

# **Основы биоэнергетики**

**Доц. Петушок Н.Э.**

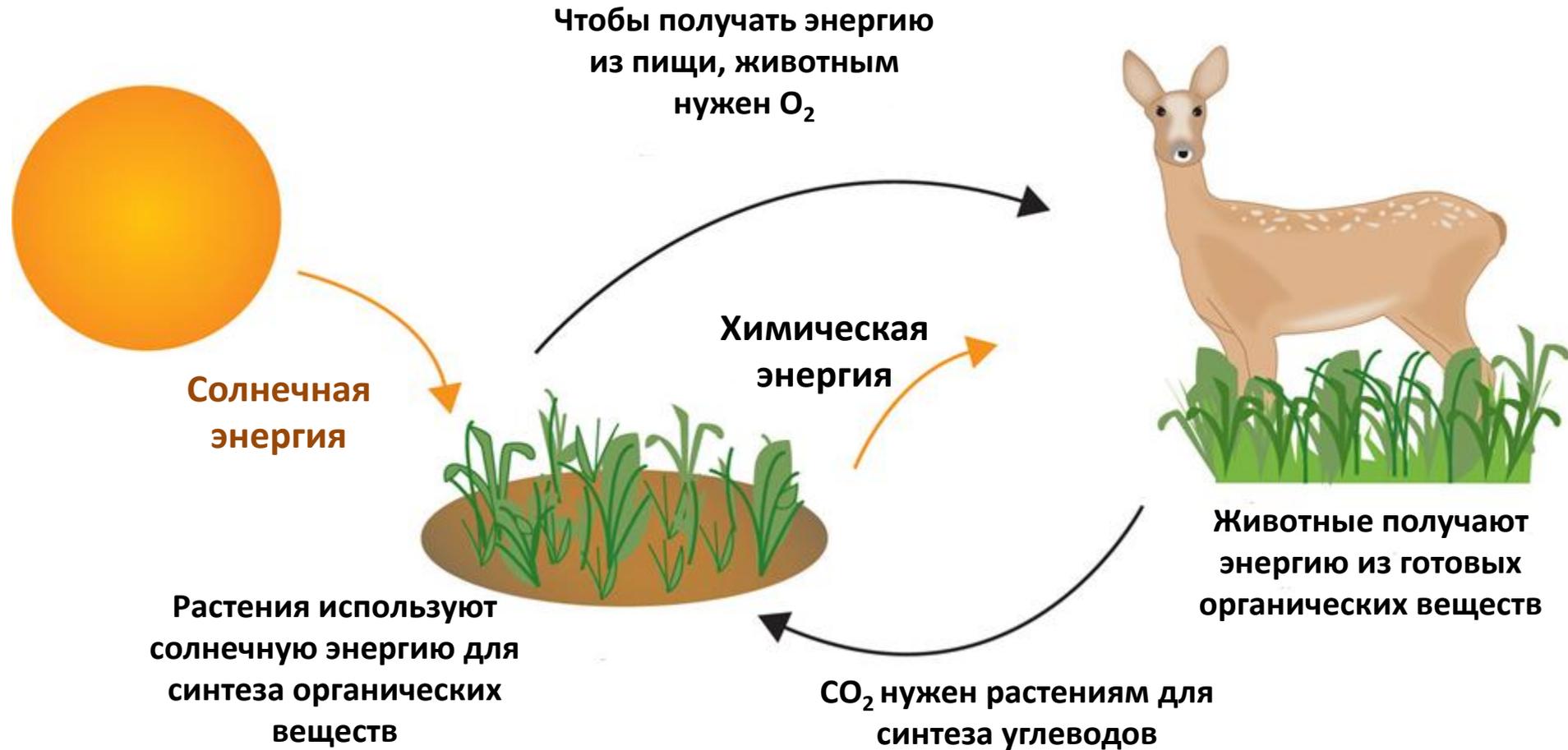
# **Чтобы оставаться в живых, расти и воспроизводиться живые клетки и организмы должны выполнять работу**

## **Энергия им нужна для:**

- синтеза клеточных компонентов**
- генерации концентрационных и электрических градиентов**
- движения**
- продукции тепла**
- и многих других процессов**

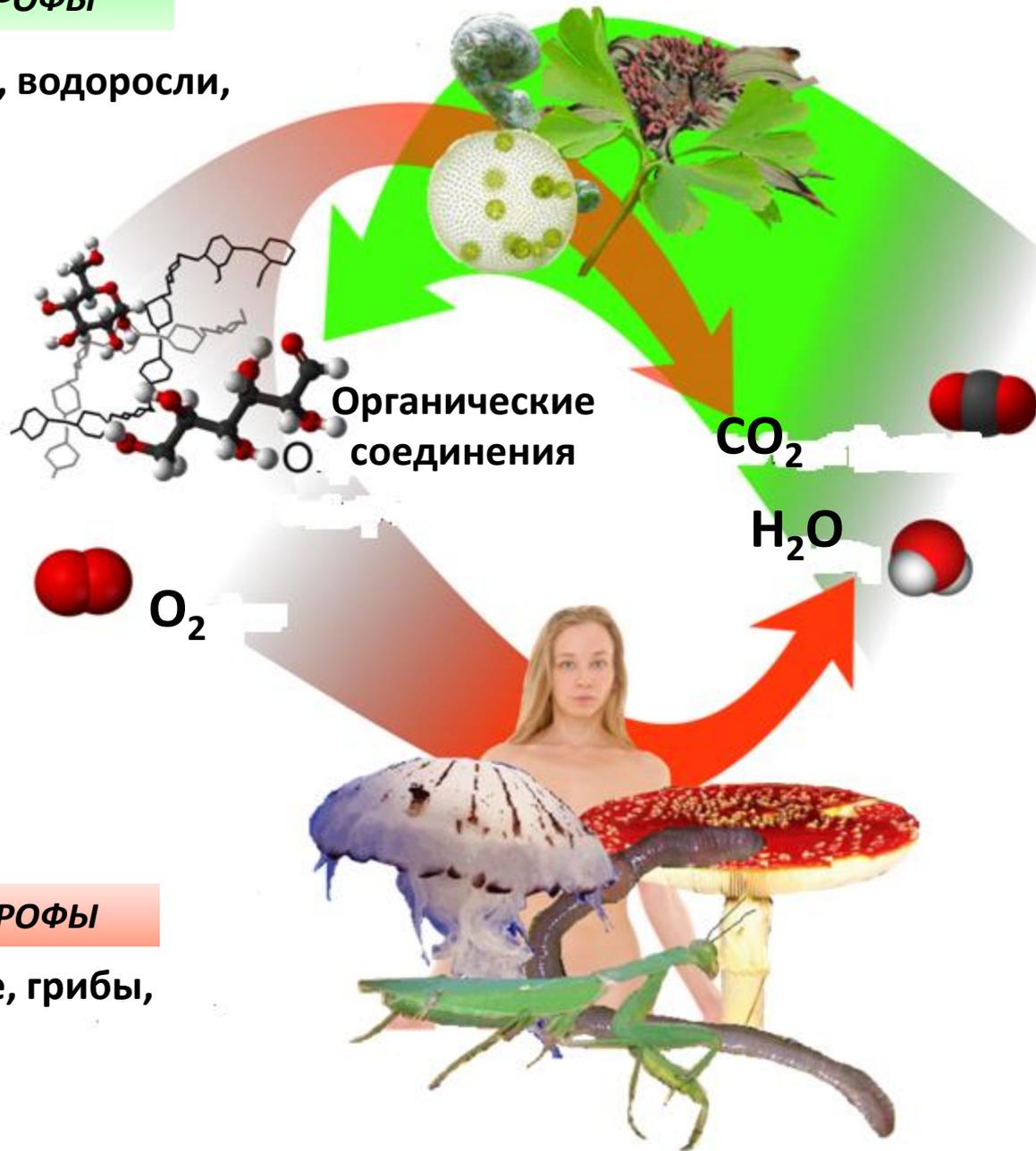
**Биоэнергетика занимается  
количественным исследованием  
преобразований энергии в живых  
системах, а также химическими  
процессами, лежащими в основе  
этих преобразований**

# Потоки веществ и энергии в биосфере



## АВТОТРОФЫ

растения, водоросли,  
бактерии



## ГЕТЕРОТРОФЫ

животные, грибы,  
бактерии

**Живые клетки- это открытые системы,  
обменивающиеся со своим окружением как  
веществами, так и энергией**



**Изменения энергии, происходящие в химической реакции, описываются следующими термодинамическими величинами**

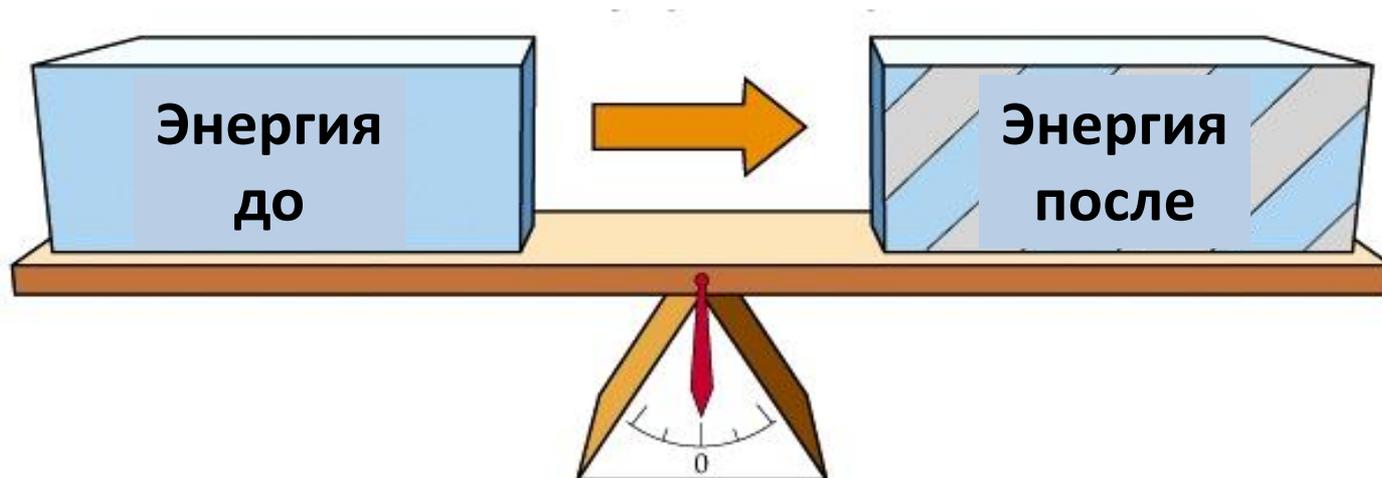
- **Свободная энергия Гиббса (G)** – та часть энергии, которая может производить работу при постоянной температуре и давлении
- **Энтальпия (H)** – внутренняя энергия или теплота, содержащаяся в системе .
- **Энтропия (S)** – мера неупорядоченности системы

Часть энергии, которая не может быть преобразована в работу, называется **связанной энергией( $T\Delta S$ )**

**Преобразования энергии в биологических системах подчиняются законам термодинамики**

**Первый закон термодинамики – это закон сохранения энергии**

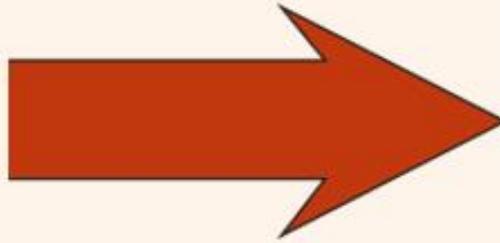
**при любом физическом или химическом изменении, общее количество энергии во вселенной остается постоянным. Энергия может переходить из одной формы в другую или может перераспределяться, но не может исчезнуть**



# Переходы энергии



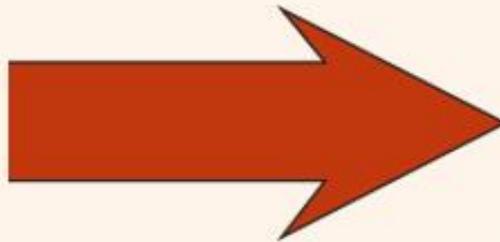
**Химическая энергия**



**Кинетическая энергия**



**Энергия света**



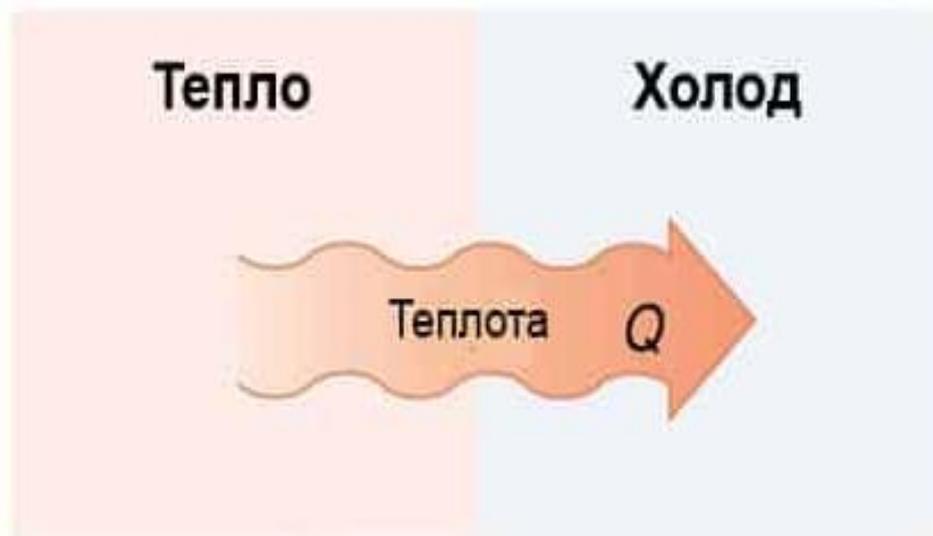
**Химическая энергия**

**Второй закон термодинамики гласит, что все процессы во вселенной стремятся к увеличению беспорядка:**

**в результате естественных процессов энтропия вселенной возрастает**



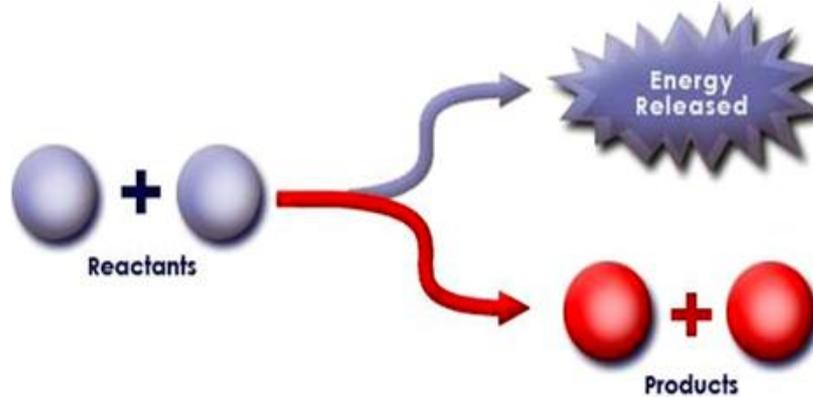
**Второй закон термодинамики указывает  
направление возможных  
энергетических превращений**



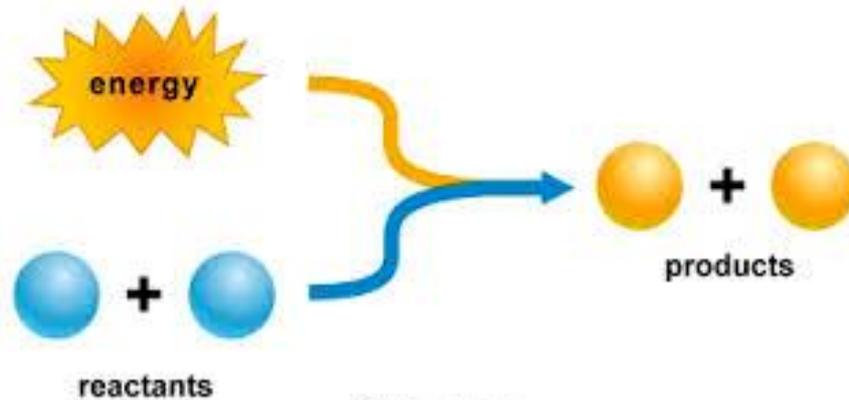
**В условиях, существующих в биологических системах (постоянные температура и давление), изменения свободной энергии, энтальпии и энтропии количественно связаны друг с другом уравнением :**

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

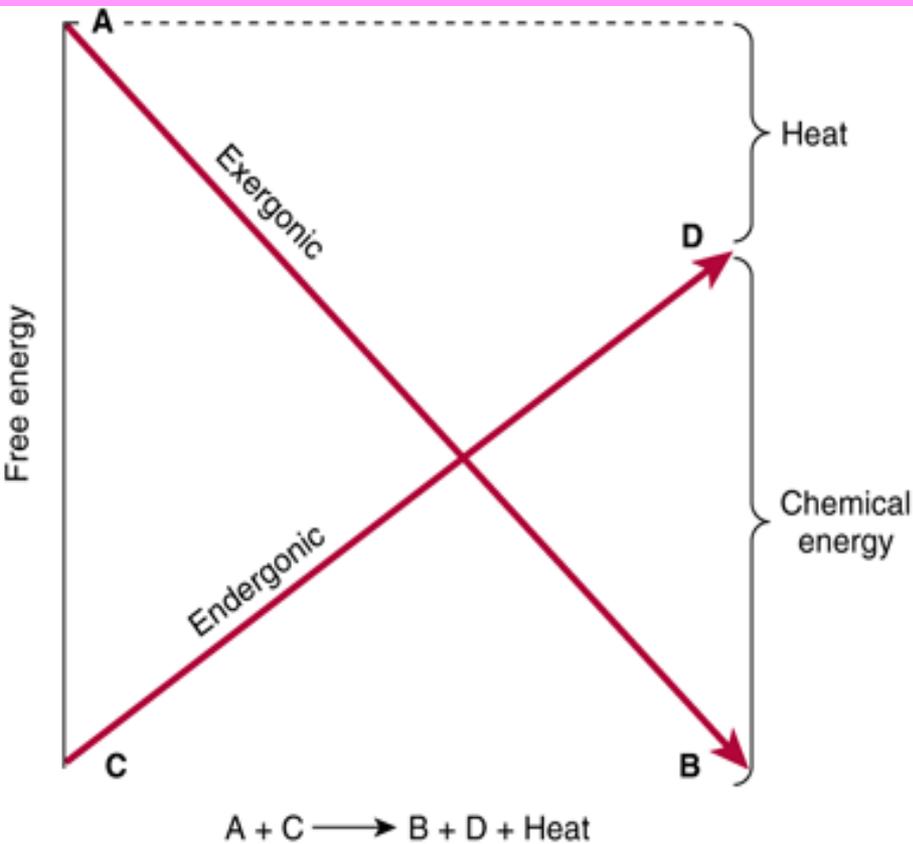
- Если  $\Delta G$  отрицательна ( $-\Delta G$ ), реакция будет протекать самопроизвольно с выделением энергии, и эта реакция называется **экзергонической реакцией**



- Если  $\Delta G$  положительна ( $+\Delta G$ ), реакция не будет протекать самопроизвольно и должна подпитываться энергией извне; такая реакция называется **эндергонической реакцией**



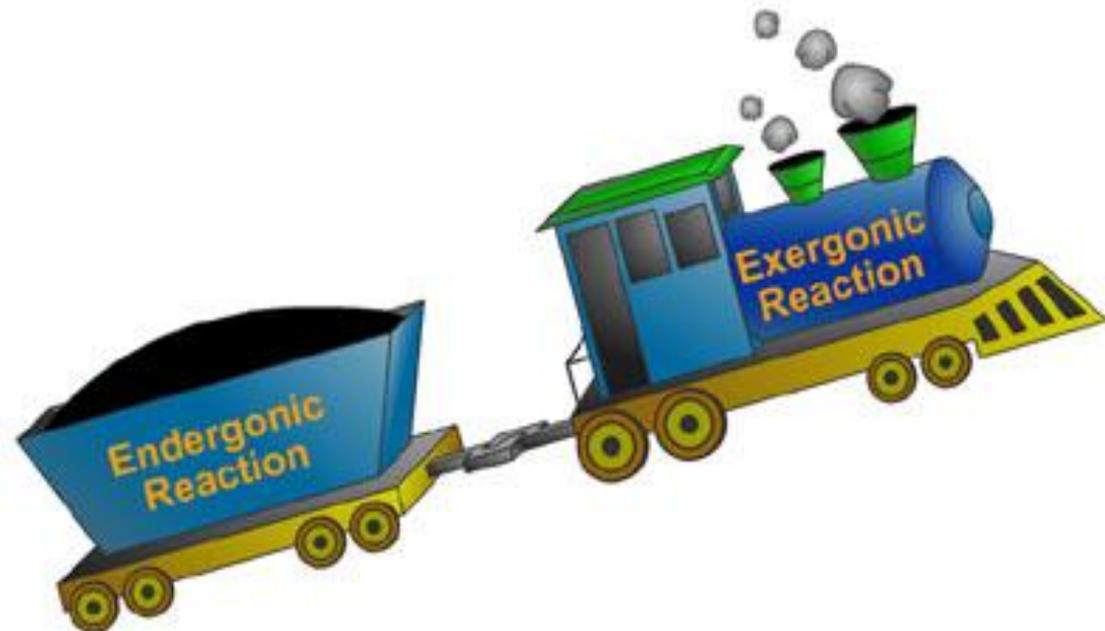
# Сопряжение экзергонических и эндергонических реакций



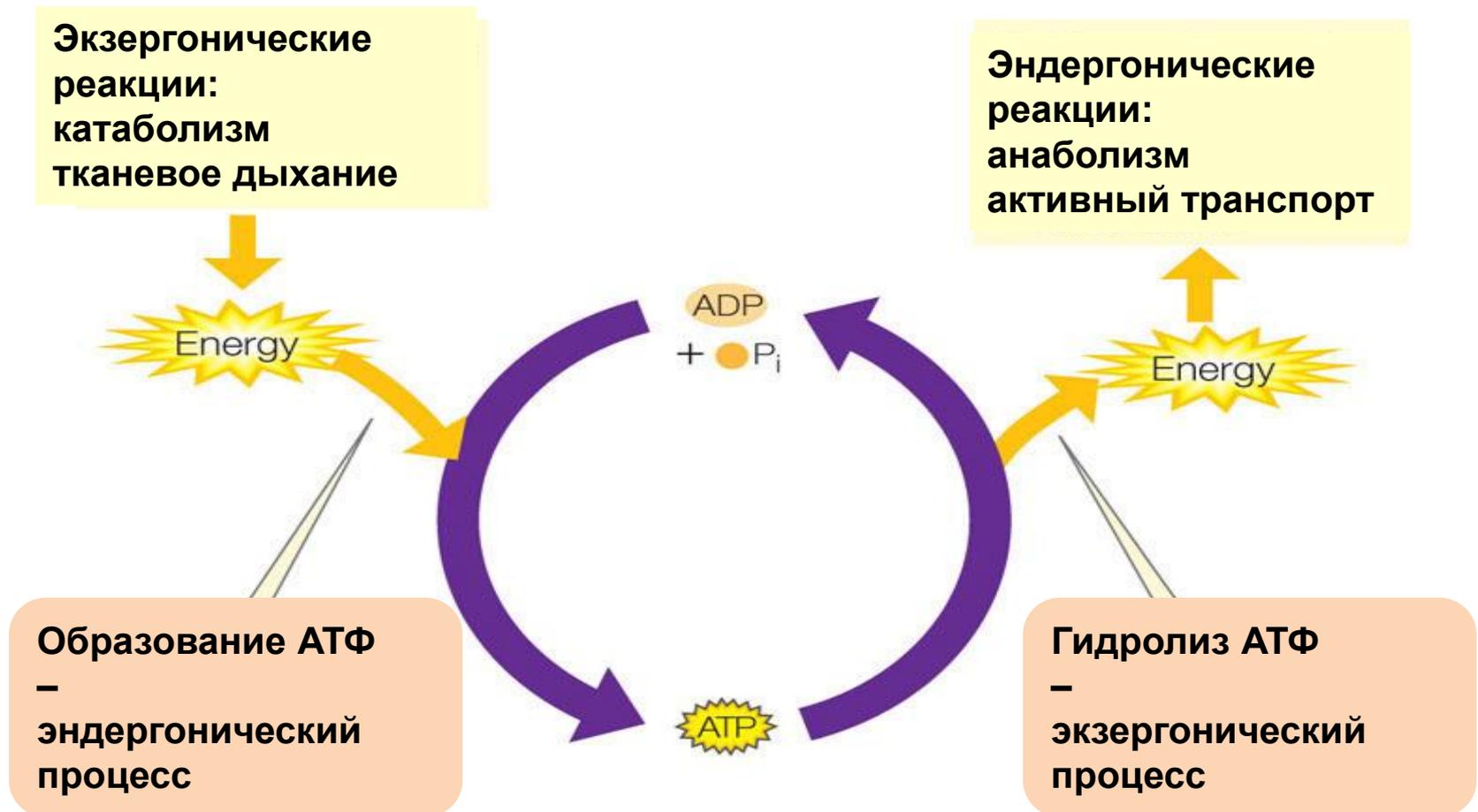
В биологических системах эндергонические реакции могут протекать лишь за счет энергии экзергонических

Source: Murray RK, Bender DA, Botham KM, Kennelly PJ, Rodwell J  
*Illustrated Biochemistry, 29th Edition*: [www.accessmedicine.com](http://www.accessmedicine.com)

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved.



**Живые системы часть энергии сохраняют в химической форме  
(разность электрохимических потенциалов, макроэнергетические соединения)**



# Макроэрги клетки

Макроэргические соединения содержат химическую связь, богатую энергией (макроэргическую связь)

Макроэргическая связь – это связь, гидролиз которой сопровождается высвобождением свободной энергии ( $-\Delta G$ ) более 5 ккал / моль (21 кДж / моль)

*Макроэргическая связь обозначается знаком “ ~ ” (тильда)*

**Есть два типа макроэргических соединений:**

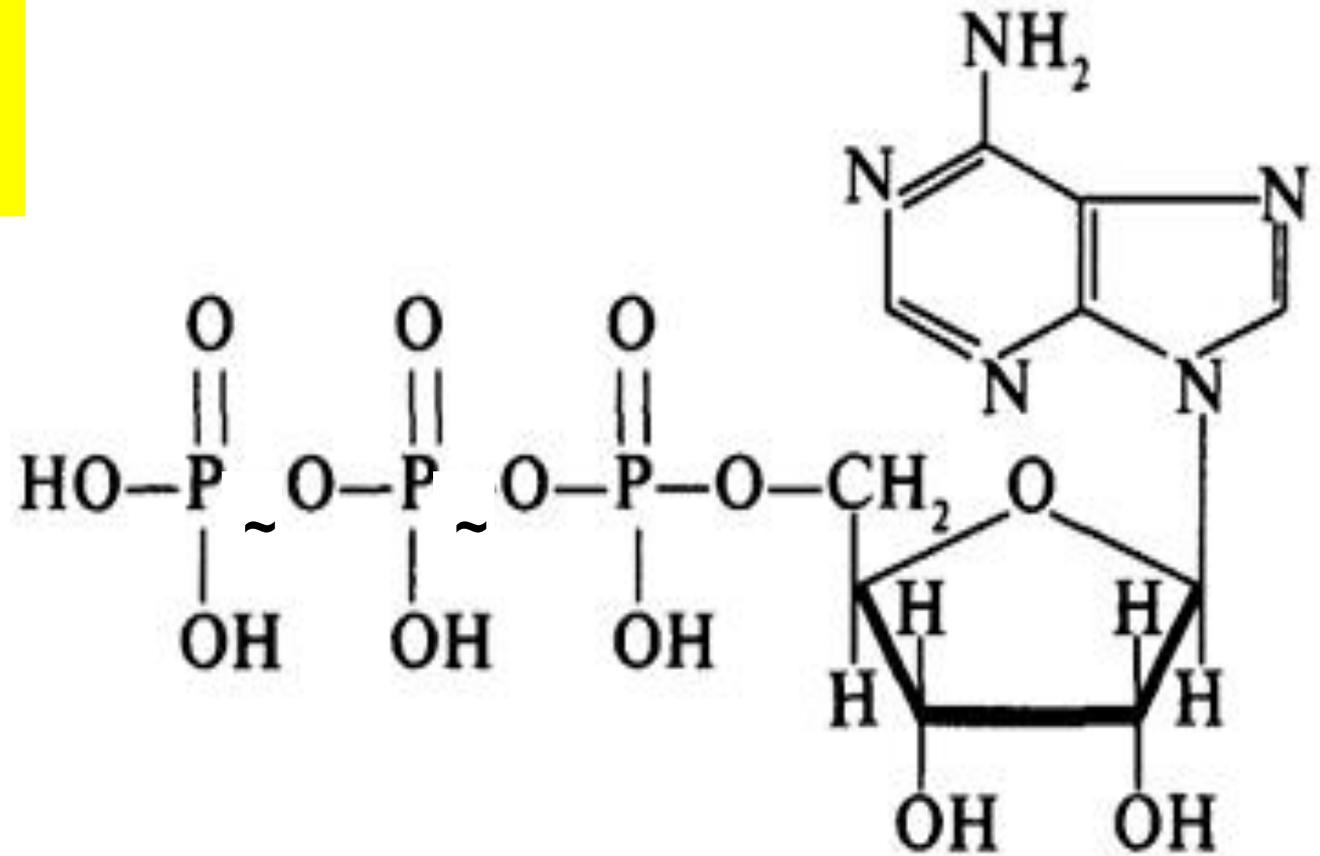
- **Фосфатсодержащие макроэргические соединения**  
креатинфосфат, 1,3-бисфосфоглицерат,  
фосфоенолпируват, карбамоилфосфат, АТФ и  
другие нуклеозидтрифосфаты
- **Серосодержащие макроэргические соединения(тиоэфиры):** ацетил-КоА, ацил-КоА,  
сукцинил-КоА

# АТФ

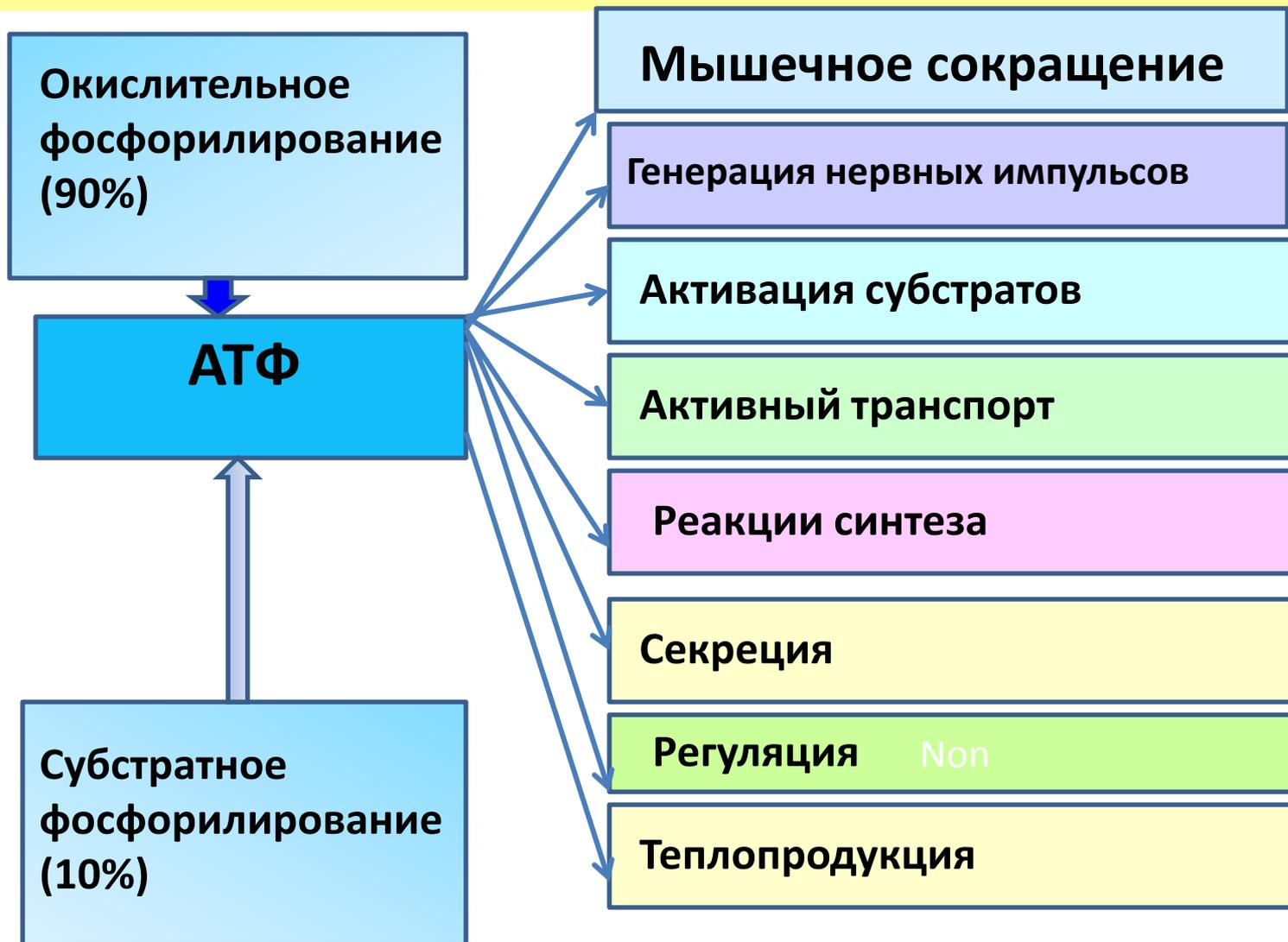
**АТФ - универсальная энергетическая валюта, потому что только это соединение может немедленно отдать свою энергию, содержащуюся в макроэргической связи, для выполнения любого типа работы в живой клетке**



ΑΤΦ



# Пути синтеза и использования АТФ



# Биологическое окисление

**это клеточный процесс, в котором органические вещества в ходе окислительно-восстановительных реакций выделяют энергию (АТФ),  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$**

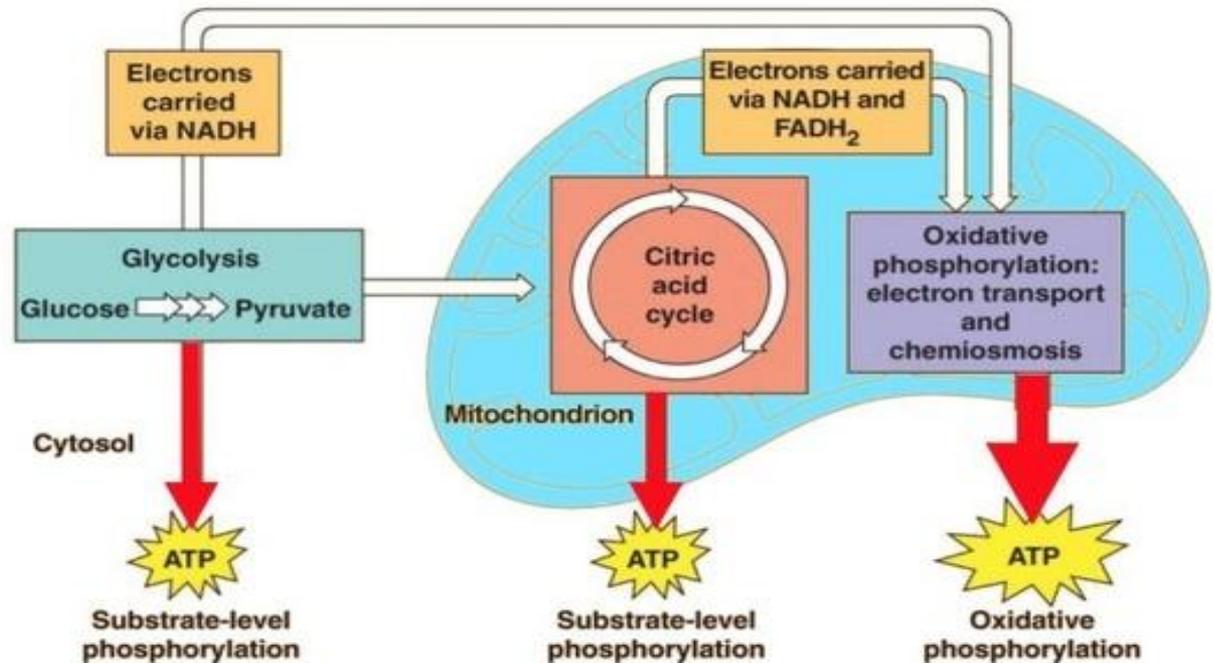
**Окисление субстратов возможно путем**

- присоединения кислорода**
- отщепления электронов /протонов**

**Эти процессы происходят с участием ферментов**

# Тканевое дыхание

- представляет собой ряд реакций, которые происходят в клетках для преобразования химической энергии питательных веществ в АТФ с высвобождением конечных продуктов метаболизма
- **конечным акцептором электронов в процессах тканевого дыхания является кислород**
- **заключительный этап происходит в митохондриях**



External environment

Органические молекулы пищи

Animal body

Переваривание и всасывание

тепло

Energy lost in feces

Органические молекулы в клетках

Energy lost in nitrogenous waste

Carbon skeletons

Тканевое дыхание

тепло

АТФ

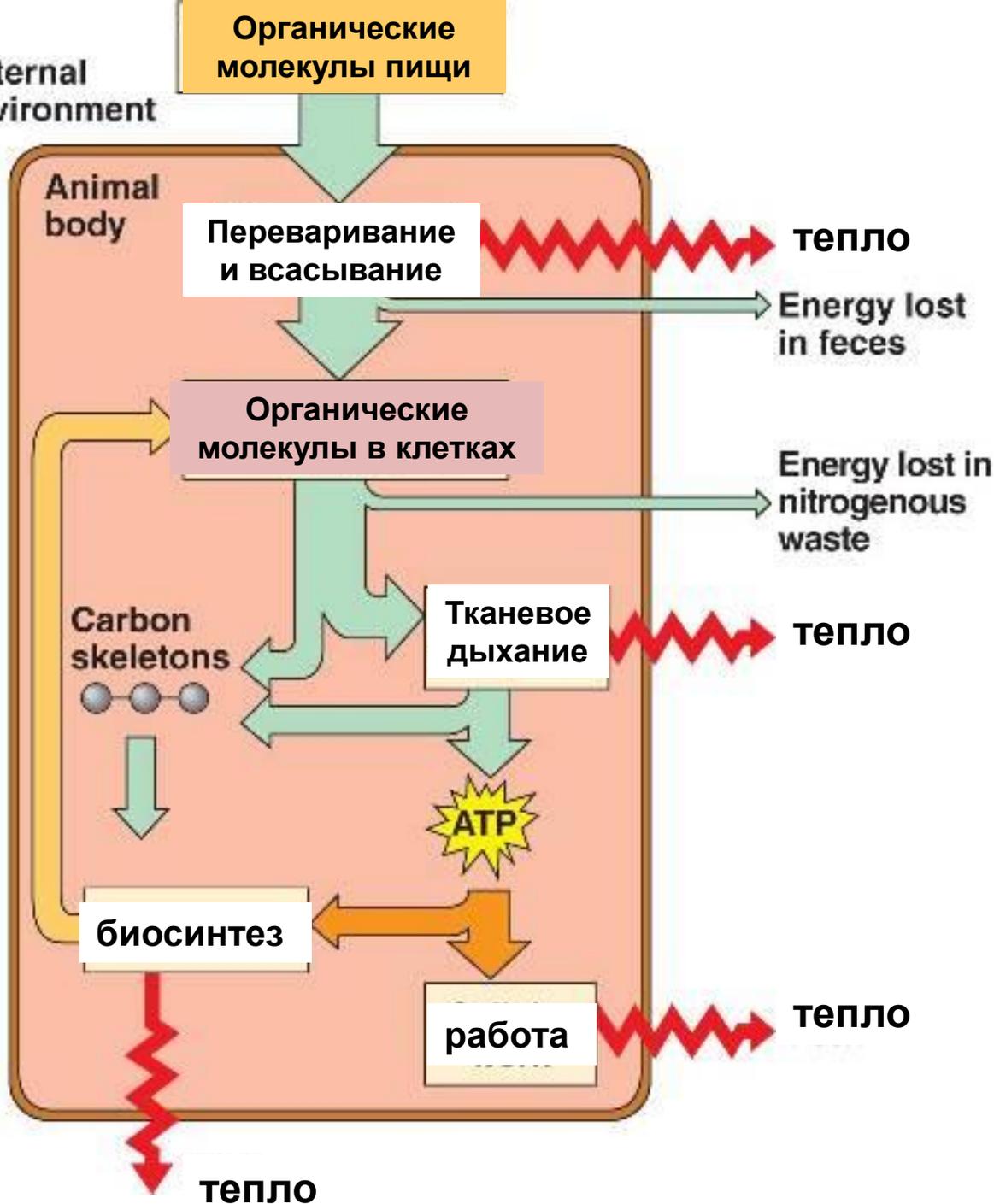
биосинтез

работа

тепло

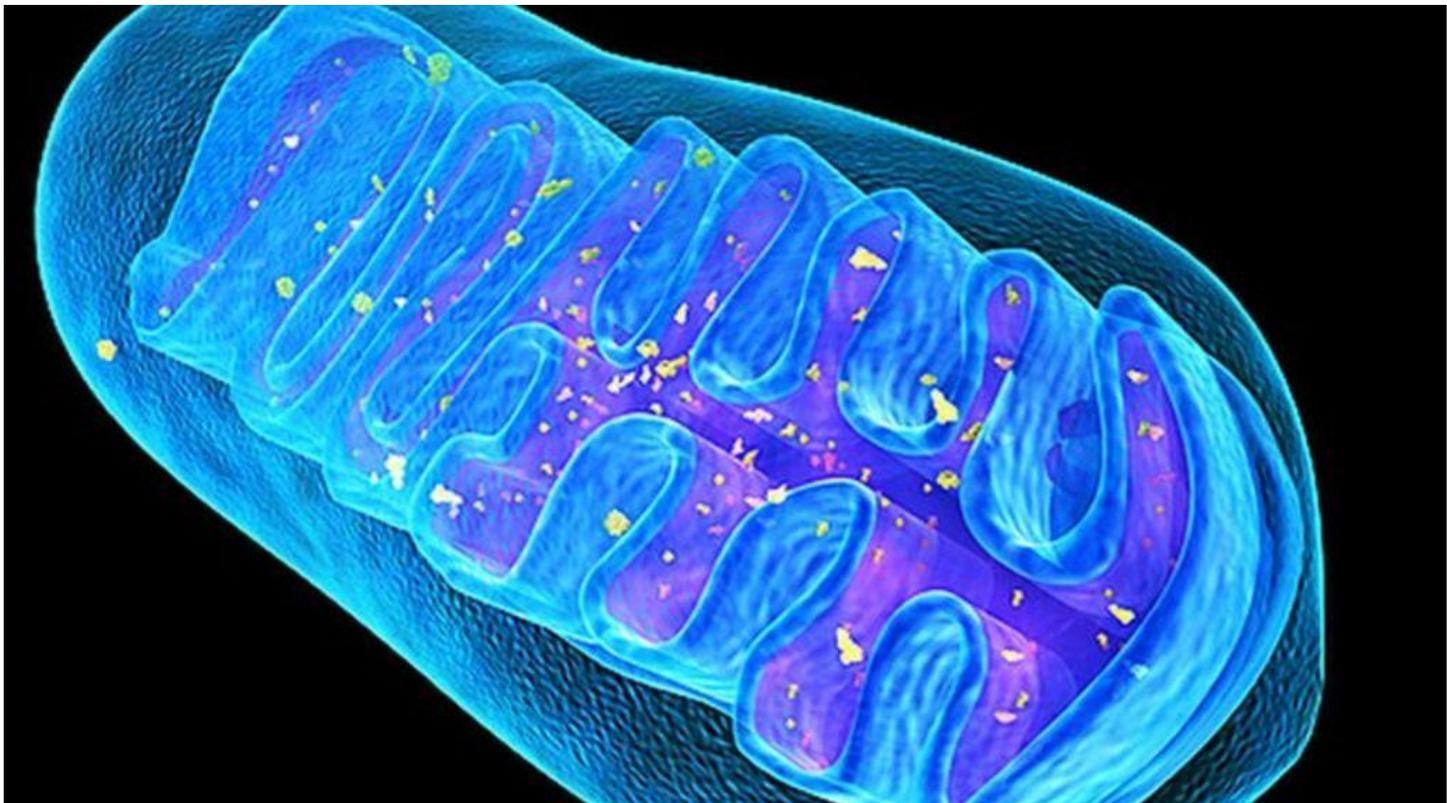
тепло

Около **40%** энергии пищи запасается в виде АТФ, оставшиеся **60%** выделяются в виде тепла

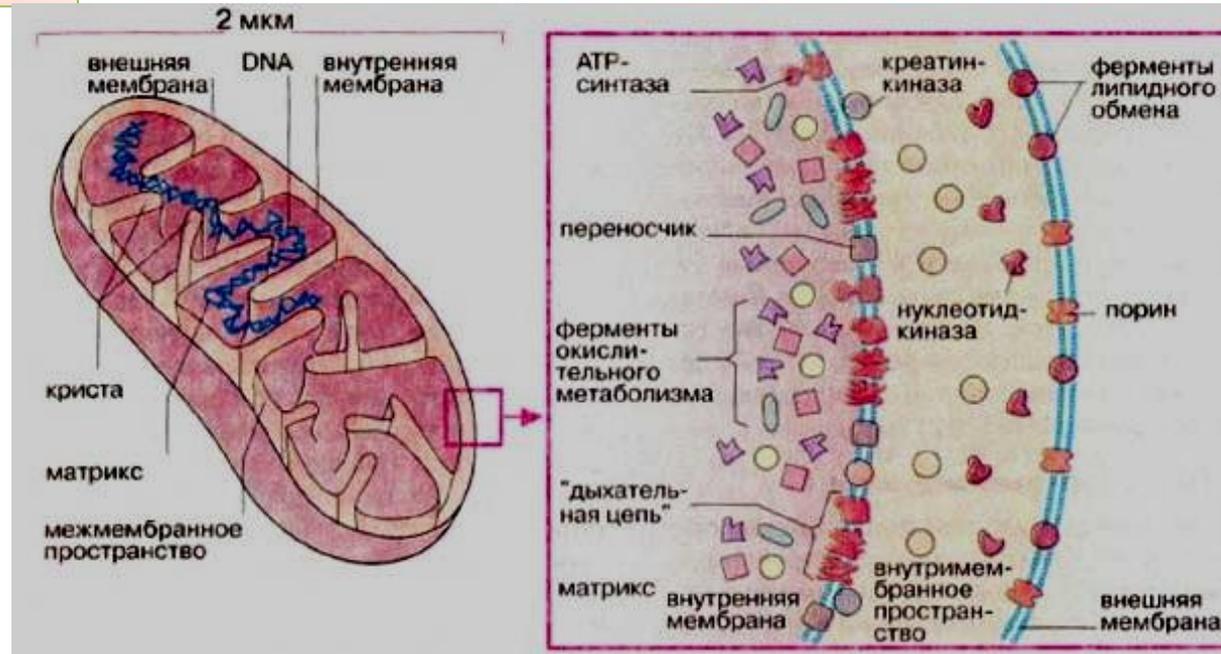


# Митохондрия

Основная функция - окисление метаболического топлива и сохранение свободной энергии за счет синтеза АТФ



# Митохондрия (структура)



Внутренняя мембрана непроницаема для большинства малых молекул и ионов, в том числе  $H^+$

Содержит:

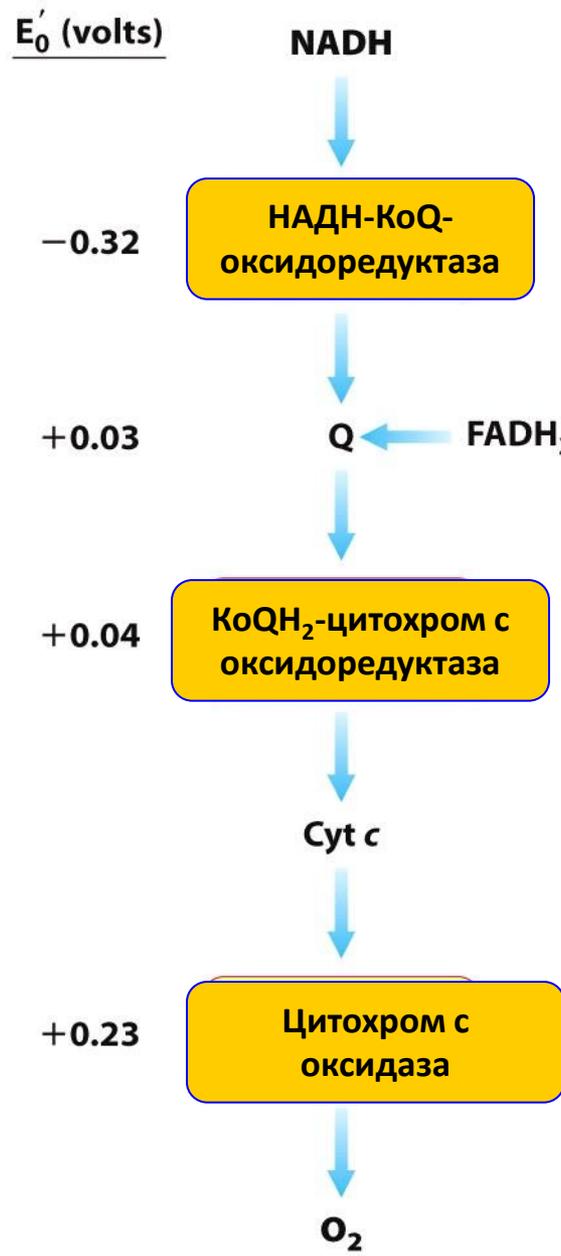
- переносчики электронов (комплексы I-IV)
- АДФ-АТФ транслоказу
- АТФ-синтазу ( $F_0F_1$ )
- другие мембранные транспортеры

Матрикс содержит:

- пируватдегидрогеназный комплекс
- ферменты ЦТК
- ферменты  $\beta$ -окисления жирных кислот
- ДНК, рибосомы

# Цепь переноса электронов (ЦПЭ)

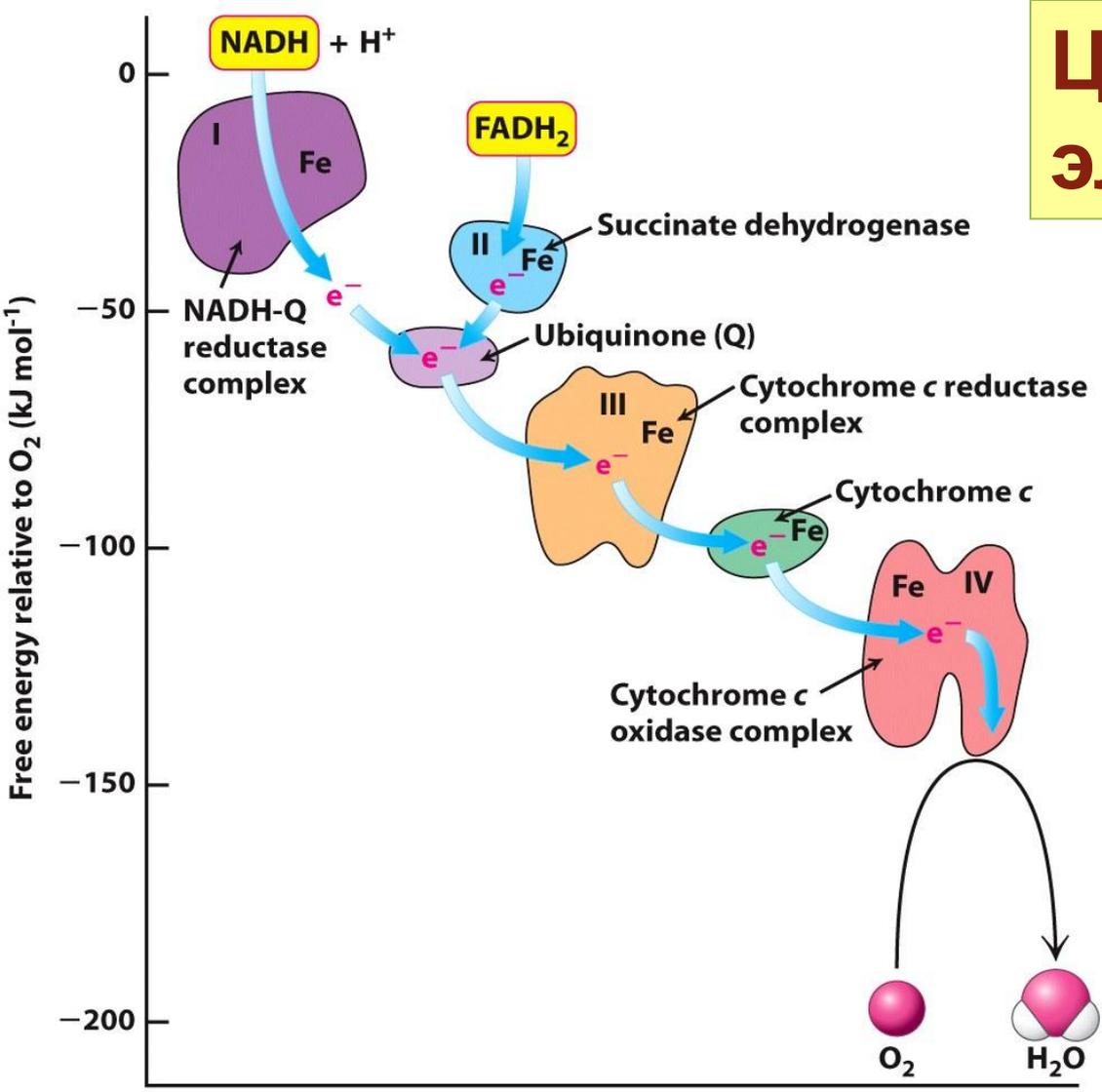
ЦПЭ состоит из нескольких комплексов, следующих друг за другом в определенной последовательности



✦ Электроны двигаются от переносчиков с низким восстановительным потенциалом к переносчикам с высоким

Figure 20.10  
Biochemistry: A Short Course, Second Edition  
© 2013 W. H. Freeman and Company

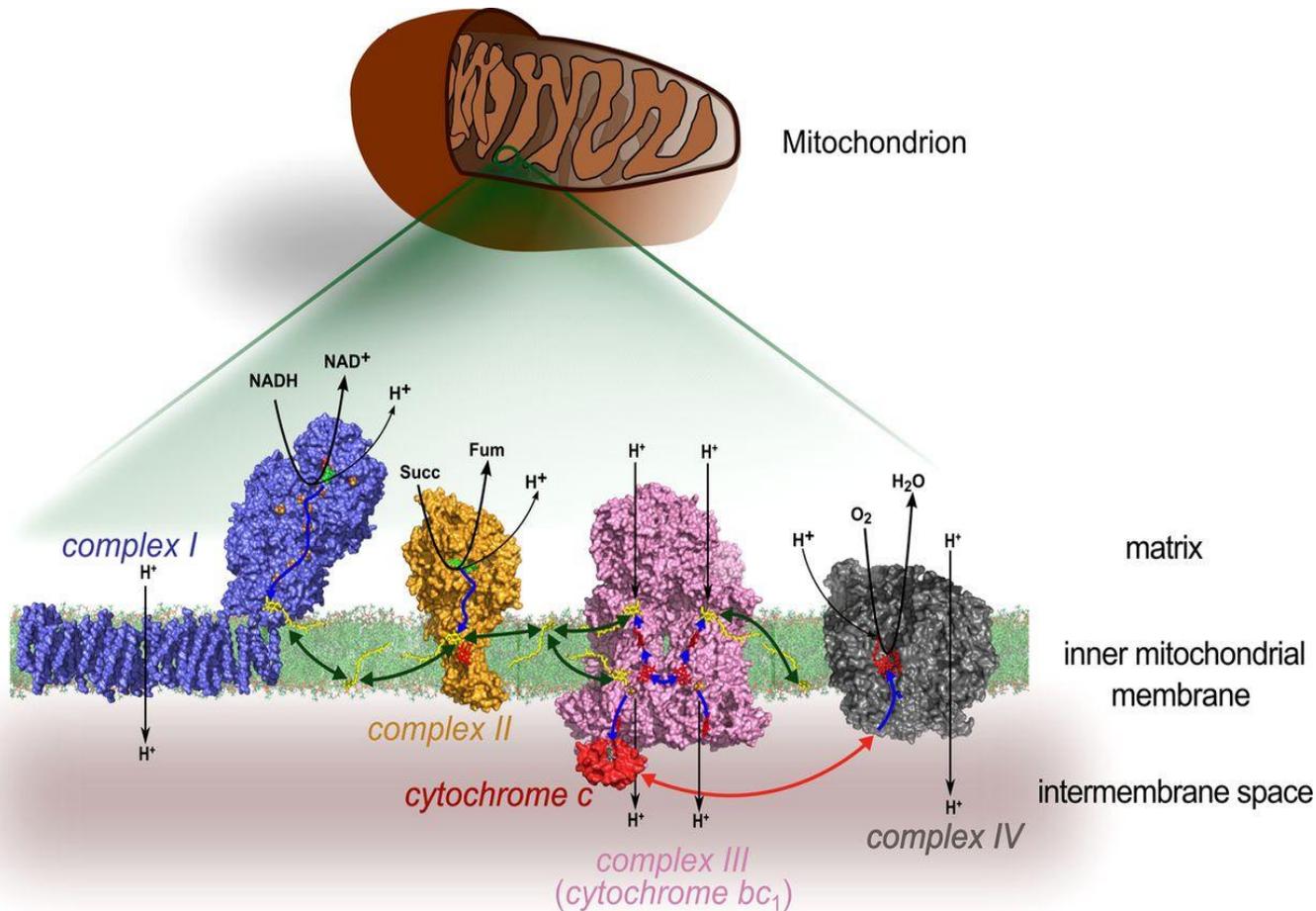
# Цепь переноса электронов (ЦПЭ)



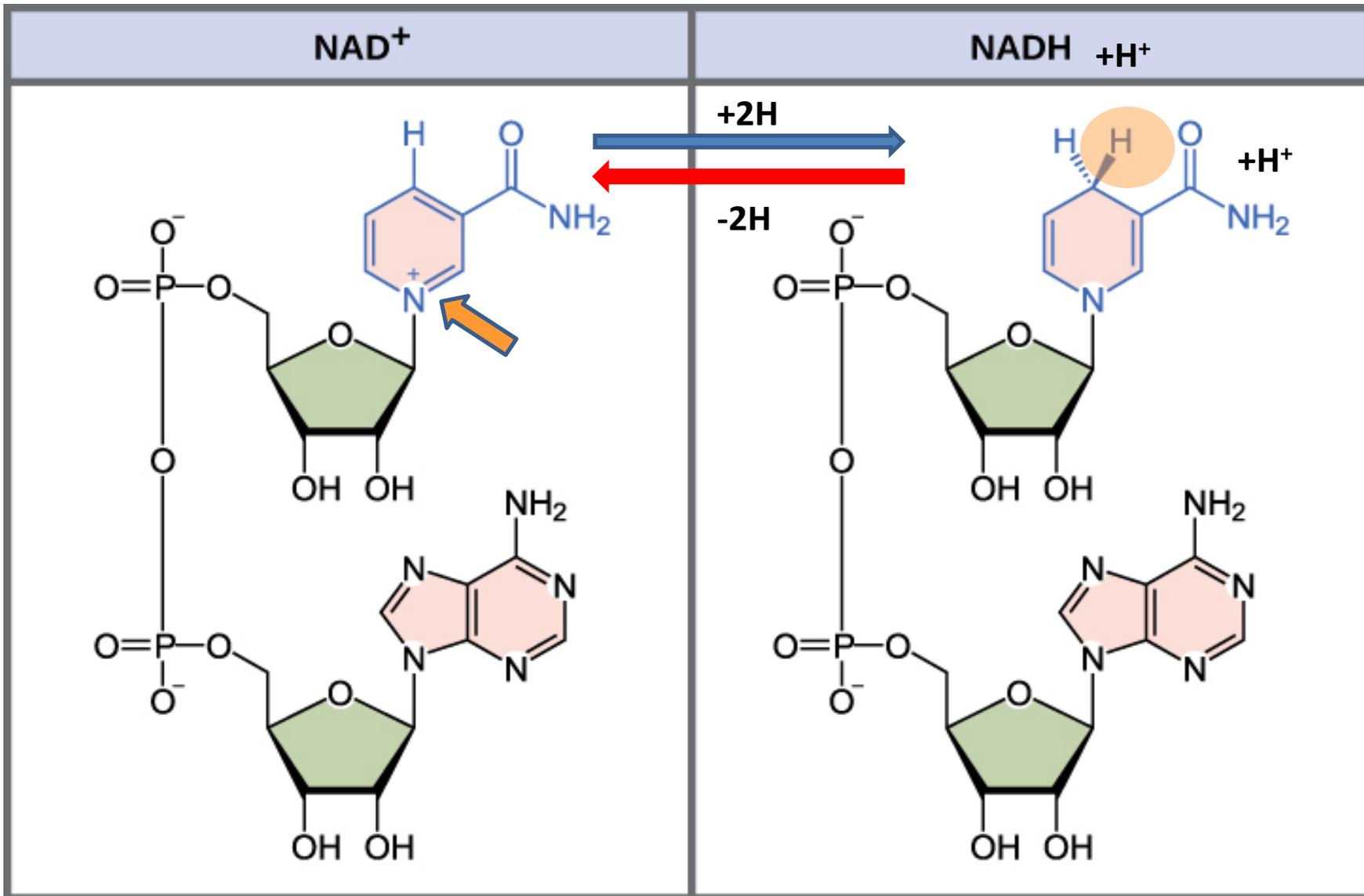
Компоненты ЦПЭ переносят протоны и электроны (или только электроны) от восстановленных субстратов ( $SH_2$ ) или от восстановленных коферментов (таких как НАДН или ФАДН<sub>2</sub>) к кислороду ( $O_2$ ) с образованием воды в результате

Figure 20.6  
*Biochemistry: A Short Course, Second Edition*  
© 2013 W. H. Freeman and Company

Таким образом, ЦПЭ представляет собой последовательность окислительно-восстановительных реакций, в ходе которых выделяется свободная энергия. Часть этой энергии (около 50-75%) накапливается в макроэргических связях АТФ, а другая часть свободной энергии выделяется в виде тепла

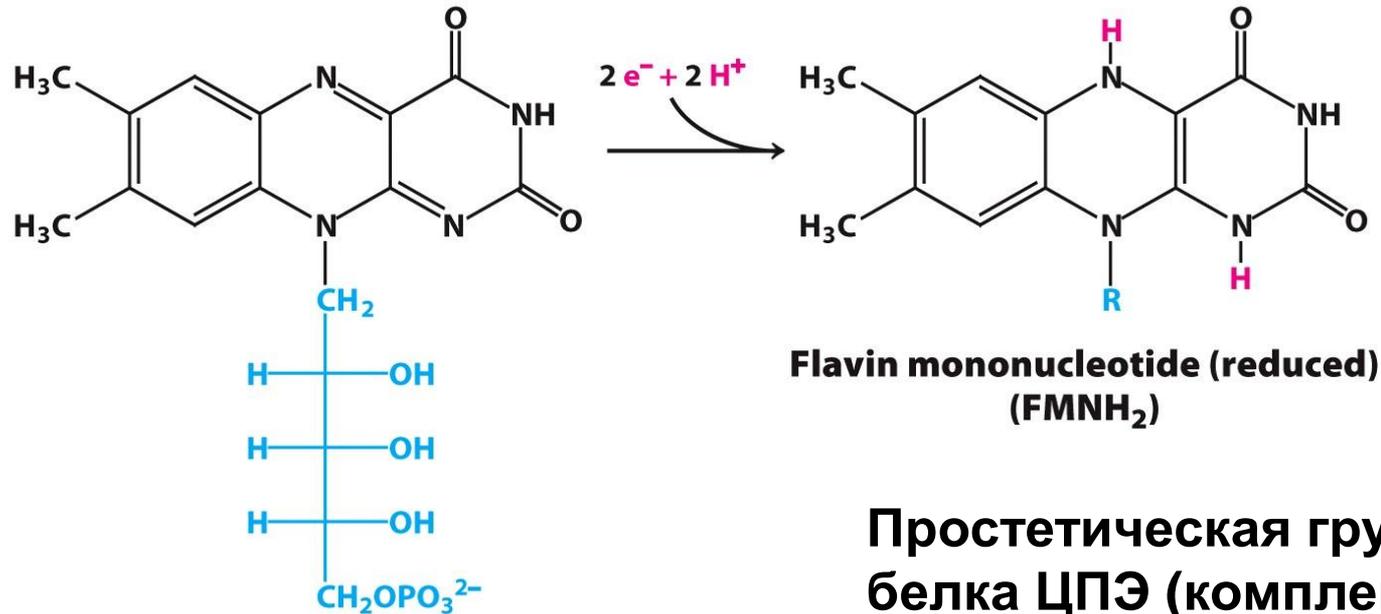


# Переносчики ЦПЭ: НАД



НАД<sup>+</sup> (никотинамиалениндинуклеотид)

# Переносчики ЦПЭ: ФМН



Простетическая группа  
белка ЦПЭ (комплекс I)

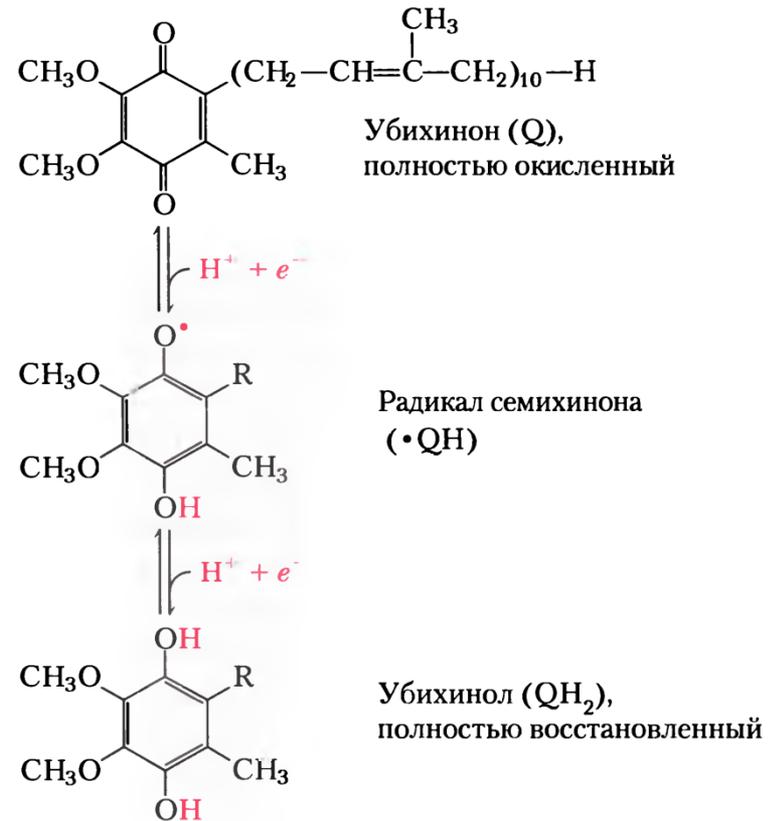
акцептор 1 или 2-х электронов

Figure 20.5  
*Biochemistry: A Short Course*, Second Edition  
© 2013 W. H. Freeman and Company

# Переносчики ЦПЭ: кофермент Q

Мобильный переносчик  
электронов внутри  
бислоя мембраны

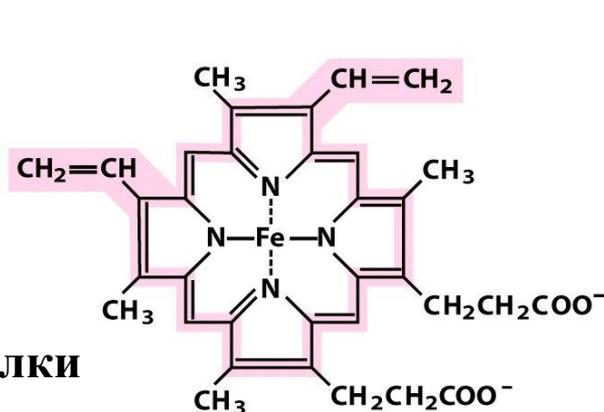
акцептор 1 или 2-х  
электронов



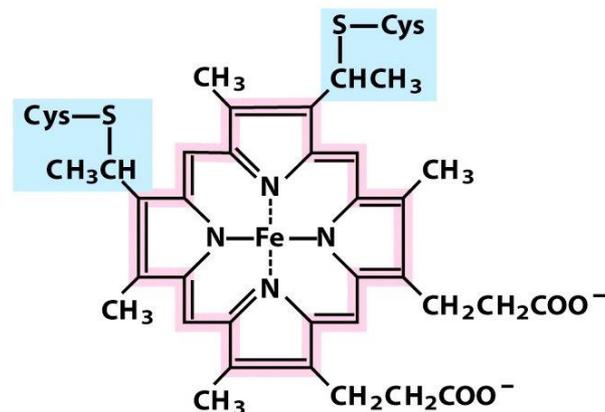
# Переносчики ЦПЭ: цитохромы

## Гемопротеины

В основном это  
интегральные белки

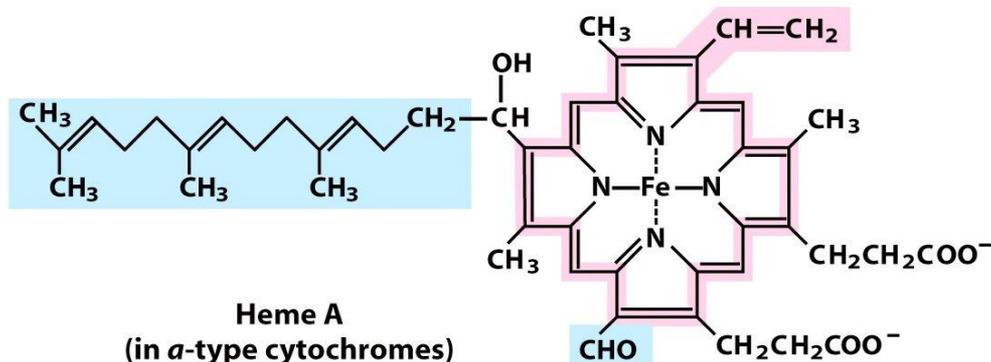


Iron protoporphyrin IX  
(in *b*-type cytochromes)



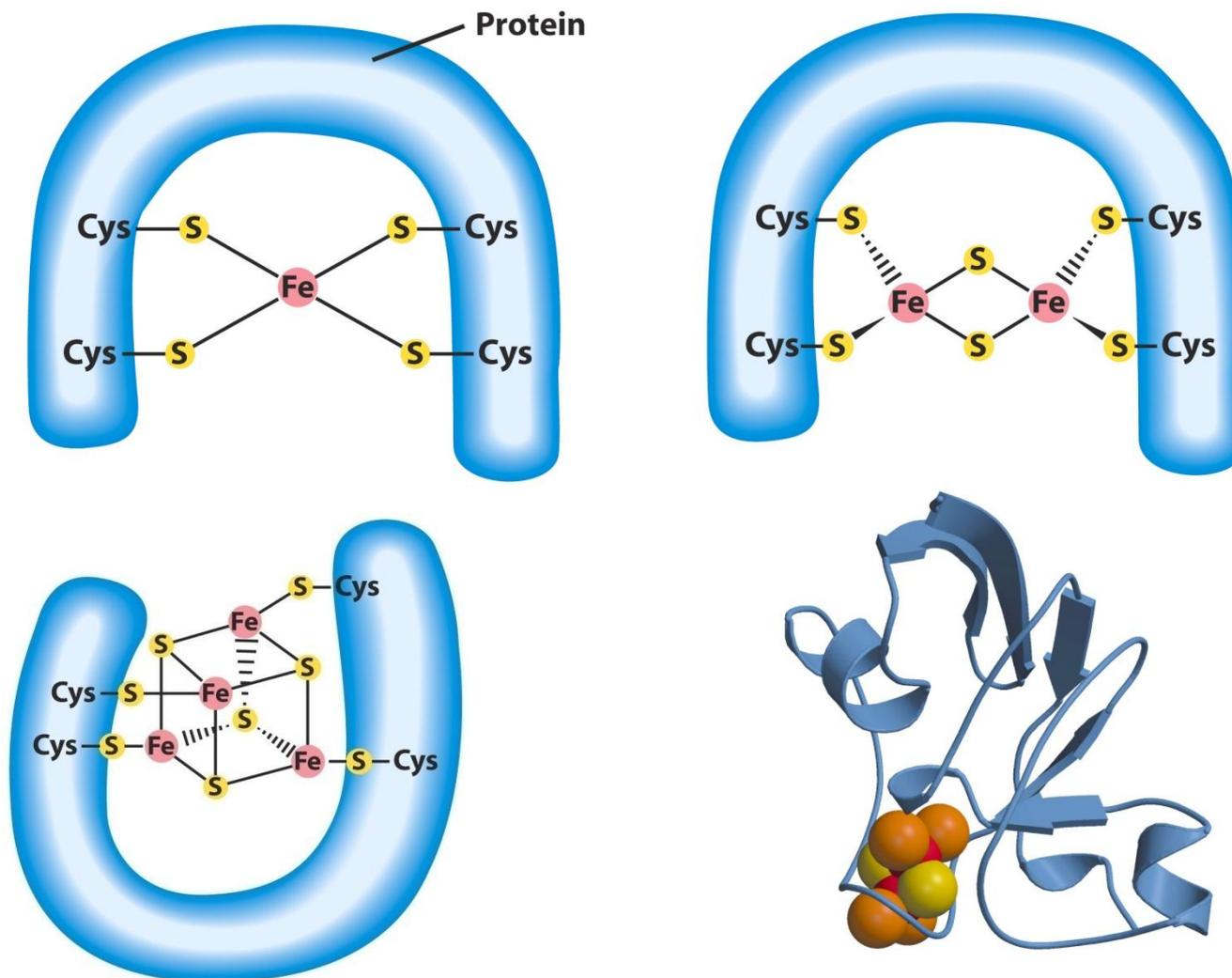
Heme C  
(in *c*-type cytochromes)

Цитохром с -  
растворимый  
периферический  
белок.

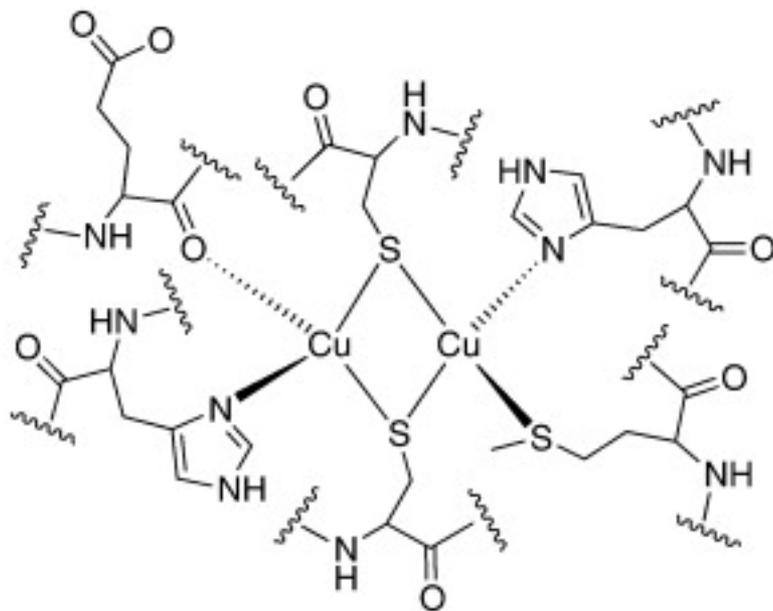


Heme A  
(in *a*-type cytochromes)

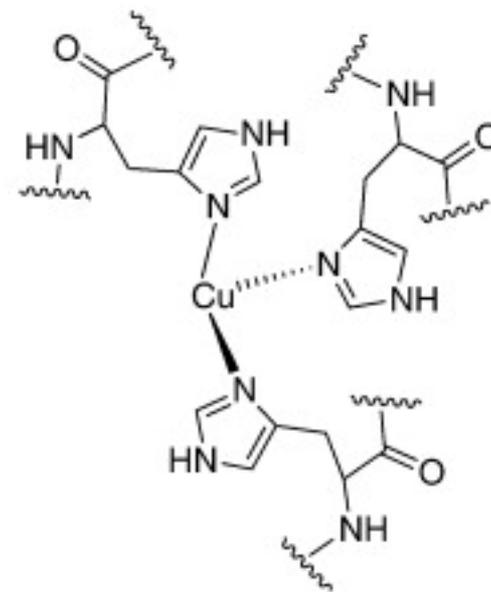
# Переносчики ЦПЭ: железо-серные белки



## Переносчики ЦПЭ: медные центры



✦  $\text{Cu}_A$  center

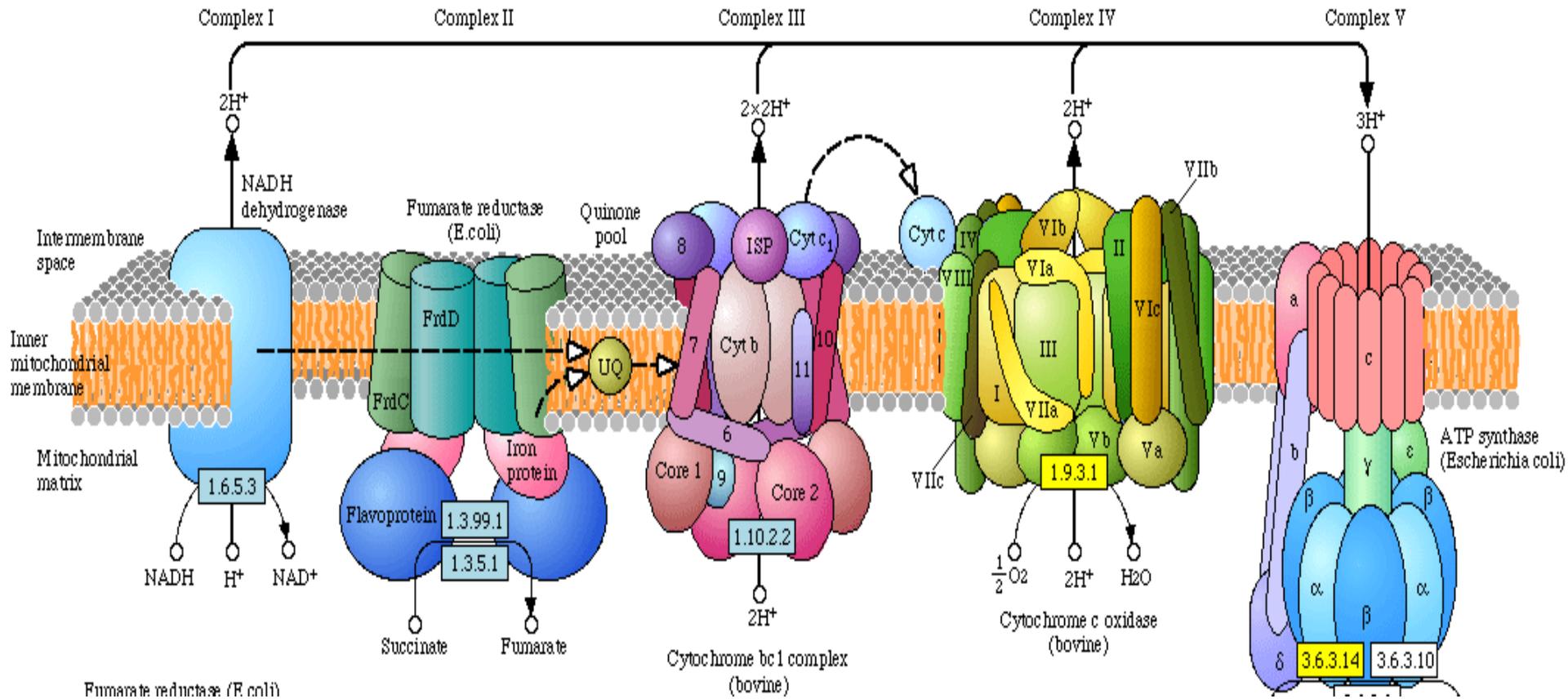


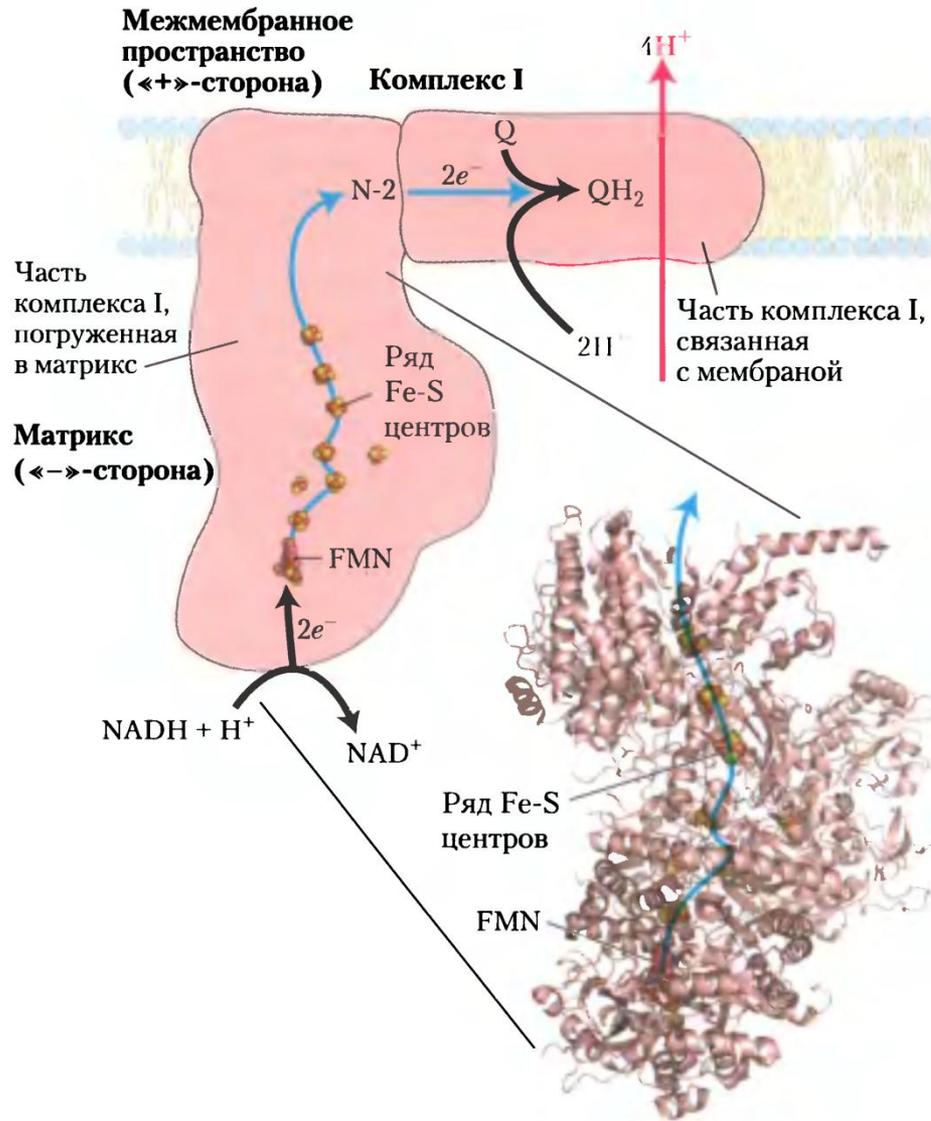
✦  $\text{Cu}_B$  center

## Белки, участвующие в переносе электронов в ЦПЭ

Комплекс фермента с белком	Масса, кДа	Число субъединиц*	Простетические группы
NADH-дегидрогеназа (комплекс I)	850	43 (14)	FMN, FeS
Сукцинатдегидрогеназа (комплекс II)	140	4	FAD, FeS
Убихинон-цитохром c-оксиредуктаза (комплекс III)	250	11	гемы, FeS
Цитохром c**	13	1	гем
Цитохромоксидаза (комплекс IV)	160	13 (3-4)	гемы, Cu <sub>A</sub> , Cu <sub>B</sub>

# Переносчики электронов в ЦПЭ образуют полиферментные комплексы





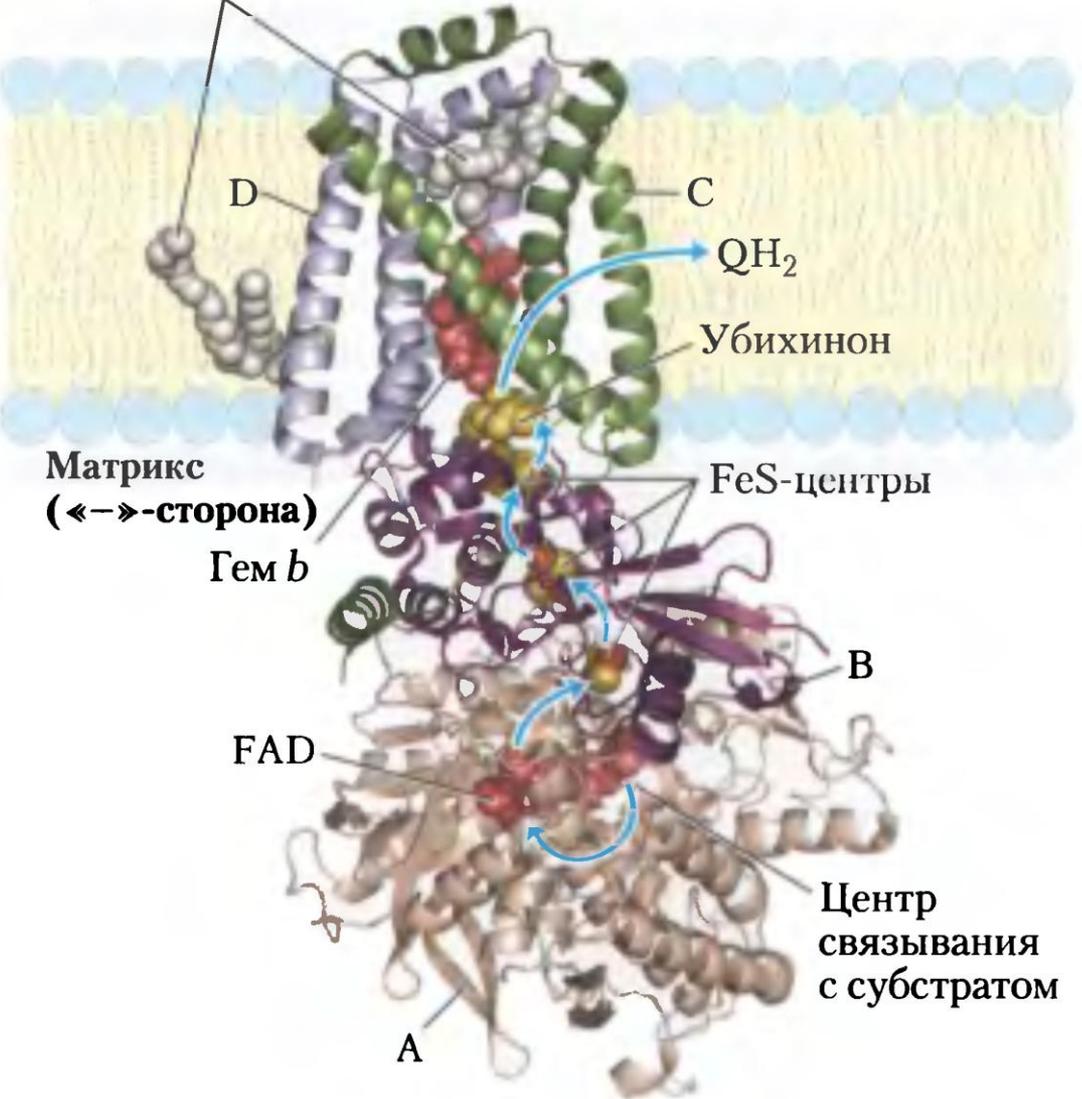
# Комплекс I

## НАДН-КоQ оксидоредуктаза

# Комплекс II: сукцинат-КоQ оксидоредуктаза

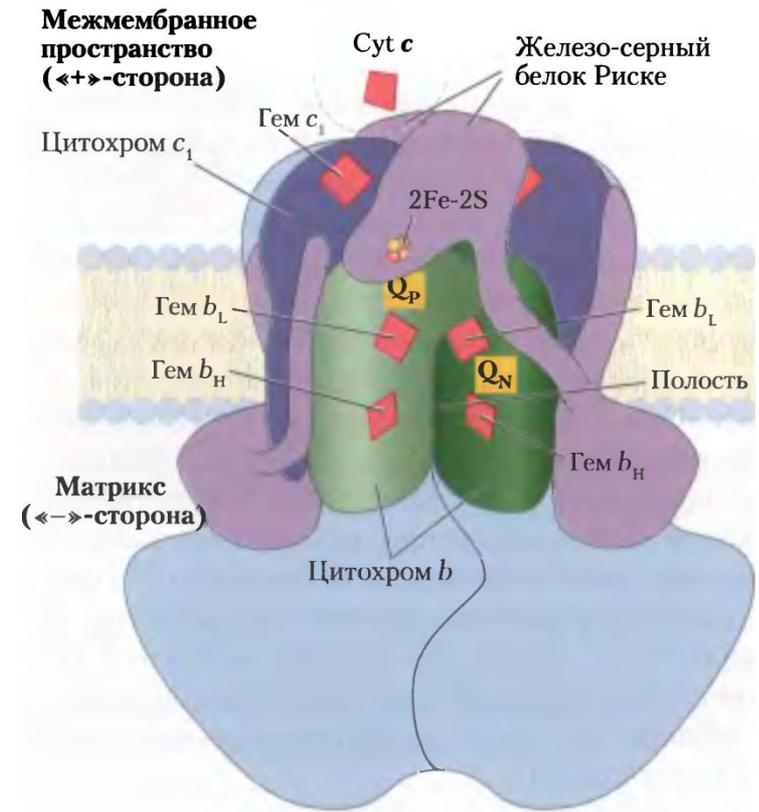
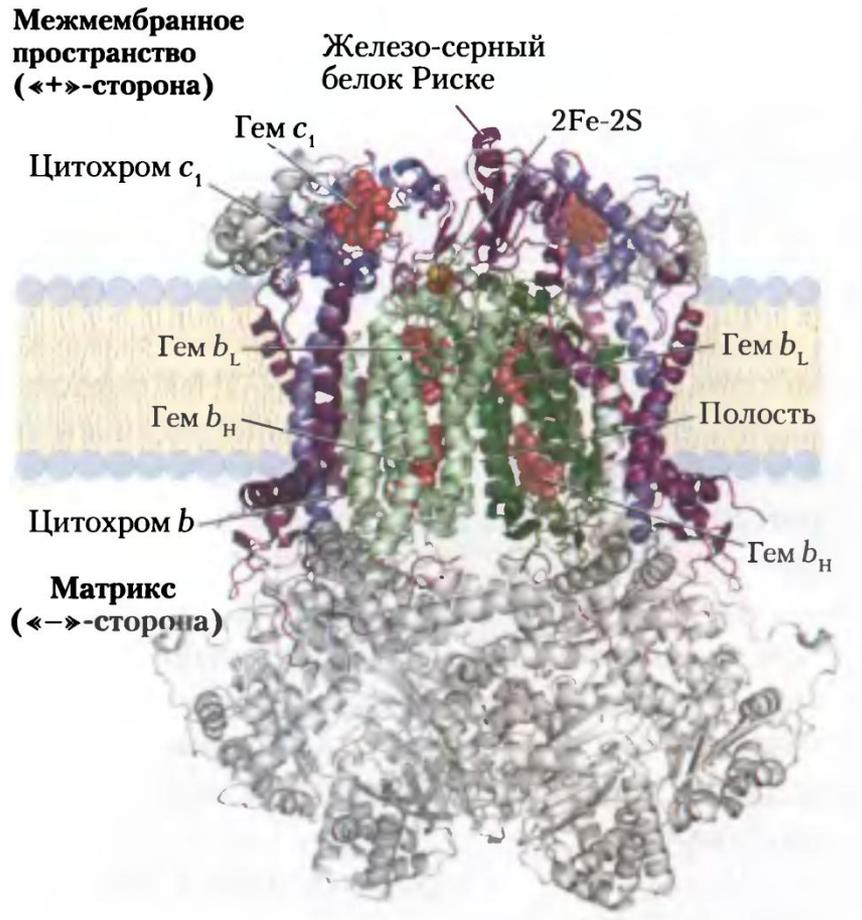
Межмембранное пространство («+»-сторона)

Фосфатидилэтаноламин

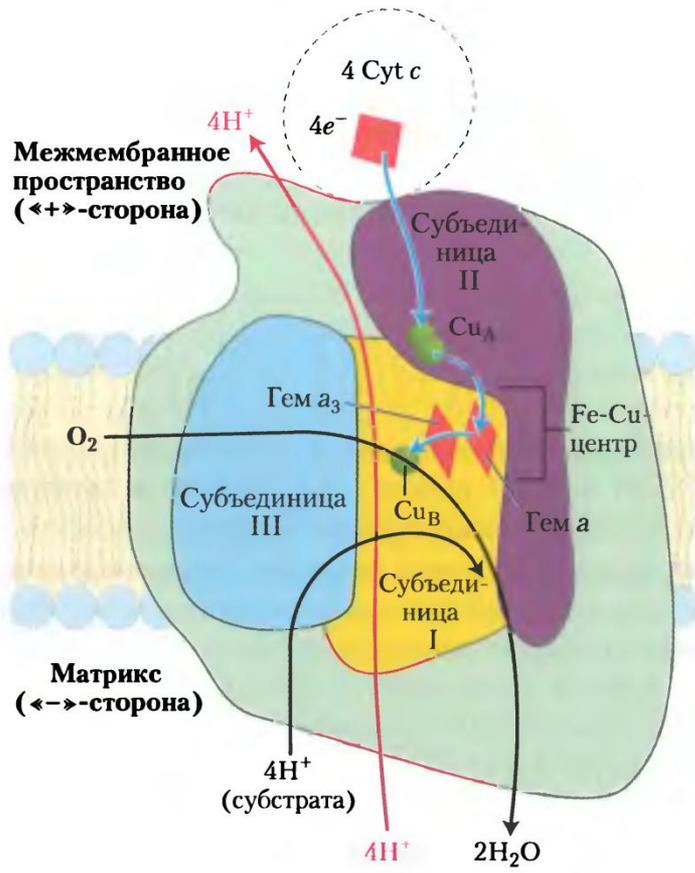


Комплекс II  
(сукцинатдегидрогеназа)

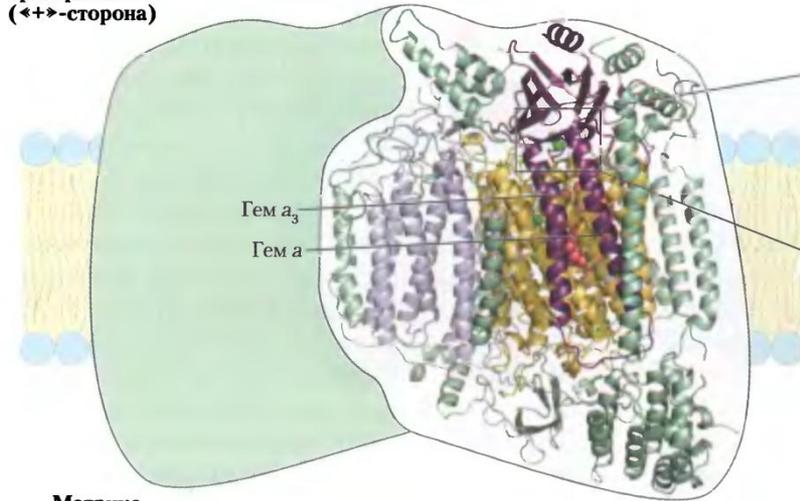
# Комплекс III: CoQH<sub>2</sub>-цитохром с оксидоредуктаза



# Комплекс IV: цитохромоксидаза



*a*  
Межмембранное пространство ( $\leftarrow+\rightarrow$ -сторона)



Матрикс ( $\leftarrow-\rightarrow$ -сторона)

# ЦПЭ

На каждую пару электронов:

**NADH**

В межмембранное пространство:

**4 H<sup>+</sup>**



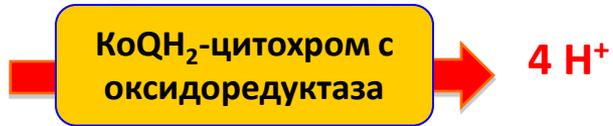
**Q**

**FADH<sub>2</sub>**

Сукцинат дегидрогеназа

A yellow rounded rectangular box representing succinate dehydrogenase. A blue arrow points from the left side of the box to the Q label.

**4 H<sup>+</sup>**



**Cyt c**

**2 H<sup>+</sup>**



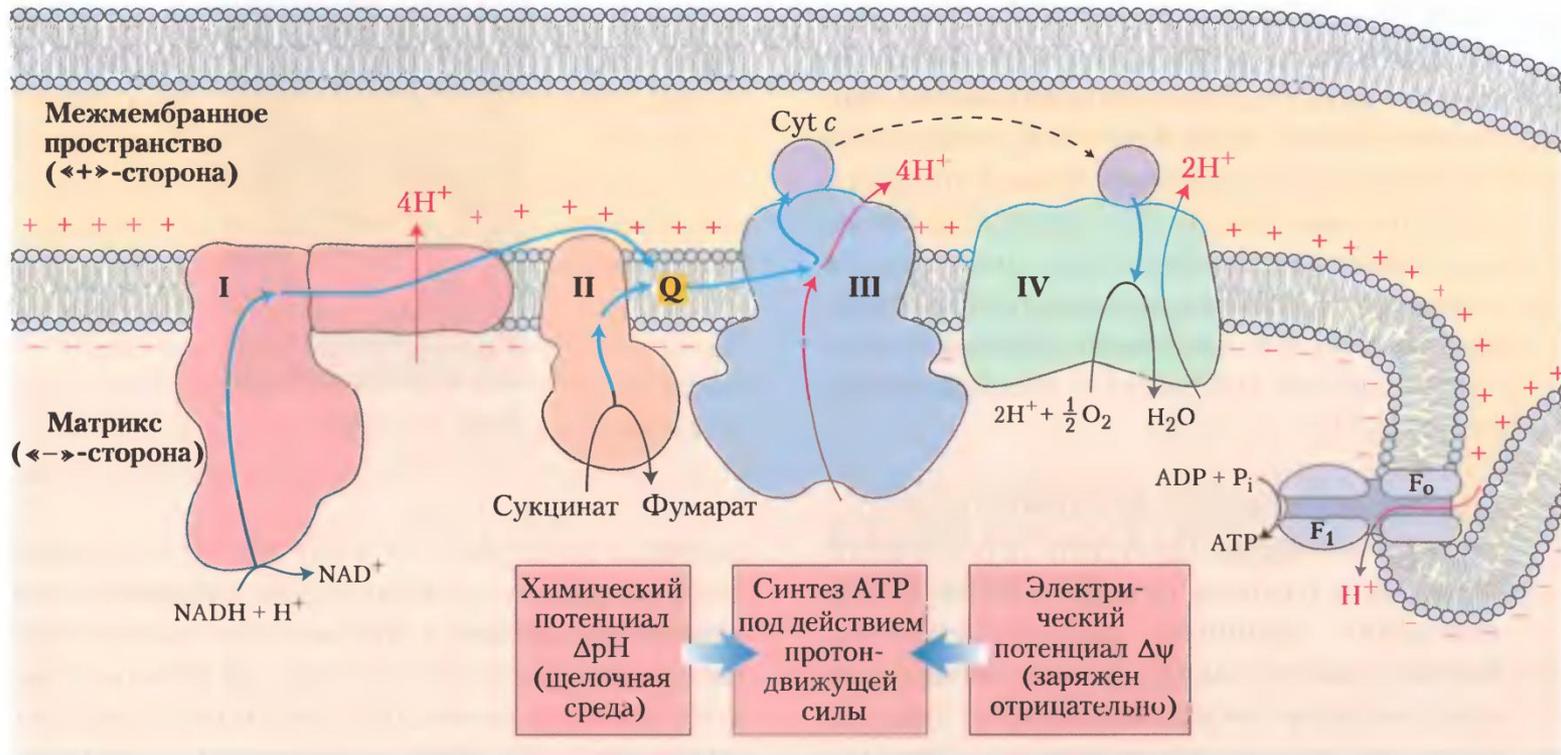
**O<sub>2</sub>**

Некоторые переносчики способны перекачивать протоны через мембрану

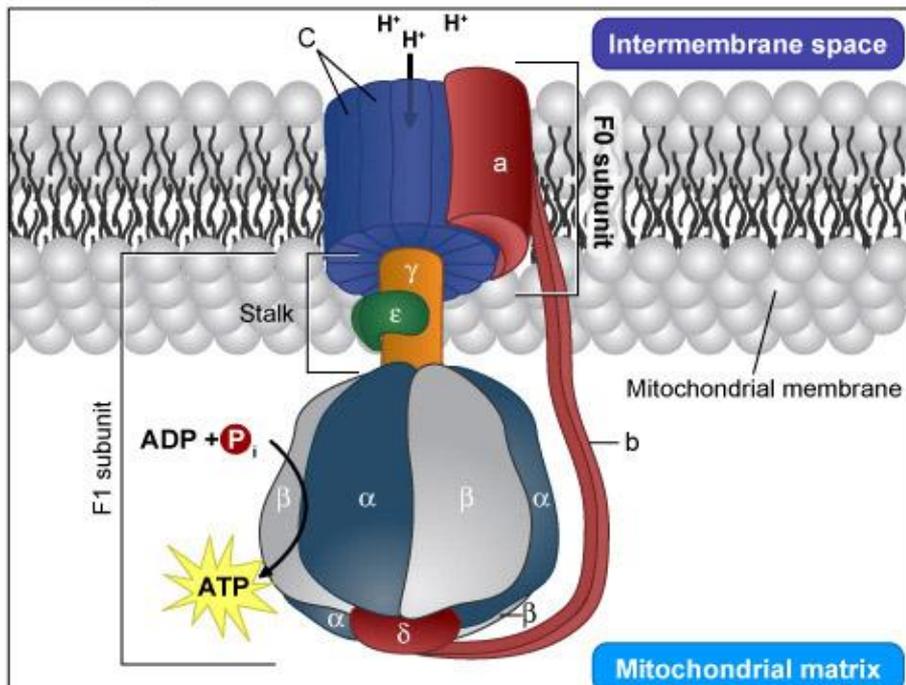
Энергия, высвобождаемая при переносе электронов в дыхательной цепи, запасается в виде протонного градиента (электрохимического потенциала)

Протонный градиент используется АТФ-синтазой для синтеза АТФ

# Хемиосмотический механизм



ATP Synthase



# Комплекс V: АТФ-синтаза

