

## Ассимиляционная нитратредукция

- Осуществляется и прокариотами, и эукариотами
- Как в аэробных, так и в анаэробных условиях
- Нитраты также превращаются в нитриты
- Нитриты переходят в форму иона аммония, который идет на синтез аминокислот

Нитратное дыхание

Диссимиляционная нитратредукция

Денитрификация

- Конечные акцепторы в ЭТЦ – нитраты ( $\text{NO}_3^-$ ) или нитриты ( $\text{NO}_2^-$ )
- Результат процесса – газообразные формы азота ( $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ )
- Процесс проходит в несколько стадий, строго анаэробно
- Огромное значение для цикла азота
- Осуществляется разнородной группой денитрифицирующих бактерий

## Диссимиляционная нитратредукция

- Представители: некоторые энтеробактерии, бифидобактерии, *Thiobacillus thioararus*
- Реакция:  $\text{NO}_3^- + 2e^- \rightarrow \text{NO}_2^-$

## Денитрификация

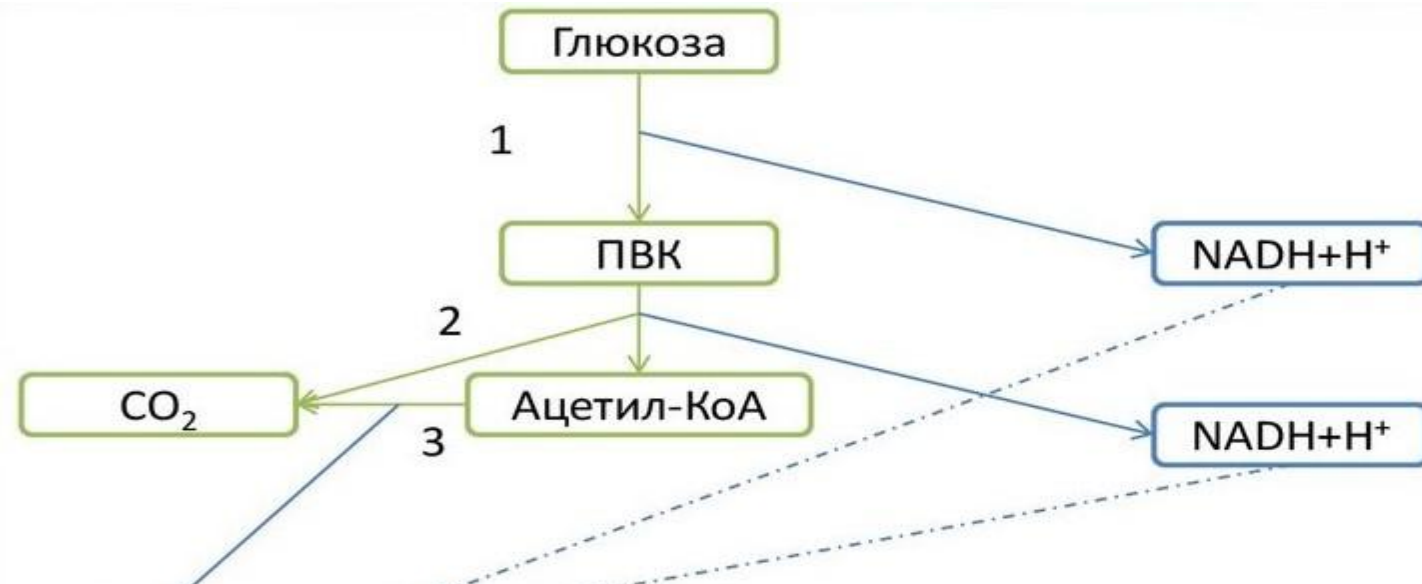
- Представители: *Pseudomonas*, *Bacillus*  
Реакция:  $2\text{NO}_3^- + 10e^- \rightarrow \text{N}_2$

## Диссимиляционная нитритредукция

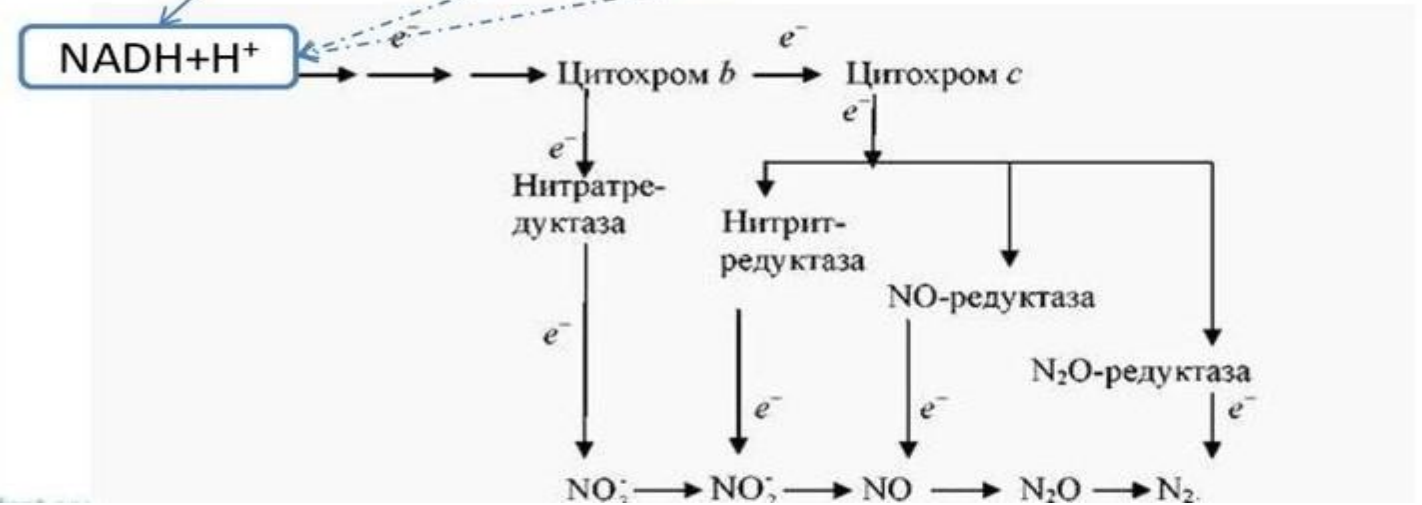
- Представители: *Neisseria*, *Flavobacterium*, *Alcaligenes odorans*
- Реакция:  $2\text{NO}_2^- + 6e^- \rightarrow \text{N}_2$

# Денитрифицирующие бактерии

- К денитрификации способны только прокариоты
- В наибольшей степени способность к денитрификации распространена у бактерий из родов *Bacillus* и *Pseudomonas*
- Эти бактерии являются факультативными анаэробами, которые переключаются на нитратное дыхание только в отсутствие кислорода



- 1 – гликолиз  
ПФП  
КДФГ-путь
- 2 – окислительное  
декарбоксилирование
- 3 - ЦТК



Два ключевых фермента:  
 нитратредуктаза и  
 нитритредуктаза

# Нитратное дыхание

- Денитрифицирующие бактерии относятся к группе бактерий, осуществляющих **анаэробное дыхание**
- Денитрифицирующие бактерии используют в качестве конечных акцепторов электронов нитраты и осуществляют так называемое **нитратное дыхание**
- Процесс нитратного дыхания имеет энергетическое значение для осуществляющих его бактерий – в его ходе происходит образование АТФ
- Энергетический выход нитратного дыхания составляет примерно 70% по сравнению с аэробным дыханием

# Экологическая роль денитрификации

- Денитрификация широко распространена в природе
- Денитрифицирующие бактерии обитают в почвах разного типа, в пресных и морских водоемах
- Денитрификация может приводить к обеднению почв за счет потерь нитратного азота
- С другой стороны, данный процесс служит источником атмосферного азота и является необходимым звеном в круговороте азота в природе

# Сульфатное дыхание

- Вторым источником сероводорода микробиологического происхождения является деятельность **сульфатвосстанавливающих бактерий**
- Сульфатвосстанавливающие бактерии используют в своем энергетическом метаболизме неорганические соединения серы в качестве акцепторов электронов в дыхательной цепи
- Это приводит к **восстановлению** сульфатов до сероводорода
- В качестве доноров электронов сульфатвосстанавливающие бактерии, как правило, используют органические соединения или водород
- Окисление происходит в анаэробных условиях
- По аналогии с нитратным дыханием, этот процесс получил название **сульфатного дыхания** или диссимиляционной сульфатредукции



## Сульфатное дыхание

- Донор  $e^-$  – формиат, ацетат, лактат, этанол, ВЖК
- Конечный акцептор  $e^-$  – сульфат ( $SO_4^{2-}$ )
- Результат процесса –  $H_2S$

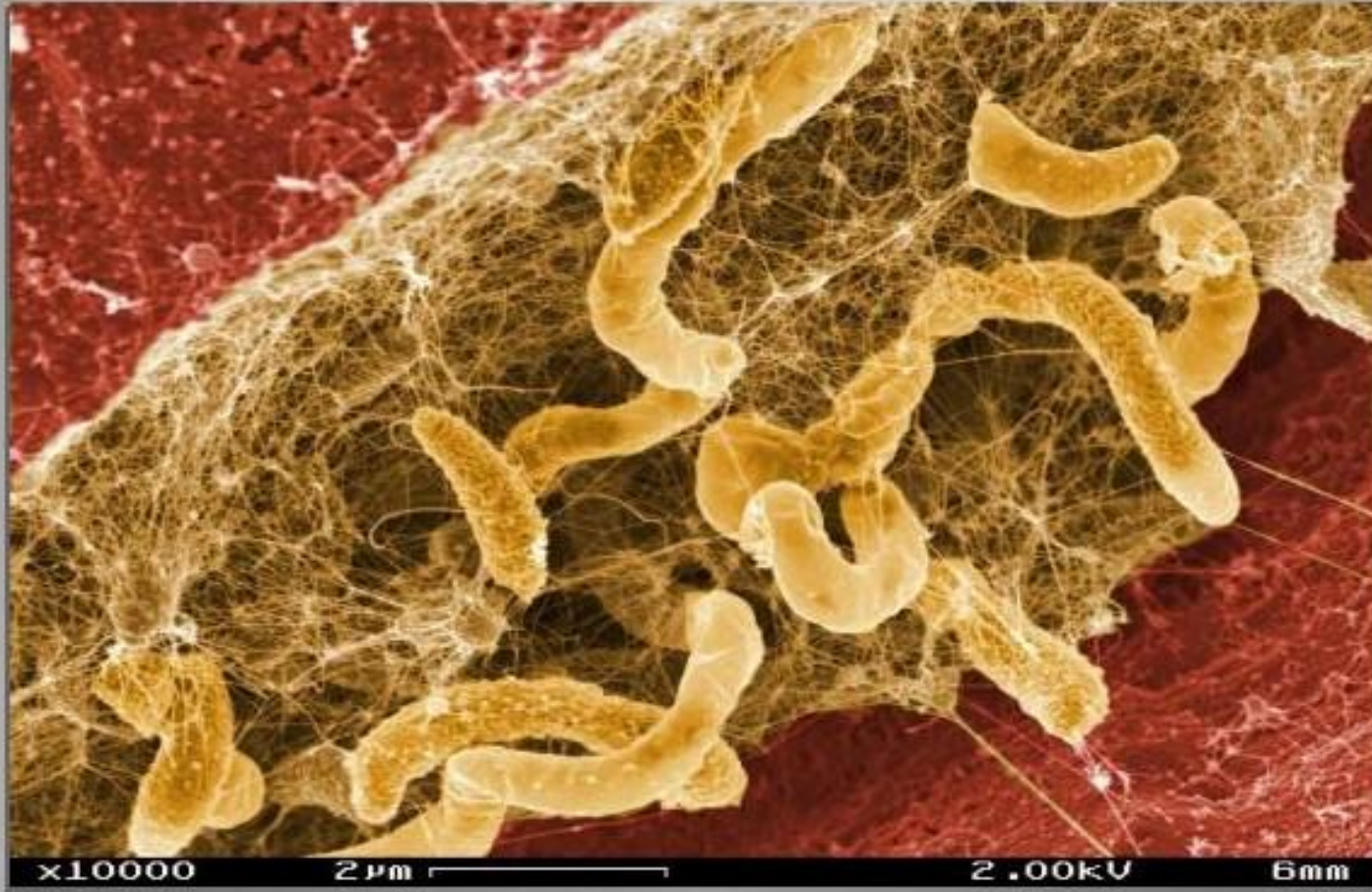


Процесс проходит в три этапа:

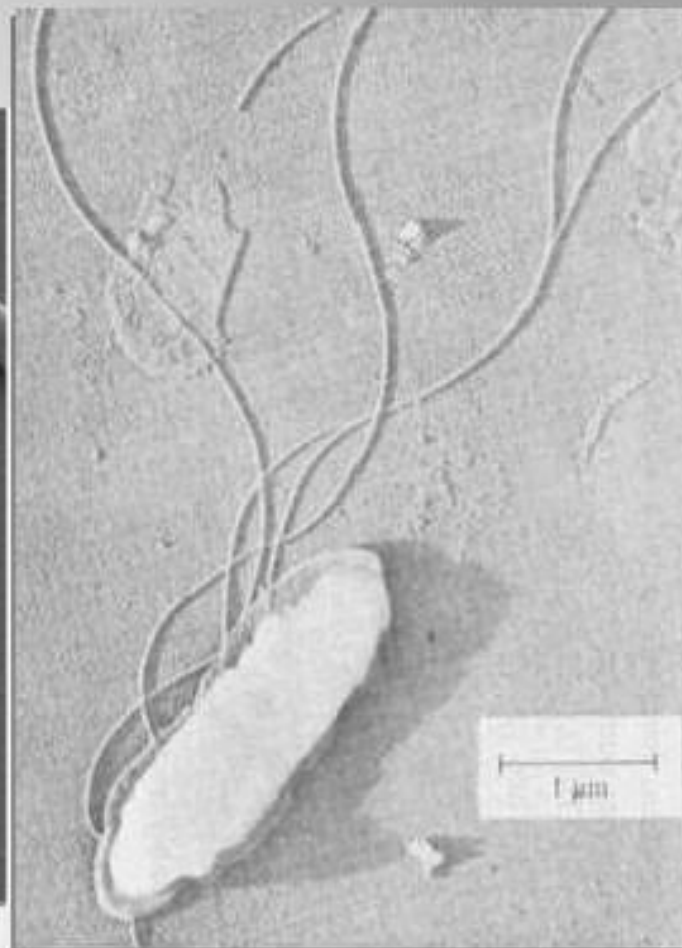
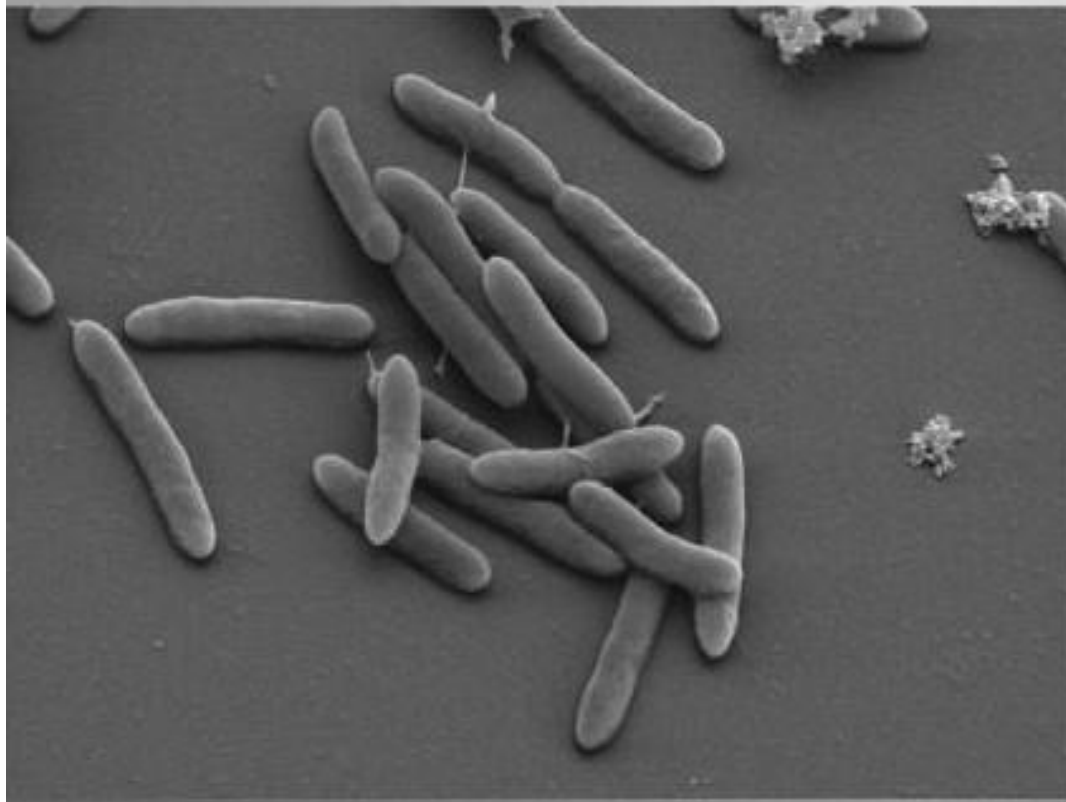
- отрыв электрона от субстрата (молекулярный водород, пируват, ВЖК, этанол, лактат)
- перенос электронов по дыхательной цепи (переносчики – Fe-S-белки, хиноны, цитохромы b c)
- присоединение электронов к конечному акцептору

## Сульфатредукторы

- Анаэробы
- Разнородная в таксономическом смысле группа
- Обитатели донных отложений
- Одна группа – хемоОРГАНОтрофы – источники энергии - брожение или окисление органических субстратов в процессе сульфатного дыхания
- Другая группа – хемоЛИТОтрофы – источник энергии - анаэробное окисление  $H_2$  с акцептированием электронов на  $SO_4^-$  в сочетании с конструктивным метаболизмом гетеротрофного или автотрофного типа



**Desulfovibrio**



***Desulfotomaculum* (*D.nigrificans*, *D.orientis* и *D.ruminis*)-спорообразующий род**

## Ассимиляционная сульфатредукция

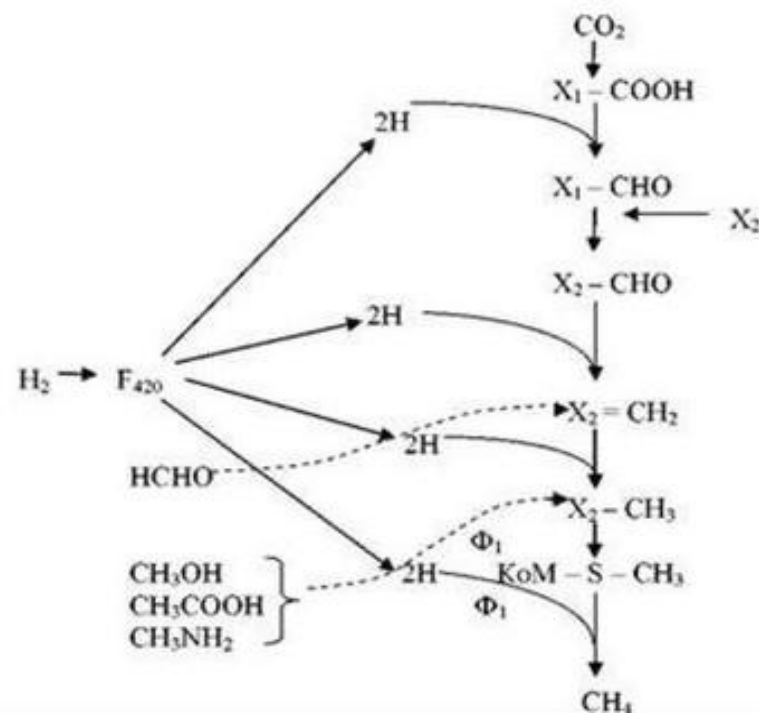
- Осуществляется и бактериями, и некоторыми эукариотами
- Суть не в извлечении энергии, а в получении сульфид-иона и использовании его в конструктивном метаболизме
- Встраивание в серусодержащие АК и белки

# Экологическое значение сульфатвосстанавливающих бактерий

- Сульфатвосстанавливающим бактериям принадлежит ведущая роль в образовании сероводорода в природе и в отложении сульфидных минералов
- Накопление в среде  $H_2S$  часто приводит к отрицательным последствиям – в водоемах к гибели рыбы, в почвах к повреждению растений
- С активностью сульфатвосстанавливающих бактерий связана также **коррозия в анаэробных условиях** различного металлического оборудования, например, металлических труб

# Карбонатное дыхание

- Конечный акцептор электронов – CO
- Результат процесса – метан, осуществляют этот процесс археи-метаногены
- Фиксация CO<sub>2</sub> происходит в нескольких циклах, вариаций очень много



Карбонатное дыхание (метаногенез) – конечный акцептор  $\text{CO}_2$  !

- **Метаногенные бактерии (13 родов)**

Строгий анаэробизм

Способность образовывать метан



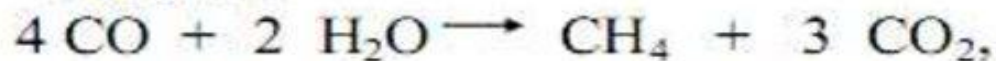
Кроме как из  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}_2$  многие метанобразующие бактерии могут использовать для получения энергии формиат, метанол, ацетат, а также метилированные амины:



формиат



метанол



ацетат



# Метанобразующие бактерии

- Все метанобразующие бактерии относятся к **архебактериям**
- По **морфологическим признакам** метаногенные бактерии весьма гетерогенны: среди них есть прямые или изогнутые палочки разной длины; кокковидные формы, сарциноподобные организмы; извитые формы – в частности спираиллы, а также бактерии необычной формы
- Для некоторых метаногенов характерна развитая система внутриклеточных элементарных мембран, являющихся результатом разрастания и впячивания в цитоплазму ЦПМ и сохраняющих с ней связь

# Метан – парниковый газ

- Образование метана бактериями является важным геохимическим процессом
- Количество метана образуемого метаногенами достигает 1 млрд. тонн в год
- Попадая в атмосферу, метан способствует развитию "**парникового эффекта**", ведущего к глобальному потеплению климата
- Парниковая активность метана примерно в 21 раз выше чем у углекислого газа.

# Метан – основной компонент биогаза

- Метан является горючим газом и представляет собой ценный вид газообразного топлива
- В некоторых странах для получения метана используют специальные сооружения - метантенки, которые позволяют также утилизировать разнообразные органические отходы
- В метантенках при высокой температуре в отсутствие кислорода происходит сбраживание органических веществ первичными анаэробными микроорганизмами, в результате чего образуется водород и углекислота, которые далее трансформируются в метан метанобразующими бактериями
- Производство биогаза в метантенках, с одной стороны, увеличивает энергетические ресурсы, а с другой, позволяет бороться с загрязнением окружающей среды органическими загрязнителями