

УЧЕБНИК ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

ПРИКЛАДНАЯ ЭКОБИОТЕХНОЛОГИЯ

1



ИЗДАТЕЛЬСТВО

БИНОМ

УЧЕБНИК ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

ПРИКЛАДНАЯ ЭКОБИОТЕХНОЛОГИЯ

В ДВУХ ТОМАХ

1

2-е издание

Допущено
Учебно-методическим объединением
по образованию в области
химической технологии и биотехнологии
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по специальности
«Биотехнология»



Москва
БИНОМ. Лаборатория знаний
2012

УДК 504.06+574+663.1
ББК 30.16:20.1я73
П75

Серия основана в 2009 г.

Авторский коллектив:

А. Е. Кузнецов, Н. Б. Градова, С. В. Лушников, М. Энгельхарт,
Т. Вайссер, М. В. Чеботаева

Прикладная экобиотехнология : учебное пособие : в 2 т.
П75 Т. 1 / А. Е. Кузнецов [и др.] — 2-е изд. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. — 629 с. : ил., [4] с. цв. вкл. — (Учебник для высшей школы).

ISBN 978-5-9963-0778-4 (Т. 1)

ISBN 978-5-9963-0777-7

В учебном пособии, написанном опытными преподавателями, известными учеными и технологами из России и Германии, систематизирован и обобщен материал по биологическим, инженерным, эколого-экономическим основам, практическим методам и способам реализации современной биотехнологии для решения задач охраны окружающей среды. В томе 1 рассмотрены методы биологической очистки загрязненных вод, дезодорации газовоздушных выбросов, переработки органических отходов (в том числе полимерных материалов) и ремедиации почв.

Для студентов, преподавателей вузов, аспирантов, научных работников, инженеров-технологов и других специалистов по биотехнологии, решающих задачи охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов.

УДК 504.06+574+663.1
ББК 30.16:20.1я73

По вопросам приобретения обращаться:
«БИНОМ. Лаборатория знаний»
Телефон: (499) 157-5272
e-mail: binom@Lbz.ru, <http://www.Lbz.ru>

ISBN 978-5-9963-0778-4 (Т. 1)
ISBN 978-5-9963-0777-7

© БИНОМ. Лаборатория знаний,
2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава 1. Биологическая очистка сточных вод	13
1.1. Сточные воды как объекты очистки	13
1.1.1. Цель и нормативы очистки сточных вод	13
1.1.2. Основные показатели загрязненности сточных вод	15
1.1.3. Особенности сточных вод различного происхождения	29
1.2. Общие принципы очистки сточных вод	34
1.3. Биологические методы очистки сточных вод	48
1.3.1. Классификация методов биологической очистки	48
1.3.2. Показатели работы очистных сооружений и их сравнение.....	52
1.4. Аэробная биологическая очистка.....	56
1.4.1. Биоценозы сооружений аэробной очистки	56
1.4.1.1. Активный ил	57
1.4.1.2. Биопленки и биообращения	63
1.4.1.3. Показатели состояния активного ила и биопленок	69
1.4.2. Основные биохимические процессы при аэробной очистке	73
1.4.3. Очистка на полях фильтрации и орошения	76
1.4.4. Очистка с активным илом	79
1.4.4.1. Очистка в аэротенках	79
1.4.4.2. Очистка в модифицированных сооружениях.....	104
1.4.5. Очистка с биопленкой	115
1.4.5.1. Очистка на биофильтрах	115
1.4.5.2. Очистка в погружных и комбинированных сооружениях.....	123
1.4.6. Пути совершенствования систем аэробной очистки ..	137
1.5. Анаэробная биологическая очистка.....	149

1.5.1. Биоценозы и биохимические процессы при анаэробной очистке	149
1.5.2. Очистка в сооружениях традиционной конструкции	173
1.5.3. Анаэробные реакторы нового поколения	173
1.6. Технологические схемы многостадийной биологической очистки сточных вод	193
1.7. Удаление биогенных элементов из сточных вод	204
1.7.1. Биологическое удаление азота	206
1.7.1.1. Влияние условий очистки на удаление азота	206
1.7.1.2. Методы и технологии удаления азота	216
1.7.2. Биологическое удаление фосфора	231
1.7.3. Биологическое удаление серы	237
1.8. Обезвоживание осадков очистных сооружений	239
1.9. Малые установки для локальных очистных сооружений	258
Глава 2. Биологическая очистка и дезодорация газоздушных выбросов	281
Глава 3. Переработка органических отходов	294
3.1. Общая характеристика отходов	294
3.2. Микробиологическая переработка органических отходов	318
3.2.1. Обогащение микробным кормовым белком	318
3.2.1.1. Технологические особенности микробиологической конверсии в кормовой белок	324
3.2.1.2. Выделение и концентрирование биомассы и белковых веществ	342
3.2.1.3. Техничко-химический контроль и обеспечение качества продукции	347
3.2.1.4. Принципы организации малоотходного производства	350
3.2.1.5. Особенности переработки в кормовые продукты некоторых отходов	353
3.2.2. Силовование	368
3.2.3. Компостирование	375
3.2.4. Аэробная стабилизация	387
3.2.5. Анаэробное сбраживание и метаногенерация	388
3.2.6. Биоконверсия в тепловую энергию и топливо	393
3.2.7. Биоудобрения и биоинтенсивное земледелие	411

3.2.8. Биодеструкция растительных полимеров и материалов	424
3.2.9. Биодegradация синтетических полимерных материалов и использование биодegradируемых пластиков	430
3.2.10. Складирование и захоронение твердых отходов.....	444
3.3. Вермикyльтивирование и вермикомпостирование	451
3.3.1. Особенности дождевых червей как биологических объектов культивирования	452
3.3.2. Свойства продуктов и применение вермикyльтивирования и вермикомпостирования	456
3.3.3. Технологические основы вермикyльтивирования и вермикомпостирования.....	463
Глава 4. Биоремедиация почв	472
4.1. Основные факторы, влияющие на выбор способов ремедиации почв	472
4.2. Классификация методов и технологий ремедиации	481
4.3. Небиологические методы и технологии ремедиации	483
4.3.1. Методы <i>ex situ</i> и <i>on site</i>	483
4.3.1.1. Извлечение и захоронение	483
4.3.1.2. Фиксирование и стабилизация	484
4.3.1.3. Фракционирование	486
4.3.1.4. Извлечение загрязнений	487
4.3.1.5. Термообработка	491
4.3.1.6. Деструктивная очистка.....	493
4.3.2. Методы <i>in situ</i>	499
4.3.2.1. Локализация загрязнения	500
4.3.2.2. Промывка и отдувка	511
4.3.2.3. Термообработка	517
4.3.2.4. Барьеры	521
4.3.2.5. Деструктивная очистка.....	527
4.3.2.6. Электрокинетическая обработка	528
4.4. Биологические и комбинированные методы.....	529
4.4.1. Самоочищение (природное истощение)	530
4.4.2. Биостимулирование <i>in situ</i>	532
4.4.3. Биоаугментация	545
4.4.4. Биоконцентрирование и локализация.....	548
4.4.5. Биомобилизация и биовыщелачивание.....	551
4.4.6. Реакционно-активные биобарьеры	552
4.4.7. Обработка в штабелях, буртах, насыпях, компостированием	554

4.4.8. Обработка в биореакторах	557
4.4.9. Комбинированные и гибридные процессы	560
4.5. Специализированные биопрепараты	562
4.5.1. Биопрепараты и их получение	562
4.5.2. Биопрепараты для ликвидации загрязнений.....	567
4.5.3. Биопрепараты для рекультивации территорий и восстановления плодородия почв	587
4.6. Сравнение методов ремедиации	597
4.7. Практические работы и затраты при проведении биоремедиации	604
4.7.1. Основные этапы биоремедиационных работ	605
4.7.2. Мониторинг	613
4.7.3. Затраты на ремедиационные мероприятия	616
Сокращения	621

ПРЕДИСЛОВИЕ

Экологическая биотехнология — одна из важнейших областей развития и прикладного применения биотехнологии, направленная на решение природоохранных задач специфическими биотехнологическими методами, сочетающая химические, биологические и инженерные знания с профессиональными навыками микробиолога и химика-аналитика, геохимика и гидробиолога, почвовед и агротехника, фито- и зооценолога, популяционного генетика и эколога, токсиколога и эпидемиолога, менеджера, владеющего вопросами экологического и нормативного законодательства, оценки риска, работы с геоинформационными системами, инженерного строительства.

Предлагаемая книга подготовлена коллективом авторов, объединивших опыт преподавания дисциплины «Экобиотехнология» на кафедре биотехнологии Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева с практическим опытом реализации передовых природоохранных технологий в России, странах Западной Европы и других. Она дополняет и развивает материал изданной в 2006 г. книги «Научные основы экобиотехнологии»¹, в которой впервые в отечественной литературе была предпринята попытка систематизации и обобщения знаний, составляющих научную основу биотехнологических методов, используемых для охраны окружающей среды. В ней были освещены основные особенности организации и функционирования природных экосистем и сред (водных, почвенных), приоритетные загрязнения и отходы, особенности микроорганизмов, применяемых для переработки и обезвреживания различных загрязнений, абиотических и биотических процессов, протекающих в различных средах при миграции и трансформации загрязнений, и основных факторов, влияющих на эти процессы, ключевые научные проблемы, возникающие в связи с реализацией экобиотехнологий.

В настоящем учебном пособии рассмотрены вопросы, включающие инженерно-технологические аспекты использования экологических биотехнологий и методов, принципы работы и наиболее важные конструкции промышленных аппаратов и сооружений биологической очистки, специфика различных организмов и их сообществ, предназначенных для биологической очистки водных и почвенных сред, воздуха, природных водоемов, переработки различных отходов деятельности человека, эколого-экономические основы природоохранной деятельности и использования экобиотехнологий. Определенное внимание уделено методам и технологиям, предназначенным для удаления таких приоритетных загрязнений, как нефть и нефтепродукты, тяжелые металлы, а также биодеградация и биокоррозия различных материалов, предотвращению биокоррозии, биоповреждений и биообрастаний, получению и модификации «экологически дружественных» полимеров, биоиндикации и биомониторингу.

¹ Кузнецов А. Е., Градова Н. Б. Научные основы экобиотехнологии. — М.: Мир, 2006. — 504 с.

Для того чтобы избежать чрезмерного усложнения и увеличения объема книги, в ней приведен лишь необходимый минимум формул и расчетов, важных для понимания сути наблюдаемых зависимостей и изменений, для выбора того или иного инженерно-технологического и природоохранного решения. Подробные расчеты приведены в технической литературе, учебниках, учебных пособиях и нормативных документах. Список некоторых из них находится в конце книги.

Учебное пособие предназначено для студентов и аспирантов, обучающихся по специальности и направлению «Биотехнология». Книга может быть использована студентами вузов, обучающимися по направлению «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов». Много полезного могут почерпнуть здесь преподаватели колледжей, высших учебных заведений при организации учебного процесса и подготовке лекционных курсов, научные работники, инженеры-технологи и другие специалисты, использующие биотехнологию для решения экологических задач.

Часть материала рукописи книги была подготовлена в рамках гранта, выделенного Федеральной целевой программой «Интеграция», а также по программе научно-образовательных проектов, выполнявшихся в РХТУ им. Д. И. Менделеева при поддержке компании ВР. Дополнительную спонсорскую поддержку при подготовке книги оказали фирма ЭнвиРоХеми (Германия), которая является одним из мировых лидеров в области реализации современных технологий анаэробно-аэробной очистки производственных сточных вод, и НТО «Приборсервис» – одна из ведущих фирм России в области очистки нефтезагрязненных природных и техногенных сред, активно использующая биотехнологические способы ремедиации на основе существующих и собственных научно-технических разработок и выпускаемого фирмой специализированного оборудования.

ВВЕДЕНИЕ

Направление исследований и практической деятельности, использующее биотехнологические процессы, объекты и продукты для решения экологических проблем, — сфера *экологической биотехнологии (экобиотехнологии)*.

Экобиотехнология изучает, разрабатывает и применяет такие уже достаточно развитые технологии и методы, как биологическая очистка сточных вод (в аэротенках, на биофильтрах), переработка органических отходов (приготовление компостов, анаэробное сбраживание в метантенках и реакторах других конструкций, получение кормовых добавок и биоудобрений), биологическая дезодорация газов, а также сравнительно новые, применяемые для очистки загрязненных почв (биоремедиация почв), донного ила, осадков, водоемов, восстановления плодородия земель, получения и модификации «экологически дружественных» полимеров, поверхностно-активных веществ и других материалов и соединений с полезными свойствами, предотвращения коррозии, повреждений и обрастаний, в мониторинге и индикации.

Проблема загрязнения окружающей среды волновала человека еще 5000 лет назад. Уже в Древнем Риме воды Тибра были непригодны к употреблению, поэтому строили акведуки для снабжения населения свежей водой (знаменитый римский водопровод был построен за 400 или 500 лет до н. э.), а нечистоты удаляли в море по сточным каналам. Для многих городов Европы эта проблема стала актуальной в Средние века. Указом Карла VII ассенизаторам запрещалось выливать содержимое выгребных ям непосредственно в Сену. В 1388 г. в Англии был принят первый закон, направленный на охрану качества воды. В Лондоне того времени бытовые и производственные отходы вывозили и сваливали в Темзу, что привело к значительному загрязнению ее русла. Принятый закон запрещал дальнейший сброс отходов в черте города.

В Москве к концу XVIII в. были загрязнены реки Неглинная и Яуза, многие пруды, так как развитие ремесленного дела и строительство промышленных предприятий велись, как правило, вдоль Москва-реки, Яузы, Сетуни, откуда легче было брать воду и куда удобно было сбрасывать стоки. В то время население Москвы пользовалось водой из рек, прудов и колодцев, хотя уже действовали несколько местных водопроводов (в Кремле, в Измайлово). В 1767 г. Екатерина II издала указ, в котором предписывалось «... накрепко запретить и неослабно того наблюдать, чтобы в Москва-реку и протчие через город текущие воды никто никакого сору и хламу не бросал и на лед нечистот не вывозил». В результате со второй половины XVIII столетия в Москве было начато строительство первой системы централизованного водоснабжения.

Сооружение туалета вне дома оставалось самым обычным способом избавления от человеческих экскрементов вплоть до конца XIX в. Стоки, попадающие оттуда в питьевую воду, вызывали заболевания, особенно в городах, где туалеты и питьевые колодцы находились недалеко друг от друга. С появлением туалетов со смывом, вода из которых направлялась в ливнестоки, канализационные отходы сбрасывались прямо в естественные водоемы. К концу 1870-х гг. многие водоемы в наиболее промышленно развитых городах были настолько засорены мертвой

рыбой и так неприятно пахли из-за обеднения кислородом, что представляли собой серьезную угрозу для здоровья людей.

Согласно одному из документов, датированных 1907 г., вода Темзы в районе Гринвича во время отлива после очистки от жиров и нечистот и удаления запаха становилась таким крепким напитком, который буквально валил с ног даже моряков. Как писал в 1928 г. В. Л. Омелянский: «Вода реки, протекающей через один из крупных промышленных городов Англии – Бадфорд, была настолько загрязнена фабричными и городскими отбросами, что исследовавшая ее санитарная комиссия написала свой отчет, пользуясь ею как чернилами» (цит. по П. Бертокс, Д. Радд, 1980).

Систематические поиски способов обработки отходов, очистки сточных вод и строительство канализационных сетей в городах начались лишь с середины XIX в. В то время Луи Пастером и другими микробиологами было установлено, что многие инфекционные заболевания вызываются бактериями, присутствующими в канализационных стоках, а необработанные сточные воды, сбрасываемые в водоемы, являются переносчиками инфекций.

В России в 1884 г. было создано учреждение, осуществлявшее санитарный надзор за промышленными, торговыми и коммунальными объектами. В 1891 г. профессором Ф. Ф. Эрисманом была открыта в Москве первая в России санитарно-эпидемиологическая станция (СЭС). Им же были разработаны санитарные вопросы строительства в Москве водопровода и канализации. В 1891 и 1892 гг. были проведены первые гидрохимические и гидробиологические обследования, в отчетах отмечалось загрязнение воды фабричными и бытовыми стоками.

С началом промышленной революции в странах Европы и Северной Америки загрязнение водоемов, угрожающее здоровью и жизни горожан, стало возрастать особенно резкими темпами.

Таким образом, к началу XX в. **проблемы загрязнения водоемов и очистки городских (бытовых и промышленных) стоков** стали особенно важными.

В Москве до конца XIX в. значительное количество бытовых отходов оставалось в городе. В то время удаление твердых отходов из города проводилось либо хозяйственным, либо подрядным способом. Мусор свозился на свалки. Нечистоты вывозились ассенизационными обозами на свалки и огороды, сливались в пруды. Из-за слива нечистот в Великий (Красносельский) пруд его площадь сократилась с 23 га до 9 га к концу века. Обезвреживание отбросов проводилось только на одной свалке на Сукином болоте. В начале своего существования свалки находились вдали от жилья, но с ростом города жилье приблизилось к нездоровым местам, возникла проблема утилизации отходов.

Во многих городах уже тогда существовали системы отвода ливневых вод, но спускать в них человеческие отходы было запрещено. Однако ввиду остроты ситуации такое решение быстро отменили. В Англии во избежание загрязнения городов в 1847 г. был принят Законодательный акт об улучшении городских условий, предписывающий местным властям сбрасывать твердые отходы в реки.

Рост числа отходов, особенно твердых, на одного городского жителя, достигший в XX в. в наиболее промышленно развитых странах нескольких сотен кг в год, привел к развитию **методов переработки твердых отходов**.

С увеличением численности населения и развитием городов менялись природные условия и формировались специфические городские ландшафты. Сильным изменениям подвергались растительный и животный мир, сводились леса, большая часть пригодных для земледелия земель распахивалась. Последствия экстенсивного ведения хозяйства начали проявляться уже к концу XVIII – началу XIX вв.: наблюдались падение урожайности и рост эрозии почвы, неуклонно уменьшалось содержание гумуса в пахотных почвах.

Для поддержания плодородия требовалось регулярное внесение органических удобрений. В XVIII–XIX вв. начались исследования способов повышения плодородия почв на научной основе.

По мере развития земледелия и роста городов, изъятия полезных руд и минералов, сведения лесов, распашки полей, строительства дамб и каналов, роста количества загрязнений трансформация почвы становилась все более интенсивной, снижалось плодородие, нарушались естественные процессы самоочищения почв и во многом менялись их роль и функции. В результате в Европе уже к началу XX в. девственные леса и почвы в основном были «окультурены». Это вызвало необходимость развития **методов восстановления поверхностного слоя и свойств почв** (рекультивации, реабилитации, мелиорации).

Рост объемов потребляемого органического топлива, появление железных дорог, автомобильного транспорта, развитие промышленности привели к выделению в атмосферу большого количества вредных выбросов: газов (прежде всего оксидов серы и азота, монооксида углерода) и твердых частиц (сажи, пыли). К середине XX в. загрязнение атмосферы этими вредными примесями в крупнейших промышленных городах достигло критического предела, что стимулировало развитие **методов очистки газов и газовоздушных выбросов, в том числе биологической очистки**.

С развитием промышленности и сельского хозяйства, ростом городов стала очевидна необходимость принятия мер для улучшения среды обитания человека. К концу XIX в. состояние науки и инженерного дела позволило вплотную заняться проблемами удаления загрязнений и отходов. В наибольшей степени уделялось внимание развитию городского коммунального хозяйства и очистке сточных вод.

В США к тому времени были разработаны способы очистки от загрязнений смеси дождевой и канализационной воды и построены первые водоочистные сооружения. Была осознана необходимость создания приспособлений для очистки сточных вод и было признано, что ливневые и канализационные стоки следует собирать отдельно, поскольку очищать их суммарный объем нерационально. Постепенно появились правила, требующие создания отдельных систем: ливнестоков для сбора и отведения в ручьи дождевой воды и санитарной канализации, принимающей воду из расположенных в зданиях раковин, ванн и туалетов и направляющей ее на водоочистные сооружения. В 1914 г. был принят первый стандарт на питьевую воду.

В конце XIX в. к строительству канализационной системы, а также ливнеочистой канализации для отвода талых и дождевых вод приступили и в Москве. Работы начались в сентябре 1893 г. Для строительства потребовалось принять специальный указ о принудительном отчуждении земель для канализационных сооружений.

К 1917 г. канализацию имели 28% домовладений. Это были в основном дома, расположенные в центре города. Сооружения канализации принимали сточные воды в количестве 90 тыс. м³/сут.

Первоначально сточные воды с неприятными загрязнениями просто текли вдоль открытых канав и использовались установки механической очистки в виде *бассейна-отстойника (очистного пруда)* для осаждения находящихся в сточных водах твердых частиц и тем самым предотвращения засорения канализации и образования продуктов гниения, распространяющих дурной запах. Первыми примерами таких устройств являются «дортмундские эмские колодцы», нашедшие применение во всем мире, а также *поля орошения*. Осажденный ил из колодцев удаляли и складировали на свалках.

Сточные воды, подаваемые для обезвреживания на специально подготовленные поля (поля орошения), просачивались через песчаный грунт, отфильтровывались и осветлялись. Такой метод использовался во многих городах Германии в течение десятилетий. На сахарных заводах России стали применять этот метод еще в 90-е гг. XIX в., а с началом XX в. — использовать для очистки муниципальных стоков. В Москве канализационные стоки первоначально поступали на Люблинские поля орошения, под которые было приспособлено 76 га земли (одним из организаторов Люблинских полей орошения был В.Р. Вильямс). В последующем в дополнение к Люблинским полям были созданы Люберецкие *поля фильтрации*. Их общая мощность составляла 250 тыс. м³/сут. Поля орошения и очистные пруды и до настоящего времени не утратили своего значения. Очистка сточных вод в них протекает в условиях, близких к естественным.

Предпринимались также попытки химической очистки сточных вод с помощью различных осадителей: известняка, солей железа и алюминия, которые, однако, не давали желаемых результатов.

В 1865 г. А. Мюллер предложил бактериальную очистку сточных вод, при которой, как он отмечал, «различные — главным образом микроскопически маленькие — животные и растительные организмы используют органически связанную энергию для обеспечения своей жизнедеятельности» (цит. по П. Бертокс, Д. Радд, 1980). Способ обработки сточных вод, предложенный Мюллером, использовался на заводах по производству свекловичного сахара.

Биологические методы очистки сточных вод постепенно совершенствовались. Примерно в то же время получил применение способ очистки воды от органических веществ с использованием *капельного фильтра*. Бактерии развивались и удерживались на среде-носителе, в качестве которой чаще всего использовался слой песка. Первые биофильтры появились в 1893 г. в Англии, а в 1908 г. — и в России. Кислород подавался с помощью вентиляции или путем естественной тяги. Сточные воды 6 часов в сутки сливались на грунт, остальное время суток вода не подавалась. При таком методе удавалось очистить около 1000 м³ стоков в сутки на 1 га песчаного слоя. По тем временам его использование для очистки сточных вод такого крупного города, как Лондон, потребовало бы около 800 га подходящих земель. Метод капельного фильтра (или перколяционного слоя) в дальнейшем был модернизирован — вместо песка стали использовать другие фильтрующие материалы и конструкции фильтров — и получил широкое распространение.

Параллельно с созданием системы очистки с капельным фильтром осуществлялась разработка такой системы, в которой микроорганизмы находились бы во взве-

шенном состоянии в очищаемой воде. Первые системы такой обработки представляли собой мелкие пруды: *биологические пруды* или *лагуны*. В 1914 г. была предложена система *аэробной биологической очистки* с активным илом. По новому способу время, необходимое для окисления загрязнений сточных вод, сокращалось до нескольких часов. Инновационным методом была принудительная аэрация, которая позволяла заметно улучшить эффективность очистки стоков.

Первоначально применялись периодические процессы с использованием активного ила, которые и в настоящее время сохранили ограниченное применение. В дальнейшем были разработаны непрерывные системы очистки, в ходе которых часть образованного ила (рециркулируемый, возвратный ил) возвращалась в систему очистки для смешения с подаваемой водой, а часть избыточного ила удалялась из системы очистки.

Среди других методов биологической обработки, которые стали интенсивно развиваться с начала XX в., — методы *анаэробного сбраживания* сточных вод, осадков и твердых отходов, а также метод *компостирования* органических осадков и твердых отходов, который хотя и был известен фермерам и садоводам с давних времен, но в промышленном масштабе начал использоваться только в 1925 г. (в Индии). Дешевый компост стали также применять в промышленных системах для устранения запахов из воздуха и отработанных газов. Однако низкая производительность и короткое время жизни таких фильтров побудили в последующем развитие более совершенных методов. Для очистки бытового газа были созданы фильтры, которые оказались очень эффективными, хотя в то время принципы их действия не были известны.

Особенностью всех этих методов являлось использование биологических процессов, которые применялись сначала спонтанно, затем осознанно.

Методы, разработанные в первой половине XX в., в той или иной форме используются и в настоящее время. В последующие годы они не претерпели каких-либо принципиальных изменений и их развитие было нацелено на создание новых конструкций оборудования и обеспечение оптимальных условий для повышения интенсивности и качества очистки, снижения затрат. При этом и в такой индустриально развитой стране, как США, в конце 1960-х гг. примерно треть канализационных стоков все еще сбрасывалась без всякой очистки в естественные водоемы вместе с ливневыми водами. Еще треть подвергалась перед этим только первичной очистке. Даже в городах с хорошими системами очистки существовало множество мест сброса необработанных канализационных стоков из домов, которые никогда не были подключены к централизованной муниципальной системе.

Во второй половине XX в. деятельность человека на земле затронула и изменила практически все природные среды обитания. Вместе с ростом антропогенного влияния росли и масштабы природоохранной деятельности. С середины 70-х гг. локальные проблемы, связанные с ухудшением качества окружающей среды, переросли в глобальные (деградация озонового слоя, изменение климата, загрязнение биосферы радионуклидами и токсичными химическими соединениями, быстрое уменьшение биологического разнообразия).

Для этого периода стали характерными три тенденции, определившие развитие природоохранных мероприятий:

- появление новых видов вредных воздействий, таких как радиоактивное загрязнение, химическое загрязнение стойкими органическими веществами и др.;
- активное использование различных методов охраны, очистки, восстановления пострадавших природных сред;
- осознание роли и широты воздействия живого вещества при трансформации природных сред, все более детальное понимание биологических процессов и их использование в решении возникающих природоохранных задач.

Например, незадолго до Второй мировой войны началось широкое использование пестицидов в сельском хозяйстве. С 1950 по 1970 г. на земном шаре было использовано около 4,5 млн т ДДТ — одного из наиболее стойких и сильнодействующих пестицидов. Применение ДДТ позволило искоренить малярию во многих районах, избавиться от фитофагов, наносящих большой вред урожаям. Однако бесконтрольное использование ДДТ, его стойкость в окружающей среде привели к тому, что к 1970 г. по экспертным оценкам в природе накопилось около 450 тыс. т ДДТ. Опасность ДДТ, других органических пестицидов, хлорорганических соединений также связана с их способностью накапливаться и концентрироваться в живых организмах (особенно в жировых тканях) при движении по пищевым цепям.

Масштабными стали случаи загрязнения экосистем нефтью. В Российской Федерации ежегодные прямые проливы только нефти (без учета попадания в окружающую среду нефтепродуктов) оцениваются в 1–2 млн т.

В последние десятилетия серьезной проблемой в промышленно развитых странах стало увеличивающееся загрязнение почв и донных осадков. В течение долгого времени складирование отходов в почве рассматривалось как безопасный прием, поскольку попавшие в нее загрязнения могут разлагаться за счет естественных процессов. Однако продолжающийся рост загрязнения атмосферы, морей и океанов, поверхностных вод и подповерхностных пористых сред (почв, водоносных горизонтов) приводит к увеличению объемов и уровня накопления вредных веществ в различных почвенных средах и как следствие в продуктах сельского хозяйства, что придает новое содержание проблемам улучшения качества почв, повышения их плодородия, стоящим перед человеком со времен возникновения земледелия.

Обезвреживание и нейтрализация опасных соединений в почвах и других природных средах составляет суть процессов **ремедиации** — направления научной и практической деятельности, ориентированной на восстановление качества загрязненных почв, ландшафтов, наземных экосистем. Конечная цель ремедиации — полное удаление загрязнения и восстановление multifunctionality почв.

Развитие теоретических и практических исследований в области биологической ремедиации (**биоремедиации**) началось с 1970-х гг. в Северной Америке и в меньшей степени в Западной Европе. Практическое применение методы ремедиации почв, основанные на использовании существующих и новых промышленных технологий, нашли с начала 1980-х гг.

Первый опыт ремедиации был основан на использовании традиционной технологии, включающей методы контроля, изъятия и замены загрязненной (контаминированной) почвы, сбор грунтовых вод, сооружение инфильтрационных колодцев и траншей, изолирование загрязненных участков. Однако практика показала, что, например,

изъятие почвы, хотя и может обеспечить удаление контаминированного материала в течение короткого времени, зачастую требует очень больших затрат, связанных с демонтажем сооружений, транспортировкой почвы, ее складированием и последующей обработкой химическими или физико-химическими методами.

Рост практической потребности в экономичных, эффективных, экологически чистых и безопасных методах очистки природных сред стимулировал развитие биологических методов и использование биотехнологий, основанных на способности живых организмов концентрировать и разлагать загрязнения.

Еще в конце 20-х гг. XX в. В. И. Вернадский с сотрудниками установили, что содержание радия в ряске из Петергофских прудов в десятки, а из прудов около Киева — в сотни раз выше, чем в воде этих водоемов.

Н. В. Тимофеев-Ресовский с сотрудниками в 40–50-х гг. в исследованиях на Урале показали, что радионуклиды, которые составляют основную долю радиоактивных загрязнений, аккумулируются живыми организмами. На основе этого явления ими была предложена технология биологической очистки низкорadioактивных вод в специальных сериях слабопроточных водоемов-отстойников перед спуском этих вод в открытые водоемы.

В настоящее время в индустриально развитых странах биологические методы все более активно используются для решения проблем очистки загрязненных сред и восстановления нарушенных экосистем. Найдены, селекционированы или созданы генно-инженерными методами¹ микроорганизмы, способные эффективно разлагать многие загрязнения, которые раньше считались устойчивыми к биодеградации; разработаны биологические тест-системы, дающие возможность селективно и оперативно определять загрязнения природных сред в различных концентрациях, вплоть до следовых количеств; достижения инженерной мысли позволили создать высокопроизводительные биореакторы, действенные и селективные методы разделения; активно разрабатываются технологии применения генетически модифицированных бактерий для деградации опасных веществ в биореакторах.

Среди примеров относительно новых направлений исследований: очистка почв от тяжелых металлов растениями-концентраторами (**фиторемедиация**); удаление загрязнений из воды с помощью водорослей, бактерий, грибов и **биосорбентов**, созданных на их основе; очистка природных сред от загрязнений с помощью специфических **биопрепаратов** и др.

В области водоочистки и водоподготовки пристальное внимание уделяется проблемам обеспечения качества питьевой воды. Биологические методы эффективны для глубокой очистки воды, удаления избытка биогенных элементов, таких как азот и фосфор, для предотвращения эвтрофикации водоемов.

В области переработки, утилизации твердых, жидких, газообразных отходов применяются способы их микробиологической трансформации в полезные продукты: силосование и компостирование, переработка и обезвреживание активного ила, осадков сточных вод и донных осадков различными методами, **вермикультивирование** и **верми-компостирование** (с использованием дождевых червей), ферментация и биокатализ.

¹ Первый патент, защищающий использование генно-инженерного организма, был выдан в США в начале 80-х гг. на штамм микроорганизма *Pseudomonas putida*, способного активно окислять основные группы углеводородов нефти.

На основе иммобилизованных ферментов и микробных клеток разрабатываются биокатализаторы для **очистки и дезодорации отработанных газозвудушных потоков** от вредных и дурнопахнущих веществ (спиртов, меркаптанов, альдегидов, кетонов, органических кислот и др.), проводятся работы по созданию биореакторов для очистки воздуха. Биотехнологические методы могут быть использованы и для уменьшения поступления метана, оксидов серы и азота в атмосферу.

Биоинженерные технологии все шире применяются для рекультивации, диверсификации почв, реабилитации территорий, благоустройства ландшафтов, защиты строительных конструкций и инженерных сооружений, озеленения территорий, защиты от эрозии почв, береговых линий, борьбы с почвенным засолением и закислением, сохранения и восстановления малых рек и т. п.

В США, Франции, ФРГ, Австрии и других экономически развитых странах популярно **биологическое ведение сельского хозяйства**, суть которого сводится к тому, чтобы «кормить почву, а не растения» для максимального снижения негативных последствий истощения и деградации земель. Оно использует экологические методы выращивания продукции и технологические приемы: рациональные севообороты, применение зеленых удобрений, мульчирование, стимулирующие жизнедеятельность микроорганизмов, способствующие поддержанию и повышению плодородия почвы, сохранению гумусового слоя; *выращивание почвы* с получением необходимого минимального набора продуктов с минимальной площади; биологическое компостирование и вермикомпостирование; методы интегрированной защиты растений на основе более широкого использования биологических средств защиты растений (биорегуляторов, биоудобрений, биопестицидов), с тем чтобы сохранить структуру, а также функционирование естественных почвенных процессов и почвенной экосистемы и на этой основе обеспечить стабильный урожай выращиваемой сельскохозяйственной культуры.

Большое внимание уделяется **биомониторингу** и **биотестированию**: использованию тест-систем для контроля очистки сточных вод, контроля загрязнения воздуха, почвы. Разработаны биологические тест-системы, позволяющие быстро и селективно определять качество и количество загрязнений в природных средах, вплоть до следовых количеств.

Важная прикладная задача — получение **биodeградируемых пластиков**. Биологические материалы и живые организмы также могут успешно использоваться для решения этой задачи.

Еще одна сфера применения экиобиотехнологии — борьба с микробиологической коррозией и биоповреждениями, биозащита, а также создание новых эффективных биоцидов.

Биологическая очистка, ремедиация или переработка отходов более длительна, но эффективнее, экологичнее и экономичнее, чем физические и химические методы, и сокращает образование вторичных отходов. Биологический материал включается в трофические цепи питания, природный круговорот веществ без образования отходов. В отличие от большинства физических или химических методов, биологические способы позволяют полностью минерализовать органические загрязнения, процессы протекают в более мягких условиях и отличаются универсальностью или селективностью.

Цель экиобиотехнологии — защита природных экосистем от антропогенных и техногенных воздействий; основные **способы** — биовосстановление, биопереработка и биodeградация.

Глава 1

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД

Биологическая очистка сточных вод основана на способности микроорганизмов использовать растворенные и коллоидные загрязнения в качестве источника питания и минерализовывать их в процессах своей жизнедеятельности. Среди биологических методов защиты окружающей среды биологические методы очистки сточных вод первыми получили развитие и в настоящее время наиболее широко используются. По объему перерабатываемых потоков биологическая очистка сточных вод является самой крупнотоннажной технологией и применяется на подавляющем большинстве частных сооружений: производственных, городских, локальных и придомовых.

1.1. Сточные воды как объекты очистки

1.1.1. Цель и нормативы очистки сточных вод

Очистку сточных вод проводят с целью удаления из них взвешенных и растворимых органических и неорганических соединений до концентраций, которые не превышают регламентированные (предельно допустимые концентрации, ПДК, см. гл. 11). Чем ниже содержание загрязнений в очищенной сточной воде, тем выше ее качество.

Нормативы качества и объемы сбрасываемой воды (предельно допустимые сбросы, ПДС) назначаются с учетом соотношения объемов сбрасываемых сточных вод и воды водоприемного природного водоема, процессов самоочищения в водоеме, категории водоема и содержания фоновых загрязнений (рис. 1.1). В случае использования речной воды для культурно-бытовых или хозяйственно-питьевых целей регламентируются показатели качества воды в контрольном створе, в котором состав и свойства воды должны соответствовать нормативным и который расположен на расстоянии 1 км выше ближайшего по течению пункта водопользования или водопотребления.

В России требования к качеству очищенных сточных вод содержатся в «Правилах охраны поверхностных вод (типовые положения)», «Правилах охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами», «Правилах охраны прибрежных районов морей», строительных нормах и правилах проектирования канализации и очистных сооружений. Все эти документы определяют условия отведения сточных вод в водоемы, и их выполнение обязательно как для промышленных объектов, так и для хозяйствующих субъектов.

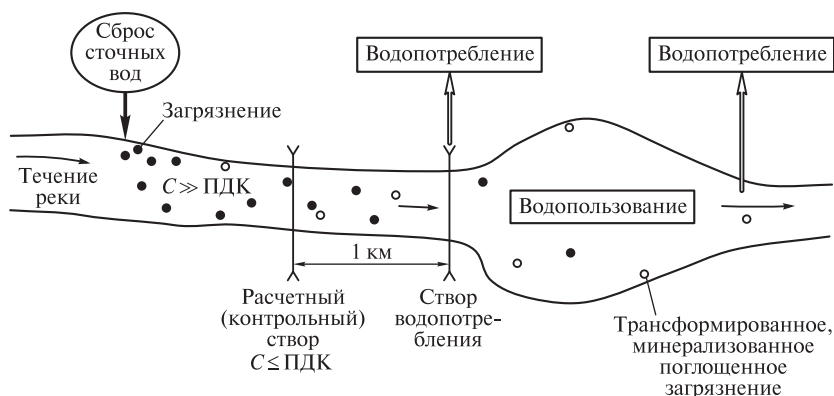


Рис. 1.1. Регламентирование показателей качества воды

Регламентированное содержание загрязнений в очищенной воде зависит от категории природного водоема, в который воду сбрасывают. Выделяют водоемы, вода которых используется для хозяйственно-питьевых целей (а также для снабжения предприятий пищевой промышленности), для культурно-бытового водопользования и в рыбохозяйственных целях. Наиболее жесткие требования предъявляют к качеству воды объектов, используемых в рыбохозяйственных целях.

Различают водопотребление и водопользование. При водопотреблении воду изымают из мест локализации и перемещают (см. рис. 1.1). Главные потребители воды – промышленность, сельское хозяйство, горная добыча, хозяйственно-питьевое водоснабжение. Российскими природоохранными документами нормируется содержание загрязнений в воде хозяйственно-питьевого назначения (см. табл. 1.1, с. 22).

При водопользовании воду используют без изъятия из мест локализации. Наиболее крупные водопользователи – гидроэнергетика, транспорт, рыбное хозяйство, система отдыха. Нормируется содержание загрязнений в воде водоемов культурно-бытового и рыбохозяйственного назначения.

Рыбохозяйственные водоемы подразделяют на 3 категории:

- высшая категория – для разведения особо ценных и ценных видов рыб, других водных животных и растений, места расположения нерестилищ;
- первая категория – для сохранения и воспроизводства ценных видов рыб, высокочувствительных к содержанию кислорода;
- вторая категория – для других рыбохозяйственных целей.

Сброс сточных вод при соблюдении рыбохозяйственных ПДК не должен приводить к гибели рыб и их кормовой базы, к их постепенному исчезновению, ухудшению товарных качеств обитающей в водном объекте рыбы, замене ценных видов рыб на малоценные.

Если сточная вода сбрасывается не в природный водоем, а в городскую канализацию, то, согласно действующему законодательству, в каждом населенном

пункте Российской Федерации могут утверждаться собственные правила приема сточных вод в канализацию и соответственно ПДК загрязняющих веществ, сбрасываемых со сточными водами на очистные сооружения канализации.

1.1.2. Основные показатели загрязненности сточных вод

Для определения характера и степени загрязненности сточных вод, качества очистки используется ряд показателей.

Органолептические показатели: цвет, вид, запах, мутность, прозрачность. Некоторые вещества обнаруживаются органами чувств человека при очень малых концентрациях (например, хлорфенол – при 0,000004 мг/л). По принятой методике **вкус** и **запах** воды определяются для холодной и подогретой до 60 °С воды и оцениваются по следующей системе:

- 0 баллов – запах и привкус не обнаруживаются;
- 1 балл – обнаруживаются лишь опытным лицом с тонким обонянием и вкусом;
- 2 балла – обнаруживаются потребителем;
- 3 балла – обнаруживаются легко, могут быть поводом для жалоб;
- 4 балла – вода неприятна для употребления;
- 5 баллов – вода совершенно непригодна для питья.

В соответствии с гигиеническими требованиями при использовании воды в питьевых целях интенсивность запаха не должна превышать двух баллов.

Из **запахов** различают ароматический, болотный, гнилостный, древесный, землистый, рыбный, сероводородный и неопределенный. Вода, пригодная для питья, не должна иметь запаха. Появление запаха чаще всего связано с образованием сероводорода при гниении серосодержащих органических веществ или при восстановлении сульфатов. Причиной появления запахов и привкусов воды может быть массовое развитие водорослей в водоеме, откуда производится водозабор. При этом в воду поступают продукты обмена веществ водорослей, придающие воде разнообразные запахи и привкусы.

Качественное определение **мутности** проводят описательно: слабая опалесценция, опалесценция, слабая, заметная и сильная муть. Количественно мутность определяют турбидиметрическим методом по ослаблению проходящего через пробу света. В качестве стандарта используют суспензию SiO₂, каолина, формазина.

Прозрачность (или светопропускание) воды обусловлена ее цветом и мутностью, т. е. содержанием в ней различных растворенных окрашенных и взвешенных органических и минеральных веществ. В зависимости от степени прозрачности воду условно подразделяют на прозрачную, слабоопалесцирующую, опалесцирующую, слегка мутную, мутную и сильно мутную. Мерой прозрачности служит высота столба воды, при которой можно наблюдать опускаемую в воду белую пластину определенных размеров (диск Секки) или различать на белой бумаге шрифт определенного размера и типа (как правило, полужирный шрифт высотой 3,5 мм). Результаты выражаются в сантиметрах с указанием способа измерения.

Физико-химические показатели: рН, температура, окислительно-восстановительный потенциал, суммарная минерализация, электропроводность, цветность.

Суммарная минерализация отражает общее содержание минеральных веществ в воде; обычно выражается в мг/л или мг/дм³ (до 1000 мг/л) и ‰ (промилле или тысячная доля при минерализации более 1000 мг/л).

Электропроводность приблизительно отражает суммарную минерализацию воды и обычно возрастает с ее увеличением.

Цветность воды выражается в градусах платино-кобальтовой или бихромат-кобальтовой шкалы и характеризует интенсивность окраски воды. Высокая цветность воды ухудшает ее органолептические свойства и оказывает отрицательное влияние на развитие водных организмов.

Содержание взвешенных веществ отражает содержание в воде грубодисперсных суспендированных минеральных примесей (частиц глины, песка, других неорганических веществ) и органических частиц (различных микроорганизмов, активного ила, планктона, отмерших остатков организмов и т. п.).

Потери при прокаливании, зольность твердых примесей характеризуют содержание органической и минеральной частей примесей. Определяют их путем прокаливании пробы (навески) при 500–600 °С, при этом большинство соединений, содержащих С, Н, N, S и другие летучие примеси, выгорают. Потери при прокаливании выражают в мг/л, зольность – в % от исходной массы твердого образца. Вместо показателей потерь при прокаливании и зольности иногда используют показатель «содержание в пробе летучих и нелетучих примесей».

Плотный остаток – остаток, образовавшийся при упаривании нефилтрованной воды и высушенный до постоянного веса при 105 °С. *Сухой остаток* – остаток после упаривания и высушивания при 105 °С профильтрованной воды.

Для описания содержания органических соединений также применяют показатели «растворенное органическое вещество» (РОВ), «взвешенное органическое вещество» (ВОВ), «общий органический углерод» (ООУ).

Показатель «общий органический углерод» определяется окислением органических веществ до СО₂ при нагревании. Для вычисления ООУ используется разность в количестве СО₂ до и после окисления. Концентрация ООУ растворенных органических веществ в незагрязненных природных водах составляет от 1 до 20 мг/л. В болотных водах она может достигать нескольких сотен мг/л.

Жесткость (мг-экв/л). Общая жесткость воды определяется, главным образом, как сумма концентраций ионов Са²⁺, Mg²⁺, выраженная в мг-экв/л. Она равна [Са²⁺]/20,04 + [Mg²⁺]/12,16. Мягкая вода имеет жесткость <4 мг-экв/л, вода средней жесткости 4–8 мг-экв/л, жесткая 8–12 мг-экв/л, очень жесткая >12 мг-экв/л. Величина общей жесткости в питьевой воде не должна превышать 7 мг-экв/л. Особые требования предъявляются к технической воде (из-за образования накипи).

Содержание железа и марганца. В городских сточных водах допускается содержание Fe до 5–8 мг/л, Mn до 1 мг/л. Воду в качестве питьевой можно использовать, если общее содержание железа не превышает 0,3 мг/л, марганца – 0,1 мг/л.

Содержание сульфатов, хлоридов, силикатов. Концентрация хлоридов может служить контрольным показателем для определения времени нахождения воды в сооружениях, сигналом о несоответствии проб поступающих и очищенных вод, поскольку в процессе прохождения сточной воды по всем очистным сооружениям хлориды практически не потребляются биоценозом очистных сооружений.

Содержание соединений азота и фосфора. Содержание аммонийного и нитратного азота в очищенной воде не должно превышать ПДК. Особенно важно отсутствие ионов NH_4^+ , которые вредны для рыб. При использовании процессов биологической очистки сточных вод в аэробных условиях должно быть обеспечено ориентировочное соотношение полного биологического потребления кислорода (БПК_п, см. с. 19), азота и фосфора: БПК_п : N : P = 100 : 5 : 1. Если в сточных водах это соотношение не выдерживается (N и P меньше требуемого уровня), то азот и фосфор добавляют в сточные воды (обычно в виде минеральных солей: хлоридов, сульфатов, фосфатов).

Кислотность (мг-экв/л) сточных вод определяется их способностью связывать гидроксид-ионы. Количество гидроксид-ионов, вступающих в реакцию нейтрализации, отражает общую кислотность воды и зависит от содержания свободного диоксида углерода, других слабых органических кислот, сильных кислот и их солей.

Щелочность (мг-экв/л) определяет количество веществ, вступающих в реакцию с сильными кислотами. В зависимости от характера анионов, формирующих щелочность, различают гидратную щелочность (обусловленную присутствием ионов OH^-), бикарбонатную (HCO_3^-), карбонатную (CO_3^{2-}), силикатную (HSiO_3^-), фосфатную (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}), гуматную и т. д. Природные воды с рН 7–9 обычно имеют суммарную карбонатную и бикарбонатную щелочность 3–4 мг-экв/л.

Суммарный показатель карбонатной и бикарбонатной щелочности используется в оценке качества иловой воды метантенка (см. разд. 1.5.2, с. 166) и выражает содержание CO_2 , гидрокарбонатов и карбонатов. В этом случае при рН воды <4,0–4,3 щелочность равна 0. При определении щелочности иловой воды метантенка при внесении HCl оттитровываются гидроксиды, карбонаты, гидрокарбонаты и низшие жирные кислоты. Щелочность включает содержание первых трех компонентов. Содержание жирных кислот определяется по разнице оттитровывания двух проб с разными индикаторами. Жирные кислоты оттитровывают последними.

Чем выше щелочность сточной воды, тем выше ее буферная емкость, выше устойчивость к закислению и защелачиванию, наблюдаемым в биологических процессах аммонификации, потребления соединений азота микроорганизмами, нитрификации, денитрификации и др. В то же время для достижения желаемых значений рН для воды с низкой щелочностью требуется меньший расход реагентов.

Содержание синтетических ПАВ. На биоочистку допускается поступление сточных вод с содержанием синтетических ПАВ не более 10–20 мг/л.

Суммарная концентрация вредных веществ на выходе из очистных сооружений в долях ПДК не должна превышать 1:

[. . .]



Кузнецов Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, член-корр. Российской инженерной академии.

Научные интересы: промышленная и экологическая биотехнология, процессы микробиологического синтеза и ферментации, биологическая очистка сточных вод, культивирование микроорганизмов и микробных популяций.

Градова Нина Борисовна – доктор биол. наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР, член-корр. Российской технологической академии. Научные интересы: промышленная микробиология и биотехнология, культивирование микроорганизмов и микробиологическое производство белковых веществ кормового и пищевого назначения, изучение ассоциативных культур, эколого-гигиеническая оценка микробиологических производств, биомониторинг и биотестирование.



Лушников Сергей Валерьевич – генеральный директор ООО «НТО «Приборсервис» (г. Томск). Член Ассоциации инженерного образования России. Награжден медалью «За национальную безопасность», «Золотым Меркурием» ТПП г. Томска, серебряной и золотой статуэтками конкурса «Гемма», призом Фонда В. И. Вернадского.

Научные интересы: проектирование технологий очистки, ремедиации и рекультивации нефтезагрязненных территорий, водных объектов, почв.

Энгельхарт Маркус – доктор наук, руководитель отдела исследований и развития фирмы «ЭнвиРоХеми ГмбХ» (Германия).

Научные интересы: биоинженерия и биотехнология, очистка природных и промышленных сточных вод.



Вайссер Томас – инженер-химик, руководитель технологической линии биологической очистки сточных вод Biomat фирмы «ЭнвиРоХеми ГмбХ» (Германия). Научные интересы: технология очистки сточных вод.

Чеботаева Марина Валерьевна – генеральный директор ООО «ЭНВИРО-ХЕМИ ГмбХ» (Россия, Екатеринбург). Биолог по образованию (УрГУ).

Научные интересы: охрана окружающей среды.

