

# ОЧЕНЬ КРАТКИЙ КУРС БИОЭНЕРГЕТИКИ

**Л.И.Нефёдов**

д.м.н., профессор, D.h.c.,  
профессор кафедры биохимии,  
УО “ГрГУ им. Янки Купалы”

[www.nil.grsu.by](http://www.nil.grsu.by)

# БИОЛОГИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ

- - это совокупность окислительных процессов в живом организме, протекающих с обязательным участием кислорода. Окисление одного вещества невозможно без восстановления другого вещества.
- Окислительно-восстановительных процессов в живой природе очень много.
- Часть их, протекающих с участием кислорода, относится к биологическому окислению.

# МИТОХОНДРИАЛЬНОЕ ОКИСЛЕНИЕ

- Мультиферментная система митохондриального окисления - система, постепенно транспортирующая протоны и электроны на кислород с образованием молекулы воды.
- Все ферменты митохондриального окисления встроены во внутреннюю мембрану митохондрий.

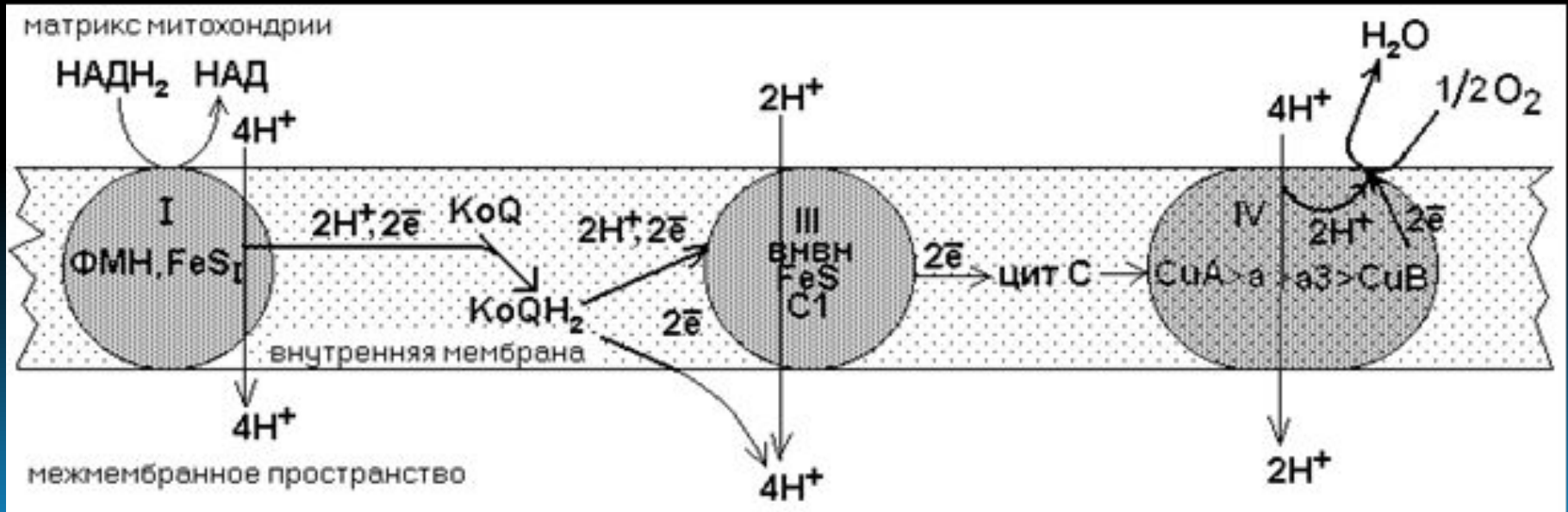
Только первый переносчик протонов и электронов – никотинамид ( $\text{НАД}^+$ )-зависимая дегидрогеназа расположена в матриксе митохондрий. Этот фермент отнимает водород от субстрата и передает его следующему переносчику.

Полный комплекс таких ферментов образует "дыхательный ансамбль" («дыхательную цепь»), в пределах которого атомы водорода отнимаются от субстрата, затем передаются последовательно от одного переносчика к другому, и, наконец, передаются на кислород воздуха с образованием воды.

- Существует строгая последовательность работы каждого звена в цепочке переносчиков.
- Эта последовательность определяется величиной **редокс-потенциала** (*окислительно-восстановительного потенциала*) каждого звена - это химическая характеристика способности вещества принимать и удерживать электроны.

# ДЫХАТЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ

- Главная дыхательная цепь - это 3 мультиферментных комплекса, встроенных во внутреннюю мембрану митохондрии. Обозначаются они латинскими цифрами – I, III и IV.



□ Комплекс I — НАДН-КоQ-редуктаза,

□ комплекс III — КоQH<sub>2</sub>-редуктаза,

□ комплекс IV —  
цитохромоксидаза.

- Есть ещё комплекс II — сукцинат-КоQ-редуктаза, но он существует отдельно от остальных комплексов и не входит в состав главной цепи.

Эти комплексы транспортируют водород от никотинамидных дегидрогеназ на кислород воздуха, в результате чего создается электрохимический градиент концентраций протонов -  $\Delta\mu\text{H}^+$ .

Он возникает на внутренней мембране митохондрий между матриксом и межмембранным пространством.

Его составляют два основных фактора:

- *электрический* мембранный потенциал  $\Delta\psi$ .
- градиент рН (*осмотический или химический градиент*).

$$\Delta\mu\text{H}^+ = \Delta\psi - k \cdot \Delta\text{pH}$$



## ЭНЕРГИЯ $\Delta\mu\text{H}^+$ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ДЛЯ СЛЕДУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ:

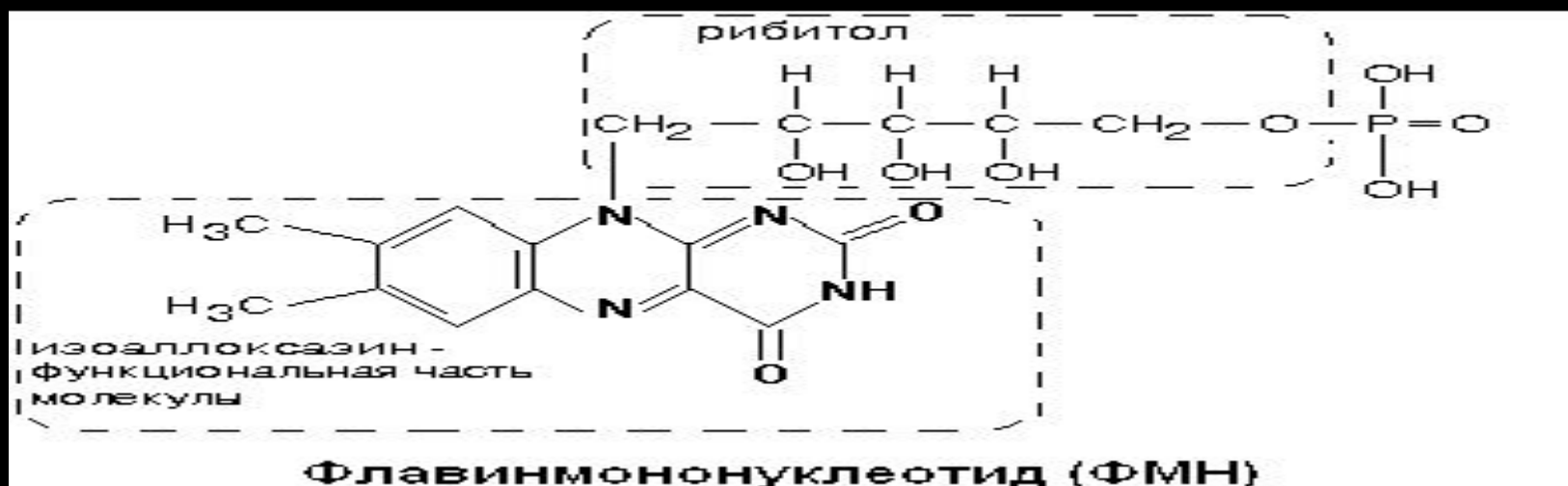
- **Синтез АТФ.**
- **Получение тепла** (*особенно важно для бурого жира и для мышечной ткани птиц*).
- **Выполнение осмотической работы** (*транспорт фосфата в матрикс митохондрии*).
- **Мышечная работа**).

Для человека наиболее важен синтез АТФ.

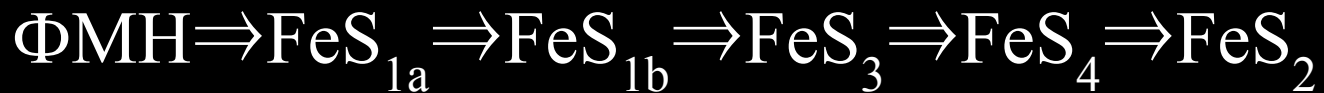
В полной цепи при окислении субстрата два атома водорода переносятся на НАД – кофермент никотинамидных дегидрогеназ.

# КОМПЛЕКС I

- В составе комплекса находится 26 полипептидных цепей общей массой 800 кДа.
- Комплекс содержит следующие небелковые компоненты: флавинмонопнуклеотид (ФМН), 5 центров FeS (*железо-серные центры*): FeS<sub>1a</sub>, FeS<sub>1b</sub>, FeS<sub>2</sub>, FeS<sub>3</sub>, FeS<sub>4</sub>.
- В транспорте водорода по дыхательной цепи в этом комплексе принимает участие ФМН.



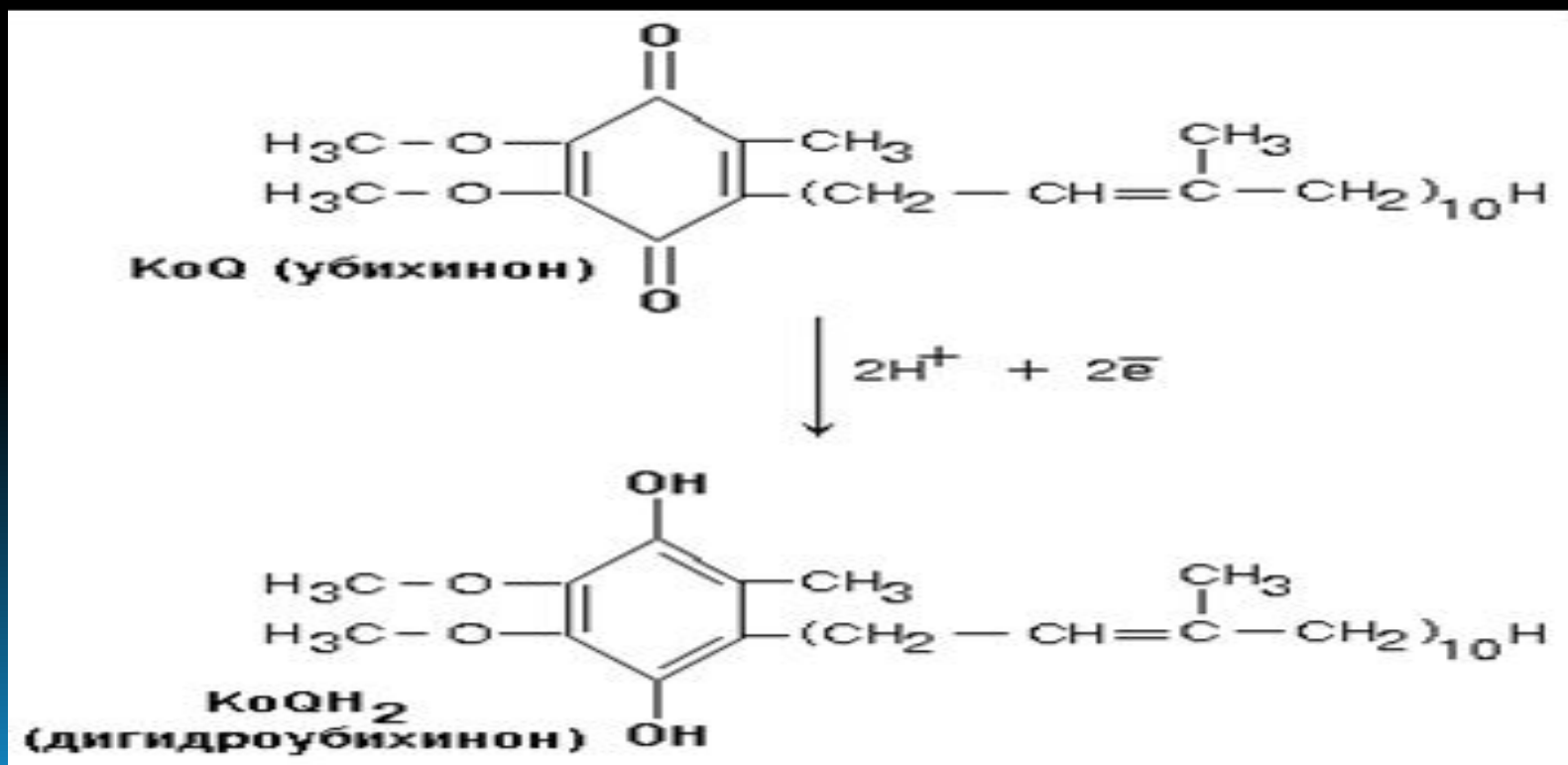
- Одновременно с протонами по дыхательной цепи транспортируются и электроны.
- Наибольшие перепады редокс-потенциала наблюдаются между железо-серными белками, расположенными в следующем порядке:



- Комплекс I – интегральный белковый комплекс. Используя энергию, выделяющуюся при переносе электронов по дыхательной цепи, он транспортирует 4 протона из матрикса в межмембранное пространство. Т.о. комплекс I работает как протонный генератор.

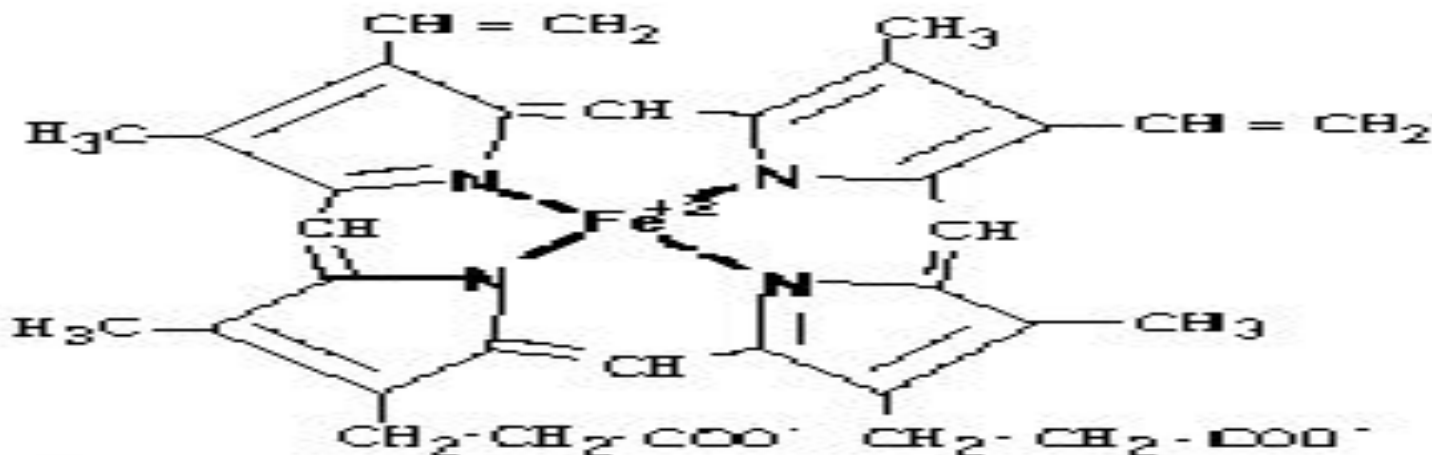
Далее комплекс I восстанавливает промежуточный переносчик КоQ (убихинон).

Это жирорастворимое низкомолекулярное вещество, содержащее длинную изопреновую цепь, не имеет белковой части. КоQ принимает водород от комплекса I. Образовавшийся  $\text{CoQH}_2$  отдает водород на комплекс III.



# КОМПЛЕКС III

- В своем составе содержит цитохромы — сложные белки, содержащие небелковый компонент - простетическую группу, сходную по строению с небелковой частью гемоглобина — гемом.



Простетическая группа  
цитохрома b

- Цитохромы **b**, имеющие в своем составе два типа простетических групп тетрапиррольной структуры - «гем».
- Известно два гема цитохромов: **b<sub>e</sub>**, обладающий низким окислительно-восстановительным потенциалом и **b<sub>h</sub>** с высоким окислительно-восстановительным потенциалом.
- Простетическая группа цитохромов **b** похожа на гем гемоглобина.

## КОМПЛЕКС IV

От двух атомов водорода, которые переносятся от КоQ на комплекс III, дальше по цепи транспортируются только электроны, а два протона ( $H^+$ ) комплекс III выбрасывает в межмембранное пространство вместе с еще одной парой протонов, которые подхватываются комплексом из матрикса.

Таким образом, комплекс III в сумме выбрасывает в межмембранное пространство 4 протона. Поэтому комплекс III, как и комплекс I, является протонным генератором, и целью его работы также является создание  $\Delta\mu H^+$ .



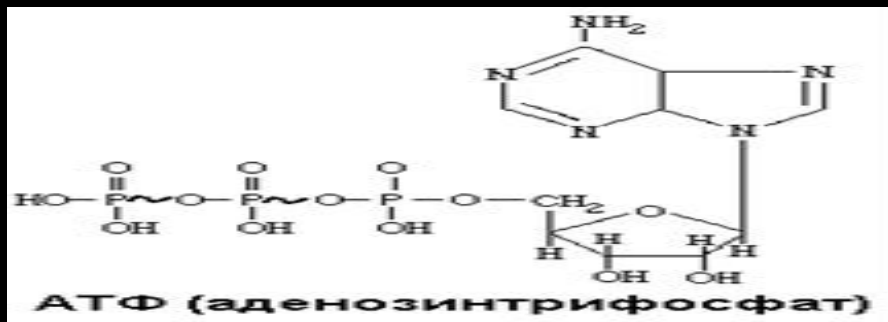
- Комплекс IV называется цитохромоксидазой. Он способен захватывать из матрикса 4 протона. Два из них он отправляет в межмембранное пространство, а остальные передает на образование воды.
- Благодаря многоступенчатой передаче энергия в дыхательной цепи выделяется не мгновенно, а постепенно (дискретно, *малыми порциями*) при каждой реакции переноса.
- Эти порции энергии не одинаковы по величине. Их величина определяется разницей между ОВП двух соседних переносчиков: если эта разница небольшая, то энергии выделяется мало и она рассеивается в виде тепла.

- Но на нескольких стадиях ее достаточно, чтобы синтезировать макроэргические связи в молекуле АТФ.

Таковыми стадиями являются:

- 1) НАД/ФАД - разность потенциалов 0.25V.
- 2) Цитохромы b/сс1 - 0.18V
- 3) аа3/O-2 - 0.53V.
- Значит, на каждую пару атомов водорода, отнятых от субстрата, возможен синтез 3-х молекул АТФ





- Макроэргическая связь - это такая ковалентная связь, при гидролизе которой выделяется не менее 30 кДж/моль энергии. Эта связь обозначается знаком ~.
- Синтез АТФ за счет энергии, которая выделяется в системе МтО, называется **окислительным фосфорилированием**. основная роль АТФ - обеспечение энергией процесса синтеза АТФ.
- Для оценки эффективности работы системы МтО при окислении вычисляют **КОЭФФИЦИЕНТ Р/О**. Он показывает, сколько молекул неорганического фосфата присоединилось к АДФ в расчете на один атом кислорода.