



Обзор и ключевые темы хемосинтеза

Хемосинтез — синтез органики за счёт энергии окисления неорганики без света.



Термин «хемосинтез» введён С.Н. Виноградским в XIX веке при изучении нитрифицирующих бактерий. Его открытие переосмыслило автотрофию и показало связь между микробиологией и геохимией через химические реакции.

Исторические аспекты изучения хемосинтеза

Определение хемосинтеза

01

Хемосинтез — процесс синтеза органических соединений из неорганических углеродосодержащих веществ, преимущественно CO_2 , за счёт энергии химического окисления.

02

Реализуется у бактерий и архей — прокариот, способных добывать энергию без света, используя химические реакции с неорганическими субстратами.

03

Основные субстраты для окисления: аммиак, сероводород, железо и водород, обеспечивающие энергетический источник для клеток.

Главные химические реакции хемосинтеза

Окисление аммиака до нитритов и нитратов: $2 \text{NH}_3 + 3 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{HNO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$. Этот процесс выделяет энергию, необходимую для синтеза АТФ.

Окисление сероводорода до сульфатов: $\text{H}_2\text{S} + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$. Химические реакции приводят к формированию органических веществ и поддержанию жизнедеятельности бактерий.



349 кДж/
МОЛЬ

энергия, выделяемая при окислении аммиака, — самая высокая среди основных хемосинтетических процессов.

Энергетический выход варьируется в зависимости от субстрата, что влияет на распространение и эффективность хемосинтеза в природе.

Сравнение хемосинтеза и фотосинтеза

Таблица демонстрирует основные различия в источниках энергии, типах организмов и продуктах при хемо- и фотосинтезе.

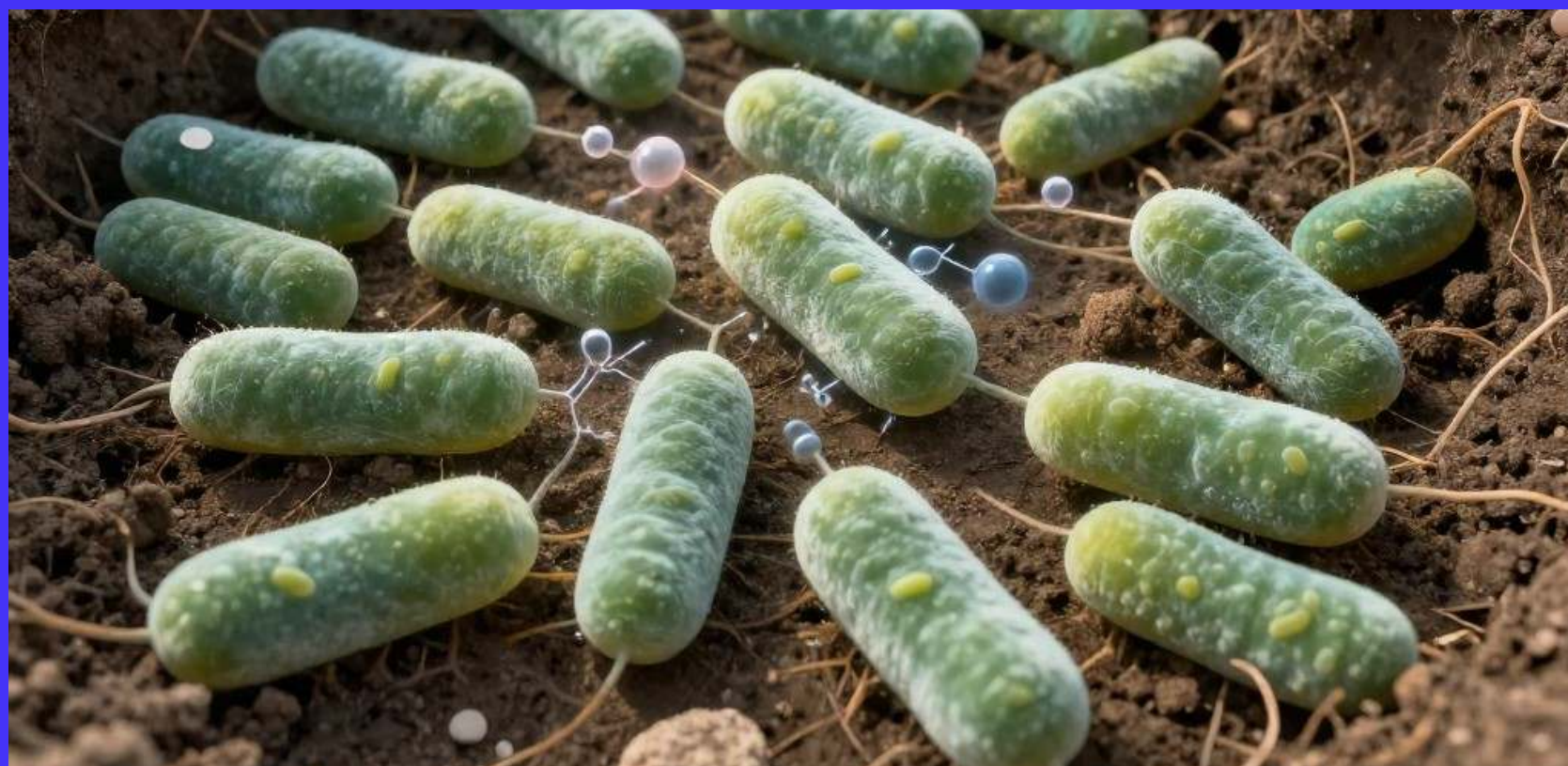
Оба процесса играют важную роль в поддержании жизни и биогеохимических циклов, дополняя друг друга в экосистемах.

Параметр	Хемосинтез	Фотосинтез
Организмы	Бактерии и археи	Растения, водоросли, цианобактерии
Источник энергии	Хим. реакции окисления	Свет
Субстрат	Неорганич. соединения	CO ₂ и H ₂ O
Продукты	Нитраты, сульфаты, органика	Углеводы

Нитрифицирующие бактерии: пример хемосинтетиков

Роль *Nitrosomonas* в азотном цикле

Бактерии *Nitrosomonas* инициируют окисление аммиака до нитритов, что снижает токсичность азота и улучшает плодородие почвы. Они важны для здоровья сельскохозяйственных экосистем.



Деятельность *Nitrobacter* в природе

Nitrobacter завершают процесс окисления нитритов до нитратов, обеспечивая формы азота, доступные для растений. Это поддерживает устойчивость азотного цикла в земных экосистемах.



Сероводородные бактерии и окисление серы

- Сероводородные бактерии используют H_2S или тиосульфат как доноры электронов для получения энергии через окисление, образуя сульфаты.
- Они живут в кислородно-дефицитных сернистых средах, таких как горячие источники и глубоководные зоны океана, играя важную роль в экосистемах этих мест.
- Деятельность таких бактерий способствует формированию минералов серы и поддерживает уникальные микробные сообщества в экстремальных условиях.

Железобактерии и биоокисление железа



Роль *Gallionella* в железном цикле

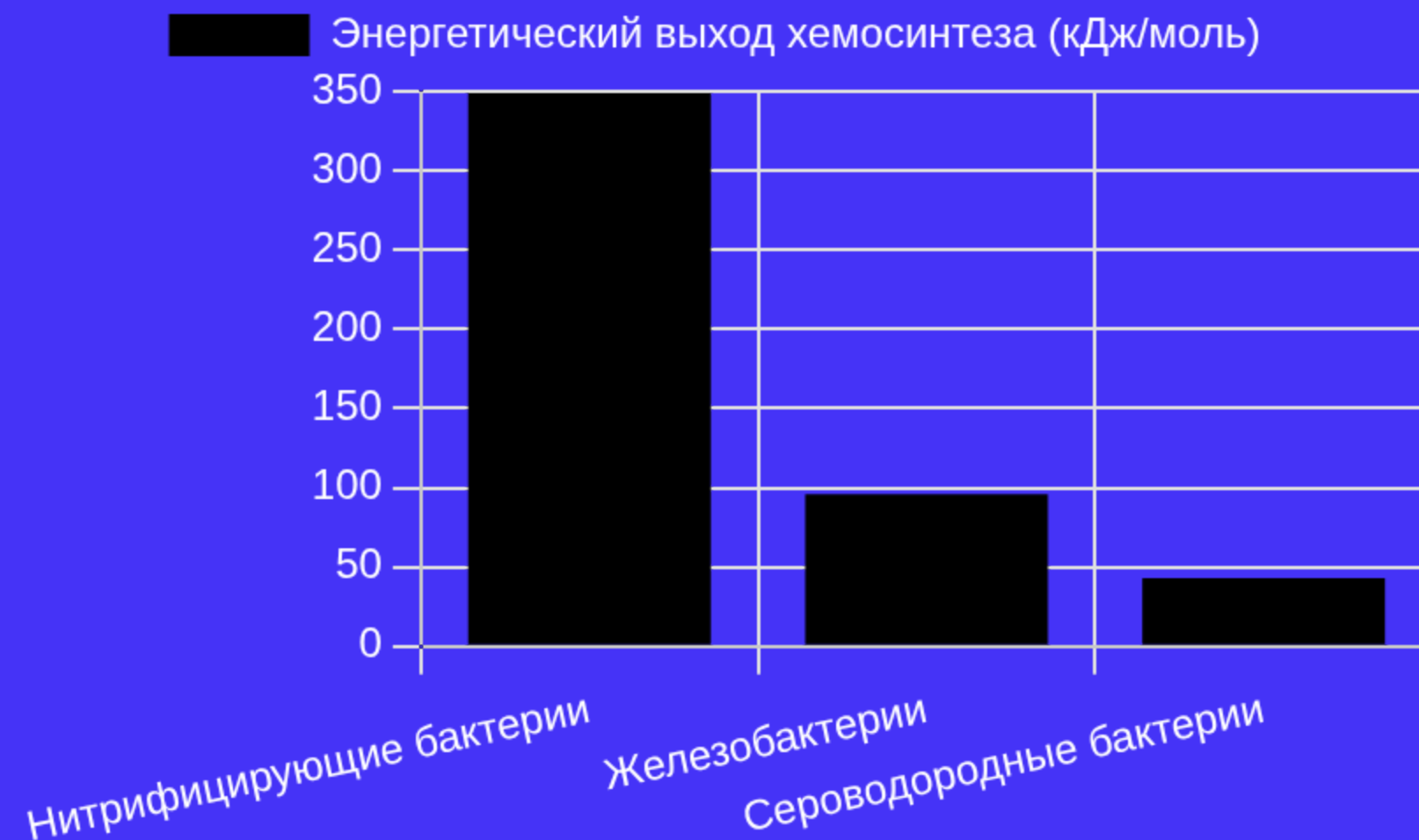
Gallionella окисляет растворимое Fe^{2+} до Fe^{3+} , образуя гидроксиды железа. Это важно для формирования природных осадков и поддержания баланса железа в водных экосистемах.



Экологическая значимость *Leptothrix*

Leptothrix формирует железистые отложения в водоёмах с высоким содержанием железа, создавая среду для специфических микрэкосистем и влияя на химический состав воды.

Сравнительная энергетика хемосинтетиков



Микробиологические исследования, 2023

Энергия, выделяемая нитрифицирующими бактериями, почти в восемь раз превышает энергию сероводородных бактерий.

Эффективность хемосинтеза сильно зависит от субстрата, что отражается на экологической роли микробов.

Экологическая роль хемосинтетиков

01

Хемосинтетики выступают основными производителями органического вещества в средах, где свет отсутствует, например, в глубоководных зонах и почвенных слоях, обеспечивая базу для питания других организмов.

02

Деятельность таких бактерий формирует разнообразие экосистем, поддерживая сложные пищевые цепи и способствуя стабильности биологических сообществ даже в экстремальных условиях.

03

Хемосинтетические микроорганизмы ускоряют процессы восстановления экосистем после природных и техногенных катастроф, способствуя регенерации биоценозов и сохранению среды обитания.

04

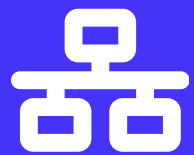
Благодаря функционированию хемосинтетиков поддерживается устойчивость биосферы, так как они обеспечивают первичную продукцию и влияют на важнейшие биогеохимические циклы.

Хемосинтез в гидротермальных источниках



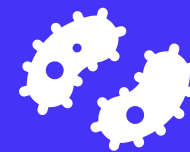
Уникальные экосистемы

Гидротермальные источники создают условия, где бактерии используют химическую энергию сероводорода для поддержания жизни в полной темноте глубоководья.



Автономные пищевые цепи

Энергия от химических реакций становится основой питания, полностью независимой от солнечного света, что расширяет понимание возможных жизненных форм.

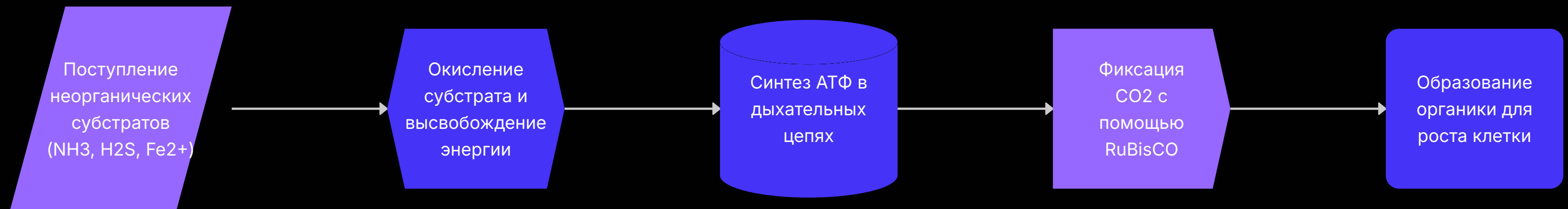


Питание организмов

Хемосинтетики служат пищей для разнообразных жителей гидротермальных рифов, таких как рифтовые черви, моллюски и ракообразные, формируя уникальные трофические сети.

Механизм хемосинтетического процесса

Ключевые стадии биохимического пути хемосинтеза в бактериях





Значение хемосинтеза для круговорота веществ в биосфере

- Хемосинтетики ускоряют сложные биогенные циклы азота, серы и железа, обеспечивая трансформацию неорганических веществ в биодоступные формы и поддерживая сбалансированность экосистем.
- Благодаря минерализации и образованию новых минеральных соединений, хемосинтетики повышают плодородие почв и способствуют восстановлению деградированных природных территорий.

Генетика и молекулярн ые механизмы хемосинтет иков

- Геномы хемосинтетиков содержат специфические опероны, кодирующие ферменты, осуществляющие этапы окисления аммиака, сероводорода и железа в энергетическом обмене.

- Изучение молекулярных структур выявило адаптации к экстремальным факторам окружающей среды, включая устойчивость к высоким температурам, давлению и токсинам.

- Горизонтальный перенос генов способствует распространению метаболических путей, что обеспечивает гибкость и приспособляемость хемосинтетических сообществ.

Промышленное применение хемосинтетических бактерий

01

Хемосинтетики широко применяются в биологической очистке сточных вод благодаря процессам нитрификации, уменьшающим содержание аммиака и других токсинов.

02

Использование микроорганизмов в биовыщелачивании металлов позволяет эффективно извлекать медь, золото и другие ценные элементы из руд с минимальным воздействием на окружающую среду.

03

Культивирование серобактерий и железобактерий на предприятиях способствует созданию экологически безопасных технологий для контроля загрязнений и восстановления экосистем.

Химические условия потенциала жизни вне Земли

Хемосинтез в условиях спутника Европа

Анализы подледных океанов Европы показывают наличие сероводорода и соединений железа, создающих потенциально пригодные для хемосинтеза источники энергии. Это расширяет возможности поиска внеземной жизни.

Моделирование и экспериментальные исследования NASA и ESA

Модели гидротермальных систем, созданные для оценки устойчивости хемосинтетиков, помогают понять, как биохимия на других планетах может существовать вне солнечного света и на ранних этапах эволюции.



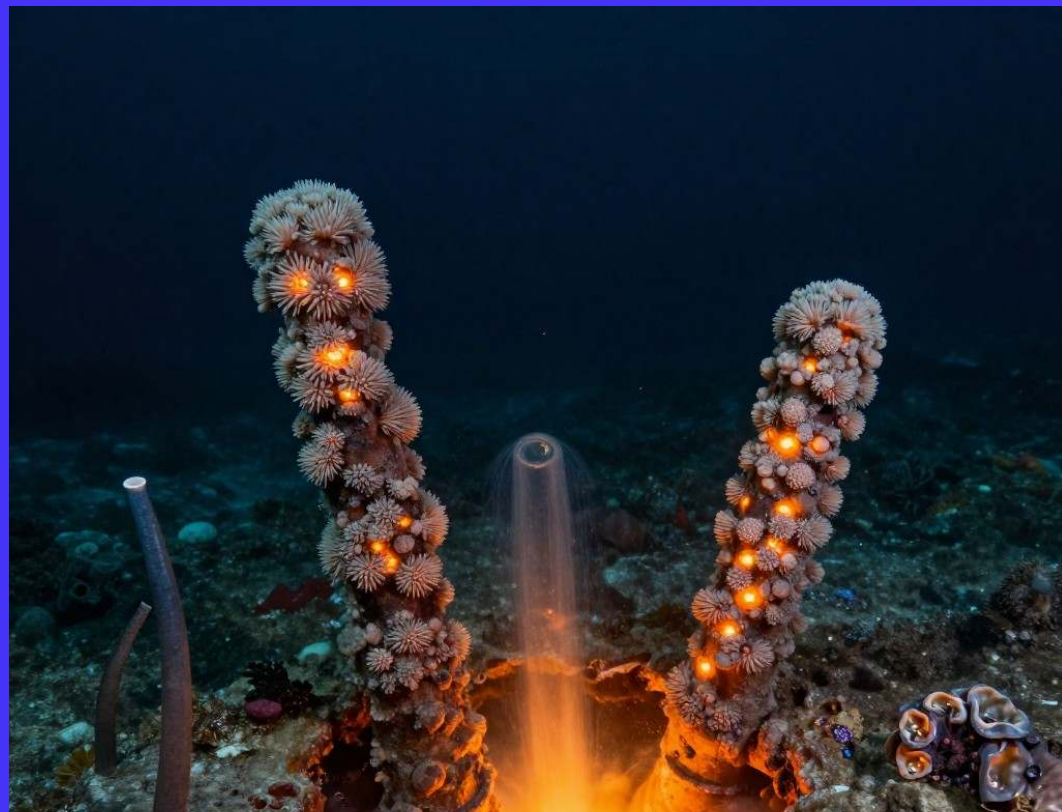
Изучение хемосинтеза в современной биологии

- Полногеномное секвенирование даёт полное представление о генетических особенностях хемосинтетических микроорганизмов, раскрывая их метаболическую потенцию.
- Метагеномный анализ биотопов помогает идентифицировать сообщества хемосинтетиков и их экологические функции в природе без культивирования в лаборатории.
- Высокое разрешение электронной микроскопии позволяет визуализировать ультраструктуры клеточных систем, отвечающих за кислородное дыхание и фиксацию CO₂.
- Данные исследований применяются в биотехнологиях для создания устойчивых агроэкосистем и оптимизации процессов очистки и восстановления природных ресурсов.

Значение хемосинтеза для устойчивости биосферы

Жизнь в экстремальных углах биосферы

Хемосинтез поддерживает организмы в абсолютно темных и холодных океанских глубинах, где солнечная энергия недоступна. Это расширяет наши представления о границах жизни и экстренных экосистемах планеты.



Сохранение биогеохимического баланса

Окисление неорганических соединений хемосинтетиками регулирует поступление и возвращение важных элементов азота, серы и железа в круговорот, поддерживая стабильность и продуктивность экосистем.



Вклад в развитие новых биотехнологий

Исследования хемосинтеза стимулируют создание экологически безопасных технологий для очистки среды и освоения новых биосферных зон, что помогает адаптироваться к изменениям глобального климата.





Хемосинтез раскрывает фундаментальные принципы существования жизни без света и вдохновляет биотехнологические инновации, способствуя применению знаний для защиты экосистем и освоения космоса.

Хемосинтез: ключ к разгадке жизни и будущего технологий