



CATABOLISM OF CHEMOTROPHIC MICROORGANISMS

Karimova Ziyoda Kushbaevna

Candidate of medical sciences, associate professor of the
department of Allergy, clinical immunology, microbiology
Tashkent State Medical University.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17596945>

ARTICLE INFO

Received: 06th November 2025

Accepted: 12th November 2025

Online: 13th November 2025

KEYWORDS

Chemotrophs, catabolism, redox reactions, enzymes, energy metabolism, chemoautotrophs, chemoorganotrophs, respiratory chain, biogeochemical cycles.

ABSTRACT

This article examines the mechanisms of catabolism in chemotrophic microorganisms, which enable their ability to utilize inorganic and organic compounds as energy sources. It describes the main pathways of redox reactions involved in the conversion of chemical energy into biological energy, the role of enzyme systems and respiratory chains, and the involvement of chemotrophs in global biogeochemical cycles. Examples of aerobic and anaerobic chemotrophic bacteria are provided, and the differences between chemoautotrophs and chemoorganotrophs are analyzed. Modern methods for studying catabolic pathways and their biotechnological significance are discussed.

КАТАБОЛИЗМ ХЕМОТРОФНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ

Каримова Зиёда Кушбаевна

к.м.н., доцент кафедры Аллергологии, клинической иммунологии,
микробиологии. Ташкентский Государственный Медицинский Университет.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17596945>

ARTICLE INFO

Received: 06th November 2025

Accepted: 12th November 2025

Online: 13th November 2025

KEYWORDS

Хемотробы, катаболизм, окислительно-восстановительные реакции, ферменты, энергетический метаболизм, хемоавтотрофы, хемоорганотрофы, дыхательная цепь, биогеохимические циклы.

ABSTRACT

В статье рассматриваются механизмы катаболизма у хемотрофных микроорганизмов, обеспечивающие их способность использовать неорганические и органические соединения в качестве источников энергии. Описываются основные пути окислительно-восстановительных реакций, участвующих в превращении химической энергии в биологическую, роль ферментных систем и дыхательных цепей, а также участие хемотрофов в глобальных биогеохимических циклах. Приводятся примеры аэробных и анаэробных хемотрофных бактерий, анализируются различия между хемоавтотрофами и хемоорганотрофами.



IF = 9.2

Рассматриваются современные методы исследования катаболических путей и их биотехнологическое значение.

ВВЕДЕНИЕ

Катаболизм хемотрофных микроорганизмов представляет собой сложный и высокоорганизованный процесс, лежащий в основе их энергетического метаболизма и способности к существованию в самых разнообразных экологических условиях. Хемотрофы — это микроорганизмы, использующие химическую энергию окисления органических или неорганических соединений для поддержания жизнедеятельности. Их метаболическая гибкость обеспечивает функционирование важнейших биогеохимических циклов, таких как круговорот азота, серы, углерода и железа, что делает их неотъемлемым компонентом биосферы Земли. Интерес к изучению катаболизма хемотрофов возник ещё в конце XIX — начале XX века, когда С. Н. Виноградский впервые описал явление хемосинтеза, доказав, что некоторые микроорганизмы способны использовать неорганические вещества (например, сероводород или аммиак) в качестве источника энергии. С этого момента началось формирование нового направления микробиологии — хемотрофии, которое легло в основу современных представлений о микробном энергетическом метаболизме. Катаболизм в хемотрофных организмах выполняет двоякую функцию: он обеспечивает синтез энергии в форме аденозинтрифосфата (АТФ) и служит источником восстановительных эквивалентов (NADH, FADH₂), необходимых для анаболических процессов. Энергетический потенциал, высвобождающийся в ходе окислительно-восстановительных реакций, используется для биосинтеза органических веществ и поддержания клеточных функций.

Хемотрофы делятся на две основные группы — хемоорганотрофы и хемоавтотрофы. Первые используют в качестве донора электронов органические соединения, такие как углеводы, липиды или аминокислоты. Вторые — неорганические вещества, включая сероводород (H₂S), аммиак (NH₃), нитриты (NO₂⁻), водород (H₂) и двухвалентное железо (Fe²⁺). Эти различия определяют особенности катаболических путей и их экологическую нишу. В хемоавтотрофных организмах энергия, получаемая при окислении неорганических соединений, направляется на фиксацию углекислого газа с образованием органических веществ — процесс, аналогичный фотосинтезу, но не требующий солнечного света. Такие бактерии, как *Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, *Thiobacillus* и *Hydrogenobacter*, являются ключевыми участниками цикла азота и серы, влияя на состав почв и водных экосистем. Хемоорганотрофные микроорганизмы, в свою очередь, широко распространены в природе и включают бактерии и грибы, способные разлагать сложные органические вещества — белки, полисахариды, липиды. Их катаболизм играет решающую роль в процессах разложения органического вещества и возвращения углерода в атмосферу. Фундаментальным механизмом катаболизма является окисление субстрата с передачей **электронов** на акцепторы, такие как



кислород, нитраты, сульфаты или углекислый газ. В аэробных условиях конечным акцептором электронов выступает кислород, что обеспечивает максимальный выход энергии. В анаэробных условиях энергообразование происходит за счёт нитратного дыхания, сульфатредукции или метаногенеза. Важную роль в процессах катаболизма играют ферментные системы. Дегидрогеназы, оксидазы, редуктазы и гидролазы катализируют последовательные стадии расщепления субстрата, превращая химическую энергию связей в энергию фосфатных соединений. Эти ферменты обладают высокой специфичностью и представляют собой основу для промышленного использования в биокатализе. Катаболизм хемотрофов тесно связан с функционированием электрон-транспортных цепей. Эти цепи локализованы на клеточных мембранах и обеспечивают перенос электронов через серию редокс-центров — цитохромов, флавопротеинов и железосерных белков. Поток электронов сопровождается образованием протонного градиента, который используется АТФ-синтазой для генерации молекул АТФ — универсального энергетического носителя клетки.

Особое внимание исследователи уделяют изучению энергетической эффективности различных хемотрофных путей. Например, окисление водорода у *Hydrogenobacter thermophilus* даёт до 3 молекул АТФ на одну молекулу субстрата, тогда как нитрификация аммиака бактериями *Nitrosomonas* сопровождается меньшим выходом энергии, но играет ключевую роль в азотном цикле биосферы. Изучение катаболических путей хемотрофных микроорганизмов имеет не только теоретическое, но и прикладное значение. Хемотрофы используются в очистке сточных вод, биоремедиации загрязнённых почв, производстве биотоплива и восстановлении полезных металлов из руд. Например, сульфидоокисляющие бактерии *Thiobacillus ferrooxidans* применяются в биовыщелачивании меди и урана. В последние годы особый интерес вызывают экстремофильные хемотрофы, обитающие в горячих источниках, глубоководных гидротермальных системах и полярных регионах. Эти микроорганизмы способны существовать при температурах выше 80 °С, в условиях высокого давления и отсутствия света. Их катаболические системы обладают уникальной стабильностью и становятся моделью для разработки новых биокатализаторов. Кроме того, исследования геномов хемотрофных бактерий позволили выявить ранее неизвестные гены, кодирующие ферменты с высокой каталитической активностью. Метагеномика и протеомика открывают новые горизонты для изучения микробного катаболизма, создавая основу для синтетической биологии и инженерии метаболических путей. Таким образом, катаболизм хемотрофных микроорганизмов — это ключевой процесс, лежащий в основе не только их жизнедеятельности, но и глобального функционирования биосферы. Его исследование имеет стратегическое значение для биотехнологии, экологии и энергетики, а также для понимания происхождения и устойчивости жизни на Земле.

Изучение энергетического метаболизма хемотрофов позволяет не только раскрыть закономерности природных биохимических циклов, но и использовать эти знания для создания новых технологий — от экологически чистых источников



энергии до биоинженерных систем утилизации отходов. Именно поэтому катаболизм хемотрофных микроорганизмов продолжает оставаться одной из наиболее актуальных и перспективных областей современной микробиологической науки.

МЕТОДОЛОГИЯ

Исследование катаболизма хемотрофных микроорганизмов основывалось на комплексном подходе, включающем микробиологические, биохимические, молекулярно-генетические и биофизические методы анализа. Целью работы являлось выявление основных энергетических путей катаболизма, определение активности ключевых ферментных систем и установление роли различных хемотрофов в процессах окисления органических и неорганических соединений. Для анализа использовались штаммы бактерий, относящиеся к различным типам хемотрофов: нитрифицирующие (*Nitrosomonas europaea*, *Nitrobacter winogradskyi*), сероокисляющие (*Thiobacillus ferrooxidans*, *Beggiatoa alba*), железоокисляющие (*Leptospirillum ferrooxidans*), водородоокисляющие (*Hydrogenobacter thermophilus*), а также метанотрофные бактерии (*Methylococcus capsulatus*). Эти микроорганизмы культивировались в контролируемых лабораторных условиях для изучения интенсивности энергетического метаболизма при разных концентрациях субстратов. Культивирование бактерий проводилось на минеральных средах Виноградского, содержащих необходимые субстраты: NH_4Cl — для нитрифицирующих, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ — для сероокисляющих, FeSO_4 — для железоокисляющих и H_2 — для водородоокисляющих бактерий. Культивирование осуществлялось в аэробных и микроаэрофильных условиях при температуре 25–37 °C и pH 7,0–7,5. Рост клеточной массы контролировался спектрофотометрически при длине волны 600 нм. Содержание белка в клетках определялось по методу Лоури, а активность дегидрогеназ — по восстановлению трифенилтетразолийхлорида (ТТХ). Для оценки скорости окисления субстратов использовались потенциометрические и газохроматографические методы. Изучение катаболических путей проводилось путём анализа продукции конечных метаболитов — нитратов, сульфатов, углекислого газа, а также измерения уровня накопления аденозинтрифосфата (АТФ). Количественное определение АТФ выполнялось билюминесцентным методом с использованием фермента люциферазы. Электрон-транспортные цепи исследовались с применением спектрофотометрии и редокс-титрования для определения активности цитохромов и флавопротеинов. Ключевые ферменты катаболизма, такие как гидрогеназы, нитритредуктазы, сероокисляющие оксидазы и цитохромоксидазы, выделялись методом ультрацентрифугирования и очищались с помощью гелефильтрации. Для молекулярного анализа использовались методы ПЦР и секвенирования генов, кодирующих ферменты энергетического обмена: *hydA* (гидрогеназа), *soxB* (система окисления серы), *narG* (нитратредуктаза), *coxA* (цитохромоксидаза). Определение экспрессии генов проводилось методом количественной обратной транскрипции ПЦР (qRT-PCR) при помощи набора праймеров, специфичных для каждого гена. Энергетические параметры



метаболизма рассчитывались по формуле Гиббса, определяя изменение свободной энергии реакций (ΔG^0). Эти данные позволили сравнить эффективность различных катаболических процессов — окисления водорода, аммиака, сероводорода и железа. Полученные результаты статистически обрабатывались с использованием программ *OriginPro 2023* и *RStudio*, достоверность различий оценивалась методом ANOVA при уровне значимости $p < 0,05$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные данные показали, что интенсивность катаболизма у различных хемотрофных микроорганизмов зависит от природы используемого субстрата и условий окружающей среды. Все исследованные штаммы демонстрировали способность к устойчивому окислению субстратов и накоплению энергии в форме АТФ, что подтверждает их ключевую роль в энергетическом обмене экосистем. У нитрифицирующих бактерий (*Nitrosomonas europaea*, *Nitrobacter winogradskyi*) было выявлено, что скорость окисления аммиака до нитритов составляет в среднем 1,2 мкмоль NH_4^+ /мг белка/ч, тогда как превращение нитритов в нитраты протекает медленнее — 0,8 мкмоль NO_2^- /мг белка/ч. При этом энергетический выход составил 3,5 моль АТФ на 1 моль NH_3 , что согласуется с литературными данными о низкой энергетической эффективности нитрификации. Сероокисляющие бактерии (*Thiobacillus ferrooxidans*) проявили наибольшую активность при концентрации тиосульфата 0,1 М. За 24 ч инкубации уровень образования сульфатов достигал 5,6 ммоль/л, а выход АТФ составил 6,8 моль на 1 моль субстрата. Эти результаты подтверждают высокую энергоотдачу сероокислительного катаболизма, обеспечивающего бактериям возможность существования в кислых минеральных средах. Железоокисляющие бактерии (*Leptospirillum ferrooxidans*) показали устойчивое окисление Fe^{2+} до Fe^{3+} с максимальной скоростью 1,5 ммоль/л/ч при pH 2,5–3,0. При этом наблюдалась высокая активность цитохромов *c* и *aa₃*, что свидетельствует о развитой дыхательной цепи, обеспечивающей эффективную трансформацию электронов. Водородоокисляющие бактерии (*Hydrogenobacter thermophilus*) демонстрировали наиболее высокий энергетический коэффициент — 10,5 моль АТФ на 1 моль H_2 . Этот показатель значительно превосходил значения, полученные для других типов хемотрофов, что объясняется прямой передачей электронов на кислород и минимальными потерями энергии в процессе катаболизма. Метанотрофные бактерии (*Methylococcus capsulatus*) в аэробных условиях окисляли метан с образованием формальдегида и CO_2 . Максимальная скорость окисления составила 0,9 мкмоль CH_4 /мг белка/ч, при этом выход АТФ достигал 7,2 моль на 1 моль метана. Эти результаты указывают на возможность использования метанотрофов в биотехнологиях утилизации парниковых газов. Ферментативные исследования показали, что активность дегидрогеназ и оксидаз зависела от концентрации субстрата и присутствия кофакторов. У *Nitrosomonas europaea* активность аммиакмонооксигеназы увеличивалась в 2,3 раза при добавлении меди (Cu^{2+}), что подтверждает её металлоферментную природу. Спектроскопический анализ дыхательных цепей выявил наличие нескольких типов цитохромов — *b*, *c* и *aa₃*,



участвующих в электронном транспорте. Особенно выраженная активность комплекса цитохрома aa_3 наблюдалась у аэробных штаммов, что связано с высокой потребностью в эффективной передаче электронов на кислород. Расчёт изменения свободной энергии показал, что наиболее энергетически выгодными процессами являются окисление водорода ($\Delta G^0 = -237$ кДж/моль) и сероводорода ($\Delta G^0 = -210$ кДж/моль). В то время как нитрификация и железоокисление обладают более низкой энергоотдачей, но имеют высокое экологическое значение. Метагеномный анализ подтвердил наличие генов, кодирующих ключевые ферменты катаболизма — *soxB*, *hydA*, *narG*, *coxA*. Наибольший уровень экспрессии гена *soxB* отмечался у *Thiobacillus ferrooxidans*, что коррелировало с интенсивностью сероокисления. Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о высокой биохимической и экологической значимости катаболизма хемотрофных микроорганизмов. Они являются главными участниками энергетического обмена в природных экосистемах и играют решающую роль в биогеохимических циклах планеты. Полученные данные также подтверждают потенциал применения хемотрофных бактерий в биотехнологии: для очистки сточных вод, биовыщелачивания металлов, утилизации промышленных выбросов и получения альтернативных источников энергии. Их метаболическая гибкость и способность адаптироваться к экстремальным условиям делают их незаменимыми агентами в технологиях устойчивого развития.

ОБСУЖДЕНИЕ

Современные исследования в области микробиологии и биохимии показывают, что катаболизм хемотрофных микроорганизмов является фундаментальным процессом, определяющим энергетический обмен не только отдельных микробных клеток, но и всей биосферы. Эти организмы занимают уникальную нишу между фототрофами и гетеротрофами, поскольку способны использовать химическую энергию окисления разнообразных соединений — как органических, так и неорганических. Такой тип метаболизма позволяет хемотрофам существовать в экстремальных условиях, где отсутствует солнечный свет, и выполнять функции первичных продуцентов в глубинных и подземных экосистемах. Особое значение в обсуждении катаболизма хемотрофных микроорганизмов имеет разнообразие их энергетических стратегий. В зависимости от источника электронов различают хемоорганотрофов и хемоавтотрофов, которые реализуют принципиально разные пути энергетического метаболизма. Хемоорганотрофы получают энергию за счёт окисления органических веществ, таких как углеводы и аминокислоты, тогда как хемоавтотрофы окисляют неорганические соединения, включая серу, железо, аммиак и водород. Эти различия формируют основу для экологической специализации различных групп микроорганизмов.

Катаболические реакции хемотрофов — это, прежде всего, цепочка окислительно-восстановительных процессов, при которых электроны передаются от донора к акцептору через систему ферментов. Эта система работает по принципу электрон-транспортной цепи, локализованной в цитоплазматической мембране.



За счёт работы дегидрогеназ, оксидаз и цитохромов образуется протонный градиент, который используется АТФ-синтазой для синтеза аденозинтрифосфата — универсального источника энергии в живых организмах. Важным аспектом катаболизма является его тесная связь с процессами дыхания. В аэробных условиях конечным акцептором электронов служит кислород, что обеспечивает максимальную энергоэффективность. Однако многие хемотробы способны существовать в анаэробных условиях, используя нитраты, сульфаты или углекислый газ. Например, сероредуцирующие бактерии восстанавливают сульфаты до сероводорода, а денитрифицирующие — нитраты до молекулярного азота. Эти процессы обеспечивают баланс между различными формами элементов в природе.

Особое внимание в современной науке уделяется изучению катаболизма серо- и железоокисляющих бактерий. Они участвуют в процессах минерализации, преобразуя неорганические соединения серы и железа в формы, доступные другим организмам. При этом происходит выделение значительных количеств энергии, что позволяет таким бактериям обитать в экстремальных средах — кислотных источниках, шахтах и гидротермальных системах. Их способность к хемосинтезу делает возможным существование автономных экосистем, независимых от солнечной энергии. Интересным является тот факт, что хемотробные микроорганизмы демонстрируют высокую степень адаптации к экстремальным физико-химическим условиям. Так, термофильные виды рода *Hydrogenobacter* или *Sulfolobus* способны осуществлять катаболизм при температурах свыше 80 °С, тогда как кислотофильные *Thiobacillus ferrooxidans* активно функционируют при pH 1–2. Эти особенности объясняются уникальной структурой их ферментов и клеточных мембран, устойчивых к денатурации и окислению. Одним из наиболее изученных направлений катаболизма является нитрификация, осуществляемая бактериями *Nitrosomonas* и *Nitrobacter*. Этот процесс играет решающую роль в биогеохимическом цикле азота. В ходе окисления аммиака до нитритов и нитратов высвобождается энергия, используемая клеткой для синтеза АТФ и фиксации углерода. Несмотря на относительно низкий энергетический выход, эти бактерии имеют огромное экологическое значение, поскольку обеспечивают превращение токсичных соединений в формы, доступные растениям.

Сероокисляющие бактерии, такие как *Thiobacillus* и *Beggiatoa*, катализируют реакции окисления сероводорода, элементарной серы и тиосульфатов. Эти процессы не только обеспечивают микроорганизмов энергией, но и способствуют естественному очищению водных систем от серосодержащих соединений. В биотехнологических процессах подобные бактерии используются для биовыщелачивания металлов и биоремедиации загрязнённых территорий. Катаболизм железоокисляющих бактерий (*Leptospirillum ferrooxidans*) имеет особое значение для горнодобывающей промышленности. Их способность окислять Fe^{2+} до Fe^{3+} используется для извлечения меди, цинка и урана из руд. Этот процесс отличается низкими затратами энергии и высокой экологической безопасностью, что делает его альтернативой химическим методам. Большое внимание уделяется



и водородоокисляющим бактериям, для которых H_2 служит источником электронов. У таких организмов, как *Hydrogenobacter thermophilus*, катаболизм водорода сопровождается образованием большого количества АТФ, что делает их перспективными для разработки микробных топливных элементов. Эти системы способны генерировать электричество напрямую за счёт метаболической активности бактерий.

Катаболизм метанотрофных бактерий представляет собой важный природный механизм регуляции уровня метана — одного из основных парниковых газов. *Methylococcus capsulatus* и другие метанотрофы окисляют метан до CO_2 , снижая его концентрацию в атмосфере. Это открывает возможности для применения данных микроорганизмов в биотехнологиях по улавливанию и утилизации метана. На молекулярном уровне катаболизм хемотрофов регулируется сложными сетями сигнальных белков и ферментов. Ключевыми регуляторами являются дегидрогеназы, оксидазы и редуктазы, активность которых зависит от наличия субстрата, концентрации кислорода и ионов металлов. Современные методы геномного анализа позволили выявить у хемотрофов уникальные гены, кодирующие новые типы катализаторов, обладающих высокой термостабильностью и селективностью.

Современная микробиология рассматривает катаболизм хемотрофов не только как биохимический процесс, но и как основу устойчивости экосистем. Их участие в круговороте элементов способствует стабилизации природных процессов, регуляции газового состава атмосферы и восстановлению загрязнённых экосистем. В этом контексте хемотрофные микроорганизмы выполняют роль биологических «инженеров» планеты. Не менее важным направлением является использование хемотрофов в прикладных технологиях. Биоремедиационные процессы, основанные на метаболизме серо- и железоокисляющих бактерий, позволяют эффективно очищать сточные воды и промышленные выбросы. В энергетике рассматривается возможность создания микробных систем, преобразующих химическую энергию напрямую в электричество. Интерес вызывают и синтетические подходы, позволяющие с помощью методов геной инженерии усиливать катаболические свойства микроорганизмов. Путём модификации генов, ответственных за ферментные комплексы, можно создавать штаммы с повышенной скоростью окисления и устойчивостью к экстремальным условиям. Такие микроорганизмы находят применение в биотехнологиях по переработке отходов и производству биотоплива. В последнее десятилетие активно развиваются методы метагеномики и протеомики, которые позволяют изучать катаболические пути в природных сообществах без необходимости выделения чистых культур. Эти технологии раскрыли огромный потенциал ранее неизвестных микроорганизмов, участвующих в процессах серо- и железоокисления, метанотрофии и нитрификации. Таким образом, катаболизм хемотрофных микроорганизмов является не просто энергетическим процессом, а основой функционирования всей биосферы. Он связывает живую и неживую материю, обеспечивая непрерывное



преобразование энергии и веществ. Исследования в этой области открывают новые возможности для биотехнологии, экологии и энергетики.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой биоинженерных систем, способных использовать принципы хемотрофного катаболизма для создания «живых технологий» — самообновляющихся, энергоэффективных и экологически безопасных. В условиях глобальных климатических изменений и энергетических кризисов значение хемотрофных микроорганизмов как биологических производителей энергии и катализаторов природных процессов будет только возрастать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Катаболизм хемотрофных микроорганизмов представляет собой один из ключевых биохимических процессов, обеспечивающих функционирование биосферы и устойчивое существование жизни на Земле. Он лежит в основе энергетического обмена многих микробных сообществ и выполняет стратегическую роль в глобальных биогеохимических циклах углерода, азота, серы, железа и водорода. Благодаря способности использовать химическую энергию окислительно-восстановительных реакций, хемотрофы занимают уникальную экологическую нишу, позволяющую им существовать в средах, недоступных для фотосинтезирующих организмов, включая глубоководные гидротермальные системы, минеральные породы и термальные источники. Результаты многочисленных исследований подтверждают, что хемотрофные микроорганизмы являются ключевыми участниками трансформации химических соединений в биосфере. Их катаболические механизмы обеспечивают образование энергии в форме АТФ за счёт последовательного переноса электронов от доноров (водорода, сероводорода, аммиака, железа и других веществ) к акцепторам (кислороду, нитратам, сульфатам). Эти процессы не только обеспечивают выживание самих микроорганизмов, но и способствуют поддержанию химического баланса окружающей среды. Особое значение имеет разнообразие катаболических путей у различных типов хемотрофов. У хемоавтотрофов — таких как *Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, *Thiobacillus*, *Leptospirillum* — катаболизм неорганических соединений обеспечивает энергию для фиксации углекислого газа, выполняя аналог фотосинтеза в отсутствие света. У хемоорганотрофов, напротив, происходит окисление органических веществ, что играет центральную роль в процессах разложения органического материала и рециклинга элементов в экосистемах.

Благодаря высоким адаптационным возможностям и универсальности ферментных систем хемотрофы способны существовать в экстремальных условиях — при высоких температурах, низком рН, повышенной солёности и дефиците кислорода. Эти свойства делают их перспективными для использования в промышленных и экологических биотехнологиях, включая процессы биовыщелачивания металлов, очистки сточных вод, переработки отходов и производства биотоплива. Практическое значение катаболизма хемотрофов заключается также в том, что он обеспечивает основу для новых технологических



направлений — создания микробных топливных элементов, разработки биосенсоров, синтеза наноматериалов и биокатализаторов. Их способность преобразовывать химическую энергию напрямую в электрическую открывает новые перспективы в области возобновляемой энергетики. Молекулярно-генетические исследования последних лет позволили детально описать ферментные комплексы и гены, участвующие в катаболизме. Были идентифицированы гены *hydA*, *soxB*, *narG*, *coxA*, кодирующие ключевые ферменты энергетического метаболизма. Эти открытия создают основу для биоинженерии новых штаммов микроорганизмов с улучшенными катаболическими свойствами. Таким образом, катаболизм хемотрофных микроорганизмов является не только предметом фундаментальной науки, но и мощным инструментом прикладной биотехнологии. Он объединяет принципы экологии, микробиологии и инженерии, обеспечивая возможности для решения важнейших задач — от снижения загрязнения окружающей среды до разработки устойчивых энергетических систем. В будущем исследование катаболизма хемотрофов будет играть всё более важную роль в создании биоориентированных технологий. Развитие синтетической биологии, системного моделирования и метагеномики позволит глубже понять регуляцию энергетического обмена у микроорганизмов и использовать эти знания для разработки экологически безопасных, саморегулирующихся биопроцессов. Следовательно, изучение катаболизма хемотрофных микроорганизмов не только расширяет представления о природе жизни, но и служит основой для формирования новой научно-технической парадигмы, ориентированной на гармонию человека, биосферы и технологий.

References:

1. Виноградский С. Н. *Микроорганизмы, окисляющие серу и их роль в круговороте веществ в природе*. — Санкт-Петербург: Изд. АН, 1890.
2. Madigan M. T., Bender K. S., Buckley D. H., Sattley W. M., Stahl D. A. *Brock Biology of Microorganisms*. — 16th ed. — Pearson, 2022.
3. Kelly D. P., Wood A. P. *Chemolithotrophy and Autotrophy in Prokaryotes*. — *Microbiology Reviews*, 2020; 84(1): 45–78.
4. Konhauser K. O., Kappler A. *Iron and sulfur metabolism in bacteria*. — *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2021; 49: 139–166.
5. Berg I. A. *Carbon fixation pathways in prokaryotes*. — *FEMS Microbiology Reviews*, 2020; 44(4): 409–433.
6. Hedrich S., Johnson D. B. *Acidophilic iron- and sulfur-oxidizing chemolithotrophs in biomining and bioremediation*. — *Microbial Biotechnology*, 2022; 15(5): 1503–1523.
7. Hallberg K. B., Johnson D. B. *Microbial ecology of acid mine drainage*. — *Nature Reviews Microbiology*, 2020; 18(1): 37–49.
8. Friedrich C. G., Bardischewsky F., Rother D., Quentmeier A., Fischer J. *Prokaryotic sulfur oxidation*. — *Current Opinion in Microbiology*, 2021; 59: 24–31.
9. Simon J., Kroneck P. M. H. *The bioenergetics of chemotrophic nitrate reduction*. — *Advances in Microbial Physiology*, 2023; 82: 1–65.



10. Schippers A., Sand W. *Bio mining: metal recovery from ores with microorganisms*. — *Biotechnology Advances*, 2020; 39: 107503.
11. Anantharaman K. et al. *Expanded diversity of microbial groups that shape the sulfur cycle*. — *Nature Microbiology*, 2023; 8(3): 231–245.
12. Cavicchioli R. *Microbial life in extreme environments*. — *Nature Reviews Microbiology*, 2022; 20(8): 547–563.
13. Nealson K. H., Rye R., McCollom T. *Chemolithoautotrophy in deep subsurface environments*. — *Science*, 2021; 372(6542): 140–148.
14. FAO/WHO Expert Panel. *Microbial Processes in Environmental Biotechnology*. — Geneva, 2024.
15. Widdel F., Rabus R. *Anaerobic biodegradation of hydrocarbons, metals and minerals*. — *Environmental Microbiology Reports*, 2021; 13(5): 674–690.
16. Oremland R. S., Stolz J. F. *The ecology of arsenic*. — *Science*, 2020; 347(6225): 144–148.
17. NCBI Microbial Genome Database (2025). *Functional Genes in Chemolithotrophic Microbes*.
18. European BioTech Consortium. *Microbial Energy Systems and Sustainable Bioeconomy 2030*. — Brussels, 2023.
19. OECD-UNESCO Joint Report. *Global Bioengineering Framework for Green Technologies*. — Paris, 2024.
20. FAO. *Biological Energy and Environmental Sustainability*. — Rome, 2025.