

УДК 579.695; 546.85; 502.55; 661.63

Микроорганизмы деструкторы и их роль в очистке природных сред (обзор)

Миндубаев Антон Зуфарович

Общество с ограниченной ответственностью «Инновационные технологии детоксикации», Казань, Россия; mindubaev-az@yandex.ru

Аннотация

Серьезной проблемой современности является загрязнение окружающей среды и переработка отходов. Одним из лучших путей ее решения является биodeградация – наиболее естественный и экологически безопасный способ уничтожения отходов цивилизации. Представленная статья ставит задачу показать, что наша биосфера находится под надежной и неусыпной охраной микробов деструкторов, для которых самые ядовитые отходы являются лакомством. А заодно осветить возможности биodeградации.

Ключевые слова: биodeградация, редуценты, бактерии, грибы, охрана окружающей среды, метаболизм

Microorganisms destructors and their role in the purification of natural environments (review)

Mindubaev Anton Z.

Limited liability company Innovative technologies of detoxification, Kazan, Russia; mindubaev-az@yandex.ru

Abstract

Environmental pollution and waste recycling remain a precarious problem of our time. One of the best approaches in solving it is biodegradation - the most natural and environmentally friendly way of destroying the waste of civilization. The presented article aims in presenting our biosphere as a territory under a reliable and vigilant protection of destructive microbes, which savor on the most toxic wastes, while highlighting the possibilities of biodegradation.

Key words: biodegradation, reducers, bacteria, fungi, environmental protection, metabolism

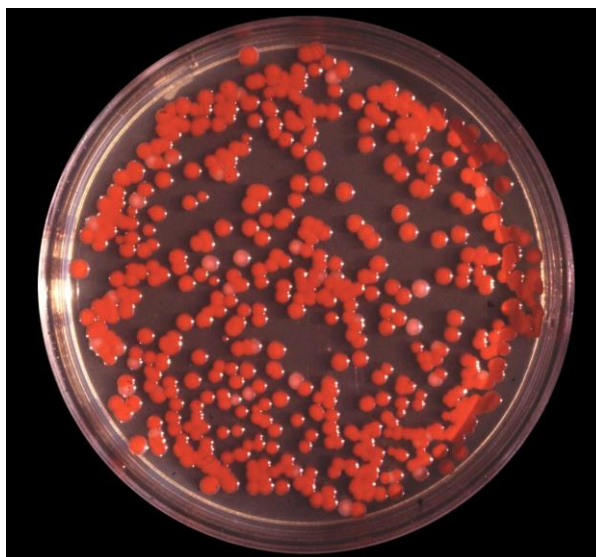
Приспособляемость микробов к условиям окружающей среды удивительна. Ни одна другая группа живых организмов не может сравниться с ними. Бактерии обитают в источниках с температурой воды 120 градусов Цельсия, в охладителях ядерных реакторов и на дне океанов. Выдерживают они и пребывание в космическом пространстве, и перегрузку в сотни тысяч g [38]. Немногим отстают от них споры грибов. Эти примеры никого не оставляют равнодушными, о них много говорят и пишут.

На первый взгляд, причина такой удивительной живучести микробов кажется парадоксальной. Она кроется в их уязвимости. Микробы, в отличие от животных, не могут уйти из опасной зоны. Их размеры малы, а способность к передвижению ограничена. Но из всех живых организмов именно микробы обладают самым быстрым темпом смены поколений.

Соответственно, самой быстрой эволюцией, открывающей почти неограниченные адаптивные возможности. Вот и приспособляются.

Мне, как исследователю, изучающему процессы микробиологической очистки, ближе примеры устойчивости микроорганизмов к химическим загрязнителям [3, 5, 29, 30, 31]. Неспроста экологи относят бактерии и грибы к группе редуцентов – с латыни это слово переводится как «те, кто разлагает». К этой же группе относят ряд низших животных, например, дождевых червей, которых иногда тоже применяют для биodeградации. До сих пор ведутся споры, относить ли к редуцентам некоторые виды бесхлорофилльных растений, таких как подъяльник (*Monotropa*).

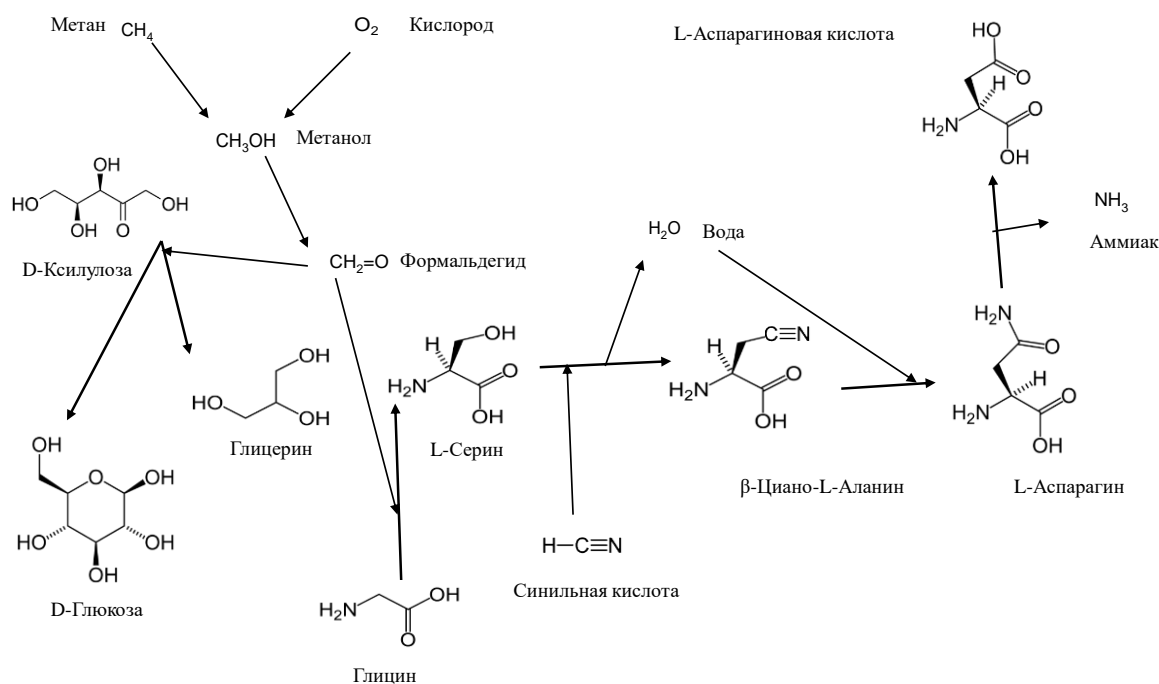
Конечно, первое, что приходит на ум – выработка устойчивости к антибиотикам. Сами микроорганизмы задолго до возникновения нашей цивилизации начали бороться друг с другом при помощи изоциановых токсинов. И выработки устойчивости к последним. Сейчас это явление остро сказывается на развитии медицины, которая очень нуждается в эффективных антимикробных препаратах. А они утрачивают эффективность за считанные годы. Достаточно вспомнить сообщение о том, что антибиотики могут служить единственным источником углерода для культуры микробов (рис. 1) [13]!



*Рис.1. Почвенная бактерия *Serratia marcescens* легко узнаваема благодаря способности к выработке красного пигмента продигиозина [50]. А еще некоторые штаммы этого микроорганизма способны питаться антибиотиками. Изображение с сайта https://en.wikipedia.org/wiki/Serratia_marcescens*

Большинство из нас знает, что сохраненные в формалине биологические образцы не гниют, а совсем незначительное количество цианида убивает человека мгновенно. Совершенно ясно, что у большинства людей, далеких от биохимии, эта пара веществ никак не ассоциируется с живой природой. Ну

разве что как нечто, для нее губительное. Тем не менее, в природе существуют метаболические пути, превращающие формальдегид и цианид в сахара, липиды и аминокислоты! Конечно, один вид бактерий или грибов вряд ли способен обезвредить сразу два опаснейших ксенобиотика. Однако, сообществу видов это вполне по силам, и пути, изображенные на рисунке 2, реально существуют.



*Рис.2. Схема усвоения сразу нескольких токсичных веществ в едином метаболическом пути, демонстрирующая совершенство биохимии микроорганизмов. Окисление метана (который может формироваться как биогенным, так и абиогенным путем [4, 26]) до метанола кислородом [8] осуществляется метанотрофными бактериями [2]. Окисление метанола до формальдегида и синтез из последнего серина, шестиуглеродных и трёхуглеродных сахаров - некоторыми метилотрофными бактериями и дрожжами [47, 7]. Биосинтез β-цианоаланина из синильной кислоты и серина осуществляется некоторыми бактериями и беспозвоночными [9, 10, 48], а последующий биосинтез аспарагина из цианоаланина – бактериями *Pseudomonas pseudoalcaligenes* СЕСТ 5344 и рядом растений [6, 36]. Изображенный на схеме глицин может являться метаболитом еще одного (уже третьего!) ксенобиотика – гербицида глифосата, который бактериями *Pseudomonas aeruginosa* разлагается до полезных продуктов – аминокислоты и фосфата [51]. Рисунок А.З. Миндубаева.*

Очень показательны адаптации микробов к солям тяжелых металлов. Это опасные загрязнители. В отличие от органических токсинов, тяжелые

металлы не могут разлагаться полностью, их атомы остаются в неизменном виде после любых химических превращений. Но перевести металл в малоопасную форму вполне возможно! Микробы именно так и поступают.

Некоторые особо опасные металлы и металлоиды могут образовывать летучие алкилированные соединения. Человеку они давно известны. Например, тетраэтилсвинец длительное время использовался в качестве присадки к топливам, а какодиловая (диметиларсиновая) кислота в позапрошлом веке применялась в качестве пестицида. Подобные соединения обладают высочайшей токсичностью. Собственно, поэтому они вышли из употребления. Но микроорганизмы их синтезируют! Свинец, ртуть, мышьяк, кадмий, олово, селен, теллур, таллий микробы превращают в летучие метильные производные, которые испаряются в атмосферу [16]. Донором метильных групп служит аминокислота метионин в составе микробных клеток. Цель микробов очевидна – они очищают свою среду обитания, совершенно не заботясь о чистоте атмосферы. Тем не менее, биометилирование является одной из основных угроз, связанных с загрязнением тяжелыми металлами.

Итак, биометилирование металлов это опасное явление. Но микробы обезвреживают металлы и другими путями, менее угрожающими. Например, переводя их в нерастворимые в воде формы. Некоторые из них человек может использовать для своих нужд.

Природный уран более чем на 99% состоит из слаборадиоактивного изотопа уран-238, который нельзя использовать в качестве ядерного топлива. В атомной энергетике и ядерном оружии применяется уран-235, которого в природном уране менее 1%. Чтобы получить уран-235, проводят процедуру обогащения. При этом образуется большое количество малоценного обедненного урана. Уран – очень тяжелый металл, его плотность почти втрое выше плотности железа. А радиоактивность обедненного урана низкая. Поэтому, его применяют в тех отраслях, где требуются материалы с высокой плотностью – производстве танковой брони и бронебойных снарядов (рис. 3, вверху слева), балансировочных грузов в кораблях и самолетах, роторов гироскопов, защиты от рентгеновских лучей.

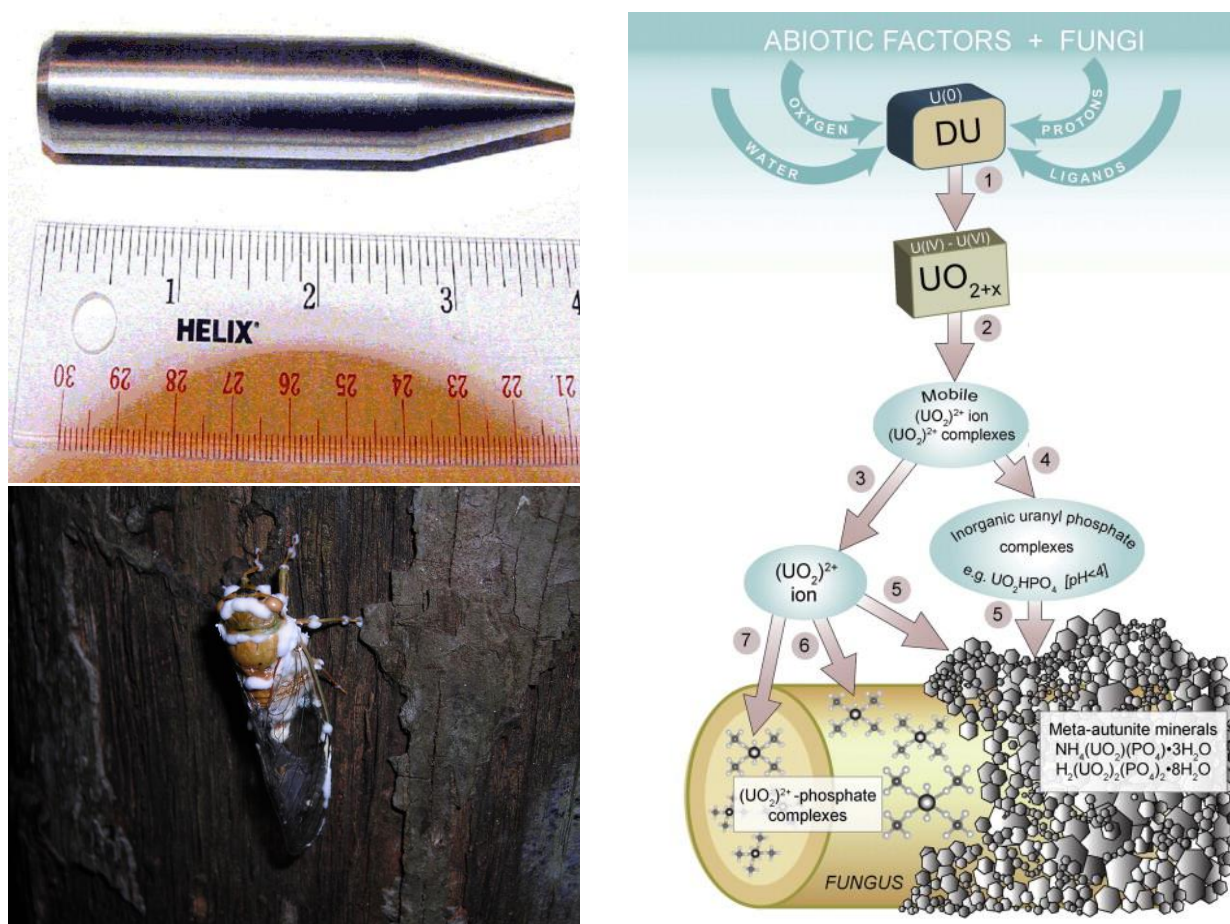


Рис.3. Вверху слева. Сердечник 30 мм снаряда из обедненного урана. Грибы способны его обезвредить! Изображение с сайта https://en.wikipedia.org/wiki/Depleted_uranium. Внизу слева. Цикада, убитая энтомопатогенным грибом *Beauveria*. Изображение с сайта <https://en.wikipedia.org/wiki/Beauveria>. Справа. Схема метаболизма обедненного урана грибами. По [14].

Но обедненный уран – металл не только очень ядовитый, но и обладающий радиоактивностью, пускай и слабой. Соответственно, представляет большую угрозу для окружающей среды. Не может не вызывать удивление способность грибов *Beauveria caledonica* (гриб, паразитирующий на насекомых (рис. 3, внизу слева)), *Rhizopogon rubescens* (гриб, внешне похожий на трюфель) и *Humenoscyphus ericae* (типичный гриб редуцент, вызывающий гниение органических остатков) разлагать металлический обедненный уран [14]. Поверхность урана, покрытая мицелием грибов, окисляется до оксидов IV и VI, которые далее в ряд стадий превращаются сначала в растворимые соли уранила, а затем в нерастворимые фосфаты уранила (рис. 3, справа). Вещества, не растворимые в воде и химически инертные. Соответственно, их опасность для окружающей среды минимальна. То есть, продукты превращений обедненного урана грибами – просто идеальные кандидаты на роль захоронений ядерных отходов. А сами грибы продемонстрировали настоящее биохимическое чудо.

Итак, микробы обезвреживают токсичные вещества разными путями – превращают в пищу, улетучивают в атмосферу, переводят в нерастворимые осадки. Есть еще один путь – обездвижить токсичное вещество в составе своих клеток и тканей.

Циклогексан – токсичный промышленный растворитель и сырье в производстве капролактама. В аэробных условиях, в присутствии кислорода, микробы сравнительно легко окисляют циклогексан до безвредных веществ. В отсутствие кислорода сделать это труднее – как и большинство насыщенных углеводородов, циклогексан устойчив. Так как же его обезвредить? Анаэробные бактерии *Geobacter* sp. FRC-32, выделенные из воды озера Цвишенанер Мер в Германии, существуют в анаэробных условиях за счет так называемого анаммокс процесса – превращают нитрат или нитрит аммония в газообразный азот. Такой способ получения энергии сам по себе делает эту бактерию необычной. Но геобактер, к тому же, еще утилизируют незамещенный циклогексан. Часть его полностью окисляется с раскрытием цикла. Но обезвредить так весь циклогексан бактерия не может. Оставшееся вещество бактерия связывает, присоединяя его к фумаровой кислоте с образованием циклогексилянтарной кислоты (рис. 4). Далее, через ряд стадий образуется циклогексилацетил КоА, участвующий в биосинтезе жирных кислот. В результате образуются необычные жирные кислоты с циклогексильной группой на конце [33].

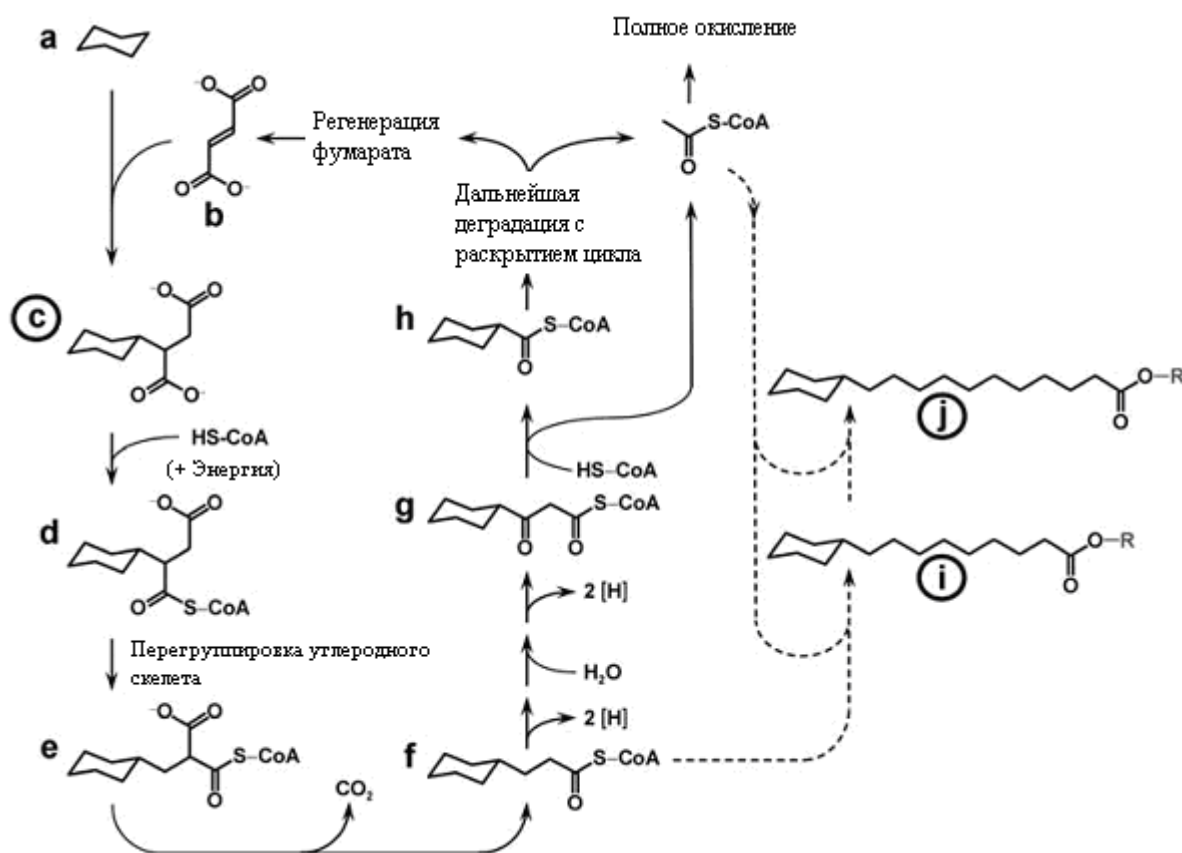


Рис.4. Анаэробный метаболизм циклогексана, приводящий к его иммобилизации в составе жирных кислот. Предполагаемый путь

анаэробной деградации циклогексана. Обведенные кружком буквы обозначают обнаруженные соединения. Циклогексан (a) активируется путем добавления к фумарату (b), давая циклогексилсукцинат (c), который затем может быть активирован до циклогексилсукцинил-КоА (d). Последний может подвергаться перегруппировке углеродного скелета в (циклогексилметил) малонил-КоА (e), который в результате декарбоксилирования (или транскарбоксилирования) приводит к циклогексилпропионил-КоА (f). Основная масса последних разлагается путем регулярного β -окисления через 3-оксо-3-циклогексилпропионил-СоА (g), циклогексилкарбоксил-СоА (h) и расщепление кольца с получением ацетил-СоА, а также нового фумарата для реакции активации. Некоторые циклогексилпропионил-СоА (f) могут вносить вклад в синтез клеточных жирных кислот путем добавления C_2 -звеньев с образованием 9-циклогексилнонаноата (i) и 11-циклогексилундеканоата (j). По [33], с изменениями.

А в дальнейшем эти жирные кислоты могут включиться в состав микробных запасных полимеров – полигидроксиалканоатов, гранулы которых запасаются внутри клеток и не представляют для них вреда [1].

В итоге, разные вещества обезвреживаются микробами разными способами. Но оказывается, различные способы подходят и для утилизации одного соединения. Фенол (гидроксибензол, карболовая кислота, C_6H_5OH) является крупнотоннажным продуктом химической промышленности. Является сырьем в производстве фенолформальдегидных смол и поликарбонатов, фенолфталеина, аспирина. Еще сравнительно недавно применялся в качестве антисептика.

Поскольку фенол является высокоопасным загрязнителем окружающей среды (класс опасности II), важной задачей является очистка от него сточных вод химических предприятий. В настоящее время в России и в мире глубоко исследуется биологическая очистка от фенола, при помощи микробиоты активного ила [24]. Несмотря на высочайшую токсичность и биоцидные свойства фенола, для него известны различные пути метаболизма. Основным из них является классический аэробный метаболизм ароматических соединений до катехина, *цис*, *цис*-муконовой кислоты и далее до ацетилкофермента А, легко вступающего в дальнейшие биохимические превращения [11]. Этим путем разлагают фенол многочисленные бактерии родов *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Rhodococcus*, *Sulfolobus*.

В анаэробных условиях, в отсутствие свободного кислорода, фенол метаболизируется другими путями, без раскрытия ароматического кольца. Сначала фенол фосфорилируется АТФ до фенилфосфата, а затем карбоксилируется в пара-положение. Образуется производное пара-гидроксибензойной кислоты (парабена). Далее ароматический цикл может гидрироваться и терять ароматичность. В результате, фенол превращается в безопасные метаболиты, такие как ацетил-КоА [23] (рис. 5).

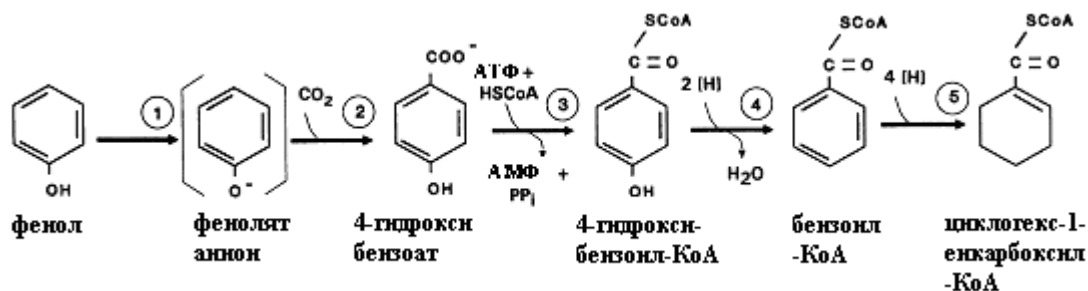


Рис.5. Анаэробный метаболизм фенола, по [23], с изменениями

Чрезвычайно интересные реакции с фенолом осуществляет фермент β -тирозиназа (тирозинфеноллизаз) из бактерии *Escherichia intermedia*. Нормальная реакция, катализируемая этим ферментом – элиминирование аминокислоты L-тирозина до фенола, пировиноградной кислоты и аммиака. Однако, данная реакция обратима. β -тирозиназа может превращать пируват аммония в аминокислоту 2,3-дидегидроаланин и воду, и присоединять фенол к дегидроаланину с образованием L-тирозина [35]. L-Тирозин – это аминокислота, входящая в состав белков [18, 40] и являющаяся предшественником множества вторичных метаболитов – гормонов [12, 32], алкалоидов [41], пигментов [19, 42, 44], антибиотиков [17, 46], токсинов [22], лигнина [27]. Так токсичный загрязнитель окружающей среды может превращаться в незаменимую аминокислоту и важные биологические соединения.

Авторы статьи [20], К. Ким и П. Коул из Лаборатории биоорганической химии Университета Рокфеллера (США), тоже работали с фенолом и β -тирозиной – из другой, правда, бактерии, *Citrobacter freundii*. А пировиноградную кислоту заменили ее гомологом, α -кетомасляной кислотой. В результате получили аминокислоту (2S, 3R)- β -метилтирозин, не найденную в природе. Предполагается, что β -метилтирозин может проявить лекарственную активность, в частности, подавлять рост опухолей. Коллективу авторов из Миланского технического университета (Италия) удалось при помощи β -тирозинызы *Escherichia intermedia* получить L-тирозин из фенола, путем конденсации его с аминокислотой L-серином с отщеплением воды [15]. Сотрудникам корпорации Генекс (США) удалось произвести совсем удивительный синтез L-тирозина сразу из двух ядовитых ксенобиотиков – фенола и формальдегида! Исследователи присоединили их к глицину при помощи комплекса двух ферментов: серингидроксиметилтрансферазы из *Klebsiella aerogenes* и β -тирозинызы из *Erwinia herbicola* (ATCC 21434) [25].

Наконец, при помощи ферментов пероксидаз растений удается полимеризовать фенол и получать полимер полифенол – материал, который, по свойствам похож на фенолформальдегидные пластики и, возможно, придет им на смену [39]. Все-таки ферментативная полимеризация более экологически чистая, да и ядовитый формальдегид исключается из

технологического цикла. Полимеризация, помимо прочего, приводит к утрате веществом токсических свойств.

Любопытно, что сам фенол вырабатывается микроорганизмами как промежуточный продукт биodeградации другого опасного промышленного загрязнителя – бензола C_6H_6 [43, 49]. То есть, все перечисленные выше пути переработки фенола подходят также и для бензола.

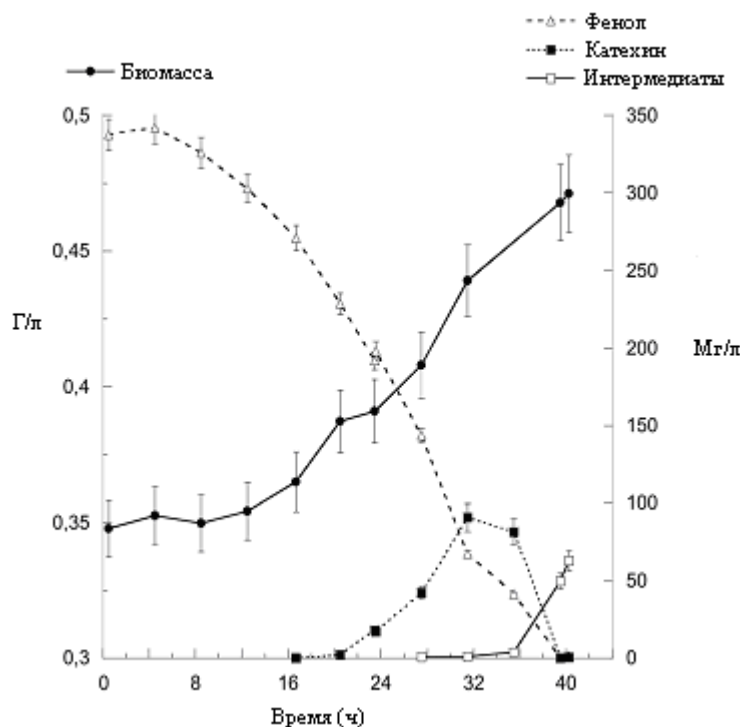


Рис.6. Снижение концентрации фенола в загрязненной среде в результате биodeградации штаммом гипертермофильной археи *Sulfolobus solfataricus* 98/2 на протяжении 40 часов, по [11], с изменениями

Многообразие метаболических путей превращений одних и тех же веществ, конечно же, имеет эволюционные корни. Метаболизм микробов является указателем их происхождения и родственных связей. Каждая группа микробов вырабатывала способность к биodeградации самостоятельно, в этом причина различий.

В конечном итоге биodeградация позволяет эффективно снижать концентрацию фенола в сточных водах (рис. 6). Это же касается любого загрязнения.

Логика эволюционного процесса подсказывает, что искать микроорганизмы деструкторы нужно в тех местах, где почва или вода загрязнены химическими отходами. Понятно, что адаптации к обезвреживанию токсичных веществ могут возникать только в их присутствии. Ученые именно там их и ищут – на территории химических предприятий, в прудах-отстойниках сточных вод.

К примеру, поливинилхлорид (ПВХ) является одним из важнейших полимеров (рис. 7). Из этой пластмассы изготавливают широчайший набор предметов, от хирургических перчаток до водопроводных труб. Ставшие сегодня раритетными «виниловые» грампластинки тоже делали из этого материала. ПВХ хорош всем, кроме одного – не выдерживает стандартов «зеленой химии», содержит хлор. Это делает очень опасными продукты разложения ПВХ, в частности, горения. И в значительной степени затрудняет его биодegradацию.

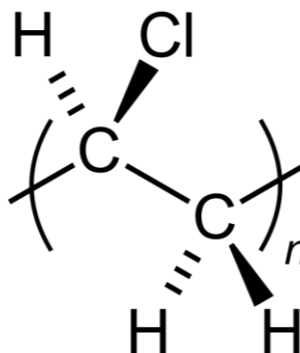


Рис.7. Химическая структура поливинилхлорида. Изображение с сайта https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_chloride, с изменениями.

С другой стороны, грибы редуценты вырабатывают ферменты лакказы, осуществляющие окисление молекулярным кислородом самых труднодоступных субстратов, таких как лигнин. Некоторым грибам это позволяет паразитировать на растениях. Несколько видов фитопатогенных грибов из рода *Cochliobolus* поражают злаковые культуры и вызывают некроз тканей (рис. 8). Но вот что интересно. Из почвы в окрестностях предприятия в Ренигунте (Индия), производящего пластмассы, выделен гриб *Cochliobolus* sp., состоящий в близком родстве с фитопатогенами и способный при помощи своих лакказ разлагать поливинилхлорид. Гриб даже способен расти в средах, содержащих ПВХ в качестве единственного источника углерода, то есть для него этот пластик стал полноценным пищевым продуктом [45].



Рис.8. Слева. Листовая пластинка риса, пораженная грибом *Cochliobolus miyabeanus*. Изображение с сайта https://en.wikipedia.org/wiki/Cochliobolus_miyabeanus

Справа. Плодовые тела (аски, заполненные аскоспорами) Cochliobolus heterostrophus. Изображение с сайта <http://www.plantpath.cornell.edu/>

Созданию штаммов, осуществляющих биodeградацию, способствует и генная инженерия. Например, алкилбензойные кислоты с трудом поддаются микробному метаболизму. Дело в том, что промежуточными продуктами деградации этих ксенобиотиков являются алкилкатехины, а они, в свою очередь, ингибируют фермент 2,3-катехиндиоксигеназу – важное звено в метаболизме ароматических соединений. Ученые преодолели это препятствие, выращивая бактерии псевдомонады, в норме расщепляющие бензойную кислоту, в присутствии сильного мутагена. Некоторые из штаммов мутантов стали вырабатывать измененную 2,3-катехиндиоксигеназу, не ингибируемую алкилкатехинами, и без труда обезвреживать *n*-этилбензоат [37].

Распространению в популяциях микробов способности к биodeградации очень способствует такое явление, как горизонтальный перенос генов. Прокариотические организмы могут передавать свой наследственный материал не только привычным для нас образом, прямым потомкам, но и отдаленным родственникам, представителям других штаммов и даже видов. Поэтому многие микробиологи считают понятие «вид» для бактерий условным. В результате, когда генетически модифицированные бактерии, обезвреживающие замещенные бензоаты, были внедрены в сообщество активного ила, то путем горизонтального переноса генов эта способность распространилась среди местной, автохтонной микрофлоры [34].

Приспособительные возможности микроорганизмов поражают. Статья [28] посвящена примерам биodeградации нефтепродуктов в экстремальных условиях (значения температуры, pH, солености, давления). Не стоит забывать о том, что присутствие в окружающей среде токсичных веществ – само по себе неблагоприятный фактор. То есть, микробы оказываются приспособленными по целому спектру экстремальных условий!

Еще недавно считалось, что биodeградация возможна только в интервале температур 20–40 °С. Микробиологи называют эти условия «мезофильными». Но в реальности температура может быть гораздо ниже, скажем, у нас в России, прежде всего, в Сибири или за Полярным кругом. И что, в этих условиях биodeградация неприменима? Оказывается, применима. Пресловутая генная инженерия позволила переносить плазмиды с генами, отвечающими за биodeградацию, в бактерии психрофилы, растущие в диапазоне температур 0-20 °С [21]. Это значит, что биodeградация, скажем, нефтепродуктов возможна и в Арктике, освоение которой стало приоритетной задачей.

Таким образом, редуценты микробы являются настоящими санитарами нашей планеты, надежными защитниками даже от самых ядовитых загрязнителей. А ученые, зная особенности их жизни, могут влиять на

процесс биодegradации и добиваться большей его эффективности, даже в самых неблагоприятных и суровых условиях.

Список литературы

1. Акименко В.К. Полигидроксиалканоаты микроорганизмов: поиск природных и конструирование рекомбинантных штаммов-продуцентов, биосинтез, использование // Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрыбина РАН. М.: ТИРУ. 2015. 284 с.
2. Каллистова А.Ю., Меркель А.Ю., Тарновецкий И.Ю., Пименов Н.В. Образование и окисление метана прокариотами // Микробиология. 2017. Т.86. № 6. С. 661-683. DOI: 10.7868/S002636561706009X
3. Миндубаев А.З., Бабынин Э.В., Волошина А.Д., Акосах Й. А., Сапармырадов К.А., Минзанова С.Т., Миронова Л.Г., Бадеева Е.К. О биологической деградации белого фосфора // Живые и биокосные системы. 2019. №28. С. 1-24.
4. Миндубаев А.З., Белостоцкий Д.Е., Минзанова С.Т., Миронов В.Ф., Алимова Ф.К., Миронова Л.Г., Коновалов А.И. Метаногенез: Биохимия, Технология, Применение // Учен.зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2010. Т.152. №2. С.178-191.
5. Миндубаев А.З., Кузнецова С.В., Евтюгин В.Г., Даминова А.Г., Григорьева Т.В., Романова Ю.Д., Романова В.А., Бабаев В.М., Бузюрова Д.Н., Бабынин Э.В., Бадеева Е.К., Минзанова С.Т., Миронова Л.Г. Влияние белого фосфора на выживаемость, протеом и клеточную морфологию *Aspergillus niger* // Прикладная биохимия и микробиология. - 2020. - Т.56. - №.2. – С.156-164. DOI: 10.31857/S0555109920020117
6. Acera F., Carmona M.I., Castillo F., Quesada A., Blascoa R. A Cyanide-Induced 3-Cyanoalanine Nitrilase in the Cyanide-Assimilating Bacterium *Pseudomonas pseudoalcaligenes* Strain CECT 5344 // Appl Environ Microbiol. 2017. Vol.83. No.9. e00089-17. DOI: [10.1128/AEM.00089-17](https://doi.org/10.1128/AEM.00089-17)
7. Bhosale S.H., Rao M.B., Deshpande V.V. Molecular and Industrial Aspects of Glucose Isomerase // Microbiological Reviews. 1996. Vol.60. No.2. P.280-300. DOI: 10.1128/MMBR.60.2.280-300.1996
8. Bosak T., Bush J.W.M., Flynn M.R., Liang B., Ono S., Petroff A.P., Sim M.S. Formation and stability of oxygen-rich bubbles that shape photosynthetic mats // Geobiology. 2010. Vol.8. No.1. P.45-55. DOI: 10.1111/j.1472-4669.2009.00227.x.
9. Budde M.W., Roth M.B. The Response of *Caenorhabditis elegans* to Hydrogen Sulfide and Hydrogen Cyanide // Genetics. 2011. Vol. 189. 521-532. DOI: [10.1534/genetics.111.129841](https://doi.org/10.1534/genetics.111.129841)
10. Castric P.A., Conn E.E. Formation of 3-Cyanoalanine by O-Acetylserine Sulfhydrylase // Journal Of Bacteriology.1971. Vol.108. No.1. P.132-136.

11. Comte A., Christen P., Davidson S., Pophillat M., Lorquin J., Auria R., Simon G., Casalot L. Biochemical, Transcriptional and Translational Evidences of the Phenol-meta-Degradation Pathway by the Hyperthermophilic *Sulfolobus solfataricus* 98/2. PLoS ONE. 2013. Vol.8. No. 12. e82397 DOI: 10.1371/journal.pone.0082397
12. Cosentino M., Marino F. Adrenergic and Dopaminergic Modulation of Immunity in Multiple Sclerosis: Teaching Old Drugs New Tricks? // J Neuroimmune Pharmacol. 2013. Vol.8. No.1. P.163-179. DOI: [10.1007/s11481-012-9410-z](https://doi.org/10.1007/s11481-012-9410-z)
13. Dantas G., Sommer M.O.A., Oluwasegun R.D., Church G.M. Bacteria Subsisting on Antibiotics // Science. 2008. Vol. 320. No. 5872. P.100-103. DOI: 10.1126/science.1155157
14. Fomina M., Charnock J.M., Hillier S., Alvarez R., Livens F., Gadd G.M. Role of fungi in the biogeochemical fate of depleted uranium // Current Biology. 2008. Vol .18. No. 9. P. R375-R377. DOI: 10.1016/j.cub.2008.03.011
15. Fuganti C., Ghiringhelli D., Giangrasso D., Grasselli P. Stereochemical course of the enzymic synthesis of L-tyrosine from phenol and L-serine catalysed by tyrosine phenol lyase from *Escherichia intermedia* // J. Chem. Soc., Chem. Commun. 1974. No.18. P.726-727. DOI: 10.1039/C39740000726
16. Gadd G.M. Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation // Microbiology. 2010. Vol. 156. No.3. P. 609-643. DOI 10.1099/mic.0.037143-0
17. Gross H., Loper J.E. Genomics of secondary metabolite production by *Pseudomonas* spp // Nat. Prod. Rep. 2009. Vol. 26. No.11. P.1408-1446. DOI: [10.1039/b817075b](https://doi.org/10.1039/b817075b)
18. Holliday G.L., Mitchell J.B.O., Thornton J.M. Understanding the Functional Roles of Amino Acid Residues in Enzyme Catalysis // J. Mol. Biol. 2009. Vol. 390. 3. P.560-577. DOI: 10.1016/j.jmb.2009.05.015.
19. Jones L.H., Narayanan A., Hett E.C. Understanding and applying tyrosine biochemical diversity // Mol. BioSyst. 2014. Vol.10. No.5. P.952-969. DOI: [10.1039/C4MB00018H](https://doi.org/10.1039/C4MB00018H)
20. Kim K., Cole P.A. Synthesis of (2S,3R)- β -methyltyrosine catalyzed by tyrosine phenol-lyase // Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters. 1999. Vol.9. No.8. P.1205-1208. DOI: 10.1016/s0960-894x(99)00162-6
21. Kolenc R.J., Inniss W.E., Glick B.R., Robinson C.W., Mayfield C.I. Transfer and Expression of Mesophilic Plasmid-Mediated Degradative Capacity in a Psychrotrophic Bacterium // Applied and Environmental Microbiology.1988. Vol. 54, No.3. P. 638-641. DOI: 10.1128/AEM.54.3.638-641.1988
22. Kristensen C., Morant M., Olsen C.E., Ekstrøm C.T., Galbraith D.W., Møller B.L., Bak S. Metabolic engineering of dhurrin in transgenic *Arabidopsis* plants with marginal inadvertent effects on the metabolome and transcriptome // PNAS. 2005. Vol. 102. No. 5. P. 1779-1784. DOI: [10.1073/pnas.0409233102](https://doi.org/10.1073/pnas.0409233102)

23. Lack A., Fuchs G. Carboxylation of Phenylphosphate by Phenol Carboxylase, an Enzyme System of Anaerobic Phenol Metabolism. *Journal of bacteriology*. 1992. Vol. 174. No. 11. P. 3629-3636. DOI: [10.1128/jb.174.11.3629-3636.1992](https://doi.org/10.1128/jb.174.11.3629-3636.1992)
24. Lallement A., Besaury L., Tixier E., Sancelme M., Amato P., Vinatier V., Canet I., Polyakova O.V., Artaev V.B., Lebedev A.T., Deguillaume L., Mailhot G., Delort A.-M. Potential for phenol biodegradation in cloud waters. *Biogeosciences*. 2018. Vol. 15. P.5733-5744. DOI: [10.5194/bg-15-5733-2018](https://doi.org/10.5194/bg-15-5733-2018)
25. Lee T.K., Hsiao H.-y. Synthesis of L-tyrosine by a coupled reaction of serine hydroxymethyltransferase and β -tyrosinase // *Enzyme and Microbial Technology*. 1986. Vol.8. No.9. P. 523-526. DOI: [10.1016/0141-0229\(86\)90034-7](https://doi.org/10.1016/0141-0229(86)90034-7)
26. Lopes R.M.C., Malaska M.J., Schoenfeld A.M., Solomonidou A., Birch S.P.D., Florence M., Hayes A.G., Williams D.A., Radebaugh J., Verlander T., Turtle E. P., Le Gall A., Wall S.D. A global geomorphologic map of Saturn's moon Titan // *Nature Astronomy*. 2019. DOI: [10.1038/s41550-019-0917-6](https://doi.org/10.1038/s41550-019-0917-6).
27. Maeda H.A. Lignin biosynthesis. Tyrosine shortcut in grasses // *Nature Plants*. Vol.2. No.16080. P. 1-2. DOI: [10.1038/NPLANTS.2016.80](https://doi.org/10.1038/NPLANTS.2016.80)
28. Margesin R., Schinner F. Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments // *Appl Microbiol Biotechnol*. 2001. Vol. 56. No.5-6. P. 650-663. DOI: [10.1007/s002530100701](https://doi.org/10.1007/s002530100701)
29. Meckenstock R.U., Elsner M., Griebler C., Lueders T., Stumpp C., Aamand J., Agathos S.N., Albrechtsen H.-J., Bastiaens L., Bjerg P.L., Boon N., Dejonghe W., Huang W.E., Schmidt S.I., Smolders E., Sørensen S.R., Springael D., van Breukelen B.M. Biodegradation: Updating the Concepts of Control for Microbial Cleanup in Contaminated Aquifers // *Environ. Sci. Technol*. 2015. Vol.49. No.12. P.7073-7081. DOI: [10.1021/acs.est.5b00715](https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00715)
30. Mindubaev A.Z., Babynin E.V., Voloshina A.D., Saparmyradov K.A., Akosah Y.A., Badeeva E.K., Minzanova S.T., Mironova L.G. The possibility of neutralizing white phosphorus using microbial cultures // *News of NAS RK. Series of geology and technical sciences*. - 2019. - Vol.5. - No.437. - P.122-128. DOI: [10.32014/2019.2518-1491.63](https://doi.org/10.32014/2019.2518-1491.63)
31. Mindubaev A.Z., Kuznetsova S.V., Evtugin V.G., Daminova A.G., Grigoryeva T.V., Romanova Y.D., Romanova V.A., Babaev V.M., Buzyurova D.N., Babynin E.V., Badeeva E.K., Minzanova S.T., Mironova L.G. Effect of White Phosphorus on the Survival, Cellular Morphology, and Proteome of *Aspergillus niger* // *Applied Biochemistry and Microbiology*. - 2020. - Vol. 56. - No. 2. - P. 194-201. DOI: [10.1134/S0003683820020118](https://doi.org/10.1134/S0003683820020118)
32. Mondal S., Raja K., Schweizer U., Mugesh G. Chemistry and Biology in the Biosynthesis and Action of Thyroid Hormones // *Angew.Chem.Int. Ed*. 2016. Vol. 55. No.27. P.7606-7630. DOI: [10.1002/anie.201601116](https://doi.org/10.1002/anie.201601116)
33. Musat F., Wilkes H., Behrends A., Woebken D., Widdel F. Microbial nitrate-dependent cyclohexane degradation coupled with anaerobic ammonium oxidation

- // The ISME Journal. 2010. Vol. 4. No. 10. P. 1290-1301.
DOI:10.1038/ismej.2010.50
34. Nüsslein K., Maris D., Timmis K., Dwyer D.F. Expression and Transfer of Engineered Catabolic Pathways Harbored by *Pseudomonas* spp. Introduced into Activated Sludge Microcosms // *Appl Environ Microbiol.* 1992. Vol.58. No.10. P. 3380-3386. DOI: 10.1128/AEM.58.10.3380-3386.1992
35. Palcic M.M., Shen S.-J., Schleicher E., Kumagai H., Sawada S., Yamada H., Floss H.G. Stereochemistry and Mechanism of Reactions Catalyzed by Tyrosine Phenol-Lyase from *Escherichia intermedia*. *Z. Naturforsch.* 1987. Vol.42. No.2. P.307-318. DOI: [10.1515/znc-1987-0401](https://doi.org/10.1515/znc-1987-0401)
36. Piotrowski M., Volmer J.J. Cyanide metabolism in higher plants: cyanoalanine hydratase is a NIT4 homolog // *Plant Molecular Biology.* 2006. Vol.61. No.1-2. P.111–122. DOI 10.1007/s11103-005-6217-9
37. Ramos J.L., Wasserfallen A., Rose K., Timmis K.N. Redesigning metabolic routes: manipulation of TOL plasmid pathway for catabolism of alkylbenzoates // *Science.* 1987. Vol.235. No.4788. P.593-596. DOI: 10.1126/science.3468623
38. Rampelotto P.H. Resistance of Microorganisms to Extreme Environmental Conditions and Its Contribution to Astrobiology // *Sustainability.* 2010. Vol. 2. No.6. P.1602-1623. DOI: 10.3390/su2061602
39. Reihmann M., Ritter H. Synthesis of Phenol Polymers Using Peroxidases. *Adv Polym Sci.* 2006. Vol. 194. No.1. P.1-49. DOI: [10.1007/12_034](https://doi.org/10.1007/12_034)
40. Roskoski R. Src protein–tyrosine kinase structure and regulation // *Biochemical and Biophysical Research Communications.* 2004. Vol.324. No.4. P. 1155-1164. DOI: 10.1016/j.bbrc.2004.09.171
41. Schenck C.A., Maeda H.A. Tyrosine biosynthesis, metabolism, and catabolism in plants // *Phytochemistry.* 2018. Vol. 149. No.82e102. P.82-102. DOI: [10.1016/j.phytochem.2018.02.003](https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2018.02.003)
42. Shamim G., Ranjan S.K., Pandey D.M., Ramani R. Biochemistry and biosynthesis of insect pigments // *Eur. J. Entomol.* 2014. Vol.111. No.2. P. 149-164. DOI: 10.14411/eje.2014.021
43. Snyder R., Hedli C.C. An Overview of Benzene Metabolism // *Environmental Health Perspectives.* – 1996. Vol.104. No.6. P.1165-1171. DOI: [10.1289/ehp.961041165](https://doi.org/10.1289/ehp.961041165)
44. Strack D., Vogt T., Schliemann W. Recent advances in betalain research // *Phytochemistry.* 2003. Vol.62. No.3. P.247-269. DOI: [10.1016/S0031-9422\(02\)00564-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(02)00564-2)
45. Sumathi T., Viswanath B., Sri Lakshmi A., SaiGopal D.V.R. Production of Laccase by *Cochliobolus* sp. Isolated from Plastic Dumped Soils and Their Ability to Degrade Low Molecular Weight PVC // *Biochemistry Research International.* 2016. Vol. 2016. No.9519527. P.1-10. DOI: 10.1155/2016/9519527

46. Süßmuth R.D., Mainz A. Nonribosomal Peptide Synthesis - Principles and Prospects // *Angew.Chem.Int. Ed.* 2017. Vol.56. No.14. P.3770-3821. DOI: 10.1002/anie.201609079
47. Van der Klei I.J., Yurimoto H., Sakai Y., Veenhuis M. The significance of peroxisomes in methanol metabolism in methylotrophic yeast // *Biochimica et Biophysica Acta.* 2006. Vol. 1763. No. 12. P. 1453-1462. DOI: 10.1016/j.bbamcr.2006.07.016.
48. Vozdek R., Hnízda A., Krijt J., Šerá L., Kožich V. Biochemical properties of nematode O-acetylserine(thiol)lyase paralogs imply their distinct roles in hydrogen sulfide homeostasis // *Biochimica et Biophysica Acta.* 2013. Vol.1834. No.12. P.2691-2701. DOI: 10.1016/j.bbapap.2013.09.020
49. Weelink S.A.B., van Eekert M.H.A., Stams A.J.M. Degradation of BTEX by anaerobic bacteria: physiology and application // *Rev Environ Sci Biotechnol.* 2010. Vol.9. No.4. P.359-385. DOI: [10.1007/s11157-010-9219-2](https://doi.org/10.1007/s11157-010-9219-2)
50. Williamson N.R., Simonsen H.T., Harris A.K.P., Leeper F.J., Salmond G.P.C. Disruption of the copper efflux pump (CopA) of *Serratia marcescens* ATCC 274 pleiotropically affects copper sensitivity and production of the tripyrrole secondary metabolite, prodigiosin // *J Ind Microbiol Biotechnol.* 2006. Vol. 33. No.2. P.151-158. DOI: [10.1007/s10295-005-0040-9](https://doi.org/10.1007/s10295-005-0040-9)
51. Willsey G.G., Wargo M.J. Sarcosine Catabolism in *Pseudomonas aeruginosa* Is Transcriptionally Regulated by SouR // *J Bacteriol.* Vol.198. No.2. P.301-310. DOI: 10.1128/JB.00739-15.

Spisok literatury

1. Akimenko V.K. The polyhydroxyalkanoates of microorganisms: search of natural and construction of recombinant strains of primary producers, biosynthesis, using. Skryabin Institute of biochemistry and physiology of microorganisms. M.: TiRu. 2015. 284p. (In Russian).
2. Kallistova A.Y., Merkel A.Y., Pimenov N.V., Tarnovetskii I.Y. Methane formation and oxidation by prokaryotes. *Microbiology (Mikrobiologiya)*. 2017. T. 86. № 6. C. 671-691 (In Russian). DOI: 10.7868/S002636561706009X
3. Mindubaev A.Z., Babynin E.V., Voloshina A.D., Akosah Y.A., Saparmyradov K.A., Minzanova S.T., Mironova L.G., Badeeva E.K. On the biological degradation of white phosphorus // *Living and bio-inert systems.* 2019. No28. P. 1-24. (In Russian).
4. Mindubaev A.Z., Minzanova S.T., Mironov V.F., Zobov V.V., Alimova F.K., Mironova L.G., Belostotskii D.E., Konovalov A.I. The methanogenesis: biochemistry, technology, using // *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki.* 2010. Vol. 152. No. 2. P. 178-191. (In Russian).
5. Mindubaev A.Z., Kuznetsova S.V., Evtyugin V.G., Daminova A.G., Grigoryeva T.V., Romanova Y.D., Romanova V.A., Babaev V.M., Buzyurova D.N., Babynin
Mindubaev A. Z., Микроорганизмы деструкторы и их роль в очистке природных сред (обзор) // «Живые и биокосные системы». – 2020. – № 31; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-31/article-7>

- E.V., Badeeva E.K., Minzanova S.T., Mironova L.G. Effect of White Phosphorus on the Survival, Cellular Morphology, and Proteome of *Aspergillus niger* // Prikladnaya Biokhimiya i Mikrobiologiya. 2020. Vol. 56. No. 2. P. 156-164. (In Russian). DOI: 10.31857/S0555109920020117
6. Acera F., Carmona M.I., Castillo F., Quesada A., Blascoa R. A Cyanide-Induced 3-Cyanoalanine Nitrilase in the Cyanide-Assimilating Bacterium *Pseudomonas pseudoalcaligenes* Strain CECT 5344 // Appl Environ Microbiol. 2017. Vol.83. No.9. e00089-17. DOI: [10.1128/AEM.00089-17](https://doi.org/10.1128/AEM.00089-17)
 7. Bhosale S.H., Rao M.B., Deshpande V.V. Molecular and Industrial Aspects of Glucose Isomerase // Microbiological Reviews. 1996. Vol.60. No.2. P.280-300. DOI: 10.1128/MMBR.60.2.280-300.1996
 8. Bosak T., Bush J.W.M., Flynn M.R., Liang B., Ono S., Petroff A.P., Sim M.S. Formation and stability of oxygen-rich bubbles that shape photosynthetic mats // Geobiology. 2010. Vol.8. No.1. P.45-55. DOI: 10.1111/j.1472-4669.2009.00227.x.
 9. Budde M.W., Roth M.B. The Response of *Caenorhabditis elegans* to Hydrogen Sulfide and Hydrogen Cyanide // Genetics. 2011. Vol. 189. 521-532. DOI: [10.1534/genetics.111.129841](https://doi.org/10.1534/genetics.111.129841)
 10. Castric P.A., Conn E.E. Formation of 3-Cyanoalanine by O-Acetylserine Sulfhydrylase // Journal Of Bacteriology.1971. Vol.108. No.1. P.132-136.
 11. Comte A., Christen P., Davidson S., Pophillat M., Lorquin J., Auria R., Simon G., Casalot L. Biochemical, Transcriptional and Translational Evidences of the Phenol-meta-Degradation Pathway by the Hyperthermophilic *Sulfolobus solfataricus* 98/2. PLoS ONE. 2013. Vol.8. No. 12. e82397 DOI: [10.1371/journal.pone.0082397](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082397)
 12. Cosentino M., Marino F. Adrenergic and Dopaminergic Modulation of Immunity in Multiple Sclerosis: Teaching Old Drugs New Tricks? // J Neuroimmune Pharmacol. 2013. Vol.8. No.1. P.163-179. DOI: [10.1007/s11481-012-9410-z](https://doi.org/10.1007/s11481-012-9410-z)
 13. Dantas G., Sommer M.O.A., Oluwasegun R.D., Church G.M. Bacteria Subsisting on Antibiotics // Science. 2008. Vol. 320. No. 5872. P.100-103. DOI: [10.1126/science.1155157](https://doi.org/10.1126/science.1155157)
 14. Fomina M., Charnock J.M., Hillier S., Alvarez R., Livens F., Gadd G.M. Role of fungi in the biogeochemical fate of depleted uranium // Current Biology. 2008. Vol .18. No. 9. P. R375-R377. DOI: [10.1016/j.cub.2008.03.011](https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.03.011)
 15. Fuganti C., Ghiringhelli D., Giangrasso D., Grasselli P. Stereochemical course of the enzymic synthesis of L-tyrosine from phenol and L-serine catalysed by tyrosine phenol lyase from *Escherichia intermedia* // J. Chem. Soc., Chem. Commun. 1974. No.18. P.726-727. DOI: [10.1039/C39740000726](https://doi.org/10.1039/C39740000726)
 16. Gadd G.M. Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation // Microbiology. 2010. Vol. 156. No.3. P. 609-643. DOI [10.1099/mic.0.037143-0](https://doi.org/10.1099/mic.0.037143-0)
 17. Gross H., Loper J.E. Genomics of secondary metabolite production by *Pseudomonas* spp // Nat. Prod. Rep. 2009. Vol. 26. No.11. P.1408-1446. DOI: [10.1039/b817075b](https://doi.org/10.1039/b817075b)

18. Holliday G.L., Mitchell J.B.O., Thornton J.M. Understanding the Functional Roles of Amino Acid Residues in Enzyme Catalysis // *J. Mol. Biol.* 2009. Vol. 390. 3. P.560-577. DOI: 10.1016/j.jmb.2009.05.015.
19. Jones L.H., Narayanan A., Hett E.C. Understanding and applying tyrosine biochemical diversity // *Mol. BioSyst.* 2014. Vol.10. No.5. P.952-969. DOI: [10.1039/C4MB00018H](https://doi.org/10.1039/C4MB00018H)
20. Kim K., Cole P.A. Synthesis of (2*S*,3*R*)- β -methyltyrosine catalyzed by tyrosine phenol-lyase // *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters.* 1999. Vol.9. No.8. P.1205-1208. DOI: 10.1016/s0960-894x(99)00162-6
21. Kolenc R.J., Inniss W.E., Glick B.R., Robinson C.W., Mayfield C.I. Transfer and Expression of Mesophilic Plasmid-Mediated Degradative Capacity in a Psychrotrophic Bacterium // *Applied and Environmental Microbiology.* 1988. Vol. 54, No.3. P. 638-641. DOI: 10.1128/AEM.54.3.638-641.1988
22. Kristensen C., Morant M., Olsen C.E., Ekstrøm C.T., Galbraith D.W., Møller B.L., Bak S. Metabolic engineering of dhurrin in transgenic *Arabidopsis* plants with marginal inadvertent effects on the metabolome and transcriptome // *PNAS.* 2005. Vol. 102. No. 5. P. 1779-1784. DOI: [10.1073/pnas.0409233102](https://doi.org/10.1073/pnas.0409233102)
23. Lack A., Fuchs G. Carboxylation of Phenylphosphate by Phenol Carboxylase, an Enzyme System of Anaerobic Phenol Metabolism. *Journal of bacteriology.* 1992. Vol. 174. No. 11. P. 3629-3636. DOI: [10.1128/jb.174.11.3629-3636.1992](https://doi.org/10.1128/jb.174.11.3629-3636.1992)
24. Lallement A., Besaury L., Tixier E., Sancelme M., Amato P., Vinatier V., Canet I., Polyakova O.V., Artaev V.B., Lebedev A.T., Deguillaume L., Mailhot G., Delort A.-M. Potential for phenol biodegradation in cloud waters. *Biogeosciences.* 2018. Vol. 15. P.5733-5744. DOI: [10.5194/bg-15-5733-2018](https://doi.org/10.5194/bg-15-5733-2018)
25. Lee T.K., Hsiao H.-y. Synthesis of L-tyrosine by a coupled reaction of serine hydroxymethyltransferase and β -tyrosinase // *Enzyme and Microbial Technology.* 1986. Vol.8. No.9. P. 523-526. DOI: 10.1016/0141-0229(86)90034-7
26. Lopes R.M.C., Malaska M.J., Schoenfeld A.M., Solomonidou A., Birch S.P.D., Florence M., Hayes A.G., Williams D.A., Radebaugh J., Verlander T., Turtle E. P., Le Gall A., Wall S.D. A global geomorphologic map of Saturn's moon Titan // *Nature Astronomy.* 2019. DOI: 10.1038/s41550-019-0917-6.
27. Maeda H.A. Lignin biosynthesis. Tyrosine shortcut in grasses // *Nature Plants.* Vol.2. No.16080. P. 1-2. DOI: 10.1038/NPLANTS.2016.80
28. Margesin R., Schinner F. Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments // *Appl Microbiol Biotechnol.* 2001. Vol. 56. No.5-6. P. 650-663. DOI: 10.1007/s002530100701
29. Meckenstock R.U., Elsner M., Griebler C., Lueders T., Stumpp C., Aamand J., Agathos S.N., Albrechtsen H.-J., Bastiaens L., Bjerg P.L., Boon N., Dejonghe W., Huang W.E., Schmidt S.I., Smolders E., Sørensen S.R., Springael D., van Breukelen B.M. Biodegradation: Updating the Concepts of Control for Microbial

- Cleanup in Contaminated Aquifers // Environ. Sci. Technol. 2015. Vol.49. No.12. P.7073-7081. DOI: 10.1021/acs.est.5b00715
30. Mindubaev A.Z., Babynin E.V., Voloshina A.D., Saparmyradov K.A., Akosah Y.A., Badeeva E.K., Minzanova S.T., Mironova L.G. The possibility of neutralizing white phosphorus using microbial cultures // News of NAS RK. Series of geology and technical sciences. - 2019. - Vol.5. - No.437. - P.122-128. DOI: 10.32014/2019.2518-1491.63
31. Mindubaev A.Z., Kuznetsova S.V., Evtuyugin V.G., Daminova A.G., Grigoryeva T.V., Romanova Y.D., Romanova V.A., Babaev V.M., Buzyurova D.N., Babynin E.V., Badeeva E.K., Minzanova S.T., Mironova L.G. Effect of White Phosphorus on the Survival, Cellular Morphology, and Proteome of *Aspergillus niger* // Applied Biochemistry and Microbiology. - 2020. - Vol. 56. - No. 2. - P. 194-201. DOI: 10.1134/S0003683820020118
32. Mondal S., Raja K., Schweizer U., Mugesh G. Chemistry and Biology in the Biosynthesis and Action of Thyroid Hormones // Angew.Chem.Int. Ed. 2016. Vol. 55. No.27. P.7606-7630. DOI: 10.1002/anie.201601116
33. Musat F., Wilkes H., Behrends A., Woebken D., Widdel F. Microbial nitrate-dependent cyclohexane degradation coupled with anaerobic ammonium oxidation // The ISME Journal. 2010. Vol. 4. No. 10. P. 1290-1301. DOI:10.1038/ismej.2010.50
34. Nüsslein K., Maris D., Timmis K., Dwyer D.F. Expression and Transfer of Engineered Catabolic Pathways Harbored by *Pseudomonas* spp. Introduced into Activated Sludge Microcosms // Appl Environ Microbiol. 1992. Vol.58. No.10. P. 3380-3386. DOI: 10.1128/AEM.58.10.3380-3386.1992
35. Palcic M.M., Shen S.-J., Schleicher E., Kumagai H., Sawada S., Yamada H., Floss H.G. Stereochemistry and Mechanism of Reactions Catalyzed by Tyrosine Phenol-Lyase from *Escherichia intermedia*. Z. Naturforsch. 1987. Vol.42. No.2. P.307-318. DOI: [10.1515/znc-1987-0401](https://doi.org/10.1515/znc-1987-0401)
36. Piotrowski M., Volmer J.J. Cyanide metabolism in higher plants: cyanoalanine hydratase is a NIT4 homolog // Plant Molecular Biology. 2006. Vol.61. No.1-2. P.111-122. DOI 10.1007/s11103-005-6217-9
37. Ramos J.L., Wasserfallen A., Rose K., Timmis K.N. Redesigning metabolic routes: manipulation of TOL plasmid pathway for catabolism of alkylbenzoates // Science. 1987. Vol.235. No.4788. P.593-596. DOI: 10.1126/science.3468623
38. Rampelotto P.H. Resistance of Microorganisms to Extreme Environmental Conditions and Its Contribution to Astrobiology // Sustainability. 2010. Vol. 2. No.6. P.1602-1623. DOI: 10.3390/su2061602
39. Reihmann M., Ritter H. Synthesis of Phenol Polymers Using Peroxidases. Adv Polym Sci. 2006. Vol. 194. No.1. P.1-49. DOI: [10.1007/12_034](https://doi.org/10.1007/12_034)
40. Roskoski R. Src protein-tyrosine kinase structure and regulation // Biochemical and Biophysical Research Communications. 2004. Vol.324. No.4. P. 1155-1164. DOI: 10.1016/j.bbrc.2004.09.171

41. Schenck C.A., Maeda H.A. Tyrosine biosynthesis, metabolism, and catabolism in plants // *Phytochemistry*. 2018. Vol. 149. No.82e102. P.82-102. DOI: [10.1016/j.phytochem.2018.02.003](https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2018.02.003)
42. Shamim G., Ranjan S.K., Pandey D.M., Ramani R. Biochemistry and biosynthesis of insect pigments // *Eur. J. Entomol.* 2014. Vol.111. No.2. P. 149-164. DOI: [10.14411/eje.2014.021](https://doi.org/10.14411/eje.2014.021)
43. Snyder R., Hedli C.C. An Overview of Benzene Metabolism // *Environmental Health Perspectives*. – 1996. Vol.104. No.6. P.1165-1171. DOI: [10.1289/ehp.961041165](https://doi.org/10.1289/ehp.961041165)
44. Strack D., Vogt T., Schliemann W. Recent advances in betalain research // *Phytochemistry*. 2003. Vol.62. No.3. P.247-269. DOI: [10.1016/S0031-9422\(02\)00564-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(02)00564-2)
45. Sumathi T., Viswanath B., Sri Lakshmi A., SaiGopal D.V.R. Production of Laccase by *Cochliobolus* sp. Isolated from Plastic Dumped Soils and Their Ability to Degrade Low Molecular Weight PVC // *Biochemistry Research International*. 2016. Vol. 2016. No.9519527. P.1-10. DOI: [10.1155/2016/9519527](https://doi.org/10.1155/2016/9519527)
46. Süßmuth R.D., Mainz A. Nonribosomal Peptide Synthesis - Principles and Prospects // *Angew.Chem.Int. Ed.* 2017. Vol.56. No.14. P.3770-3821. DOI: [10.1002/anie.201609079](https://doi.org/10.1002/anie.201609079)
47. Van der Klei I.J., Yurimoto H., Sakai Y., Veenhuis M. The significance of peroxisomes in methanol metabolism in methylotrophic yeast // *Biochimica et Biophysica Acta*. 2006. Vol. 1763. No. 12. P. 1453-1462. DOI: [10.1016/j.bbamcr.2006.07.016](https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2006.07.016).
48. Vozdek R., Hnízda A., Krijt J., Šerá L., Kožich V. Biochemical properties of nematode O-acetylserine(thiol)lyase paralogs imply their distinct roles in hydrogen sulfide homeostasis // *Biochimica et Biophysica Acta*. 2013. Vol.1834. No.12. P.2691-2701. DOI: [10.1016/j.bbapap.2013.09.020](https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2013.09.020)
49. Weelink S.A.B., van Eekert M.H.A., Stams A.J.M. Degradation of BTEX by anaerobic bacteria: physiology and application // *Rev Environ Sci Biotechnol*. 2010. Vol.9. No.4. P.359-385. DOI: [10.1007/s11157-010-9219-2](https://doi.org/10.1007/s11157-010-9219-2)
50. Williamson N.R., Simonsen H.T., Harris A.K.P., Leeper F.J., Salmond G.P.C. Disruption of the copper efflux pump (CopA) of *Serratia marcescens* ATCC 274 pleiotropically affects copper sensitivity and production of the tripyrrole secondary metabolite, prodigiosin // *J Ind Microbiol Biotechnol*. 2006. Vol. 33. No.2. P.151-158. DOI: [10.1007/s10295-005-0040-9](https://doi.org/10.1007/s10295-005-0040-9)
51. Willsey G.G., Wargo M.J. Sarcosine Catabolism in *Pseudomonas aeruginosa* Is Transcriptionally Regulated by SouR // *J Bacteriol*. Vol.198. No.2. P.301-310. DOI: [10.1128/JB.00739-15](https://doi.org/10.1128/JB.00739-15).