

УДК 577.1:579.22

**О.Е. ПРИЛУЦКАЯ, А.Л. ГУЛЕВИЧ**

Брест, БрГТУ

## **ДЕГРАДАЦИЯ КСЕНОБИОТИКОВ С ПОМОЩЬЮ МИКРООРГАНИЗМОВ**

С развитием химической промышленности в биосферу стало поступать более тысячи различных ксенобиотиков, которые в значительной степени загрязняют окружающую среду. Известно, что соединения, вносимые человеком в окружающую среду в последнее время (инсектициды, гербициды, детергенты и другие ксенобиотики) помимо того, что очень токсичны, еще и устойчивы в среде (что представляет опасность для человека и животных). В настоящее время нагрузки на естественные процессы самоочищения биосферы чрезмерные, и параллельно с деструкцией загрязнений ведет их к постепенному накоплению в окружающей среде. Деградация ксенобиотиков микроорганизмами является одной из важных проблем защиты биосферы.

Биодеградация – это преобразование сложных веществ с помощью биологической активности. Это широкое понятие включает три более узких процесса:

- 1) трансформацию, или незначительные изменения молекулы,
- 2) фрагментацию, или разложение сложной молекулы на более простые соединения,
- 3) минерализацию, или превращение сложных веществ в простые ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$  и т.д.).

Основными биологическими агентами, осуществляющими биоразрушение, являются микроорганизмы, обладающие огромным разнообразием ферментных систем и большой лабильностью метаболизма. Именно они способны разлагать широкий спектр химически устойчивых соединений, тем самым возвращать основные питательные элементы в глобальные циклы и избегая накопления «мертвых» остатков на поверхности Земли.

Наиболее активно участвуют в разрушении ксенобиотиков бактерии и грибы, основное количество которых выделено из почвы и воды.

Представители бактерий относятся к различным родам грамм-отрицательных и грамм-положительных аэробных и анаэробных организ-

мов. С наиболее важных аэробных грамм-отрицательных бактерий следует отметить виды родов *Pseudomonas*, *Sphingomonas*, *Burkholderia*, *Alcaligenes*, *Acinetobacter*, *Flavobacterium*, метаноокисляющие и нитрифицирующие бактерии, а с Грамм-положительных – представителей родов *Arthrobacter*, *Nocardia*, *Rhodococcus* и *Bacillus*.

Некоторые виды нитрат- и сульфатредуцирующих бактерий, а также метаногенные археи активно участвуют в анаэробной деградации ксенобиотиков. Грибы, способные аэробно разрушать такие соединения, относятся к родам *Phanerochaete* (возбудители «белой гнили»), *Penicillium*, *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Fusarium*.

Особую актуальность разрушающая способность микроорганизмов приобрела в последние десятилетия в связи с увеличивающимися в биосфере устойчивыми загрязнителями антропогенного происхождения, причем нередко в масштабах, превышающих природную самоочищающуюся способность. Дело в том, что человеку удалось создать такие соединения, которые не разрушаются в природе и обычных условиях. Это различные синтетические полимеры, красители, пестициды, фармацевтические препараты, мощные средства и т.д. Эти чужеродные вещества (ксенобиотики) имеют уникальную биологическую структуру уже на уровне микропримесей. В широком смысле к ксенобиотикам могут быть отнесены и вещества природного происхождения, но полученные в сверхколичествах и перемещенные в несвойственные им места (например, нефть). Большинство таких соединений обладает значительной стабильностью, и для их полного разложения при обычных условиях требуются столетия.

Происходит непрерывный перенос этих веществ по пищевым цепям и их накопление на конечных этапах, к которым относится и человек. Огромное число ксенобиотиков чрезвычайно токсично и проявляет мутагенную, канцерогенную, аллергенную и тератогенную активности. Однако понятно, что человечество не может полностью отказаться от использования таких веществ, так как они применяются практически во всех областях деятельности [1, с. 70]. Поэтому на первый план выходит использование биоразрушающей способности микроорганизмов для очистки окружающей среды от антропогенных загрязнителей.

Существует два типа метаболизма ароматических субстратов, аэробных и анаэробных. Аэробная деградация простых ароматических соединений осуществляется введением в молекулу одной или двух гидроксильных групп действием моно- или диоксигеназ. Далее катехол подвергается орто- или мета-расщеплению ароматического кольца с образованием соответствующих производных муконовой кислоты. Эти не ароматические продукты дальше окисляются с использованием реакций общих метаболических путей до воды и углекислоты. Если на бензольном кольце заместители, то

они могут превращаться и отщепляются как до, так и после раскрытия кольца. Разложение ароматических кислот может начинаться с неокислительного декарбоксилирования, приводит к образованию фенолов, которые затем окисляются в линейные непредельные дикарбоновые кислоты. Основными микроорганизмами, разрушающими в аэробных условиях простые ароматические соединения, являются представители родов *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Bacillus* и грибы рода *Aspergillus*, широко распространенных в почвенных и водных экосистемах.

В анаэробных условиях, при отсутствии такого окислителя как кислород, разрушение ароматических веществ происходит более сложно - многоэтапный процесс с участием различных ферментов. Микроорганизмы способны использовать широкий набор ароматических субстратов в нитрат-, сульфат-, железо- и карбонат-восстановительных условиях. Основными этапами процесса биodeградации является активация бензольного кольца, его разрыв и образование C1- и C2-соединений. Активация кольца может быть результатом реакций карбоксилирования, анаэробного гидроксирования и образования КоА тиоэфиров ароматических кислот. В последней реакции участвуют растворимые, неспецифические КоА-лигазы или КоА-трансферазы. Центральным звеном процесса биodeградации ароматических соединений является бензил-КоА, который подвергается серии последовательных восстановлений под воздействием бензил-КоА-редуктазы и гидролитического расщепления образовавшегося циклогексана. Первым неароматическим продуктом эпимелил-КоА. Только некоторые микроорганизмы, способные к биodeструкции ароматических соединений, выделены в виде чистых культур. Это *Pseudomonas* sp., *Thaueraaromatica*, *T. chlorobenzoica*, *Desulfobacterium anilini*, *Azoarcusevansii*, *Magnetospirillum* sp., *Delftia acidovorans*, *Rhodospseudomonaspalustris*, *Syntrophus gentianae* и *S. buswellii*. Значительно больше сообщений о биodeградации таких соединений анаэробными микроорганизмами сообществами. В метаногенных условиях конечные стадии биodeструкции представлены археями родов *Methanobacterium*, *Methanospirillum*, *Methanosarcina*, *Methanosaeta*.

Биodeструкции поверхностно-активных веществ типа алкилбензолсульфонатов, имеющих в алкильной цепи от одного до трех атомов углерода, начинаются с сульфатных групп, а у соединений с большим числом атомов - с боковой цепи. В аэробных условиях такие соединения разлагаются бактериями и грибами, способными к деградации ароматических соединений. В отсутствие кислорода разрыв СS-связи сульфоароматических соединений могут проводить бактерии с типом метаболизма основанном на процессах брожения. Процессы анаэробной деградации алкилбен-

золсульфонатов эффективней идут в сообществе, содержащим микроорганизмы родов *Clostridium*, *Desulfovibrio*, *Methanobacterium*, *Methanosarcina*.

Синтрофизм – особый случай симбиотической кооперации между метаболически разными типами бактерий, которые зависят друг от одного при разрушении субстратов [2, с. 35].

Термин "консорциум" используется для описания различных коопераций микроорганизмов. В это понятие входят и такие формы сообществ микроорганизмов, как ассоциация и смешанная культура.

Метаболические взаимодействия кооперированных сообществ зависят от перенесения метаболитов между партнерами. Поток  $H_2$  обратно пропорционален расстоянию между водородобразующими бактериями и водородпотребляющими метаногенами. Оптимальная скорость переноса метаболитов достигается в случае тесного контакта партнеров: непосредственного соседства, образования агрегатов или "флокков".

Подобные флокки образуются, например, у бактерий, разлагающих жирные кислоты. Образование таких структур требует времени (иногда даже месяцев) [3, с. 286].

В настоящее время ведутся работы по изучению анаэробных микробных сообществ, разлагающих аминокислотную и аминосалициловую кислоты и их изомеры. Эти вещества в окислительных условиях полимеризуются в трудно разлагаемые макромолекулы, что затрудняет их расписание, а аэробная деградация приводит к образованию ряда токсических промежуточных продуктов.

Эти исследования проводятся на консорциумах, выделенных мезофильных и термофильных илов.

В настоящее время исследования по биодegradации загрязнений учитываются при разработке различных очистных сооружений. При этом используются разнообразные технологические схемы биореакторов для очистки водоемов, атмосферы, почв.

Биореакторы – это модели биологических систем. Сначала в них использовались естественно сложившиеся консорциумы микроорганизмов, которые использовали субстрат и выдавали продукт, без учета видового состава и взаимодействий между различными видами микроорганизмов внутри консорциума.

В некоторых случаях процесс деградации происходит более эффективно, если за аэробной фазой следует анаэробная, в которой могут участвовать, например, азотолерантные микроорганизмы.

В настоящее время исследования по биодegradации загрязнений учитываются при разработке различных очистных сооружений. При этом используются разнообразные технологические схемы биореакторов для очистки водоёмов, атмосферы, почв. Биореакторы – это модели биологических

систем. Изначально в них использовались естественно сложившиеся консорциумы микроорганизмов, которые потребляли субстрат и выдавали продукт, без учёта видового состава и взаимодействий между различными видами микроорганизмов внутри консорциума. В некоторых случаях процесс деградации происходит более эффективно, если вслед за анаэробной фазой следует анаэробная, в которой могут участвовать, к примеру, аэротолерантные микроорганизмы. В работах по изучению биodeградации аминокислот или аминосалициловой кислот в биореакторах основным “рабочим элементом” являлся мезофильный или термофильный ил очистных сооружений, адаптированный к определённому субстрату. В настоящее время ведутся активные исследования в направлении изучения состава различных синтрофных ассоциаций, деградирующих конкретный субстрат, и увеличения эффективности процесса [4, с. 396].

О микробных сообществах, их разрушающих, известно сравнительно немного, особенно о функциях компонентов, связи их между собой, таксономической принадлежности микроорганизмов. Анаэробные микроорганизмы являются первичными деструкторами гетероциклических и ароматических соединений. Перерабатывая сложные субстраты, они образуют продукты, потребляемые синтрофными микроорганизмами. На конечных этапах деградации субстратов важную роль в синтрофных консорциумах играют сульфатредукторы, метаногены и ацетогены. Они потребляют одно- и двухуглеродные субстраты и водород, выделяя конечные продукты, таким образом участвуя в возвращении углерода и других компонентов аминокислотных субстратов в круговорот веществ в биосфере.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельева, О.В. Проблемы экологии и физиологии микроорганизмов / О.В. Савельева, И.Б. Котова, А.И. Нетрусов. – М. : Диалог, 2000. – 204 с.
2. Общая микробиология / А.Т. Тянь [и др.]. – М. : «Высшая школа», 2005. – 240 с.
3. Шлегель, Г.А. Общая микробиология / Г.А. Тянь. – М. : Мир, 1987. – 346 с.
4. Elder, D. The bacterial degradation of benzoic and benzenoid compounds under anaerobic conditions: Unifying trends and new perspectives / D. Elder, E. Kelly. – London : MG, 1994. – 493 p.