Среди этих факторов наиболее важными является проницаемость грунта, его кислотность, температура и обводненность, содержание в нем кислорода, органических и неорганических компонентов (гумуса и способных к диссоциации неорганических солей), насыщенность микроорганизмами и их состав. Естественно, скорость ремедиации зависит от вида и концентрации загрязняющих веществ.

Для формирования рекомендаций по использованию технологий для ремедиации различных объектов НЭУ в зависимости от вида веществ, которые присутствуют на загрязненной территории, предложена классификация наиболее распространенных загрязняющих веществ (Таблица 3). Возможные загрязнители разбиты на три класса – органические вещества, неорганические вещества и прочие.

Обращают на себя внимание три обстоятельства. Во-первых, значительное место среди органических загрязнителей занимают галогидрированные соединения – это галогидрированные летучие соединения, полугетучие галогидрированные соединения, полихлорированные бифенилы, а также диоксины и фураны – соединения с хлорированными ароматическими ядрами.

Во-вторых, среди упомянутых веществ соединений явно не присутствуют загрязнители, которые трудно отнести к ПЛОС, например, длинноцепочечные карбоцепные и гетероцепные соединения. К этому типу можно отнести нефтяные углеводороды тяжелых топлив, которые являются достаточно распространенным видом загрязнения почв.

В-третьих, к специфическим (другим) загрязняющим веществам отнесены лишь взрывчатые вещества, а не, скажем, боевые отравляющие вещества или лигносульфаты.

Можно предполагать, что подобная классификация загрязняющих веществ обусловлена историческими причинами и особенностями развития экономики Европейских государств.

**3. США**

**3.1. Структура (классификация) перечня технологий, приведенных на сайте EPA**

Информация о технологиях, которые можно применить для удаления тех или иных загрязнений, содержится в сводном виде на сайте Агентства по охране окружающей среды США (EPA) <http://www.frtr.gov/matrix2/section3/matrix.html>.

Из этого сайта можно получить представление о тех технологиях, которые уже были апробированы на разном уровне по очистке объектов НЭУ в США. Кроме того, поисковая система сайта позволяет получить общее описание технологии, а также ознакомиться с источником, информация которого была размещена на упомянутом сайте EPA.

В целом классификация Defra сходна с классификацией EPA, однако в классификации EPA наряду с базовыми технологиями присутствуют многочисленные варианты их реализации. При этом обращение к источникам показывает, что многие из предлагаемых технологий есть результат лабораторного эксперимента, осуществленного в модельной реакционной среде и не проверенного в сколько-нибудь значимых масштабах.

**3.2. Технологии ремедиации «бурых полей» (brownfields)**

(<http://brownfieldstsc.org/roadmap/contguide.cfm>, <http://brownfieldstsc.org/roadmap/contByTreatTech.cfm>)

В США существует несколько категорий объектов НЭУ, ремедиация каждого из которых регулируется определенными разделами федерального законодательства и законодательства штатов. Наиболее значимыми категориями являются объекты Суперфонда и так называемые «бурые поля» (brownfields). Хотя «бурые поля» не считаются объектами высокой экологической опасности, однако их ликвидация входит в обязанности федеральных и региональных властей. Как следует из материалов, публикуемых на сайте EPA, для ликвидации «бурых полей» используются те же технологии, что и для ремедиации объектов повышенной экологической опасности.

Таблица 5. Данные по технологиям, предлагаемых для ремедиации объектов Суперфонда в документах, представленных на согласование

| Технология                     | Число упоминаний (2005-2008 гг.) среди 150 документов | Процент упоминания в документах (2005-2008 гг.) | Число упоминаний (2009-2011 гг.) среди 119 документов | Процент упоминания в документах (2009-2011 гг.) |
|--------------------------------|---|---|---|---|
| Ремедиация in situ             | 72  | 48%   | 59  | 50%   |
| Экстракция из почвы паром      | 32  | 21%   | 25  | 21%   |
| Химическая обработка           | 11  | 7%  | 17  | 14%   |
| Отверждение/Стабилизация       | 14  | 9%  | 11  | 9%  |
| Термическая обработка          | 14  | 9%  | 7   | 6%  |
| Биоремедиация                  | 10  | 7%  | 4   | 3%  |
| Многофазная экстракция         | 6   | 4%  | 3   | 3%  |
| Пруды-отстойники               | 0   | 0%  | 2   | 2%  |
| ПРБ для донных осадков         | 0   | 0%  | 2   | 2%  |
| Гидродинамическая промывка     | 2   | 1%  | 1   | 1%  |
| Ворошение                      | 1   | 1%  | 1   | 1%  |
| Фиторемедиация                 | 2   | 1%  | 0   | 0%  |
| Ремедиация ex situ             | 98  | 65%   | 80  | 67%   |
| Физическая сепарация           | 31  | 21%   | 33  | 28%   |
| Отверждение/Стабилизация       | 29  | 19%   | 15  | 13%   |
| Откачка и обработка            | 18  | 12%   | 13  | 11%   |
| Рециклинг                      | 15  | 10%   | 10  | 8%  |
| Фиторемедиация                 | 0   | 0%  | 5   | 4%  |
| Химическая обработка           | 5   | 3%  | 4   | 3%  |
| Биоремедиация                  | 4   | 3%  | 3   | 3%  |
| Удаление гидрофобных жидкостей | 1   | 1%  | 1   | 1%  |
| Термическая десорбция          | 1   | 1%  | 1   | 1%  |
| Неуточненные методы            | 14  | 9%  | 18  | 15%   |
| Иные технологии ex situ        | 13  | 9%  | 0   | 0%  |

Рекомендации по решению проблемы устранению конкретного объекта НЭУ сводятся к тому, что заинтересованные лица, приступая к деятельности по оценке состояния и ремедиации объектов, могут (или должны) получать консультации непосредственно в EPA, у представителей штата, квалифицированных специалистов или использовать иные источники информации.

В Таблице 4 представлены рекомендации по применению технологий по очистке (удалению) семи видов загрязняющих веществ из таких объектов, как загрязненные грунты, подпочвенные, сточные и поверхностные воды, осадки сточных вод, шламы, линзы химических веществ, образовавшиеся в результате их утечек (протечек). Результаты базируются на практическом опыте по проведению работ по ремедиации «бурых полей».

**3.3. Технологии, используемые при ремедиации объектов, включенных в Программу Суперфонда в 2005-2011 гг.**

По состоянию на 6 июня 2012 г. в Национальном приоритетном списке объектов Суперфонда (National Priority List – NPL) числится 1652 объекта, 359 объектов по разным причинам (в том числе по результатам ремедиации) были из него исключены.

Таблица 6. Данные по технологиям, предлагаемых для обработки донных осадков в документах, представленных на согласование в 2009-2011 гг.

| Технология обработки  | Всего | Процент упоминания в 56 документах |
|---|-------|------------------------------------|
| Обработка   | 18    | 32%                                |
| Обезвоживание   | 16    | 29%                                |
| Отверждение/Стабилизация ex situ  | 5     | 9%                                 |
| Пруды-отстойники  | 2     | 4%                                 |
| ПРБ   | 2     | 4%                                 |
| Отверждение/Стабилизация in situ  | 1     | 2%                                 |
| Неуточненная переработка на объекте   | 2     | 4%                                 |
| Ускоренная регулируемая естественная ремедиация                                   | 4     | 7%                                 |
| Регулируемая естественная ремедиация  | 8     | 14%                                |
| Экסקавация или удаление осадков с объекта, а также локализация осадков на объекте | 43    | 77%                                |
| Драгирование/Экסקавация   | 34    | 61%                                |
| Удаление осадка с объекта   | 20    | 36%                                |
| Осушка при контроле эрозии  | 19    | 34%                                |
| Локализация на объекте с помощью поверхностных экранов или изолирующих ячеек      | 25    | 45%                                |
| Изменение водного режима - перенаправление водных потоков                         | 1     | 2%                                 |
| Иные технологии   | 40    | 71%                                |
| Реабилитация прудов-отстойников   | 10    | 18%                                |

В соответствии с требованиями законодательства проектная документация для объектов Суперфонда, должна проходить экспертизу и согласование в природоохранных органах. При этом в документации должны быть описаны или упомянуты технологии, которые предполагается использования для ремедиации. Как правило, объекты, на которых производились или производятся работы, характеризуются загрязнением несколько видов сред. На большей части объектов Суперфонда загрязнения содержатся в грунтовых водах, около половины из них имеют дополнительно загрязненные грунты (почвы) и около трети - еще и загрязненные донные осадки. Таким образом, анализ этих материалов позволяет установить, какие технологии пользуются наибольшей популярностью или наиболее эффективны для ремедиации объектов Суперфонда. Результаты этих аналитических исследований регулярно публикуются Агентством по охране окружающей среды США (EPA).

Последний из серии отчетов (Superfund Remedy Report, EPA,

2013) подводит итоги работ по ремедиации загрязненных объектов, включенных в Программу Суперфонда по состоянию на 2011 год. В отчете представлены данные по числу принятых решений по утверждению технологий ремедиации грунтов (почв), подземных вод и донных осадков. Для каждого объекта, по которому приняты решения по ремедиации, указаны одобренные технологии.

Таблица 5 суммирует результаты подсчета технологий ремедиации, применявшихся in situ и ex situ, для двух периодов времени реализации Программы Суперфонда – в 2005–2008 гг. и 2009–2011 гг. Число документов, согласовывавших решения по выбору технологий ремедиации, составило 150 за период 2005-2008 годов и 119 за период 2009-2011 годов. В каждом из этих документах могли быть описаны (упомянуты) несколько технологий, в совокупности приводящих к ликвидации загрязнений в объекте Суперфонда.

Термин «неуточненные методы обработки» в Таблице 5 означает, что

в документе указано только «обработка на объекте» или «обработка вне объекта», но не уточняется метод обработки. Статья «иные технологии ex situ» за 2005–2008 гг. объединяет такие технологии, как отгонка (продувка) загрязняющих веществ воздухом (2), их испарение (1), их сжигание вне объекта (6), их нейтрализация химическими реагентами (1), сжигание или детонация на месте (1) и экстракция из почвы паром ex situ (2).

Из 33 документов, в которых за период 2009–2011 гг. предлагались технологии физической сепарации, в 17 было выбрано обезвоживание, в 12 – деконтаминация, а в остальных 6 – просеивание и механическая сепарация. Технология «рециклинга» близка физической сепарации, поэтому эти два метода объединены.

Хотя «откачка и обработка» обычно ассоциируется с очисткой грунтовых вод, но в Таблицу 5 он включен как метод ex situ, если использовался для извлечения загрязняющих веществ, например, гидрофобных жидкостей, жидких продуктов выщелачивания или жидких отходов.

Таблица 7. Данные по технологиям, предлагаемых для очистки грунтовых вод в документах, представленных на согласование в 2005-2008 гг. и 2009-2011 гг.

| Технология  | Число упоминаний (2005-2008 гг.) среди 322 документов | Процент упоминания в документах (2005-2008 гг.) | Число упоминаний (2009-2011 гг.) среди 206 документов | Процент упоминания в документах (2009-2011 гг.) |
|---|---|---|---|---|
| Откачка и обработка                                 | 85  | 26%   | 45  | 22%   |
| Откачка и обработка грунтовых вод                   | 82  | 25%   | 44  | 21%   |
| Сбор и обработка поверхностных вод                  | 5   | 2%  | 1   | < 1%  |
| Очистка in situ                                     | 97  | 30%   | 79  | 38%   |
| Биоремедиация                                       | 60  | 19%   | 49  | 24%   |
| Химическая обработка                                | 38  | 12%   | 28  | 14%   |
| Барботаж воздухом                                   | 10  | 3%  | 12  | 6%  |
| ПРБ   | 7   | 2%  | 8   | 4%  |
| Отгонка воздухом в скважине                         | 0   | 0%  | 2   | 1%  |
| Многофазная экстракция                              | 1   | < 1%  | 2   | 1%  |
| Фиторемедиация                                      | 3   | 1%  | 0   | 0%  |
| Мелиорация  | 1   | < 1%  | 0   | 0%  |
| Регулируемая естественная самоочистка грунтовых вод | 116   | 36%   | 56  | 27%   |
| Локализация грунтовых вод                           | 16  | 5%  | 6   | 3%  |
| Пруды-отстойники                                    | 1   | < 1%  | 4   | 2%  |
| Для очистки грунтовых вод                           | 1   | < 1%  | 3   | 1%  |
| Для очистки поверхностных вод                       | 0   | 0%  | 1   | < 1%  |

Таблица 8. Технологии биоремедиации и химической обработки грунтовых вод in situ в 2009-2011 гг.

| Технология                          | 2009 | 2010 | 2011 | В целом |
|-------------------------------------|------|------|------|---------|
| Биоремедиация                       | 21   | 18   | 10   | 49      |
| Анаэробная биоремедиация            | 15   | 17   | 9    | 41      |
| Биодополнение                       | 4    | 3    | 3    | 10      |
| Аэробная биоремедиация              | 5    | 1    | 1    | 7       |
| Химическая переработка              | 8    | 10   | 10   | 28      |
| Химическое окисление in situ        | 5    | 4    | 7    | 16      |
| Химическое восстановление in situ   | 1    | 5    | 1    | 7       |
| Нейтрализация                       | 1    | 1    | 0    | 2       |
| Иная химическая переработка in situ | 1    | 0    | 2    | 3       |
| Барботаж озоном                     | 0    | 1    | 2    | 3       |

Как следует из данных Таблицы 5, и в период 2005–2008 гг. и в период 2009–2011 гг. предпочтение отдавалось обработке загрязненных объектов ex situ. В ремедиации ex situ наиболее распространенными технологиями были физическая сепарация, отверждение/стабилизация и откачка с последующей обработкой. При обработке ex situ наиболее часто предлагались химическая обработка и экстракция загрязняющих веществ из почвы паром.

Отдельно анализировался выбор технологий для обезвреживания (ремедиации) загрязненных донных осадков. В 2009–2011 гг. ремедиация донных осадков предлагалась в 56 документах, которые прошли согласование (Таблица 6). Три четверти утвержденных технологий включали экскавацию или локализацию/удаление, а одна треть – какой-либо метод обработки.

Среди методов обработки донных осадков использовались также специ-

ально подготовленные пруды-отстойники, в которые для проведения необходимых операций перемещались после извлечения донные осадки. После завершения работ пруды-отстойники подлежали рекультивации, и этот вид работ также проходил согласование.

Технологии «отверждения/стабилизации», указанные в Таблице 6, необходимы для иммобилизации загрязняющих веществ в донных осадках перед их удалением.

Таблица 9. Наиболее распространенные загрязнители в объектах, подлежащих ремедиации в рамках Программы Суперфонда

| Загрязняющее вещество      | Относительная доля среди загрязняющих веществ, % |
|----------------------------|--|
| Полихлорированные бифенилы | 26   |
| Свинец*)                   | 23   |
| Трихлорэтилен              | 22   |
| Мышьяк*)                   | 16   |
| Хром***)                   | 16   |
| Ртуть*)                    | 16   |
| Кадмий*)                   | 10   |
| Винилхлорид                | 9  |
| Бензол                     | 8  |
| Медь*)                     | 8  |
| Цинк*)                     | 7  |
| Тетрахлорэтан              | 7  |
| Никель*)                   | 7  |
| Пентахлорэтан              | 7  |

\*) Производные металлов  
\*\*) Производные шестивалентного хрома

Из 459 документов, согласовывавших решения по выбору технологий ремедиации в 2009–2011 гг., 45% (206) относились к очистке грунтовых вод (Таблица 7). В период 2005 – 2008 гг. было одобрено 322 предложения по очистке грунтовых вод.

Наиболее распространенным методом очистки грунтовых вод являются комбинация их откачки и последующей очистки, обработка in situ и регулируемая естественная самоочистка.

В период 2005-2008 гг. откачка с обработкой предлагалась примерно в 25% случаев, в период 2009–2011 гг. – приблизительно в 22% случаев. В 2009–2011 гг. выбор регулируемой естественной самоочистки составлял от 17% до 35% среди всех решений по грунтовым водам. В то же время доля решений по очистке грунтовых вод, включающей обработку in situ, неуклонно возрастала. В 2009–2011 гг. она выросла до 38%, против 30% за 2005–2008 гг. Локализация грунтовых вод с помощью вертикальных инженерных барьеров или завес составляла, как правило, менее 5% случаев в согласованных документах.

Наиболее часто выбираемыми технологиями in situ продолжают быть биоремедиация, химическая обработка, барботаж воздухом и ПРБ. Био-

ремедиация и химическая обработка доминировали среди технологий in situ, выбранных с 2009 по 2011 годы. Из 79 документов, утверждавших решения по очистке грунтовых вод, более половины включали биоремедиацию и более трети – химическую обработку.

Отдельно были проанализированы запросы и решения по биоремедиации и химической обработке грунтовых вод in situ, общее число которых в 2009–2011 гг. составило 79. Как следует из результатов анализа, при выборе биоремедиации предпочтение отдавалось ее анаэробной версии (Таблица 8). Биодополнение (добавление бактерий, способных разлагать целевые химические соединения) и аэробная биоремедиация выбирались в одном случае из трех. Более половины заявителей, выбравших химическую обработку, предпочитали химическое окисление in situ, а четвертая часть – химическое восстановление in situ.

Для планирования будущих работ по ремедиации территорий, включенных в приоритетный список Программы Суперфонда, в рамках различных исследований и оценок были определены основные загрязнители в 261 объекте. Как следует из данных Таблицы 9, наиболее распространен-

ными загрязняющими веществами в них были производные тяжелых металлов – свинца, мышьяка, хрома, ртути, кадмия, меди, цинка и никеля. Среди галоидированных ЛОС доминировали трихлорэтан и винилхлорид. Среди галоидированных ПЛОС наиболее часто встречались полихлорированные бифенилы.

**4. Заключение**

Проблеме ликвидации объектов НЭУ в развитых странах уделяется особое внимание. В этих странах не только сформировано законодательство, регулирующее все вопросы ремедиации (реабилитации) загрязненных территорий и природных сред, но и разработаны общедоступные базы данных по соответствующим технологиям ремедиации. Законодательство и технологическая база позволяют там уже в течение длительного времени осуществлять конкретную деятельность по ремедиации объектов НЭУ. В США, например, ежегодно реализуются десятки проектов по ликвидации объектов, входящих в приоритетный перечень проектов Суперфонда, а также многочисленные проекты по очистке (рекультивации) так называемых «бурых полей». Существующий порядок учета и согласования реализуемых проектов ремедиации в США дает возможность осуществлять детальный анализ предпочтительности используемых технологий. Доступность же результатов проведенных работ для специалистов и общественности позволяет использовать накопленный опыт при планировании и проведении дальнейшей деятельности по ликвидации объектов НЭУ.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что и в Западной Европе и в США предметом наибольшего внимания являются хлорорганические соединения, а также тяжелые металлы. Именно они, насколько можно судить по публикациям в зарубежной и отечественной литературе, представляют наибольшую опасность для человека и объектов живой природы. Это обстоятельство должно быть принято во внимание при определении приоритетов при планировании работ, направленных на ликвидацию объектов НЭУ на территории Российской Федерации. ■