

М.В. Ахмадиев, Л.В. Рудакова

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Россия

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ (РОССИЙСКИЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ)

Технология биоремедиации нефтезагрязненных грунтов реализуется различными методами, среди которых выделяют методы Ex-situ и In-situ. Метод In-situ основан на очистке нефтезагрязнения непосредственно на месте его образования, при использовании метода Ex-situ загрязненная почва удаляется с места загрязнения и размещается на специализированной технологической площадке биоремедиации или биологическом реакторе. Перспективным методом биоремедиации является применение биореакторов различных конструкций. Приведены результаты исследований процесса биоремедиации нефтезагрязненной почвы в условиях биореактора.

Ключевые слова: биоремедиация, методы Ex-situ и In-situ, биореактор, алканотрофные микроорганизмы, нефтезагрязненная почва.

Восстановление загрязненных минеральными маслами и нефтепродуктами территорий является актуальной экологической задачей.

Попадание нефтепродуктов в почвы урбанизированных территорий может происходить с территорий железнодорожного полотна, автозаправочных станций и мазутных хозяйств, не исключен несанкционированный слив нефтепродуктов в окружающую среду. Существует вероятность аварийных ситуаций при транспортировке различных фракций нефтепродуктов с использованием дорожной сети.

Наибольший вклад в загрязнение природных объектов нефтепродуктами вносит нефтяная промышленность. Источниками негативного воздействия являются поисковые и разведочные работы, бурение скважин, объекты нефтяного производства как в процессе их эксплуатации, так и в постэксплуатационный период.

Нефть является природным жидким токсичным продуктом, попадание которого в окружающую среду оказывает негативное воздействие на природные объекты, а также здоровье городского населения.

Попадание нефтепродуктов в почву вызывает сильные и частично необратимые повреждения биогеоценозов. При попадании нефти почва становится основным трофическим субстратом для углеводородоокисляющих микроорганизмов (УВОМ). Другие виды микрооргани-

мов, растения и животные находятся в угнетенном состоянии, подавляется ферментативная активность почвы.

Ежегодно в мире потери при нефтедобыче составляют около 3 % от общего объема добытой нефти. На территории Пермского края за 2012 г. было добыто около 13,3 млн т нефти, из них в результате аварийных ситуаций приблизительно 400 тыс. т (3 %) могло попасть в объекты окружающей среды. Нефтепродукты способны накапливаться в поверхностном слое почвы, которая играет роль органо-сорбционного барьера, также не исключена и миграция нефтепродуктов по почвенному профилю, которая зависит от степени растворимости в водной среде отдельных компонентов нефти [1, 2].

Целью данной работы являлся анализ европейского и российского опыта восстановления нарушенных нефтезагрязненных территорий.

Необходимость возврата городских земель в хозяйственное использование в течение лимитированного периода времени, ограниченность земельных ресурсов повышают актуальность применения интенсивных биотехнологических методов.

Биотехнологические методы основаны на естественных механизмах самоочищения почвы от ксенобиотиков при участии всех видов живых организмов, формирующих структуру биоценоза со скоростями, зависящими от условий проведения процесса.

В настоящее время для восстановления нефтезагрязненных земель широко применяется метод биоремедиации, который может быть реализован с применением различных технологических решений.

Под биоремедиацией понимают способ биологической очистки и восстановления нефтезагрязненных почв (НЗП), основанный на биологическом разложении загрязнений микроорганизмами в результате различных биохимических реакций и физико-химических процессов, осуществляемых с участием почвенной микробиоты.

Биоремедиация нефтезагрязненных почв может быть основана на применении как аборигенной микрофлоры, так и накопительных культур нефтеокисляющих микроорганизмов. Культуры нефтеокисляющих микроорганизмов входят в составы различных биопрепаратов.

Применяемые в биоремедиации почв методы можно разделить на методы *In-situ* и *Ex-situ*. В свою очередь методы *Ex-situ* подразделяются на методы *On-site* и *Off-site* (рис. 1).

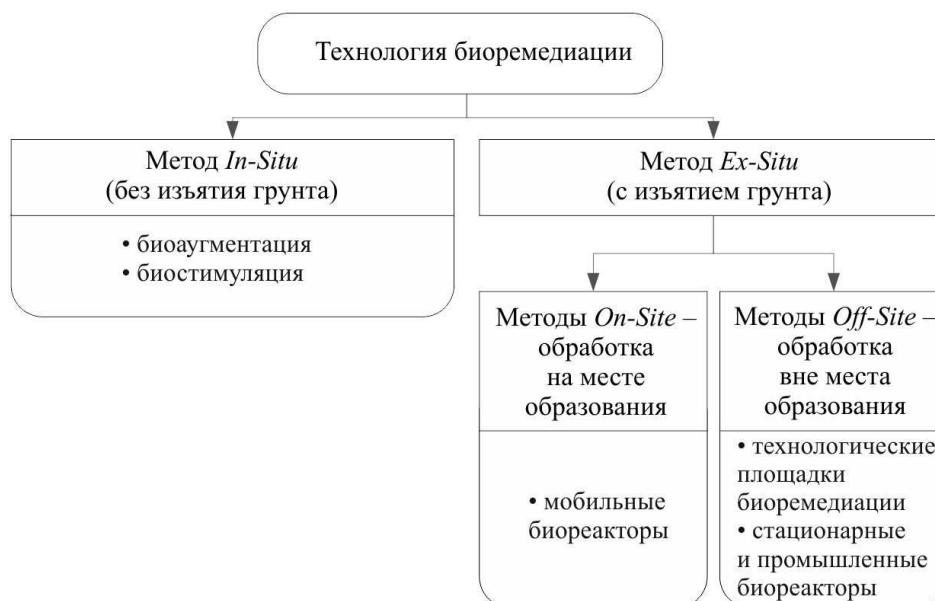


Рис. 1. Классификация методов биоремедиации нефтезагрязненных почв [3, 4]

Метод *In-situ* основан на проведении мероприятий по очистке нефтезагрязненной почвы непосредственно на участке загрязнения, без выемки почвы. Выделяют биоаугментацию и биостимуляцию НЗП.

Биоаугментация заключается в обработке НЗП культурами нефтеокисляющих микроорганизмов в сочетании с внесением комплекса минеральных удобрений. Высокой нефтеокисляющей активностью обладают представители родов бактерий *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Nocardia*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus* и аспорогенных дрожжей родов *Candida*, *Cryptococcus*, *Rhodotorula*, *Rhodospiridium*, *Sporobolomyces*, *Torulopsis*, *Trichosporon*, которые в различных комбинациях используются для создания биопрепаратов [1].

Биостимуляция представляет собой комплекс агротехнических мероприятий (вспашка почвенной поверхности для улучшения аэрации, внесение структураторов, минеральных веществ), которые проводят для стимуляции аборигенной почвенной микрофлоры.

Методы *Ex-situ* предусматривают выемку НЗП с места загрязнения и проведение последующих мероприятий по интенсификации процесса биологической очистки почвы. Внесение культур УВОМ и комплекс агротехнических мероприятий позволяют интенсифицировать процесс очистки НЗП. Данную группу методов подразделяют на методы *Off-site* и *On-site*.

Метод *On-site* заключается в изъятии НЗП и обработке загрязненной почвы на месте образования и может быть реализован путем применения мобильных биореакторов.

Мобильные биореакторы доставляются к месту нефтяного разлива, где в течение короткого промежутка времени, за счет интенсификации процессов очистки в биореакторе, производится восстановление нарушенных земель и их возврат в окружающую среду при достижении нормативных значений.

Метод *Off-site* заключается в изъятии НЗП и обработке загрязненной НЗП вне места ее образования. Данный метод реализуется посредством стационарных и промышленных биореакторов, а также путем создания специализированных технологических площадок биоремедиации.

Широкий спектр подходов к биоремедиации НЗП позволяет выбирать методы исходя из природно-климатических условий загрязненной территории, объемов образовавшейся НЗП, а также от величины концентрации нефтепродуктов в почве.

В Европе, в частности в Германии, используют преимущественно методы *In-situ*, что связано с небольшими объемами образующейся НЗП. Причем загрязнение нефтепродуктами или минеральными маслами носит локальный характер, как правило, это старые автозаправочные станции, законсервированные территории предприятий химических производств.

В силу природно-климатических особенностей в Европе, а именно – с учетом длительного вегетационного периода, у данного метода меньше недостатков, чем при применении его в России. В некоторых регионах РФ реализация данного метода ограничена природно-климатическими условиями, однако в ряде южных регионов он может находить широкое применение.

Процесс биодеструкции углеводородов нефти в природных условиях наиболее эффективно происходит при следующих параметрах:

- температура среды не ниже +10 °С и не выше +50 °С;
- влажность поверхности почвы около 70 % полной влагоемкости;
- внесение основных биогенных элементов (аммонийного азота, водорастворимых солей фосфора, калия, магния и т.д.);
- отсутствие токсичных для микроорганизмов соединений.

Требования по температурному режиму почвы лимитирует применение методов *In-situ* на Урале и Западной Сибири.

Отсутствие в Германии широкого распространения методов *Ex-situ* объясняется меньшей проблематикой в отношении техногенного воздействия на природные почвы. В связи с этим нет предприятий, специализирующихся на биоремедиации НЗП.

В России, в отличие от Германии, широко используют методы биоремедиации *Ex-situ*, а именно – технология биоремедиации на технологических площадках. Приоритетность применения данного метода обусловлена большими объемами образующейся НЗП, в связи с тем что на территории России, в отличие от Германии, интенсивно развита нефтедобыча, нефтепереработка и сеть магистральных нефтепроводов.

При высоких концентрациях углеводородов нефти в почве или невозможности проведения процесса биоремедиации с применением технологических площадок (в силу природно-климатических условий) актуально применение биореакторных технологий.

Применение биореакторной технологии целесообразно с целью ликвидации высокого уровня загрязнения почвы (более 30 г/кг). С помощью интенсивных биореакторных технологий возможно снижать высокий уровень нефтезагрязнения до допустимого остаточного содержания нефтепродуктов в почве или до заданных значений с дальнейшей доочисткой на технологических площадках. Согласно некоторым региональным нормативным документам [5, 6] допустимое содержание нефтепродуктов составляет около 10 г/кг нефтепродуктов в почве, что достигалось в процессе исследований [7, 8]. Недостатком интенсивных биореакторных технологий является ограниченность объема загрузки по сравнению с технологическими площадками, на которых перерабатываются большие объемы НЗП.

В связи с тем что биоремедиация на открытых технологических площадках может быть ограничена природно-климатическими условиями, для территорий Среднего Урала и Западной Сибири необходимо разрабатывать технологии, позволяющие поддерживать оптимальные параметры процесса биоремедиации НЗП. Наиболее перспективным направлением является разработка и применение биореакторных технологий, позволяющих проводить процесс при заданных параметрах.

На основании проведенных экспериментальных исследований был разработан аэробный биореактор для биоремедиации НЗП. Конструкция биореактора представляет собой корпус прямоугольной формы, выполненный из коррозионно-стойкого материала, с перемешиваю-

щим устройством. Перемешивание проводили один раз в две недели, для того чтобы не нарушать мицелий микроскопических грибов и актиномицетов.

В реакторе поддерживали и контролировали следующие параметры: температура субстрата (20 ± 2) °С, влажность субстрата 70–80 %, объемная доля структуратора 30 %.

Для наблюдения за процессами биоремедиации НЗП с применением аборигенной микрофлоры проводили посев микроорганизмов на селективные твердые среды: МПА (мясо-пептонный агар), среда Чапека, среда «К», КАА (крахмало-аммиачный агар), среда Эшби [9]. Для микроскопирования применяли электронный микроскоп Carl Zeiss с увеличением 40×20 , а также стереомикроскоп OLYMPUS SZX 10 с максимальной разрешающей способностью 375.

Оценку эффективности процесса очистки определяли по общему содержанию углеводов в почве при помощи ИК-спектрометрии.

Процесс очистки НЗП проводили в течение 6 месяцев, однако стоит отметить, что активное снижение концентрации нефтепродуктов в почве наблюдали в первые 20 дней эксперимента. Как было установлено на основании экспериментальных исследований, процесс биодеструкции углеводов нефти значительно замедлялся при снижении концентраций нефтепродуктов в почве до 10 г/кг (рис. 2). Данная зависимость обусловлена уменьшением доступности нефтепродуктов для групп УВОМ и, как следствие, снижением их численности, а также перестройкой на потребление других субстратов.

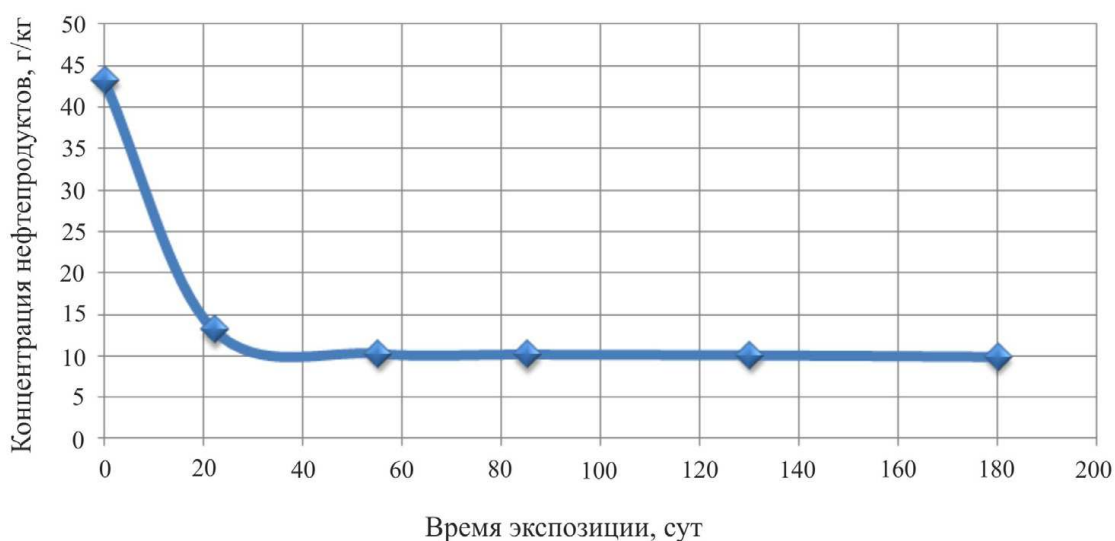


Рис. 2. Динамика снижения концентрации нефтепродуктов в НЗП

В ходе эксперимента была оценена динамика изменения видового состава микробиологического сообщества НЗП в процессе очистки.

Также в ходе исследований наблюдали за динамикой численности основных групп микроорганизмов в почве.

К концу экспозиции НЗП по некоторым показателям приблизилась к показателям фоновой почвы; так, наблюдали снижение общего числа бактериальных клеток, сапрофитов, УВОМ, увеличение численности актиномицетов, процента обрастания почвенных комочков бактериями рода *Azotobacter*, что свидетельствует о детоксикации загрязненной почвы (таблица).

Оценка процесса биоремедиации в условиях лабораторного биореактора

Показатели	Ед. изм.	Исходная НЗП	Аэробный биореактор	Фон (дерново-подзолистая почва)
Концентрация нефтепродуктов в почве	г/кг	43,2	9,8	1,4
Общее количество бактериальных клеток	кл/г	$(10,6 \pm 0,64) \times 10^8$	$(1,87 \pm 0,14) \times 10^7$	$(2,40 \pm 1,70) \times 10^7$
Количество сапрофитов	КОЕ/г	$(4,45 \pm 0,94) \times 10^7$	$(2,65 \pm 0,36) \times 10^7$	$(3,14 \pm 2,00) \times 10^3$
Количество УВОМ	КОЕ/г	$(5,85 \pm 1,08) \times 10^6$	$(3,00 \pm 0,39) \times 10^5$	не обнаружено
Количество актиномицетов	КОЕ/г	$(5,16 \pm 0,32) \times 10^6$	$(3,23 \pm 0,41) \times 10^7$	$(3,40 \pm 6,70) \times 10^1$
Количество микроскопических грибов	КОЕ/г	не обнаружено	$(3,00 \pm 1,22) \times 10^2$	$(7,10 \pm 3,10) \times 10^2$
Обрастание почвенных комочков бактериями рода <i>Azotobacter</i>	% обрастания	65,0	90,0	90,0

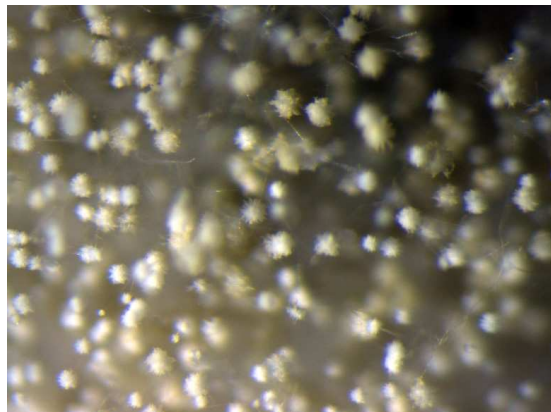
Развитие микроскопических грибов также свидетельствует о снижении техногенной нагрузки на почву и восстановлении естественных биоценозов, так как грибы не способны развиваться при значительном техногенном воздействии, которое проявляется в высоких концентрациях нефтепродуктов в почве.

На рис. 3 представлены микроскопические грибы, выделенные на минеральной среде Чапека в процессе очистки НЗП.

Эффективность биологической очистки НЗП к концу эксперимента составила порядка 77 %, причем наиболее интенсивно процесс протекал в первые 20 дней экспозиции.



a



б

Рис. 3. Репродуктивные органы *Aspergillus sp.*: *a* – при увеличении 20×40; *б* – при увеличении ×240

Дальнейшие исследования направлены на совершенствование методов *Ex-situ*, создание биореакторов *On-site* и *Off-site* на основании полученных данных. Преимущество данных методов заключается в минимизации рисков загрязнения окружающей среды за счет предотвращения миграции нефтяного загрязнения в сопредельные среды, а также возможности интенсификации процесса очистки. Преимуществом биореакторной технологии является независимость от природно-климатических факторов и, как следствие, возможность проведения биоремедиации при оптимальных контролируемых параметрах.

Особенно актуально применение биореакторных технологий в северных регионах, в которых реализация биоремедиации на открытых площадках затруднена в связи с низкими скоростями самоочищения почв, обусловленными сложными природно-климатическими условиями.

Список литературы

1. Оборин А.А. Нефтезагрязненные биогеоценозы: моногр. / УрО РАН. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 511 с.
2. Интернет-страница группы предприятий «ЛУКОЙЛ-Пермь» [Электронный ресурс]. – URL: <http://lukoil-perm.ru> (дата обращения: 28.02.2013).
3. Биологическая очистка почвы [Электронный ресурс]: конспект лекций / Институт долгосрочного управления отходами и технологии удаления отходов. – URL: www.iae.unileoben.ac.at (дата обращения: 20.01.2013).

4. Schwister K. Taschenbuch der Umwelttechnik. – München: Carl Hanser Verlag, 2010. – 519 s.

5. Об утверждении регионального норматива «Допустимое остаточное содержание нефти и продуктов ее трансформации в почве после проведения рекультивационных и иных восстановительных работ на территории Республики Татарстан» [Электронный ресурс]: Приказ Министерства экологии и природных ресурсов Республики Татарстан от 22 июля 2009 г. № 786. – URL: bazazakonov.ru/doc/?ID=1043256.

6. Об утверждении регионального норматива «Допустимое остаточное содержание нефти и нефтепродуктов в почвах после проведения рекультивационных и иных восстановительных работ на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры» [Электронный ресурс]: Постановление Правительства ХМАО Югры от 10.12.2004 № 466-П. – URL: bazazakonov.ru/doc/?ID=2233533.

7. Бикмансурова Э.Х., Рудакова Л.В., Ахмадиев М.В. Исследование процессов биоремедиации нефтезагрязненных почв в лабораторных биореакторах различного типа // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2008. – № 12. – С. 21–26.

8. Ахмадиев М.В., Рудакова Л.В., Сакаева Э.Х. Разработка исходных данных для проектирования опытно-промышленного биореактора по биоремедиации нефтезагрязненных почв // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2012. – № 7. – С. 34–37.

9. Практикум по микробиологии: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / под ред. А.И. Нетрусова. – М.: Академия, 2005. – 608 с.

Получено 5.03.2013

M.V. Akhmadiev, L.V. Rudakova

THE ANALYSIS OF THE METHODS OF THE RESTORATION OF OIL POLLUTED SOIL (RUSSIAN AND FOREIGN EXPERIENCE)

The technology for bioremediation of oil-contaminated soils is implemented by different methods. Among these techniques are isolated by ex-situ and in-situ. In-situ method is based on oil pollution clean-up on the spot of his education, using the method of ex-situ contaminated soil removed from the place contamination and placed in a specialized area of bioremediation technology or biological reactor off-site education. The priority method is the use of bioreactors for bioremediation of various designs. Showing results of investigations of oil-contaminated soil bioremediation process in the bioreactor.

Keywords: bioremediation, methods of Ex-situ and In-situ, bioreactor, alkanotrofs, oil-contaminated.

Ахмадиев Максим Владимирович (Пермь, Россия) – ассистент, аспирант Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: zamok-max@yandex.ru).

Рудакова Лариса Васильевна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: larisa@eco.pstu.ac.ru).

Akhmadiev Maksim Vladimirovich (Perm, Russia) – assistant, post-graduate student, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russia, e-mail: zamok-max@yandex.ru).

Rudakova Larisa Vasil'evna (Perm, Russia) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russia, e-mail: larisa@eco.pstu.ac.ru).