

**АЭРОБНОЕ И  
АНАЭРОБНОЕ ДЫХАНИЕ  
ПРОКАРИОТ**

# Вопросы:

1. **Аэробное дыхание.**

2. **Хемосинтез. Группы аэробных хемолитотрофных бактерий.**

3. **Группы аэробных хеморганотрофных бактерий.**

4. **Анаэробное дыхание.**

**Дыхание** – это окислительно-восстановительный процесс, идущий с образованием АТФ.

**В качестве донора  
электронов и протонов**

**прокариоты могут  
использовать:**

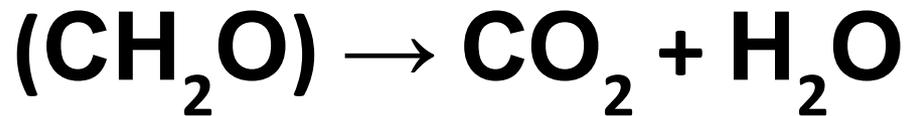
- **органические вещества  
(органотрофные бактерии)**
- **неорганические вещества  
(литотрофные бактерии).**

**Аэробное дыхание - ЭТО ТИП**  
**дыхания, при котором**  
**конечным акцептором**  
**электронов является  $O_2$**

- **Анаэробное дыхание** - тип дыхания при котором конечным акцептором электронов могут служить:
  - ✓ «связанный кислород» в форме нитратов, сульфатов,  $\text{CO}_2$
  - ✓ молекулярная сера
  - ✓  $\text{Fe}^{3+}$
  - ✓ органические соединения – фумаровая кислота
- Характерно только для

# 1. Аэробное дыхание

- Аэробное дыхание – это процесс, обратный «нормальному» фотосинтезу, т. е. органическое вещество ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) разлагается до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ :



Это полное окисление.

- Неполное окисление – осуществляют, например, уксуснокислые бактерии (р. *Acetobacter*). Они окисляют этанол до уксусной кислоты. Вредители

**Аэробные организмы обладают особым аппаратом:**

- **дыхательной (электронтранспортной) цепью**
- **ферментом АТФ-синтетазой.**
- **оба компонента у прокариот расположены в ЦПМ.**

**Дыхательная цепь** - это система переносчиков электронов и протонов от донора (окисляемого вещества) к акцептору (при аэробном дыхании - это  $O_2$ ).

**В состав дыхательной цепи входят:**

- ✓ **Флавопротеиды** – вещества белковой природы – переносчики протонов.
- ✓ **Хиноны (у бактерий – убихинон)** – способны переносить, как протоны, так и электроны.
- ✓ **Цитохромы** – белки (содержащие геммы), переносчики электронов.
- ✓ **Железо-серные белки** – переносчики электронов.

- Протоны и электроны, извлеченные при окислении субстрата (при помощи дегидрогеназ), акцептируются НАД или ФАД (это переносчики электронов) и переносятся в дыхательную цепь.
- Транспорт электронов по цепи сопряжен с переносом протонов из цитоплазмы через мембрану.

- Вследствие чего возникает трансмембранный электрохимический протонный градиент, который создает протондвижущую силу.
- Протоны возвращаются, «перетекают», обратно с наружной стороны мембраны на внутреннюю по электрохимическому градиенту.

- Синтез АТФ осуществляется при помощи мембранного фермента АТФ-синтетазы путем конверсии энергии трансмембранного электрохимического градиента протонов в химическую форму энергии.

- Образование АТФ в процессе дыхания называется

ОКИСЛИТЕЛЬНЫМ

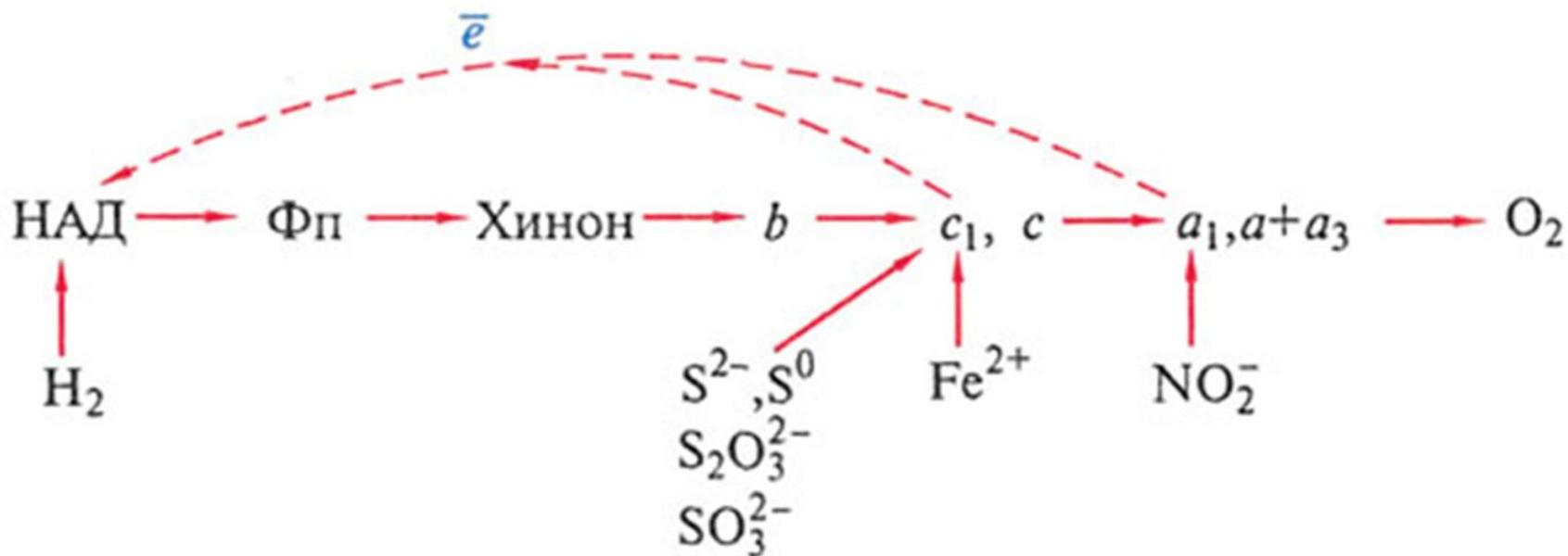
ФОСФОРИЛИРОВАНИЕМ.

## 2. Хемосинтез. Группы аэробных хемолитотрофных прокариот

- Хемосинтез – это способность некоторых прокариот синтезировать клеточные компоненты, используя в качестве источника углерода  $\text{CO}_2$  за счет энергии, получаемой при окислении неорганических соединений.

- **Явление хемосинтеза было открыто С. Н. Виноградским в 1887-1890 гг.**
- **Хемосинтез осуществляют только прокариоты – хемолитоавтотрофные бактерии.**

# Дыхательная цепь хемолитоавтотрофных бактерий



- В большинстве случаев включение электронов в дыхательную цепь при окислении неорганических субстратов ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{S}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ) происходит на уровне цитохромов.
- Только при окислении  $\text{H}_2$  электроны поступают на уровне НАД, т.к.  $\text{H}_2$  обладает высоким отрицательным значением  $E_0$  (-420 мВ).
- Это приводит к тому, что функционирует только один генератор трансмембранного

- Для образования восстановителя НАД·Н<sub>2</sub> у таких бактерий работает система обратного переноса электронов, т. е. «лифт», поднимающий электроны в сторону более высокого отрицательного потенциала – до уровня НАД ( у НАД  $E_0 = -320\text{мВ}$ ).
- Этот процесс идет с затратой энергии, используется АТФ, синтезируемая в процессах окислительного фосфорилирования на концевом этапе дыхательной

# Группы аэробных хемолитотрофных прокариот

## Нитрифицирующие бактерии

- Аэробные Грам(-) бактерии различной морфологии.
- Окисляют восстановленные соединения азота (аммоний, азотистая кислота) до азотной кислоты.
- Процесс окисления аммония до азотной кислоты называется **нитрификацией**.

# Процесс нитрификации идет в

два этапа:

**1. Окисление аммония до нитрита:**



**Осуществляют бактерии родов:**

*Nitrosomonas, Nitrosococcus,*

*Nitrosolobus, Nitrospira,*

*Nitrovibrio.*

## 2. Окисление нитрита ( $\text{NO}_2^-$ ) до нитрата:



Осуществляют бактерии родов: *Nitrobacter*, *Nitrospira*, *Nitrococcus*.

Источник углерода -  $\text{CO}_2$ , фиксируют его в цикле Кальвина.

- Между двумя группами нитрифицирующих бактерий особый тип симбиоза – **метабиоз** – взаимоотношения, когда один вид использует продукты жизнедеятельности другого, как субстрат для развития.
- **Распространены** в почвах, в водоемах, в иловых отложениях, в морских осадках, на очистных сооружениях, в горных породах, на поверхности каменных исторических

## • **Значение:**

- ✓ **Участвуют в круговороте азота, осуществляя нитрификацию.**
- ✓ **В хорошо аэрируемых почвах могут приводить к подкислению почвы.**
- ✓ **Участвуют в разрушении зданий (разрушают известь, камень) за счет выделения**

# Тионовые бактерии

- К ним относятся бактерии родов: *Thiobacillus*, *Thiomicrospora*, *Thiosphaera*, *Thermothrix* и др.
- Окисляют восстановленные соединения серы:  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{S}$ , сульфит -  $\text{SO}_3^{2-}$ , тиосульфат -  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$  и др.
- $\text{H}_2\text{S}$  окисляют до  $\text{H}_2\text{SO}_4$  через ряд промежуточных продуктов:



- **Встречаются** в водоемах при наличии  $H_2S$  и  $S$ , в серных источниках, в сульфидных и серных месторождениях, в почвах, на очистных сооружениях. Симбионты некоторых морских беспозвоночных (у глубоководных погонофор, моллюсков).
- **Значение.** Участвуют в

# Железобактерии

- Истинные железобактерии (*Thiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*) окисляют  $\text{Fe}^{2+}$  до  $\text{Fe}^{3+}$  с целью получения энергии.
- Окисление  $\text{Fe}^{2+}$  происходит на внешней стороне ЦПМ, в цитозоль ионы  $\text{Fe}^{2+}$  не проникает. Электроны с ионов железа акцептируются **рустицианином** (медьсодержащий белок), который переносит электроны в дыхательную цепь на

- **Железобактерии встречаются в** кислых рудничных стоках, в подземных водах сульфидных месторождений, кислых железистых источниках и озерах.
- **Практическое использование.** *T. ferrooxidans* используется в биогидрометаллургии.

# Водородные бактерии

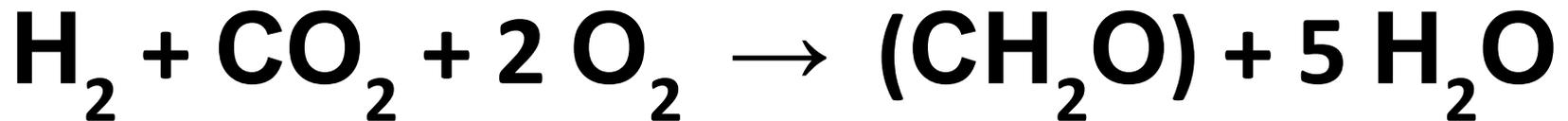
- Облигатные водородные бактерии входят в состав родов *Calderobacterium* и *Aquifex* (экстремальные термофилы, развивающиеся при  $t$  выше  $+70^{\circ}\text{C}$ )
- Факультативные водородные бактерии – некоторые виды р. *Pseudomonas* (*P. aeruginosa*), *Paracoccus*, *Bacillus*.

- Энергию получают при окислении водорода:



- Имеют гидрогеназы – ферменты, катализирующие реакцию:  $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}$

- Водород также используют в биосинтетических процессах:

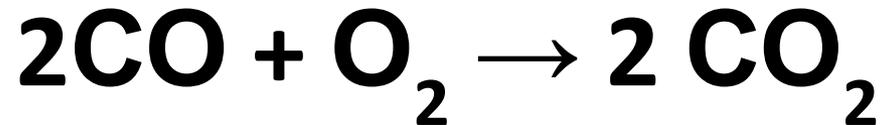


$\text{CH}_2\text{O}$  – обобщенная формула орган. в-ва.

- Являются газотрофами.
- Значение: используют для

# Карбоксидобактерии

- Род *Carboxydomonas*, некоторые представители р. *Pseudomonas*
- CO окисляют для получения энергии:



Фермент: СО-оксидаза

- При окислении CO используется особая, не чувствительная к CO цитохромоксидаза  $b_{563}$ .
- Образовавшийся  $\text{CO}_2$  используют как источник углерода,  $\text{CO}_2$  фиксируют в цикле Кальвина.

### 3. Аэробные

## хемоорганотрофные бактерии

- Типичные хемоорганогетеротрофы - бактерии семейства *Enterobacteriaceae*, например, *Escherichia coli*.
- Энтеробактерии предпочитают использовать различные углеводы (глюкозу,

- **Окисление глюкозы происходит в гликолитическом или окислительном пентозофосфатном пути, в результате образуется ПВК, которая после окислительного декарбоксилирования, поступает в цикл трикарбоновых кислот в форме ацетил-КоА –  $\text{CH}_3\text{-CO}\sim\text{S-CoA}$ . В ЦТК происходит полное окисление субстрата, и**

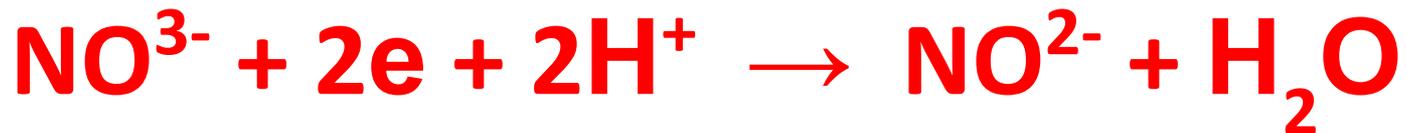
К хемоорганогетеротрофным бактериям также относятся узкоспециализированные группы:

- ✓ *Метанотрофы и метилотрофы – окисляют метан  $\text{CH}_4$ , метанол  $\text{CH}_3\text{OH}$ , метиламин  $\text{CH}_3\text{NH}_2$ , формальдегид  $\text{HCHO}$  и муравьиную кислоту  $\text{HCOOH}$ .*
- ✓ *Аммонифицирующие бактерии*
- ✓ *Целлюлозоразрушающие бактерии*
- ✓ *Углеводородокисляющие и др.*

## 4. Анаэробное дыхание

### Нитратное дыхание

- Конечным акцептором электронов является нитрат  $\text{NO}^{3-}$ , который восстанавливается до нитрита  $\text{NO}^{2-}$ :



Реакцию катализирует фермент *нитратредуктаза*.

- Широко распространено среди прокариот. Например, характерно для *Pseudomonas fluorescens*, *Thiobacillus denitrificans*, *Paracoccus denitrificans*.

## Сульфатное дыхание

- Конечным акцептором электронов является **сульфат  $SO_4^{2-}$** , который восстанавливается через сульфит ( $SO_3^{2-}$ ) до сероводорода:



- Сульфатное дыхание характерно для сульфатредуцирующих бактерий (р. *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum*, *Desulfobacter*, *Desulfonema* и др.). Строгие анаэробы. Обитают в илах в водоемах, в почвах, пищеварительном тракте животных.

## Серное дыхание

- В качестве конечного акцептора электронов используется молекулярная сера S, которая восстанавливается до сероводорода.
- Характерно для бактерий *Desulfuromonas acetoxidans*, обитающих в морской воде.

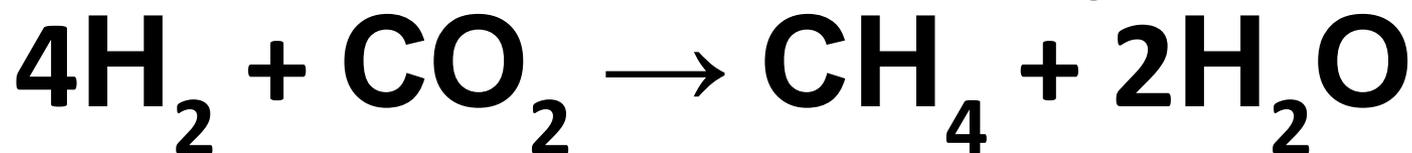
# Карбонатное дыхание

- Конечным акцептором электронов является CO<sub>2</sub>.
- Характерно для анаэробных ацетогенных бактерий (р. *Acetobacterium* и др.), которые образуют уксусную кислоту, используя CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>:



**• У метанобразующих бактерий**

**в процессе карбонатного  
дыхания при окислении  $\text{H}_2$   
образуется метан  $\text{CH}_4$ :**



## «Железное» дыхание

- Конечным акцептором электронов являются **ионы  $Fe^{3+}$** , которые восстанавливаются до  $Fe^{2+}$ .
- $Fe^{3+}$  как акцептор электронов используют бактерии родов *Geobacter*, *Shewanella*.
- Предполагают, что  $Fe^{3+}$  как неорганический акцептор электронов появился раньше, чем нитрат, сульфат или  $O_2$ .