

ISSN 2222-517X

Ежемесячное обозрение

Август–сентябрь, 2013 (№25)

# НАУКА ЗА РУБЕЖОМ

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ РАЗВИТИЯ НАУКИ РАН

## БИОРЕМЕДИАЦИЯ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ



[www.issras.ru/global\\_science\\_review](http://www.issras.ru/global_science_review)

**Наука за рубежом**

№ 25, август–сентябрь 2013

Ежемесячное обозрение

Электронное издание:

[www.issras.ru/global\\_science\\_review](http://www.issras.ru/global_science_review)

**Рубрика «Биотехнологии и генетика. Сельское хозяйство, пищевая и химическая промышленность»**

Обзор выполнил **Н. А. Трофимов**

Выпускающее подразделение: **Сектор анализа зарубежной науки**

Руководитель проекта **Л. К. Пипия**

Редактор **О. Е. Осипова**

Верстка: **Н. В. Шашкова**

## **СОДЕРЖАНИЕ**

Введение .....	4
1. Измерение биодоступности и биоремедиация .....	6
2. Технологии экогеномики .....	10
3. Генная инженерия в экологической и промышленной биотехнологии .....	13
4. Оценка уровня загрязнения территорий в России .....	17
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ</b> .....	<b>19</b>
Рис. Молекулярные технологии изучения микробных сообществ с целью биоремедиации загрязненных сред .....	19
Табл. Преимущества и недостатки основных технологий ремедиации, конкурирующих с технологиями биоремедиации .....	20

*Человечеству понадобились многие десятилетия, чтобы приблизиться к осознанию того, что оборотной стороной избранного пути технологического прогресса и промышленного производства является необходимость очищать и восстанавливать нарушенную и индустриально загрязненную природную среду. Для этого требуются масштабные затраты и специальные технологии, среди которых биоремедиация оценивается как одна из наиболее перспективных. Большие надежды возлагаются и на технологии генной инженерии, однако восприятие обществом генетически модифицированных организмов остается негативным. Вероятно, генная инженерия представляет собой как возможный инструмент решения экологических проблем, так и еще одну угрозу биоразнообразию. Особое место в ряду факторов загрязнения окружающей среды занимают радиоактивные загрязнения и отходы атомной промышленности, работы по захоронению и устранению которых очень трудоемки и затратны.*

## **Введение**

Современные аспекты применения биотехнологии для охраны окружающей среды и биоремедиации<sup>1</sup> рассмотрены в очередной публикации Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) [1]. Возможности биотехнологии оцениваются с позиций планирования научно-технологической политики в этой важнейшей для промышленности и экологии области.

Экспертами рассмотрены два принципиально различающихся режима государственного и транснационального регулирования в сфере экологической и промышленной биотехнологии. В то время как экологическая

---

<sup>1</sup> Биоремедиация (от англ. bioremediation) – множество технологий очистки и восстановления загрязненных экосистем с использованием биологических организмов: микробов, растений и животных.

биотехнология<sup>2</sup> сфокусирована на технологиях очистки и восстановления природных экосистем и связана с развитием инструментов принудительной регуляции, промышленная биотехнология<sup>3</sup> ориентирована преимущественно на производство конечной продукции и связана во многом с разрешающими и поощряющими регулирующими механизмами. Промышленная биотехнология оказывает неоднозначное воздействие на окружающую среду, кроме того она может повлечь за собой изменения в землепользовании<sup>4</sup>.

Промышленную биотехнологию, по сравнению с появившейся сравнительно недавно (в конце прошлого столетия) экологической биотехнологией, можно характеризовать как последовательность планомерных технологических инноваций на протяжении многих десятилетий в промышленных ферментационных процессах. Промышленная и экологическая биотехнология в известной степени пересекаются, например, в области методов инженерии микробных сообществ. Развитие промышленной биотехнологии протекало в унисон с предложенными в 60-х годах прошлого века учеными Массачусетского технологического института футуристиче-

---

<sup>2</sup> Экологическая биотехнология (от англ. environmental biotechnology) – включает различные технологии биоремедиации и очистки сточных вод, а также некоторые вспомогательные технологии, например биосенсоры. Исходное «сырье» для экологической биотехнологии – загрязненные земли и водные ресурсы, которые в силу своего состояния не представляют экономической ценности. Следовательно, промышленность не заинтересована в их очистке до тех пор, пока она не обязана это делать. И даже в этом случае частные компании и государственные промышленные предприятия ограничиваются теми пороговыми значениями «допустимого» содержания отравляющих и вредных веществ в почве и воде, которые прописаны в регулирующих нормах. Данное направление деятельности не дает промышленным предприятиям никакой прибыли, а напротив, накладывает дополнительные финансовые обязательства.

<sup>3</sup> Промышленная биотехнология (от англ. industrial biotechnology) – направлена на получение экономической прибыли и включает такие отрасли, как производство биотоплива, биопластиков, химикатов и фармацевтических продуктов, а также выращивание генно-модифицированных растений и микробных сообществ (за исключением сельскохозяйственных культур), в том числе для биотопливной промышленности.

<sup>4</sup> Изменения в землепользовании (от англ. land-use change) – допускаемые регулирующими нормами изменения в распоряжении землями, влекущие за собой вероятность появления экологических и экономических дисбалансов. Например, в контексте промышленной биотехнологии вероятны дисбалансы вследствие выбора в пользу выращивания тех или иных трансгенных культур на одних земельных участках (регионах или странах) с одновременным отказом от выращивания тех или иных традиционных культур и/или развития природоохраненных зон. В таком случае экологический дисбаланс может привести, например, к потере биоразнообразия, а экономический – к упущенной выгоде или же убыткам.

скими концепциями «белка одноклеточных»<sup>5</sup> и «еды из нефти»<sup>6</sup>. Впоследствии эти идеи были «обогащены» технологиями генной инженерии.

Промышленные стоки содержат больше токсичных веществ, чем канализационные сточные воды. Как правило, мониторинг их содержания в окружающей среде осуществляется методом химического анализа. Для 99% выбрасываемых в почву и водоемы веществ не существует экологических стандартов. При этом для большей части стандартов не хватает объективных и систематизированных данных, а уровень токсичности для экологии многих тысяч химикатов до сих пор не изучен. Исследователи сталкиваются с трудностями также при прогнозировании вероятных последствий взаимодействия различных химикатов в природной среде. Применяемые методы аналитической химии дорогостоящи и зачастую связаны с существенными ограничениями при выделении того или иного химиката из субстрата и разложении его на исходные действующие вещества.

Осознание на политическом уровне беспрецедентного по масштабам загрязнения Земли вследствие промышленной деятельности человека произошло относительно недавно. Например, первые исследования по выявлению прямого токсичного воздействия<sup>7</sup> в ряде ведущих развитых стран были проведены в начале 90-х годов прошлого столетия.

## **1. Измерение биодоступности и биоремедиация**

Не только измерение, но даже и оценка биодоступности того или иного вещества в природной среде зачастую проблематична, поскольку <sup>5</sup> «Белок одноклеточных» (от англ. Single Cell Protein) – концепция производства протеиновых кормов из культур одноклеточных организмов (например, дрожжей), которые способны перерабатывать различные промышленные и сельскохозяйственные отходы, используемые в дальнейшем как корм для скота, а также в пищевой промышленности.

<sup>6</sup> «Еда из нефти» (от англ. food from oil) – концепция выращивания одноклеточных организмов (используемых в качестве белка одноклеточных) на побочных продуктах нефтяной промышленности. Например, обогащенные липидами, синтетическими аминокислотами и витаминами кормовые дрожжи, выращенные на парафинах, добавляют в корм бройлерных цыплят.

<sup>7</sup> От англ. Direct Toxicity Assessment (DTA) – метод оценки токсичности, при котором не обязательно исследовать исходные субстанции, являющиеся причиной токсичного воздействия. В США этот метод известен как анализ совокупной токсичности стоков (от англ. Whole Effluent Toxicity).

зависит от множества частных и взаимосвязанных условий, включая биохимический состав почвы и воды, взаимодействие и химическую активность загрязняющих веществ и их расщепление на составные токсичные части, факторы биологической трансформации и концентрации веществ. Кроме того, по мере истечения времени с момента попадания токсичного вещества в окружающую среду его биодоступность сокращается вследствие недостаточно изученного механизма внутрипочвенной секвестрации<sup>8</sup>. Технические методы оценки и измерения биодоступности разделяются на прямые и косвенные, а также на биологические и химические. При этом прямые химические методы нецелесообразны, потому что оценить биодоступность практически невозможно, не прибегая к помощи живых организмов.

Прямые биологические методы измерения биодоступности позволяют с наиболее возможной точностью оценить реальную дозу поглощенного биологическим организмом токсичного вещества. Еще одной важной стороной этих методов является возможность объединения в процессе измерения всех биотических и абиотических факторов окружающей среды, влияющих на изменение биодоступности того или иного химиката. В то же время данный метод дорогостоящий и не может широко применяться. Например, определение уровня биодоступности заданных химических соединений в дождевых червях требует значительных временных и финансовых затрат.

Косвенные биологические методы позволяют обнаружить некоторые признаки воздействия токсичного вещества на организм, например летальность, индукция или подавление энзимов, репродуктивные эффекты. Косвенный характер методов заключается в том, что качественные проявления воздействия вредных веществ можно измерить и квантифицировать<sup>9</sup>, но их химическая концентрация остается неизвестной.

Одним из обещающих методов представляется использование генетически модифицированных организмов (ГМО), способных выявить и квантифицировать заданные токсичные вещества. Биосенсоры данного вида

---

<sup>8</sup> Секвестрация – поглощение токсичного вещества, при котором токсичность вещества по-прежнему может проявиться, в то время как степень его биодоступности сокращается.

<sup>9</sup> Квантификация – сведение качественных показателей к количественным измерениям.

основаны на высокоспецифичных механизмах генетического контроля микроорганизмов, позволяющих им экспрессировать специфичные белки только при соблюдении строго заданных условий, например в ходе обезвреживания токсичных химикатов.

Одним из наиболее популярных механизмов детекции является репортерная система *lux*<sup>10</sup>. Это связано с тем, что световые импульсы могут быть легко квантифицированы, к тому же они не зависят от вероятных сопутствующих процессу детекции биохимических взаимодействий в организме-детекторе.

Преимуществом ГМО-сенсоров является способность обнаружения очень низких концентраций вещества, прежде всего тяжелых металлов. В то же время с помощью данного метода зачастую трудно выявить многие вредные органические вещества из-за низкой специфичности реакций. В настоящее время объем рынка для ГМО-сенсоров слишком мал, что препятствует исследованиям и разработкам в этой области, а также ограничивает возможности их применения в полевых условиях.

Косвенные химические методы предполагают извлечение фракции заданного химиката (металлов или органических веществ) из почвы (водоёма), при этом его извлекаемость зависит от самого химиката, экстрагента и заданных условий эксперимента. Примером химических методов является РВЕТ<sup>11</sup>.

Альтернативой технологиям биоремедиации в США являются сжигание промышленных отходов, термическая десорбция, стабилизация/цементирование почв, паровая экстракция (SVE<sup>12</sup>) и откачивание грунтовых вод с последующей адсорбцией загрязняющих веществ. Сравнительные

<sup>10</sup> Способность ряда микроорганизмов в определенных условиях (например, при воздействии токсичного вещества) проявлять биолюминесцентные гены.

<sup>11</sup> РВЕТ (от англ. Physiologically Based Extraction Test) – метод экстракции токсичного вещества с учетом физиологических факторов. Например, для симуляции условий желудочно-кишечного тракта человека применяются исходные желудочные соки и ферменты при температуре 37°C с параметрами экстракции пищеварительной системы, схожими с параметрами детского организма после приема пищи. Далее аналитическая химия позволяет изучить различные виды растворов, полученных в ходе экстракции.

<sup>12</sup> SVE (от англ. Soil Vapour Extraction) – метод ремедиации почвы путем ее обработки парами воздуха под давлением.

преимущества и недостатки ключевых технологий ремедиации приведены в таблице.

Технологии биоремедиации используются сравнительно редко – в 10–15% случаев ремедиации почв и территорий. Такая небольшая доля рынка обусловлена рядом причин: а) биоремедиация чаще всего основана на методах деградации органических загрязняющих веществ и значительно реже на поглощении тяжелых металлов растениями, поэтому сфера применения этой технологии зависит от того, в какой мере загрязняющие вещества могут быть подвержены разложению; б) по-прежнему не изучены темпы обработки загрязненных территорий (по-видимому, темпы биодegradации существенно замедляются со временем); в) технологии биоремедиации, как правило, не позволяют полностью очистить субстрат, поэтому необходимо заранее предусмотреть возможность дополнительной обработки почвы (водоема) с применением других технологий ремедиации для достижения приемлемого уровня содержания токсичных веществ; г) при рассмотрении опции биоремедиации, как правило, приходится прибегать к более затратным, детальным и интрузивным исследованиям зараженной местности; д) многие подрядчики в области ремедиации не знакомы с технологиями биоремедиации.

Следует особо отметить, что ввиду низкой растворимости и биодоступности загрязняющих веществ биоремедиация с использованием микроорганизмов имеет ограничения по степени тщательности очистки загрязненных сред даже в лабораторных условиях. В полевых условиях эта задача становится еще более сложной.

В большинстве стран исследования и разработки в области биоремедиации не являются приоритетными. Частное финансирование НИОКР также крайне ограничено. Во многом из-за того, что подрядчиками в области биоремедиации выступают, как правило, малые предприятия или небольшие подразделения строительно-инженерных компаний.

Одной из перспективных областей применения биоремедиации является очистка экосистем от фосфорных загрязнений. Спрос на поставки фосфора постоянно растет в пищевой, автомобильной, компьютерной и огнезащитной промышленности. В ближайшем будущем не исключено

возникновение дефицита фосфорного сырья. Основными источниками фосфатов являются металлолом, осадки сточных вод, отходы пищевой и ферментационной промышленности. Загрязнение экосистем фосфором приводит к серьезным последствиям, например к вспышкам цветения вредоносных водорослей. Фосфорные шлаки – побочные продукты добычи фосфора из отходов могут быть использованы для производства цемента. Многие микроорганизмы, например *E.coli*, способны эффективно накапливать полифосфаты. Микробные консорции аэробных и анаэробных организмов – лучший на сегодняшний день способ очистки водоемов от содержащих фосфор загрязнителей. Эксперты ОЭСР приводят в качестве положительного примера политику Японии в области утилизации фосфорных загрязнений, которую в тесном взаимодействии эффективно координируют четыре национальных министерства.

## **2. Технологии экогеномики**

Одной из быстро развивающихся базовых технологий биоремедиации является экогеномика<sup>13</sup>. Прикладная экогеномика находится в фокусе внимания не только потому, что она связана с генетической модификацией растений и живых организмов, необходимых экологической и промышленной биотехнологии, но также вследствие необычайно высокой эффективности и перспективности данной технологии.

Экогеномика преимущественно применяется для характеристики микроорганизмов, проживающих в различных средах (рисунок). До появления робастных методов молекулярной биологии выявление микробов в их природных средах обитания представляло собой сложный, длительный и дорогостоящий процесс, который к тому же нередко приводил к недовольным результатам.

Полимеразная цепная реакция (ПЦР) ознаменовала переход к разветвленному множеству технологий геномики, включая метатехнологии, такие

---

<sup>13</sup> Экогеномика (от англ. eco-genomics) – разветвленное множество молекулярных технологий, включая протеомику, генетику, геномную инженерию, находящихся в тесном взаимодействии с синтетической биологией и метаболической инженерией и направленных на решение экологических проблем, например на детекцию полезных микроорганизмов и/или энзимов в загрязненных экосистемах с целью развития инструментов биоремедиации.

как метапротеомика<sup>14</sup>, метаболомика<sup>15</sup>, метатранскриптомика<sup>16</sup>. Некоторые из геномных технологий применимы к ремедиации зараженных земель и водоемов. Одной из наиболее пригодных для этого технологий признается метагеномика<sup>17</sup>, которая «работает» с целыми исходными популяциями микроорганизмов, населяющих природную среду. В грамме сухого грунта живет  $10^{10}$  микроорганизмов, из которых лишь 1% можно оценить в лабораторных условиях, выращивая заданные культуры микробов, т. е. без использования арсенала метагеномики.

С позиции фундаментальной науки увеличение финансирования исследований микробных сообществ может дать ключ к пониманию механизмов повышения эффективности методов биоремедиации. Однако, по мнению экспертов ОЭСР, это необходимо доказать, и до тех пор пока нет достаточного количества наглядных подтверждений, рассчитывать на увеличение финансирования отрасли не приходится.

Дополнительной проблемой является несовместимость исследовательских процессов в аккредитованных лабораториях по изучению загрязненных почв и водоемов, которые могли бы стать оптимальной базой для внедрения экогеномных технологий, и в лабораториях, специализирующихся на геномике и протеомике. Эти лаборатории должны быть тщательно изолированы и оборудованы устройствами управления потоками

---

<sup>14</sup> Несмотря на существенный прогресс в технологиях секвенирования и массовой спектрометрии, применение метапротеомики в интересах экологии находится на начальном этапе из-за отставания в биоинформатике и ряде технических трудностей при изучении полного протеома заданной природной среды обитания.

<sup>15</sup> Метаболомика относится к всеобъемлющему исследованию низкомолекулярных фракций метаболитов с весом менее 1 кДа. Данная область геномики находится в стадии зарождения.

<sup>16</sup> Метатранскриптомика направлена на коллективное изучение всех транскриптомов заданной среды обитания. Основные трудности этой зарождающейся науки связаны с выявлением действительных транскрипционных процессов, происходящих в заданном месте в заданное время. Также трудно выяснить, какие из этих процессов и как меняются в ответ на изменение окружения и биотические взаимодействия. Трудности носят вполне объективный характер, поскольку период полураспада РНК составляет всего несколько минут, даже при поддержании оптимальных условий.

<sup>17</sup> Метагеномика позволяет установить филогенетические связи между различными семействами микроорганизмов благодаря открытию специальных биомаркеров – 16S рРНК. Несмотря на прорывные достижения метагеномики в области анализа на базе библиотек клонов, остается множество ограничений, связанных с искажениями при ПЦР-амплификации. Также недостаточно изучена экспрессия генов *E. coli* и других экспрессионных векторных библиотек. По имеющимся оценкам, типичные анализы на базе рРНК охватывают не более 50% микробного разнообразия в сэмпле.

воздуха и HEPA-фильтрами. Проведение биологических анализов предполагает специальную стерилизацию стеклянного инвентаря и уничтожение генетических сэмплов (например, ДНК). Таким образом, переоборудование химических лабораторий для экогеномных исследований требует привлечения соответствующих специалистов. Кроме этого потребуется оборудовать и обеспечить квалифицированными специалистами вычислительные центры в области биоинформатики. Поэтому очевидно, что исследования такого характера осуществимы только при гарантированном долгосрочном финансировании, соответствующем затраченному труду.

Самые привлекательные с точки зрения экономической выгоды сферы применения экогеномики – фармацевтика и промышленная биотехнология. Следует отметить, что до сих пор большое внимание уделялось океаническим и морским организмам. Например, около половины исследований в области разработки лекарств для лечения рака были сосредоточены на изучении свойств морских обитателей. Исследование морских организмов позволило выявить значительное количество биологически активных веществ, но разрешения на их использование в качестве фармацевтических средств стали выдаваться лишь недавно. Тем не менее рынок продукции морской биотехнологии в 2010 г. был оценен в 2,8 млрд долл. США, и, по оценкам экспертов, он будет расти на 4–12% ежегодно. По всей видимости, многие морские микроорганизмы будут включены в программы геномных исследований в ближайшее время.

Особую ценность для промышленной биотехнологии представляет комбинация зарождающихся технологий экогеномики со сравнительно более зрелыми технологиями синтетической биологии. По оценке экспертов, экогеномика могла бы стать основной вспомогательной технологией синтетической биологии, обеспечивая ее всем необходимым «сырьем» для конструирования форм жизни с принципиально новыми свойствами и функциями.

Поскольку все метатехнологии экогеномики связаны с обработкой огромных массивов информации, важной задачей в ближайшем будущем станет подготовка специалистов в области биоинформатики, спрос на которых стремительно возрастает. Например, в одном только Пекинском

институте геномики в 2010 г. были приняты на работу 1500 специалистов в этой области.

Эксперты ОЭСР отмечают, что при проведении исследований в области метагеномики необходимо тщательно оценивать вероятность негативного общественного восприятия многих геномных технологий, прежде всего связанных с геной инженерией. Осознавая это, они полагают целесообразным сопровождать исследовательские проекты деятельностью по связям с общественностью, направленной на разъяснение, каким образом те или иные продукты биотехнологии могли бы эффективно использоваться для решения стоящих перед обществом важных проблем.

### **3. Генная инженерия в экологической и промышленной биотехнологии**

Согласно мнению экспертов ОЭСР, генная инженерия при условии тщательного регулирования и отслеживания рисков не несет в себе угрозы, а наоборот, способна позволить человечеству решить многие экологические проблемы. Данные технологии, как правило, воспринимаются обществом крайне негативно, когда сфера их применения касается продуктов питания. В то же время более вероятное негативное воздействие распространения генетически модифицированных организмов на природное биоразнообразие часто не учитывается как большинством экспертов, так и широкой общественностью.

ГМО уже давно и успешно используются в системах ферментации при производстве широкого спектра биотехнологической продукции. Современные ферментеры автоматически стерилизуются, и таким образом все ГМО остаются в пределах замкнутой системы производства.

Так как большая часть задач экологической биотехнологии относится к биоремедиации и обработке сточных вод, специалисты не видят необходимости в масштабном применении геной инженерии в этой сфере<sup>18</sup>. Оправданным может быть использование ГМО в ряде биосенсоров при условии, что они надежно корпусированы внутри устройств или же сенсоры находятся внутри лабораторий.

---

<sup>18</sup> Исключением могло бы стать применение ГМ-технологий для биодеградации чрезвычайно стойких загрязняющих веществ, например бифенилов (ПХБ).

В промышленной биотехнологии больше всего озабоченности вызывает использование ГМ-растений в качестве биомассы для биорафинировочных заводов. В то время как вопрос применения ГМО в промышленном производстве решается достаточно просто, всеобщего внимания к распространению культивируемых ГМ-растений по-прежнему избежать не удастся. Производство биотоплива второго поколения на базе древесноволокнистых растений до настоящего времени за редким исключением не связано с выведением и выращиванием ГМ-вариаций природных энергетических растений, прежде всего *Panicum virgatum*, *Miscanthus giganteus* и *Jatropha curcas*. Отчасти это связано с тем, что, например, *Panicum virgatum* и *Jatropha curcas* сами по себе достаточно неприхотливы и устойчивы ко многим неблагоприятным условиям климата, болезням и вредителям.

ГМ-технологии могут быть необходимы для снижения содержания лигнина в энергетических растениях и повышения урожайности водорослей<sup>19</sup>, являющихся перспективным источником биотоплива. При производстве биопластиков и биохимикатов (включая фармацевтику) с целью снижения себестоимости продукции использование ГМ-растений также может быть вполне оправданным. Уже сейчас ведутся исследования и разработки ГМ-растений (в том числе *Panicum virgatum*), например для производства паучьего шелка и биопластиков. В лесном хозяйстве использование ГМ-технологий могло бы привести к существенному улучшению свойств деревьев (быстрый рост, защита от вредителей и болезней), однако эксперты ОЭСР отмечают негативное мнение общественности по данному вопросу, из-за чего компании вынуждены прибегать к менее эффективным традиционным технологиям селекции. В области экологической биотехнологии предпринимаются попытки разработать специализированные сообщества микробов, в том числе трансгенные бактерии для биоремедиации экосистем с радиоактивным загрязнением [2].

Помимо общественного восприятия генной инженерии озабоченность у экспертов вызывает вероятность смешения пищевых растений и ГМ-растений, выращиваемых для промышленной биотехнологии. Вероятность этого существует, например, во время транспортировки или измельчения (молотыбы) сырья с использованием стандартного оборудования, не поддающегося стерильной очистке.

<sup>19</sup> К данной технологии производства биотоплива проявляет интерес компания «Монсанто».

В области генетически модифицированных продуктов питания эксперты отмечают успешное внедрение стандартов «Кодекса Алиментарийс», которым пользуются повсеместно, включая международные торговые инструменты, прежде всего ВТО. В том, что касается международной торговли ГМО, одним из предназначений которых могло бы стать изменение природной среды, утверждение стандартов Карфагенского протокола в области биобезопасности по-прежнему сталкивается с множеством проблем. Большая часть стран, экспортирующих ГМО, до сих пор не ратифицировала этот протокол.

Взгляды на распространение генной инженерии существенно разнятся по всему миру и даже в пределах некоторых государств. Например, в Канаде полевые испытания с выращиванием ГМ-деревьев осложнены разногласиями в регулирующих нормах различных провинций страны. Тем не менее разработки по выращиванию деревьев с использованием генной инженерии в этой стране продолжают, не взирая на общественные протесты. Генетически модифицированные соевые бобы составляют 99% от выращиваемой сои в Аргентине. В Латинской Америке также активно ведутся полевые эксперименты по выращиванию культур генетически модифицированного сахарного тростника.

Негативное общественное восприятие ГМ-технологий остается основным камнем преткновения при попытке выработать единые стандарты, способствующие распространению генно-модифицированной продукции. Позиция общественности не имеет ничего общего с научными фактами и объективной оценкой рисков, полагают эксперты ОЭСР. Исходя из этого предлагается создавать благоприятные условия для продвижения на национальном уровне регулирующих мер, направленных на поощрение ГМ-технологий. В то же время необходимо учесть негативный опыт Австралии, связанный с проникновением в природное своеобразие данного континента чужеродных видов (например, точильщика сахарного тростника, завезенного из Африки), в результате чего был нанесен существенный вред сельскому хозяйству этой страны.

ГУРТ-технологии<sup>20</sup> рассматриваются экспертами ОЭСР в качестве одного из вариантов эффективного обеспечения биобезопасности при выращивании и распространении в природной среде ГМ-растений и микроорганизмов. Необходимо отметить, что в публикации ОЭСР оставлены за рамками обсуждения вероятные негативные последствия для природы, которые могут произойти в результате распространения данного семейства технологий. Вместе с тем в настоящее время их использование запрещено Конвенцией по биоразнообразию ООН. Для повсеместного внедрения ГУРТ-технологий эксперты ОЭСР полагают целесообразным достичь общественного согласия, а также предусмотреть специальные регулирующие механизмы, которые позволят широко использовать ГМ-технологии со встроенными ГУРТ в том случае, если очевидны их преимущества для «зеленого» развития.

Примечательно, что наряду с разработкой потенциально опасных для сохранения природного разнообразия жизни на планете ГУРТ-технологий активно развивается Всемирное хранилище семян на о. Шпицберген, основной задачей которого является сохранение быстро сокращающегося разнообразия культурных растений. Некоторые эксперты полагают, что это происходит с учетом вероятности непредсказуемых и катастрофических для планеты последствий повсеместного распространения генетически модифицированных форм жизни [3].

Для мониторинга ГМ-растений, не используемых в качестве кормов или продуктов питания, специалисты ОЭСР предлагают упрощенную схему с использованием трансгенного «молчащего»<sup>21</sup> ДНК-идентификатора. Внедрение этого механизма, по их мнению, может обеспечить недорогую и надежную систему выявления такого вида растений. Кроме того, это поможет снижению уровня общественной обеспокоенности, так как широкой общественности будет показано, что ведется тщательный мониторинг ГМ-продукции.

---

<sup>20</sup> ГУРТ (от англ. Genetic Use Restriction Technologies) – генетические рестрикционные технологии, также именуемые терминаторными технологиями. Несмотря на многообразие воплощений данных технологий, основной смысл их применения заключается в контролируемом распространении/подавлении ГМ-культур. Например, при помощи ГУРТ можно «включать» или «выключать» способность ГМ-растений к размножению.

<sup>21</sup> От англ. silent – временно подавленный, «выключенный» участок ДНК, не участвующий в экспрессии генов.

#### **4. Оценка уровня загрязнения территорий в России**

В России отмечаются как радиоактивные, так и нерадиоактивные загрязнения. Первый тип загрязнения наиболее опасен ввиду длительности периода распада радиоактивных веществ. Кроме того, требуются чрезвычайно высокие затраты на их захоронение, а также ремедиацию пораженных экосистем. Зачастую провести ремедиацию захоронений отходов высокого уровня с использованием существующих технологий невозможно. Геологическое захоронение предполагает наличие достаточно надежных резервуаров, рассчитанных на сотни тысяч лет эксплуатации. К тому же заложниками такого решения становятся будущие поколения [4].

Следует отметить, что актуальной информации об уровне радиоактивного загрязнения в России в открытых источниках практически нет. В связи с этим за основу была взята публикация ОЭСР о состоянии российской экологии от 1999 г. [5].

По мнению экспертов ОЭСР, российская экономика в целом отличается в семь раз большей плотностью загрязнения окружающей среды в расчете на единицу ВВП. Это же касается и радиоактивного загрязнения. На территории России имеются участки местности с радиоактивным заражением, которые с определенной вероятностью могут вызвать значительное ухудшение здоровья местного населения. В целом динамика эффективности управления радиоактивными отходами оценивается специалистами отрицательно. Отмечены продолжающиеся случаи загрязнения Баренцева, Белого и Карского морей радиоактивными материалами.

По состоянию на 1999 г. в России было накоплено около 1 млрд т радиоактивных отходов высокого и низкого уровней. По имеющимся оценкам, активность накопленных к тому времени радиоактивных загрязнений находилась на уровне 56 000 ПБк, а активность накопленного отработанного ядерного топлива – 170 000 ПБк. Для сравнения: совокупные выбросы радиации в атмосферу в результате чернобыльской катастрофы составили примерно 8400 ПБк, а в результате катастрофы на Фукусиме – от 130 до 1020 ПБк [6].

Экспертами ОЭСР было отмечено, что в федеральной целевой программе «Обращение с радиоактивными отходами и отработавшими ядерными

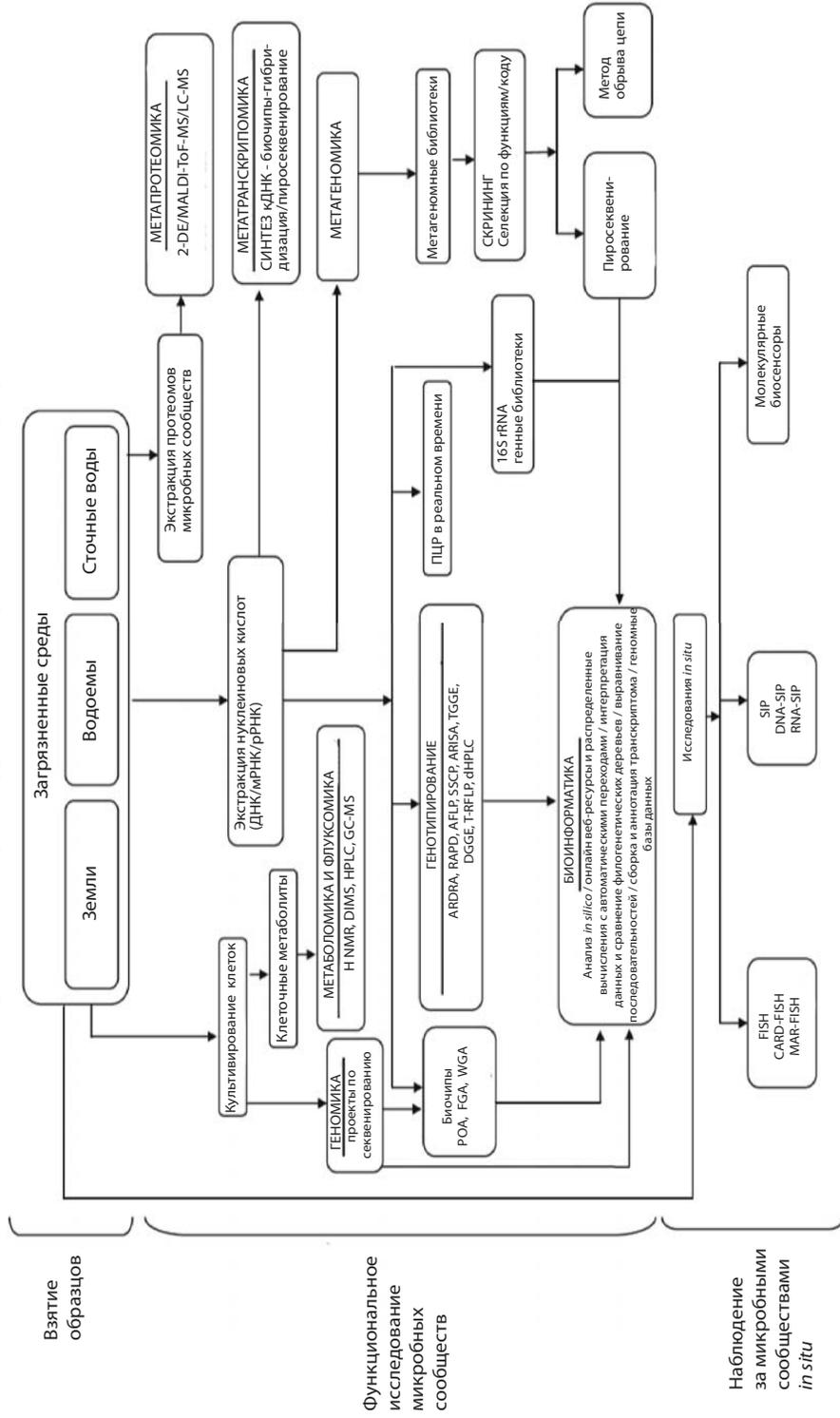
материалами, их утилизация и захоронение на 1996–2005 годы» не содержалось каких-либо количественных целевых показателей. В связи с этим не было оснований для объективного определения степени ее эффективности.

На сегодняшний день ситуация с радиоактивным загрязнением в России, вероятно, не улучшилась. За прошедшее десятилетие руководство страны неоднократно выступало на международной арене с предложениями об обустройстве на территории России постоянного хранилища радиоактивных отходов со всего мира, игнорируя мнение широких масс по данному вопросу [7].

В России проблемы радиоактивного загрязнения не всегда оправданно приковывают к себе больше общественного внимания, чем аналогичные проблемы с другими загрязняющими веществами, например органическими. По состоянию на 1999 г. около 2,3 млн га земель числились загрязненными в результате промышленной деятельности, из которых более 700 тыс. га были признаны чрезвычайно загрязненными, т. е. влекущими за собой прямую угрозу жизни населения. Критический уровень загрязнения был отмечен также приблизительно на 12% территории крупных промышленных городов. Среди основных источников загрязнения были отмечены тяжелые металлы, углеводороды и органические химикаты.

# Приложение

Рисунок. Молекулярные технологии изучения микробных сообществ с целью биоремедиации загрязненных сред



**Таблица. Преимущества и недостатки основных технологий ремедиации, конкурирующих с технологиями биоремедиации**

Технология	Преимущества	Недостатки
Паровая экстракция (SVE)	Низкие затраты на эксплуатацию. Быстрая установка. Не нарушает ландшафт. Не использует токсичных реагентов. Может содействовать биоремедиации.	При низком давлении – низкая эффективность очистки. Загрязняющие вещества не обрабатываются (остаются токсичными). Есть ограничения по типу почв.
Сжигание промышленных отходов	Эффективность более 99%. Детоксикация. Рециклированное тепло.	Очень высокие начальные инвестиции. Необходимы высококвалифицированные специалисты. Очень сложная технология. Эмиссия вредных газов. Синтез диоксинов <i>de novo</i> . Негативное общественное восприятие. Разрушение почв.
Термическая десорбция	Может применяться для маломасштабных проектов. Гибкость в условиях оперирования: например, параметры температуры, использования катализаторов. Органическая материя почв может быть сохранена при обработке.	Некоторые типы почв существенно удорожают ремедиацию. Эмиссии. Летучие металлы приводят к нарушениям в работе системы.
Стабилизация/цементирование почв	Неорганические загрязнители могут быть надежно иммобилизованы, особенно при витрификации. Материал, прошедший витрификацию, подлежит длительному хранению.	Сравнительно высокие затраты. Витрификация связана с большими энергозатратами. Структура почв полностью уничтожается. Органические загрязнители не всегда поддаются фиксации. В ряде случаев увеличивается объем цементированных почв.

Обзор выполнен на основе следующих публикаций:

1. OECD (2013), *Biotechnology for the Environment in the Future: Science, Technology and Policy*. OECD Science, Technology and Industry Policy Papers, № 3. OECD Publishing. <http://dx.doi.org/10.1787/5k4840hqhp7j-en>
2. Brim H., McFarlan S.C., Fredricson J.K. et al. Engineering *Deinococcus radiodurans* for metal remediation in radioactive mixed waste environments // *Nature Biotechnology*. 2000. V. 18. № 85–90.
3. Engdahl F. W. «Doomsday Seed Vault» in the Arctic – Bill Gates, Rockefeller and the GMO giants know something we don't. – <http://www.globalresearch.ca/doomsday-seed-vault-in-the-arctic-2/23503>
4. Abbots J. Radioactive waste: a technical solution? // *Bulletin of the Atomic Scientists*. 1979. Oct. V. 35. № 8.
5. OECD (1999), *Environmental Performance Reviews. Russian Federation*. OECD Publishing.
6. 2012 NEA Annual Report. OECD/NEA Publications, 2013.
7. Darst R.G., Dawson J.I. Think globally, store locally? // *Russia and the nuclear waste problem*. OSTEUROPA, Apr., 2006.

## **Тематические рубрики ежемесячного обзора**

Аэронавтика и космос

***Биотехнологии и генетика. Сельское хозяйство,  
пищевая и химическая промышленность***

Информационные и телекоммуникационные технологии  
и вычислительная техника

Исследования в области ядерной и квантовой физики

Медицинские технологии и оборудование

Нанотехнологии и новые материалы, микроэлектроника

Социальные и экономические науки и статистика

Энергетика и транспорт