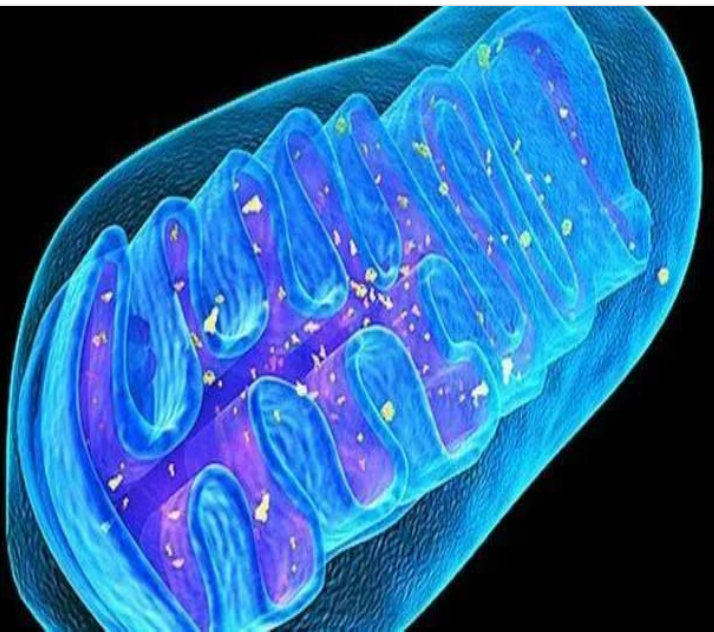


---

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ОБМЕН – I



**Зав. кафедрой биохимии  
профессор В. В. Лелевич**

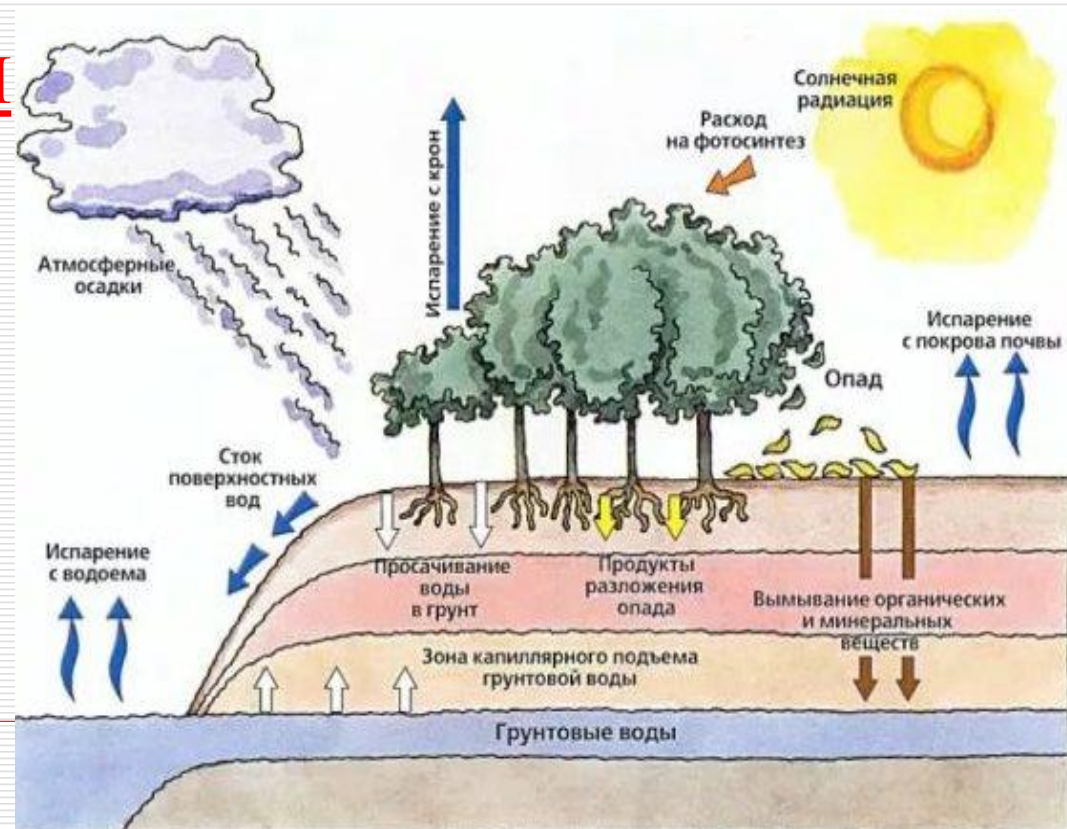
---

**Биоэнергетика** – раздел биохимии, изучающий вопросы преобразования и использования энергии в живых клетках.

**Биоэнергетика** – это часть более общей науки – термодинамики

## ФОРМЫ ЭНЕРГИИ

1. Электрическая
2. Механическая
3. Химическая
4. Тепловая
5. Световая



---

□ **Есть два вида полезной энергии:**

**1. Тепловая**

**2. Свободная**

□ **Тепловая энергия** – способна производить работу только при изменении температуры и давления.

□ Пригодной для клеток формой энергии, т.е. формой, которую они могут и должны использовать – это **свободная энергия**.

---

---

**Свободная энергия** – она может  
производить работу при  
постоянной температуре и  
постоянном давлении.

**Клетка** – это химический  
двигатель, работающий при  
постоянной температуре и  
постоянном давлении.

---



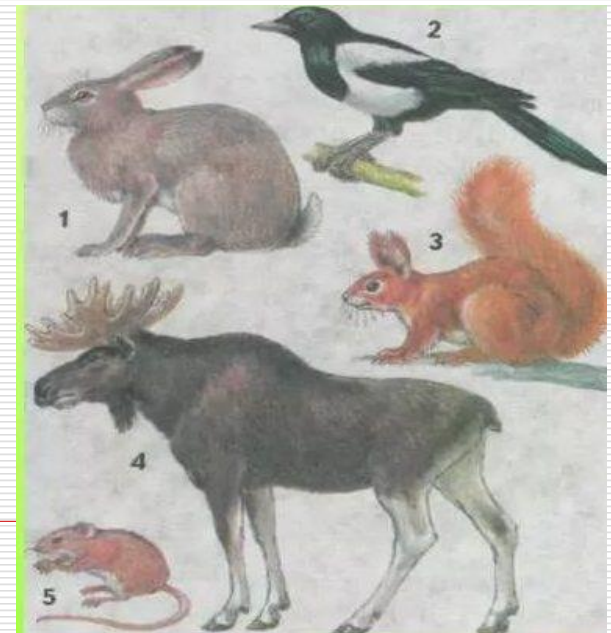
---

**Автотрофы (фототрофы) –**  
организмы, способные  
синтезировать сложные  
соединения за счет энергии  
солнца и энергии окисления  
неорганических веществ.



**Гетеротрофы (хемотрофы) –**  
организмы, вырабатывающие  
энергию за счет окисления  
сложных органических  
веществ (пищевых  
продуктов).

---



# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ

---

**Энтальпия (H) – полная энергия соединения**

**Свободная энергия Гиббса (G) – энергия, которая может быть переведена в работу.**

**Энтропия (S) – мера неупорядоченности системы. Чем меньше упорядочена система, тем энтропия выше.**

---

---

Изменения **свободной энергии, теплоты и энтропии** в химических реакциях, протекающих при постоянной температуре и постоянном давлении, связаны друг с другом следующим уравнением:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$\Delta G$  – изменение свободной энергии реакционной системы

$\Delta H$  – изменение теплосодержания или **ЭНТАЛЬПИИ**

$T$  – абсолютная температура при которой протекает реакция

$\Delta S$  – изменение **ЭНТРОПИИ**

---

**Экзергонические реакции** – протекают с выделением энергии.

---

То есть, если при превращении  $A \rightarrow B$  свободная энергия  $B$  меньше чем  $A$ .

**Эндергонические реакции** – протекают только при притоке энергии.

То есть свободная энергия  $B$  больше чем  $A$ .

---



# МЕМБРАННАЯ БИОЭНЕРГЕТИКА

## Энергопреобразующие мембраны

---

1. Внутренняя мембрана митохондрий
2. Внутренняя (цитоплазматическая) мембрана бактерий
3. Внешняя мембрана клеток эукариот

Энергетические  $\rightarrow \Delta \mu J \rightarrow$  работа  
ресурсы

$\Delta \mu J$  – трансмембранная разность  
электрохимического потен-  
циала иона.

---

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ «ВАЛЮТА» КЛЕТОК

---

**С участием мембран:**  $\Delta \mu_{\text{H}^+}$  или  $\Delta \mu_{\text{Na}^+}$

**Без участия мембран:** АТФ, другие макроэрги

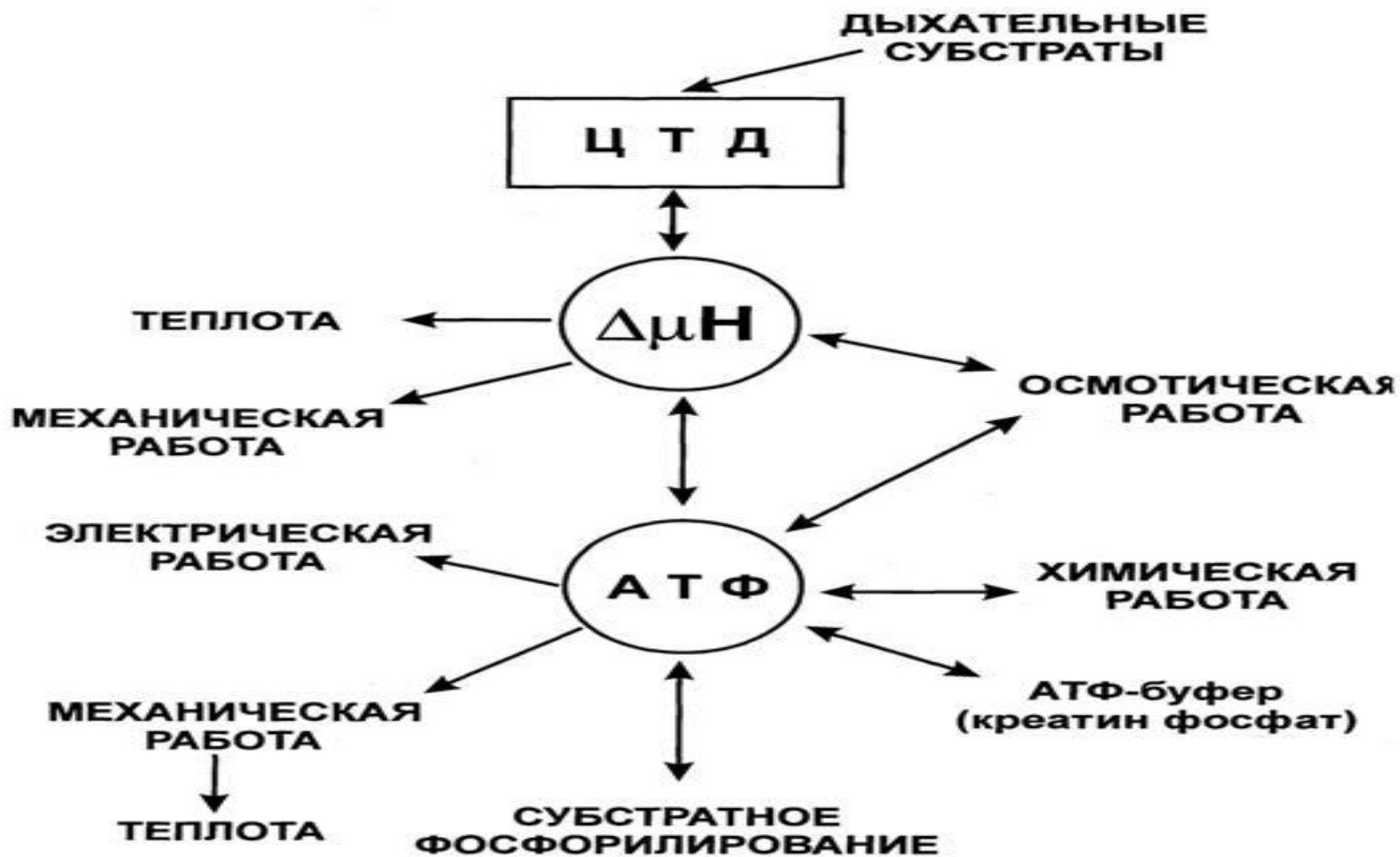
**Сопрягающие ионы:**

$\text{H}^+$

$\text{Na}^+$  (во внешних мембранах животных клеток)

---

# СХЕМА ЭНЕРГЕТИКИ КЛЕТКИ



- 
- **Запасание энергии происходит в виде богатых энергией химических связей особого класса соединений – макроэргов, большинство их которых являются ангидридами фосфорной кислоты.**
  - **Макроэргическими (богатыми энергией) принято считать связи, при гидролизе которых изменения свободной энергии системы ( $-\Delta G$ ) составляет более **21 кДж/моль** или более **5 ккал/моль**.**
-

# СВОБОДНАЯ ЭНЕРГИЯ ГИДРОЛИЗА НЕКОТОРЫХ МАКРОЭРГИЧЕСКИХ ФОСФАТОВ

СОЕДИНЕНИЕ	$-\Delta G$ , кДж/моль
ФОСФОЕНОЛПИРУВАТ	61,8
1,3-ДИФОСФОГЛИЦЕРАТ	54,3
КАРБАМОИЛФОСФАТ	51,8
КРЕАТИНИНФОСФАТ	43,0
АЦЕТИЛФОСФАТ	43,0
<b>АТФ</b>	<b>30,5</b>
<b>АДФ</b>	<b>27,6</b>

# МАКРОЭРГИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ

---

- АТФ и все нуклеозидтрифосфаты – ГТФ, ЦТФ, УТФ, ТТФ
  - Креатинфосфат (мышцы, миокард)
  - 1,3-дифосфоглицерат
  - Фосфоенолпируват
  - Ацетил-КоА
  - Сукцинил-КоА
  - Карбамоилфосфат
-

**Биологическое окисление** – это совокупность всех окислительных процессов, протекающих в организме с участием кислорода

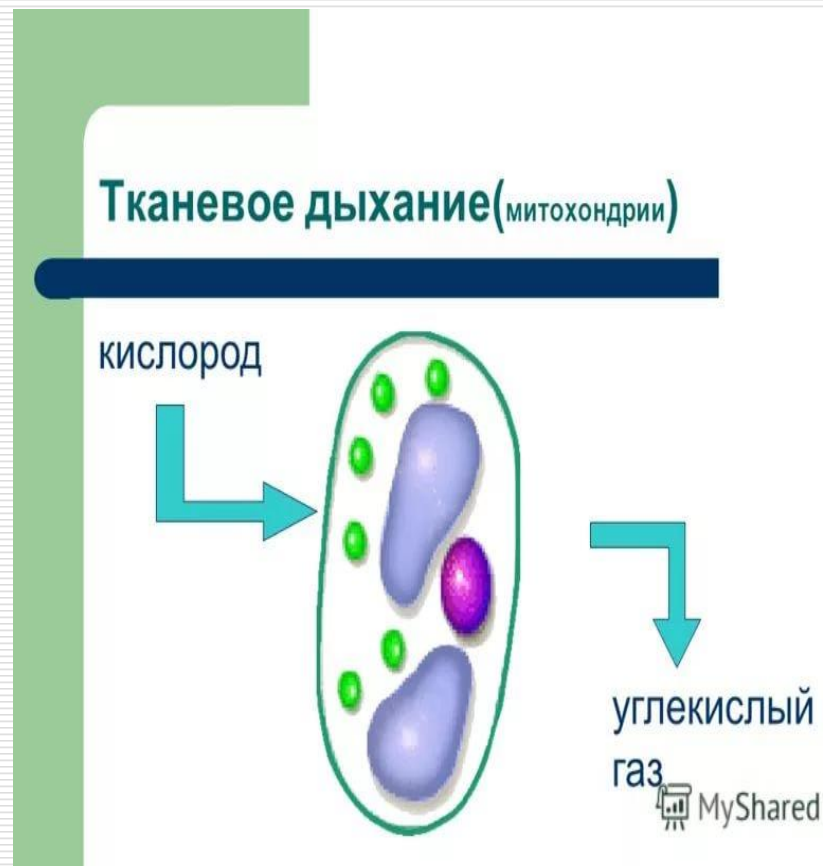
---

### **Назначение биологического окисления**

- 1. Извлечение энергии из различных соединений (тканевое дыхание)**
  - 2. Разрушение или обезвреживание ксенобиотиков (пероксидазное и оксигеназное окисление)**
  - 3. Биосинтезы (гидроксилазное окисление)**
  - 4. Изменение проницаемости мембран (окислительная модификация молекул).**
-

# ХАРАКТЕРНЫЕ ЧЕРТЫ ТКАНЕВОГО ДЫХАНИЯ

- Это часть биологического окисления, где субстрат окисляется путем дегидрирования, акцептором водорода служит кислород (**проходит в митохондриях**).
- Водород в виде восстановительных эквивалентов переносится на кислород через **дыхательную цепь**.
- Энергия окисления используется для синтеза АТФ в ходе **окислительного фосфорилирования**.





# ТИПЫ ФОСФОРИЛИРОВАНИЯ

---

- 1. Окислительное** – свободная энергия генерируется в **ЦПЭ** (митохондрии)
  - 2. Субстратное** – синтез АТФ идет за счет энергии высокоэнергетических соединений, стоящих в термодинамической шкале выше АТФ.
  - 3. Фотосинтетическое** – с использованием энергии Солнца в процессе фотосинтеза  
**АТФ – универсальный аккумулятор энергии**
-

# Пути синтеза и утилизации АТФ

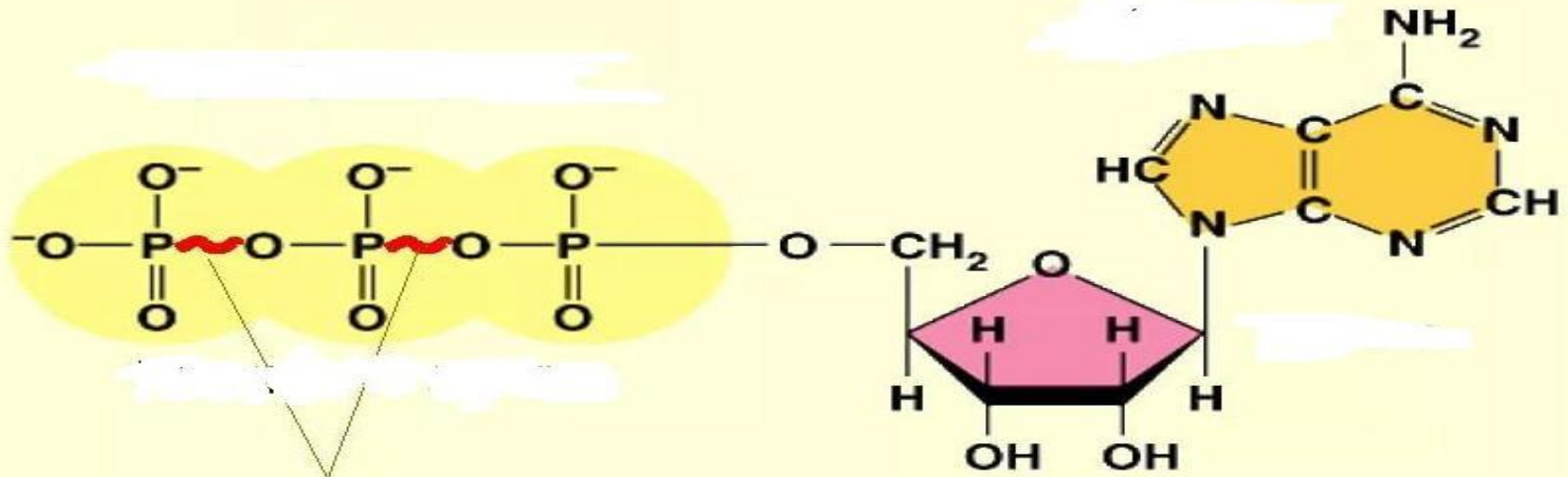


# Аденозинтрифосфорная кислота (АТФ)

**1929 г.** - впервые обнаружена в мышечной ткани Карлом Ломаном (Германия)

**1941 г.** – концепция, что АТФ – универсальный макроэрг (Фриц Липман)

**Средняя скорость оборота пула АТФ (при сидячей работе) - 3800 раз в сутки.**



Макроэргические связи

---

**□ АТФ связывает процессы анаболизма и катаболизма.**

**Это соединение – энергетическая «валюта» живой клетки.**

**□ Экзергонические превращения АТФ в АДФ и P неорг. или АМФ и PP сопряжено со многими эндергоническими реакциями.**

---

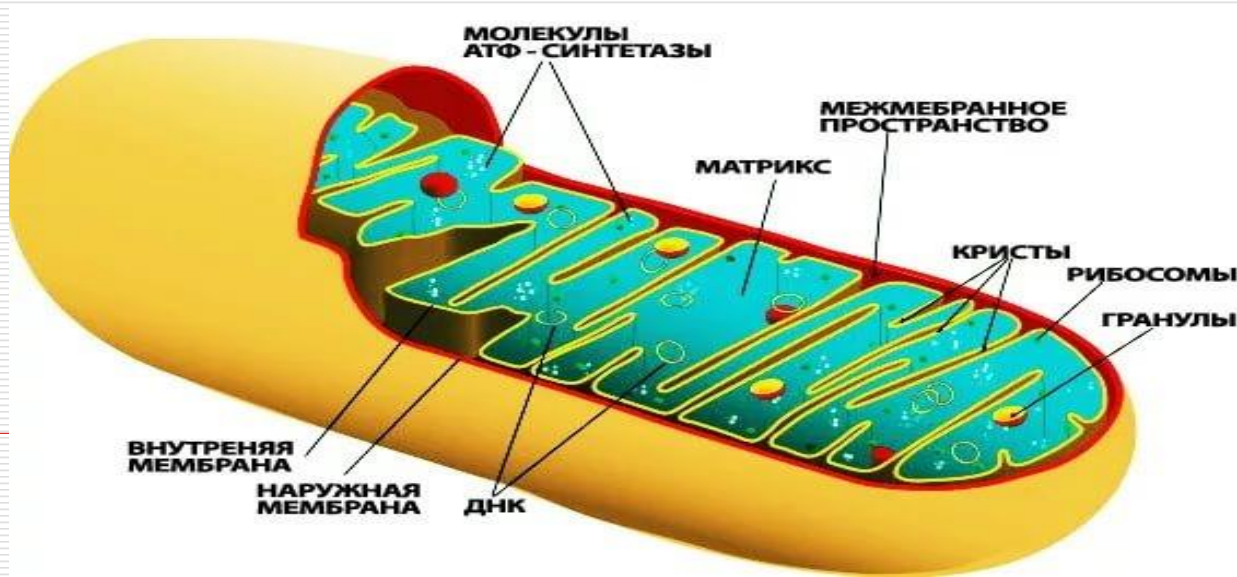
- 
- Для поддержания способности к переносу фосфатных групп концентрация АТФ должна быть намного выше равновесной концентрации.**

**Это достигается за счет реакций катаболизма, сопровождающихся производством энергии.**

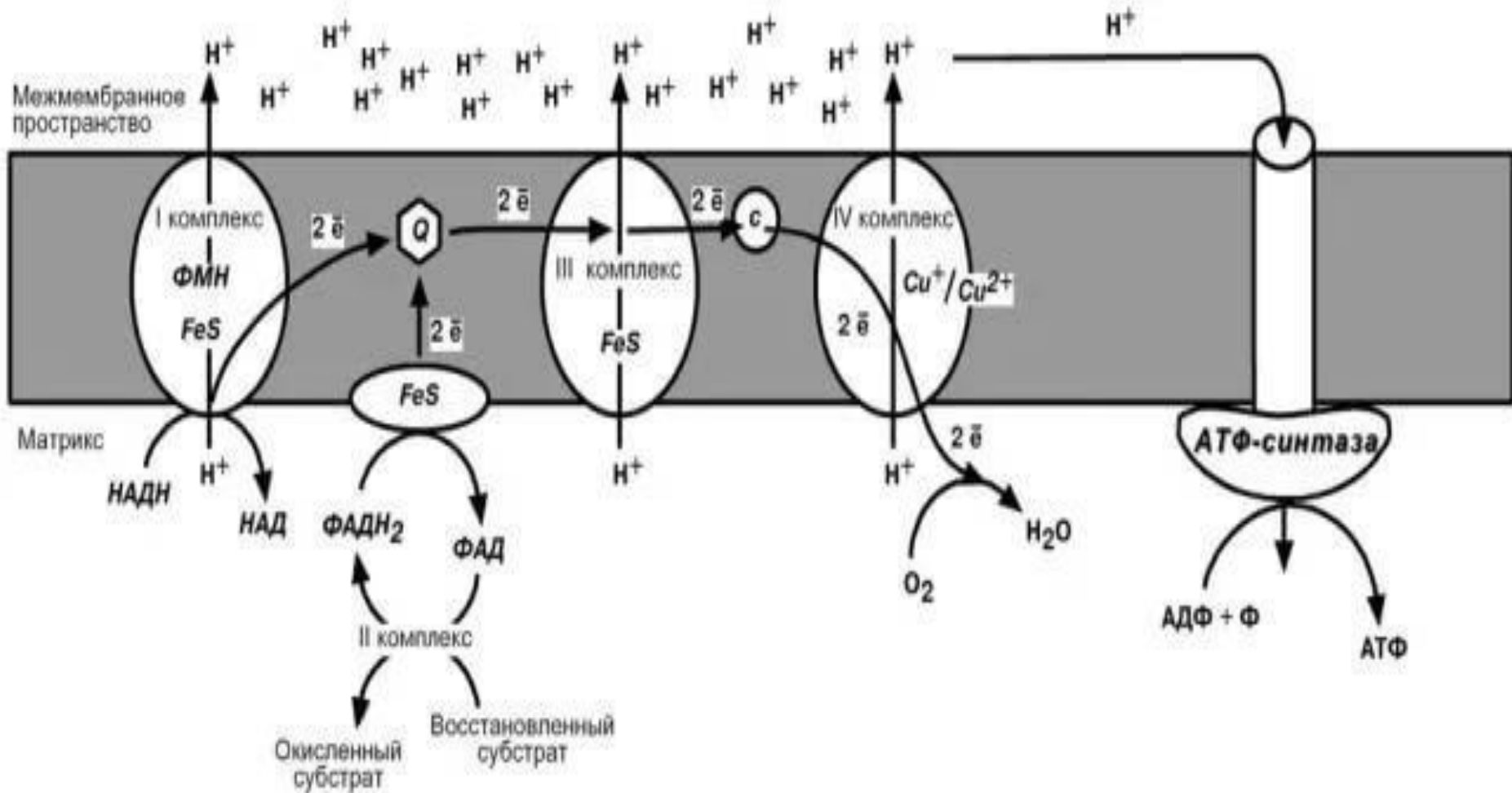
---

# МИТОХОНДРИАЛЬНАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ

- Последовательность переносчиков **протонов ( $H^+$ )** и **электронов** от окисляемого субстрата на кислород, локализованных во внутренней мембране митохондрий.



# МИТОХОНДРИАЛЬНАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ



# СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЦПЭ

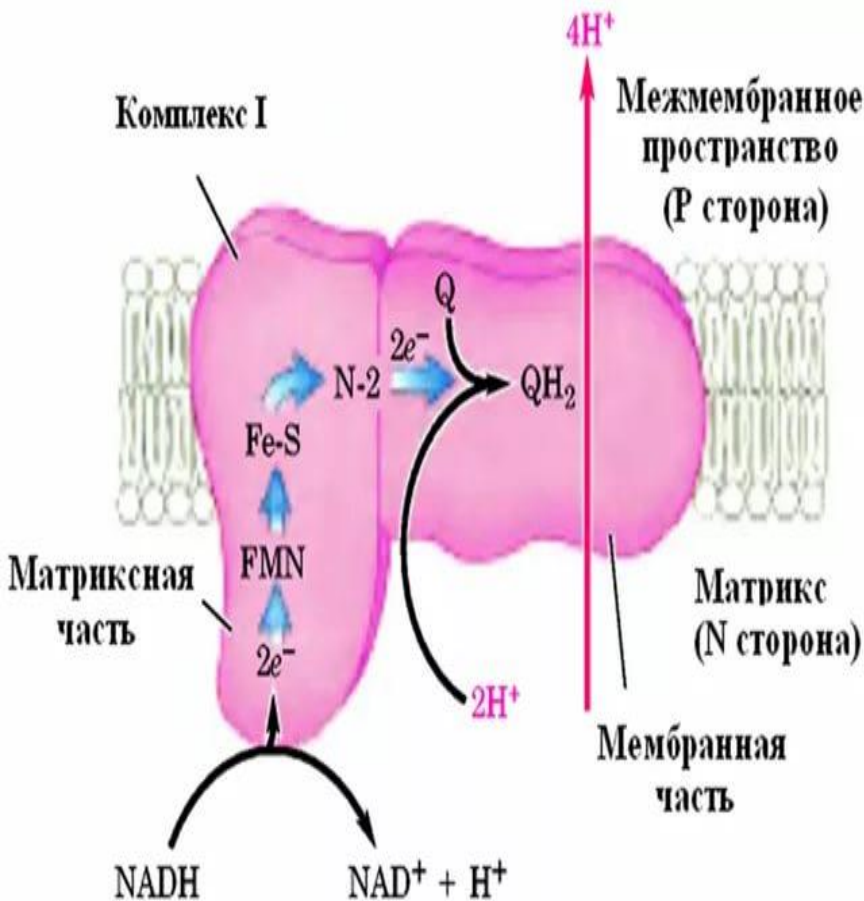
---

ЦПЭ включает в себя около 70 разнообразных пептидов и белков, которые организованы в 5 больших мембрано-связанных комплексов.

- I. НАДН – КоQ - оксидоредуктаза
  - II. Сукцинат – КоQ-оксидоредуктаза ( СДГ )
  - III. КоQH<sub>2</sub>- цитохром С - оксидоредуктаза
  - IV. Цитохромоксидаза (цитохром С оксидаза) – ( цитохром С редуктаза )
  - V. АТФ - синтаза
-



# I комплекс (НАДН – КоQ редуктаза)



□ окисляет НАДН+Н<sup>+</sup> , отбирая у него **2 электрона**, и переносит их на растворимый в липидах **Кофермент Q (Убихинон)**, который внутри мембраны диффундирует к **комплексу III**.

□ перекачивает **4 H<sup>+</sup>** из матрикса в межмембранное пространство митохондрий.

## **II комплекс (сукцинат-КоQ-оксидоредуктаза)**

---

- включает ФАД-зависимые дегидрогеназы и железосерные белки.**
  - Не перекачивает протоны, но обеспечивает вход в ЦПЭ дополнительных электронов за счет окисления сукцината.**
-

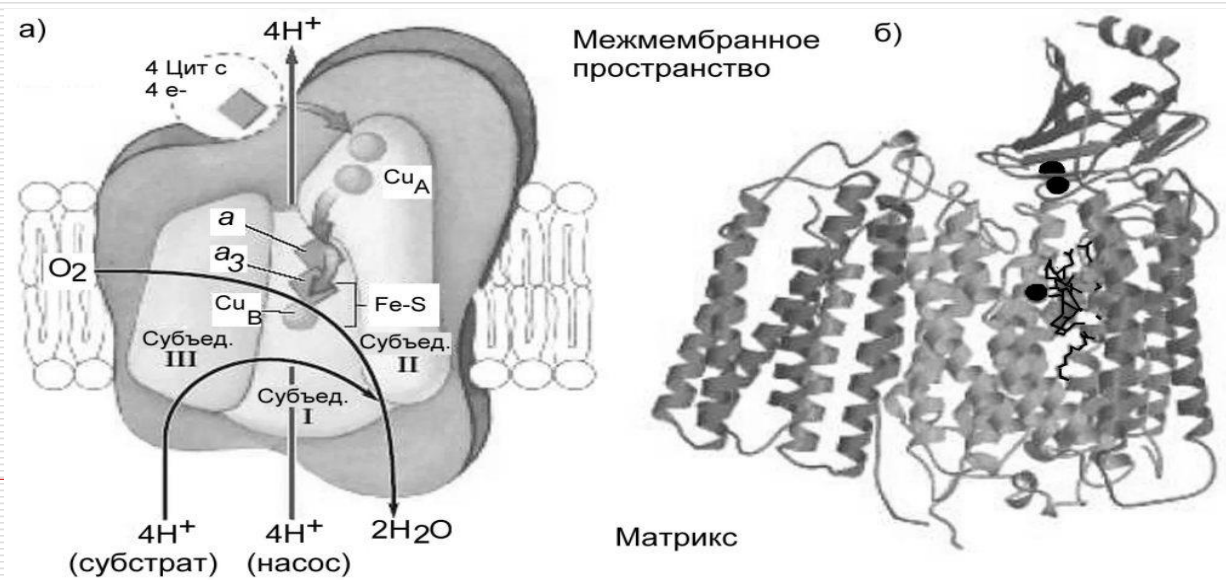
## III комплекс ( $\text{CoQH}_2$ –цитохром С редуктаза) –

---

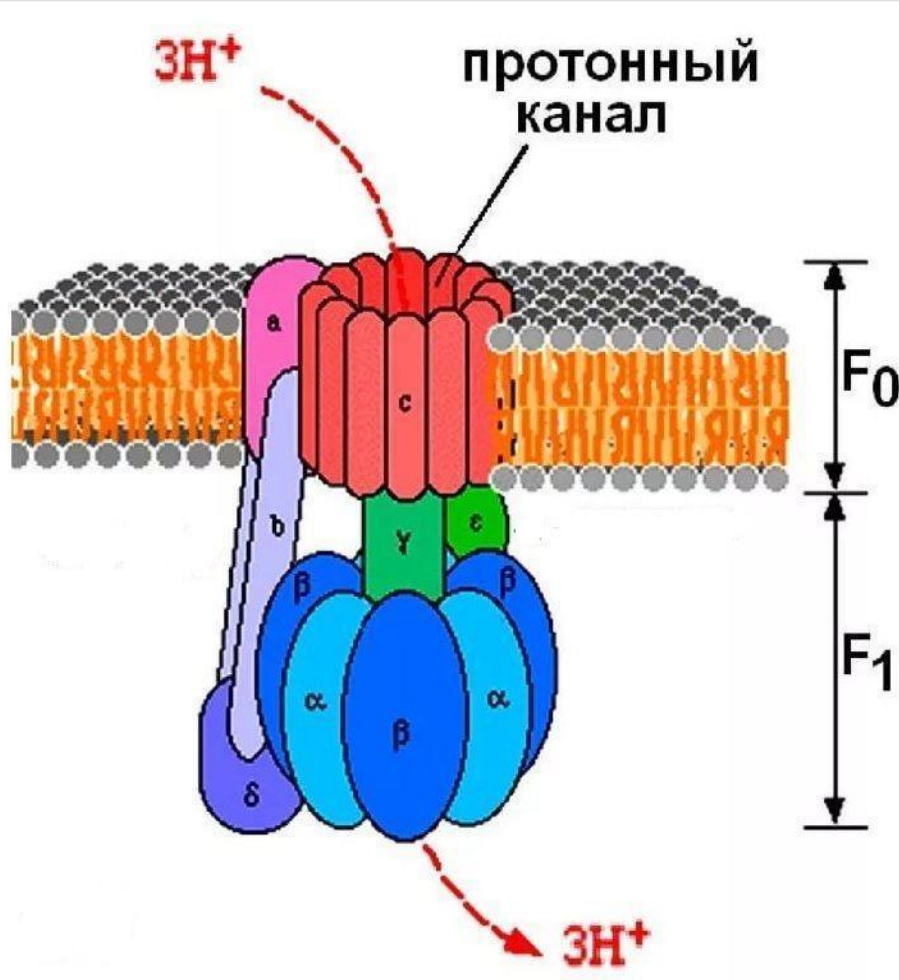
- в его состав входят **цитохромы b, c<sub>1</sub>** и **железосерные белки**, которые переносят **электроны** с **Кофермента Q** на два водорастворимых **цитохрома c** с внутренней мембраны митохондрий.
  - Комплекс III перекачивает из матрикса в межмембранное пространство **4 H<sup>+</sup>**.
-

# IV комплекс (цитохромоксидаза)

- состоит из **цитохромов  $\alpha$  и  $\alpha_3$** , которые помимо гема содержат ионы меди.
- катализирует перенос **2 электронов** через **цитохром  $c$**  на один атом молекулярного  $O_2$ , перекачивая при этом в межмембранное пространство **2 из 4 протонов**.



# V комплекс (F<sub>0</sub>F<sub>1</sub> АТФ-синтаза)



- АТФ-синтазный комплекс использует энергию трансмембранного протонного потенциала для синтеза АТФ из АДФ и Фн

# Существуют 2 разновидности ЦПЭ

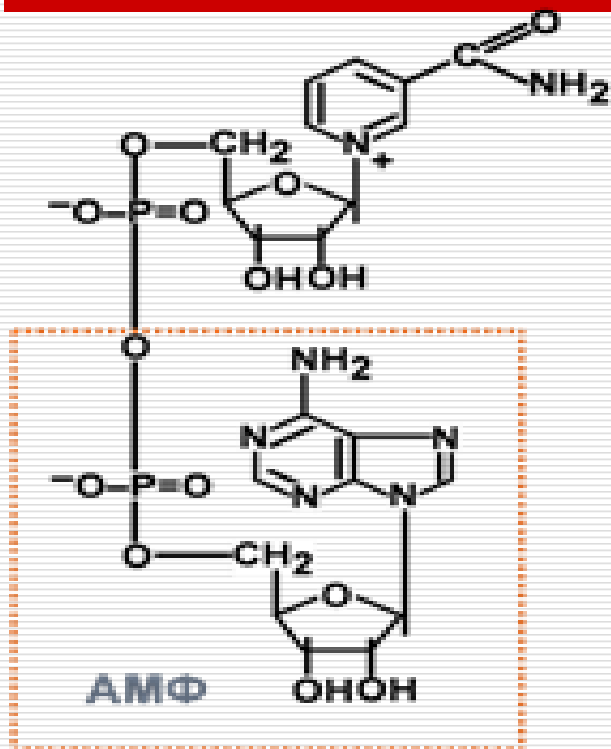
---

**Полная цепь** – в нее вступают пиридинзависимые субстраты и передают атом водорода на НАД-зависимые дегидрогеназы.

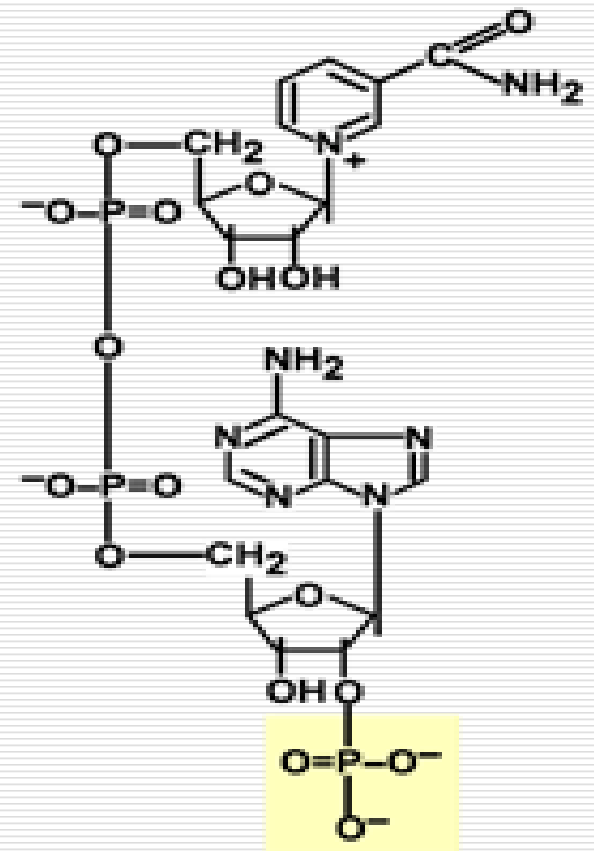
**Неполная (укороченная) цепь** – в ней атомы водорода передаются от ФАД-зависимых субстратов в обход I комплекса.

---

# Пиридинзависимые дегидрогеназы



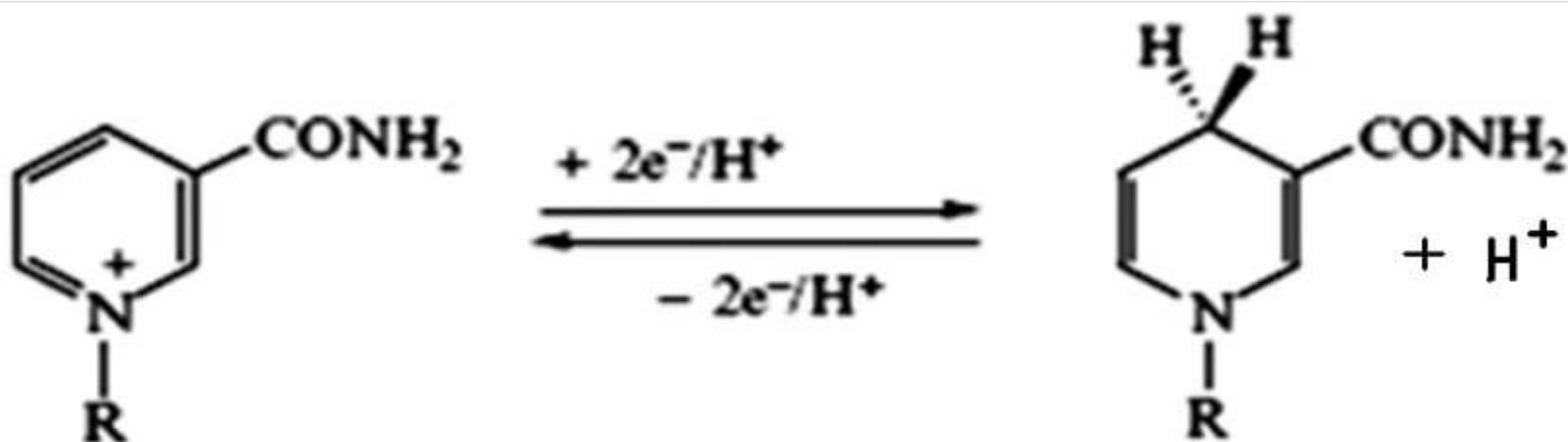
Никотинамидадениндинуклеотид  
окисленный (НАД<sup>+</sup>)



Никотинамидадениндинуклеотид-  
фосфат окисленный (НАДФ<sup>+</sup>)

# Окисленная и восстановленная формы НАД

---



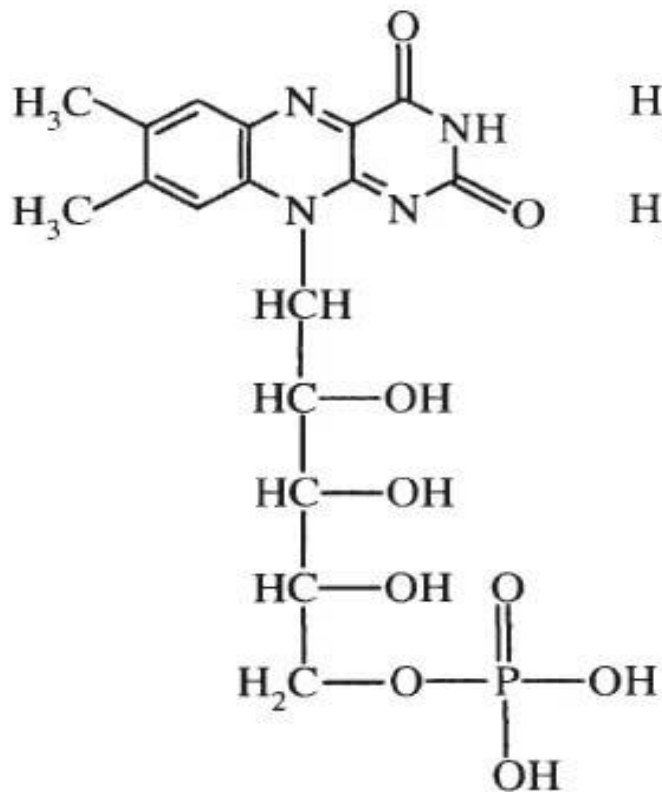
НАД<sup>+</sup>

НАДН+H<sup>+</sup>

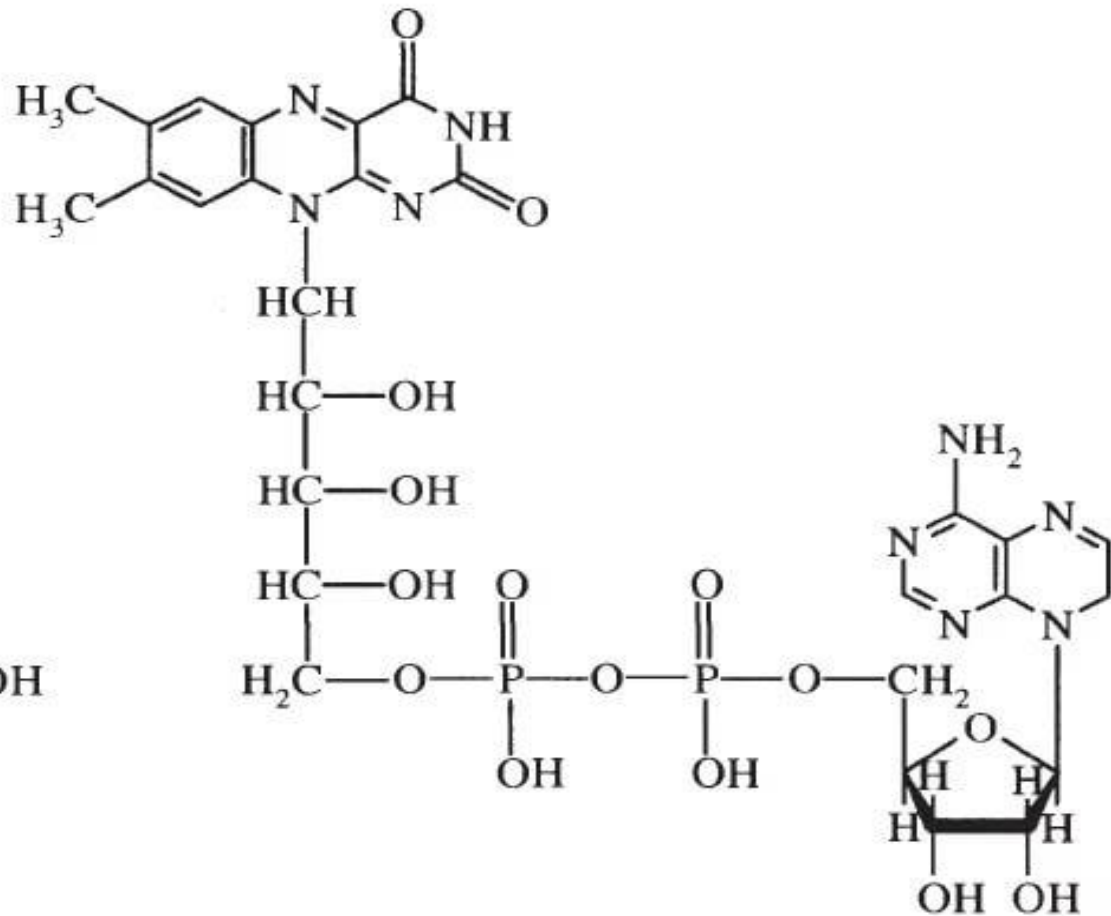
---



# Флавиновые ферменты

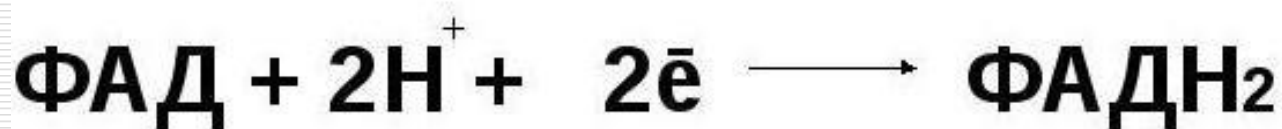
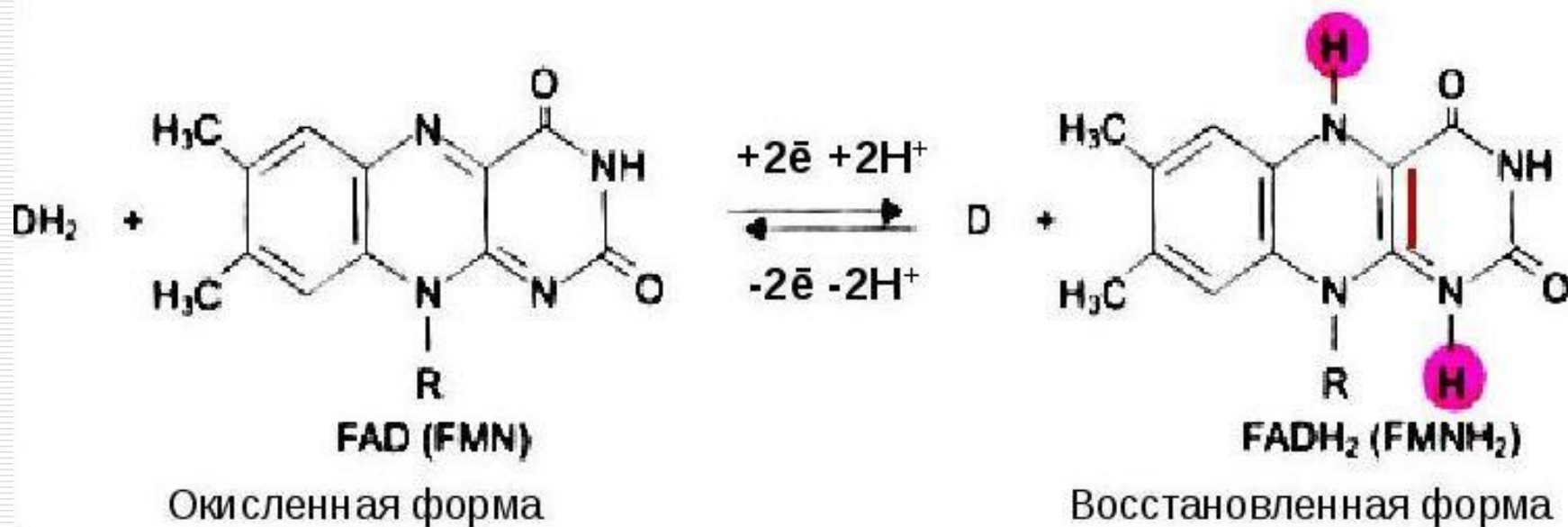


ФМН

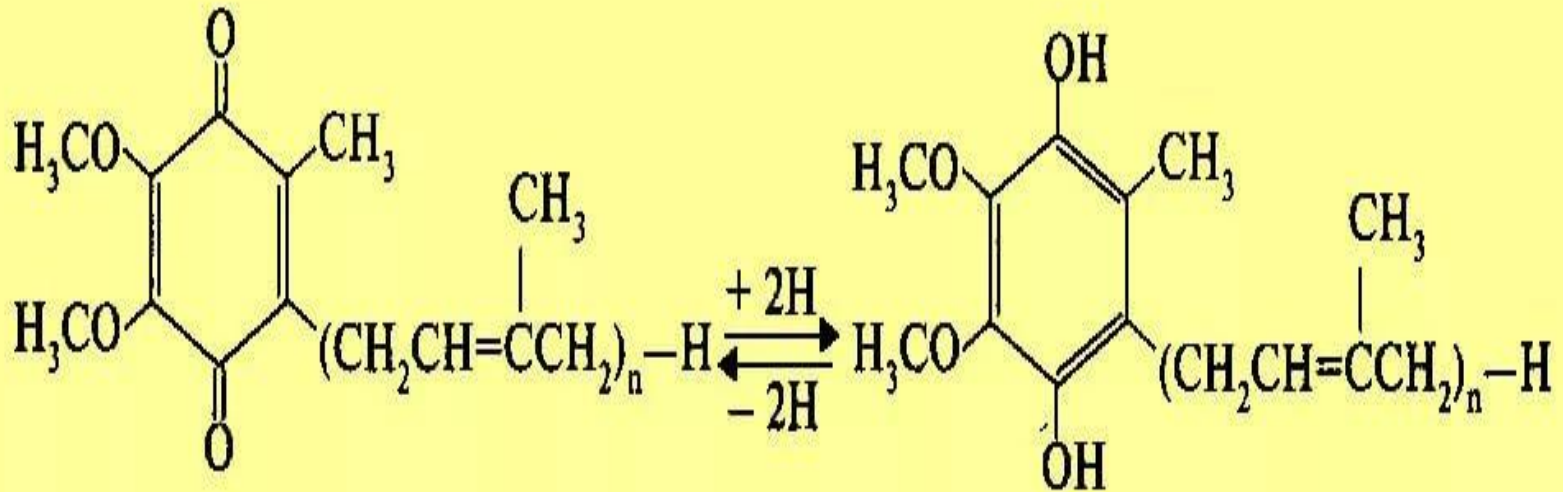


ФАД

# Окисленная и восстановленные формы ФАД



# КоQ или убихинон



окисленный кофермент Q (CoQ)  
(в форме хинона)

восстановленный кофермент  
Q (CoQH<sub>2</sub>) (в форме гидрохинона)

*Окисленная и восстановленная формы кофермента Q*

# Цитохромы

---

- Цитохромы – гемопротейны, содержащие в качестве простетической группы гем. Атом Fe в геме может менять валентность, присоединяя или отдавая электроны:  $Fe^{3+}$  или  $Fe^{2+}$
  - По величине окислительно-восстановительного потенциала цитохромы располагаются в ЦПЭ следующим образом:  
$$b \rightarrow c_1 \rightarrow c \rightarrow aa_3$$
  - Цитохромы **b**, **c<sub>1</sub>** и **c** выполняют функции промежуточных переносчиков электронов, а **цитохром aa<sub>3</sub> (цитохромоксидаза)** – непосредственно взаимодействует с кислородом.
-

---

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

---