

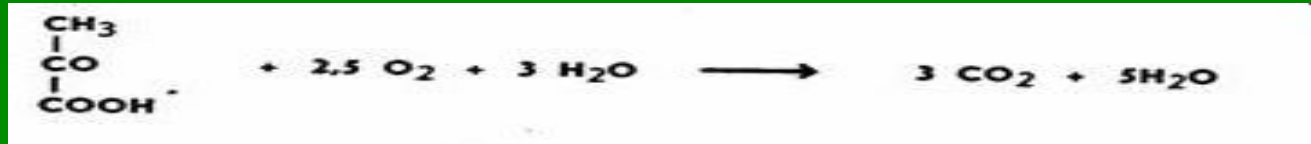
# Дыхание растений

---

1. Аэробная фаза дыхания
2. Цикл Кребса
3. Электронтранспортная цепь дыхания
4. Пентозофосфатный цикл

## Аэробная фаза дыхания

- Вторая фаза дыхания — аэробная — локализована в митохондриях и требует присутствия кислорода.



- В аэробную фазу дыхания вступает **пировиноградная кислота**.

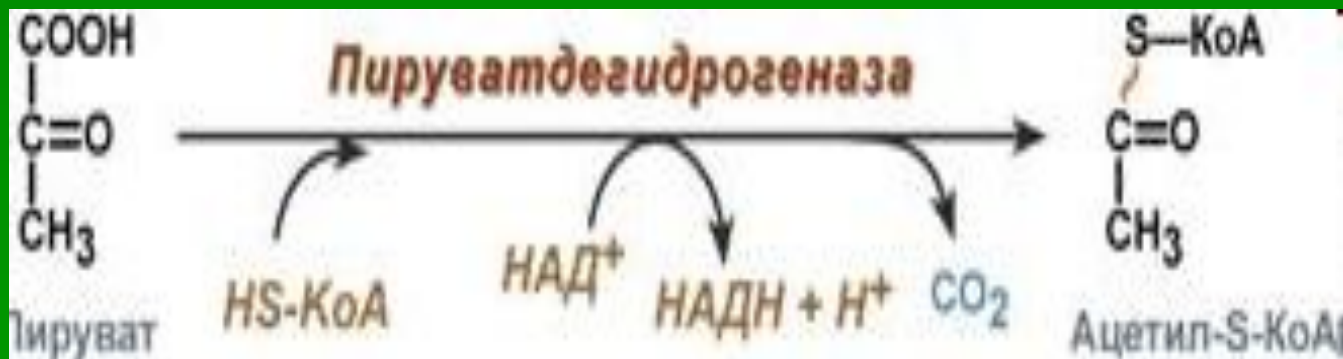
- Общее уравнение этого процесса следующее:



- Процесс можно разделить на три основные стадии:
- 1) окислительное декарбоксилирование пировиноградной кислоты; (превращение поступивших из цитоплазмы<sup>1</sup>) окислительное декарбоксилирование пировиноградной кислоты; (превращение поступивших из цитоплазмы в митохондрию пирувата и жирных кислот в ацетил-СоА; )
- 2) окисление ацетил-СоА в цикле трикарбоновых кислот (цикл Кребса);
- 3) заключительная стадия окисления — электронно-транспортная цепь (ЭТЦ) требует обязательного присутствия O<sub>2</sub>. (Перенос электронов с НАДН на кислород по дыхательной цепи;)
- Образование АТФ в результате деятельности мембранного АТФ-синтетазного комплекса.
- Первые две стадии происходят в матриксе митохондрий, электронно-транспортная цепь локализована на внутренней мембране митохондрий.

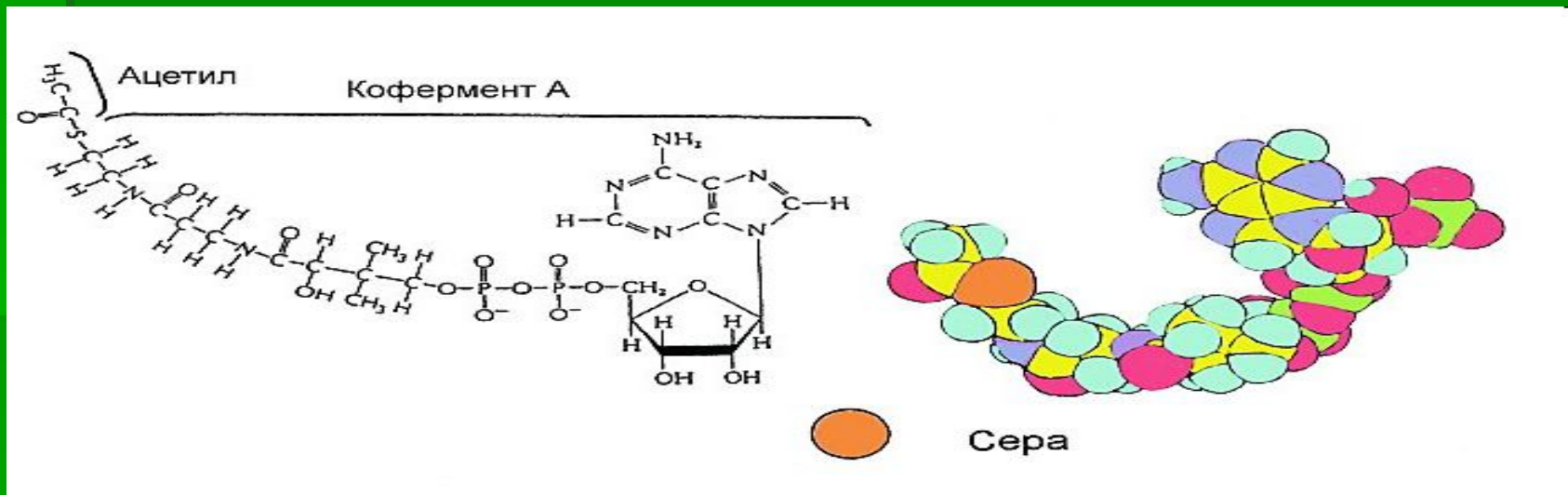
## Первая стадия — окислительное декарбоксилирование ПБК

- В **аэробных** условиях пируват симпортом с ионами  $H^+$ , движущимися по протонному градиенту, проникает в митохондрии
- Здесь происходит его превращение до **уксусной кислоты**, переносчиком которой служит коэнзим А.
- Суммарное уравнение отражает окислительное декарбоксилирование пирувата, восстановление НАД до НАДН и образование ацетил-S-CoA.



# Ацетил-SКоА

- **Ацетил-SКоА** образуется в процессе расщепления сахаров, жирных кислот и некоторых аминокислот и используется при их синтезе. является реакционноспособным носителем **ацетильной группы**.
- В одних реакциях она используется для синтеза органических веществ, в других – для их «сжигания» в качестве топлива. Поэтому **ацетил-соА** является важнейшим посредником во множестве биохимических процессов, связанных с обменом вещества и энергии.



От молекулы пирувата отщепляется молекула диоксида углерода, а оставшаяся от него ацетильная группа присоединяется к коферменту А, с образованием ацетил-соА. Образуется НАД-Н и CO<sub>2</sub>

# Окисление ацетата дает много энергии

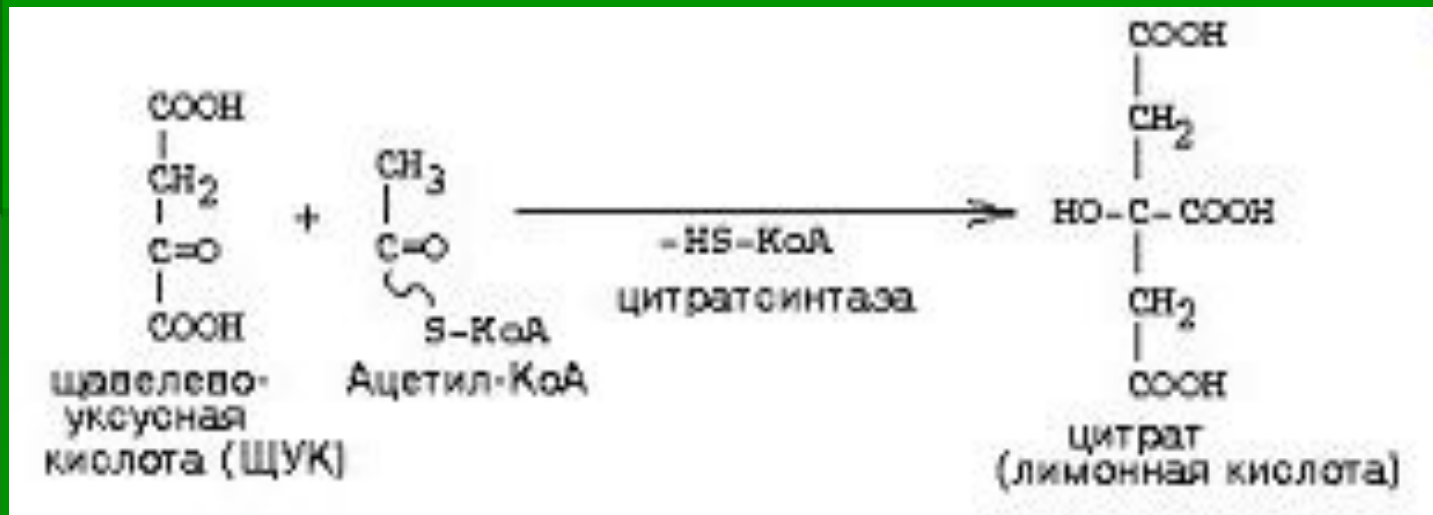
- Образующийся в ПВК-дегидрогеназной реакции ацетил-SКоА далее вступает в **цикл трикарбоновых кислот** (ЦТК, цикл лимонной кислоты, цикл Кребса).
- Кроме пирувата, в цикл вовлекаются кетокислоты, поступающие из катаболизма **аминокислот** или каких-либо **иных веществ**.

# Вторая стадия - ЦТК

- **Открытие ЦТК.**
- В 1937 году Ганс Кребс. Эта идея родилась у него, когда он исследовал влияние анионов различных органических кислот на скорость поглощения кислорода суспензиями измельченных грудных мышц голубя, в которых происходило окисление пирувата.
- Кребс также подтвердил, что обнаруженные ранее в животных тканях другие органические кислоты (янтарная, яблочная, фумаровая и щавелевоуксусная) стимулируют окисление пирувата.
- Кроме того, он нашел, что окисление пирувата мышечной тканью стимулируется **шестиуглеродными трикарбоновыми кислотами** - лимонной, цис-аконитовой и изолимонной, а также пятиуглеродной кетоглутаровой кислотой.
- За это важное открытие Кребс был удостоен в 1953 году Нобелевской премии.

# Цикл трикарбоновых кислот

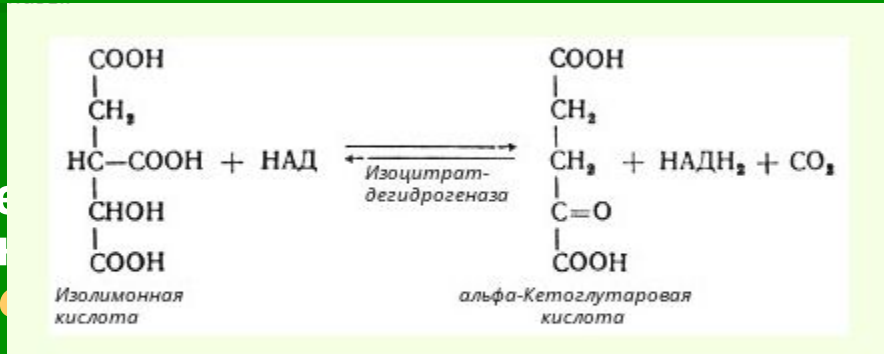
- Цикл протекает в **матриксе митохондрий** и представляет собой восемь последовательных реакций.
- 1. Цикл начинается со взаимодействия молекулы ацетил-СоА с щавелевоуксусной кислотой (**оксалоацетатом**), в результате которого образуется шестиуглеродная трикарбоновая кислота, называемая **лимонной**, при этом КоА выделяется в прежнем виде. Этот процесс катализируется ферментом **цитратсинтазой**.





2. Лимонная кислота превращается в **изолимонную**.

Превращение цитрата в изоцитрат катализируется **аконитазой**, содержащей железо в двухвалентном состоянии. Эта реакция осуществляется в две стадии: сначала происходит дегидратация с образованием цис-аконитата, а затем - гидратация и образование **изоцитрата**:



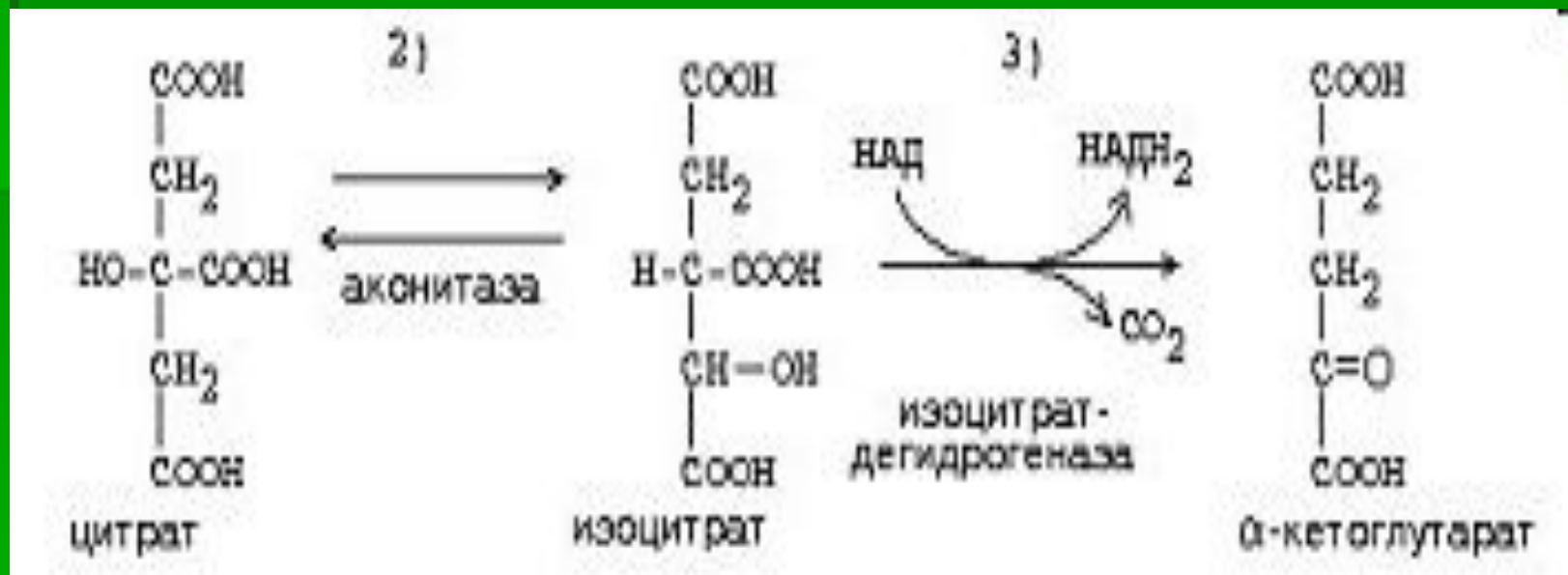
На следующей стадии образуется **изоцитрат** из лимонной кислоты, реакция катализируется **изоцитратдегидрогеназой**.

**изолимонной**

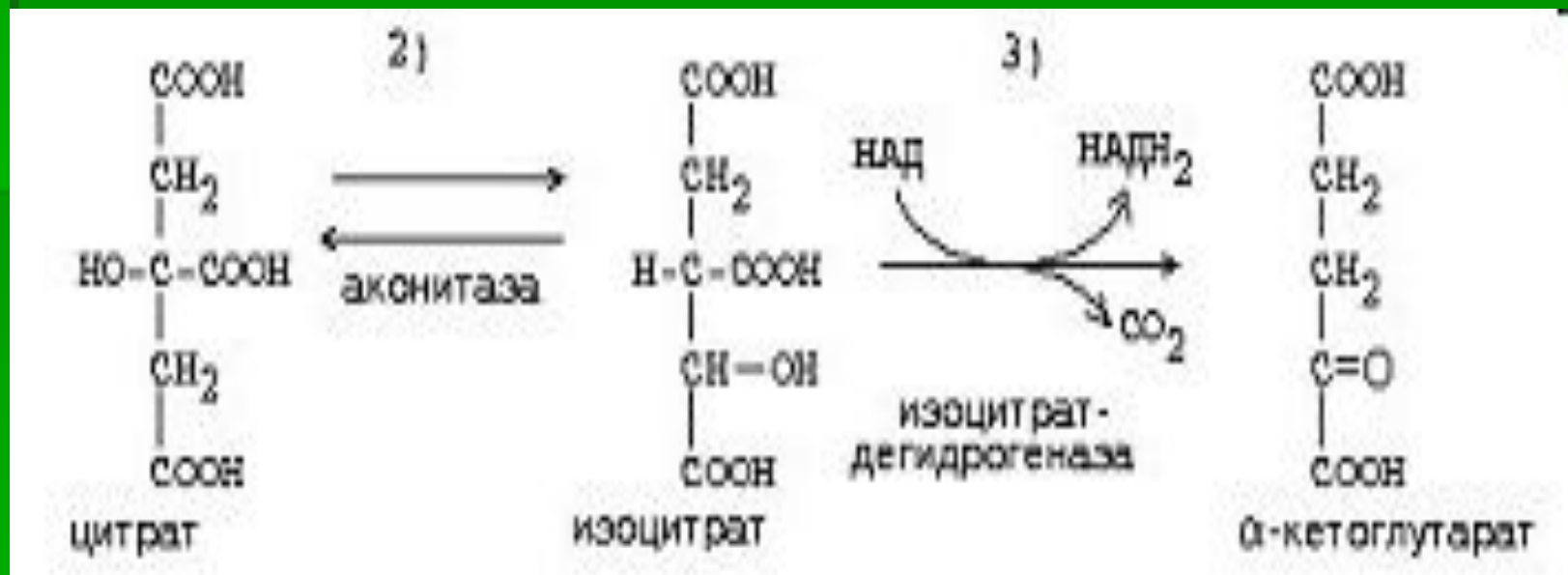
При этом протоны и электроны переносятся на НАД (**образуется НАДН + Н+**). Для протекания этой реакции требуются ионы магния или марганца.

Одновременно происходит процесс декарбоксилирования. За счет одного из атомов углерода, вступившего в цикл Кребса, первая молекула **CO2** выделяется.

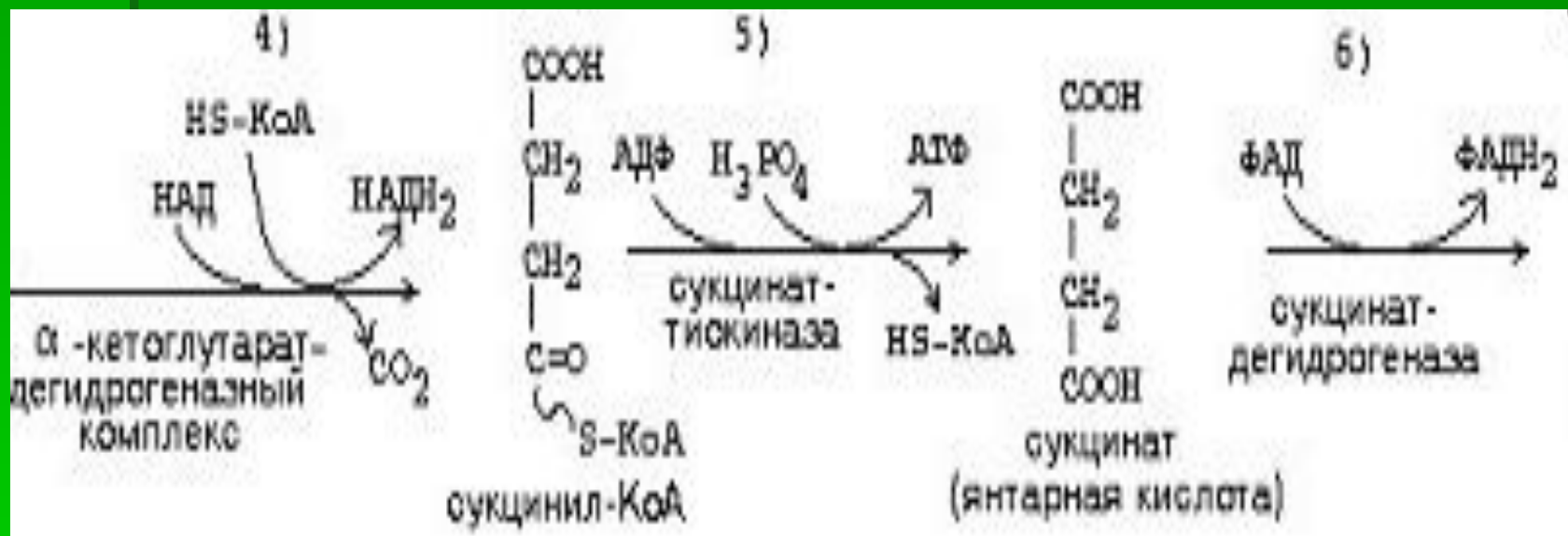
- 3. Образовавшаяся **α-кетоглутаровая кислота** подвергается окислительному декарбоксилированию. Этот процесс также катализируется мультиферментным комплексом **кетоглутаратдегидрогеназой**, содержащим тиаминпирофосфат, липоевую кислоту, коэнзим А, ФАД и НАД.
- В результате за счет второго атома углерода, вступившего в цикл, выделяется вторая молекула **CO<sub>2</sub>**



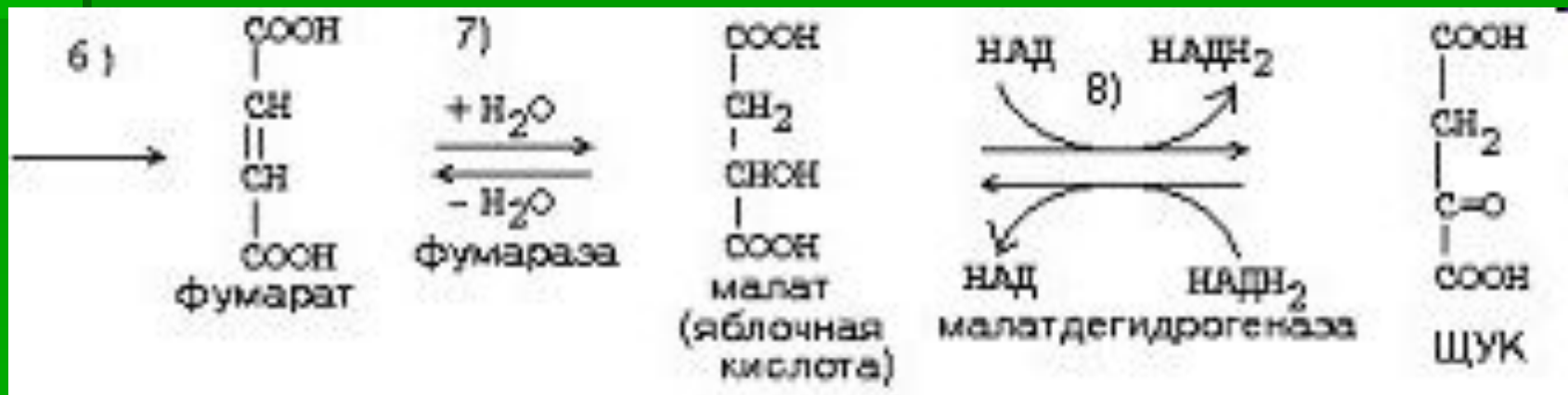
- 3. Образовавшаяся **α-кетоглутаровая кислота** подвергается окислительному декарбоксилированию. Этот процесс также катализируется мультиферментным комплексом **кетоглутаратдегидрогеназой**, содержащим тиаминпирофосфат, липоевую кислоту, коэнзим А, ФАД и НАД.
- В результате за счет второго атома углерода, вступившего в цикл, выделяется вторая молекула **CO<sub>2</sub>**



- 4. Одновременно происходит восстановление еще одной молекулы НАД до **НАДН** и образуется **сукцинил-КоА**.
- 5. На следующем этапе сукцинил-КоА расщепляется на **янтарную кислоту** (сукцинат) и **HS—КоА**. Выделяющаяся при этом энергия накапливается в макроэргической фосфатной связи **АТФ**.
- Такой этап важен, так как выделяющаяся энергия непосредственно накапливается в АТФ. Этот тип образования АТФ, подобно ее образованию в процессе гликолиза, относится к **субстратному фосфорилированию**.



- 6. Образовавшаяся янтарная кислота окисляется до **фумаровой кислоты**. Реакция катализируется ферментом **сукцинатдегидрогеназой**, простетической группой которого является ФАД. Одновременно выделяется третья пара водородов, образуя **ФАД-Н<sub>2</sub>**.
- 7. На следующем этапе фумаровая кислота, присоединяя молекулу воды, превращается в **яблочную кислоту** с помощью фермента **фумаратдегидрогеназы**.
- 8. На последнем этапе цикла яблочная кислота окисляется до **ЩУК**. Эту реакцию катализирует фермент **малатдегидрогеназа**, активной группой которого является НАД, и происходит выделение четвертой пары протонов — образуется **НАДН + Н<sup>+</sup>**.

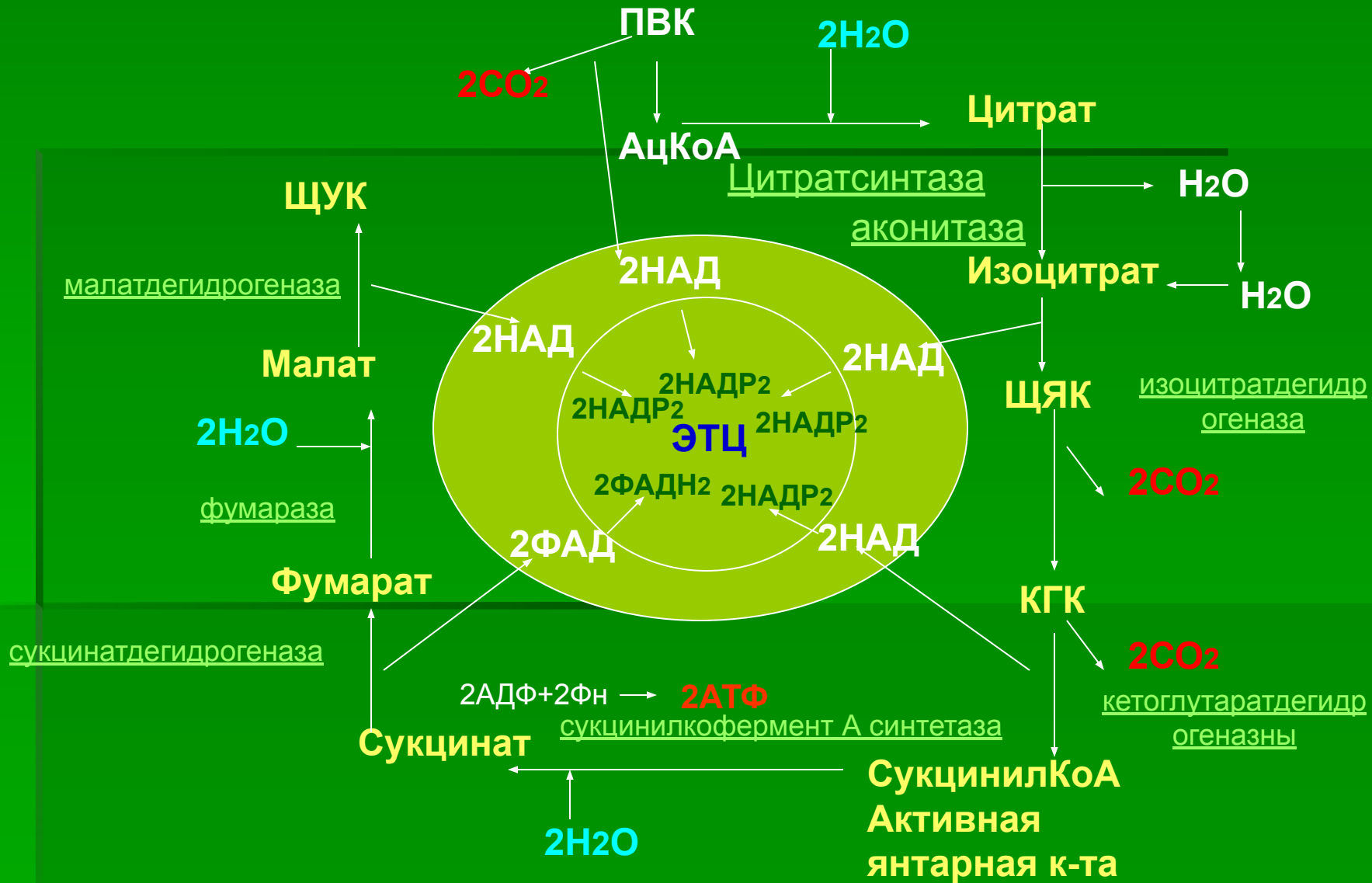


- Таким образом, ЦУК регенерирует в прежнем виде и может реагировать со следующей молекулой активного ацетата. Одновременно в ходе каждого цикла выделяются две молекулы  $\text{CO}_2$  и образуются три молекулы  $\text{НАДН} + \text{H}^+$  и молекула  $\text{ФАДН}_2$ .
- В результате распада 1 молекулы ПВК в аэробной фазе (**декарбоксилирование ПВК + цикл Кребса**) выделяется  $3\text{CO}_2$ , 4 молекулы  $\text{НАДН} + \text{H}^+$  и 1 молекула  $\text{ФАДН}_2$ .
- Таким образом, 5 пар  $\text{H}_2$ , образующихся из ПВК и воды, поступают в ЭТЦ

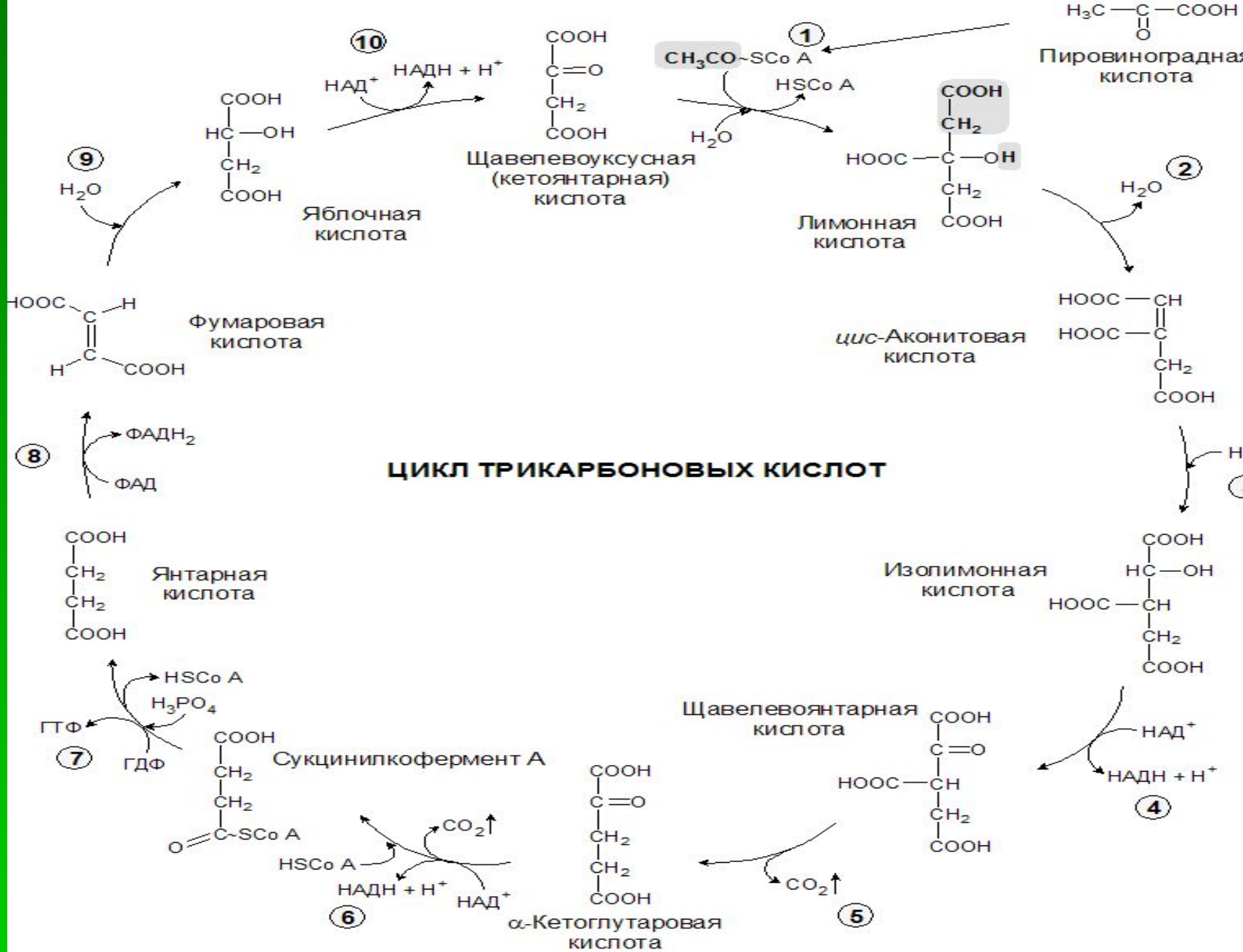
	Субстраты	Продукты	Фермент	Тип реакции	Комментарий
1	Оксалоацетат + Ацetyl-CoA + H <sub>2</sub> O	Цитрат + CoA-SH	Цитратсинтаза	Альдольная конденсация	лимитирующая стадия, превращает C <sub>4</sub> оксалоацетат в C <sub>6</sub>
2	Цитрат	изо-цитрат + H <sub>2</sub> O	изоцитратсинтаза	Дегидратация	обратимая изомеризация
3	изо-цитрат + H <sub>2</sub> O	α-кетоглутарат		гидратация	
4	α-кетоглутарат + NAD <sup>+</sup>	Оксалосукцинат + NADH + H <sup>+</sup>	α-кетоглутаратдегидрогеназа декарбоксилирующая	Окисление	образуется NADH (эквивалент 2.5 ATP)
5	Оксалосукцинат	α-кетоглутарат + CO <sub>2</sub>	декарбоксилирование	декарбоксилирование	необратимая стадия, образуется C <sub>5</sub>
6	α-кетоглутарат + NAD <sup>+</sup> + CoA-SH	сукцинил-CoA + NADH + H <sup>+</sup> + CO <sub>2</sub>	α-кетоглутаратдегидрогеназный комплекс (ферменты)	Окислительное декарбоксилирование	образуется NADH (эквивалентно 2.5 ATP), регенерация C <sub>4</sub> цепи (освобождается CoA-SH)
7	сукцинил-CoA + GDP + P <sub>i</sub>	сукцилат + CoA-SH + GTP	сукцинилкофермент А синтаза	субстратное фосфорилирование	ADP → ATP <sup>2.5</sup> образуется 1 ATP (или 1 GTP)
8	сукцилат + убихинон (Q)	фумарат + убихинол (QH <sub>2</sub> )	сукцилатдегидрогеназа	Окисление	используется FAD как простетическая группа (FAD → FADH <sub>2</sub> - первой стадии реакции) в ферменте <sup>2.5</sup> образуется эквивалент 1.5 ATP
9	Фумарат + H <sub>2</sub> O	Л-малат	фумаратаза	H <sub>2</sub> O-присоединение (гидратация)	
10	Л-малат + NAD <sup>+</sup>	оксалоацетат + NADH + H <sup>+</sup>	малатдегидрогеназа	окисление	образуется NADH (эквивалентно 2.5 ATP)



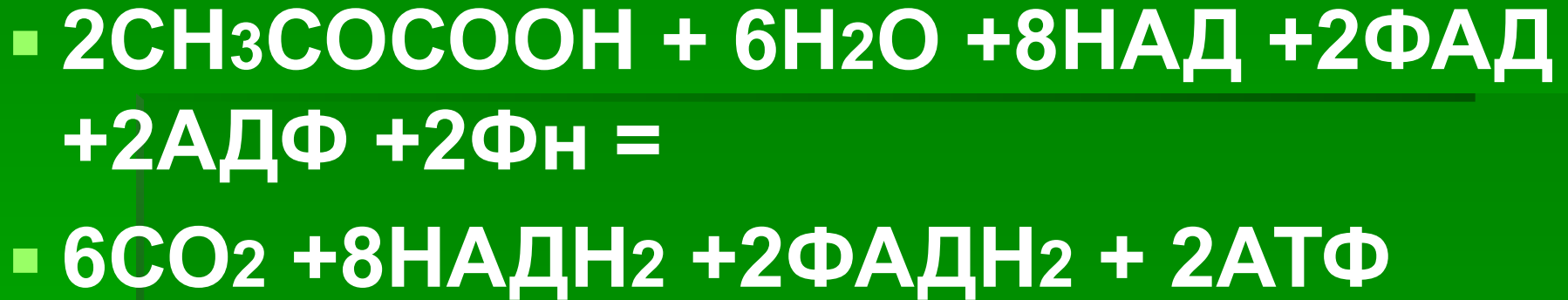
# Цикл трикарбоновых кислот







## Суммарное уравнение ЦТК



Если окисление происходит по ПФЦ, то глюкоза поставляет в цикл Кребса 1 молекулу ПВК.

**ЦТК** → место синтеза белкового, жирового и углеводного обмена (синтез АК, ЖК, углеводов, пигментов)

**ЦТК** → источник НАДН<sub>2</sub> и ФАДН<sub>2</sub> → **ЭТЦ.**

# Основная роль ЦТК

- Основная роль ЦТК заключается в
- генерации атомов водорода для работы дыхательной цепи, а именно **трех** молекул **НАДН** и **одной** молекулы **ФАДН<sub>2</sub>**.
- Кроме этого, в ЦТК образуется одна молекула **АТФ**,
- **сукцинил-SКоА**, участвующий в синтезе гема,
- **кетокислоты**, являющиеся аналогами аминокислот –  $\alpha$ -кетоглутарат для глутаминовой кислоты, оксалоацетат для аспарагиновой.

# Третья стадия — электронтранспортная цепь (ЭТЦ)

- Для чего образуются восстановленные НАД и ФАД? Являются донорами водородов (электронов) в ЭТЦ дыхания.
- Молекулы НАДН и ФАДН<sub>2</sub>, образуемые в реакциях окисления углеводов, жирных кислот, спиртов и аминокислот, далее поступают в митохондрии, где идет процесс **окислительного фосфорилирования** — синтез АТФ, сопряженный с переносом электронов по ЭТЦ дыхания.

# Окислительное фосфорилирование

- **Окислительное фосфорилирование** – процесс, происходящий во **внутренней мембране митохондрий** и заключающийся в окислении восстановленных эквивалентов (НАДН и ФАДН<sub>2</sub>) ферментами дыхательной цепи и сопровождающийся синтезом АТФ.
- Впервые механизм окислительного фосфорилирования был предложен Питером Митчеллом.
- Согласно этой гипотезе **перенос электронов**, происходящий на внутренней митохондриальной мембране, вызывает **выкачивание ионов H<sup>+</sup>** из матрикса митохондрий в межмембранное пространство.

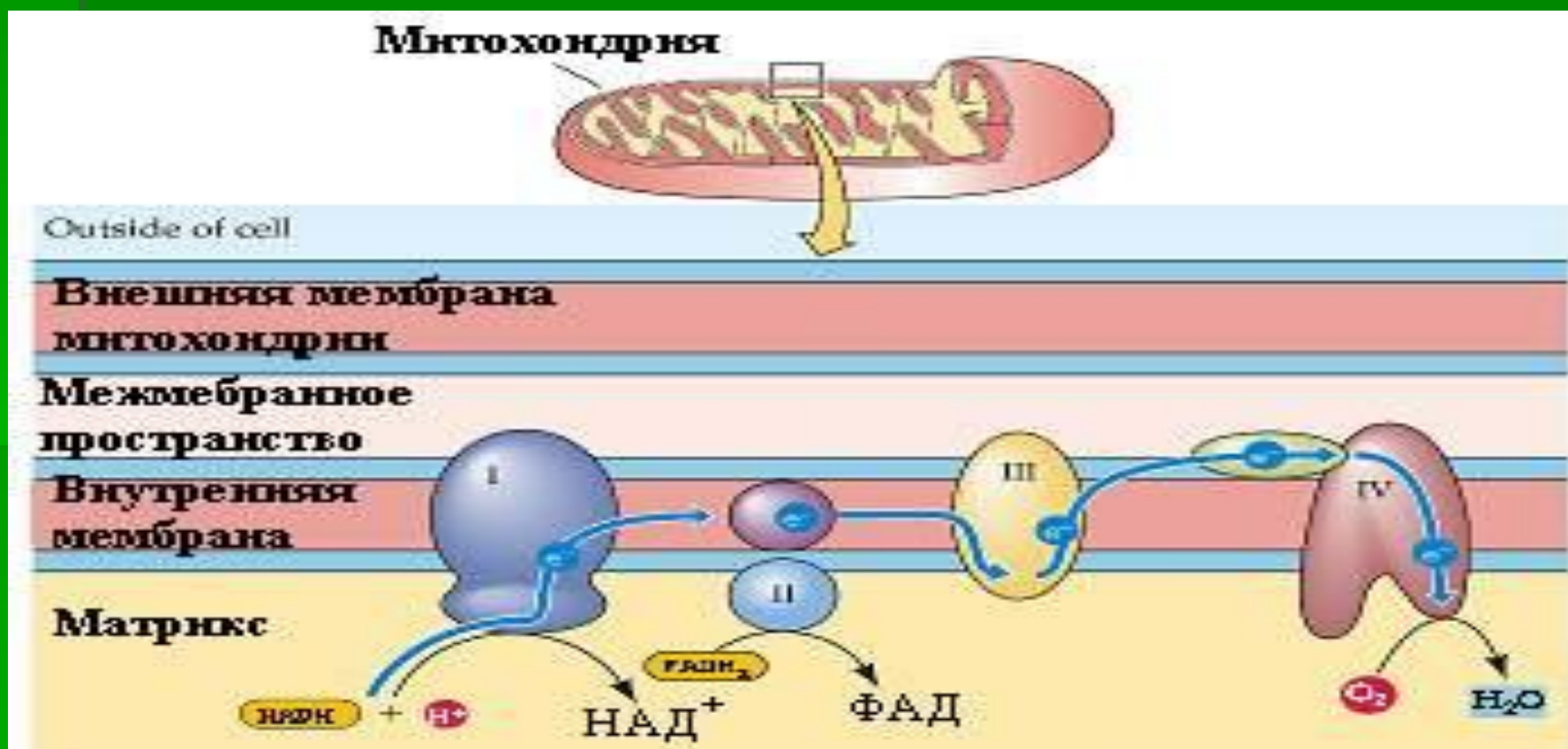
■

# Окислительное фосфорилирование

- Это создает **градиент концентрации ионов  $H^+$**  между цитозолем и замкнутым внутримитохондриальным пространством.
- Ионы водорода в норме способны возвращаться в матрикс митохондрий только одним способом – **через фермент, образующий АТФ – АТФ-синтазу.**
- Внутренняя митохондриальная мембрана содержит ряд мультиферментных комплексов, включающих множество ферментов.
- Эти ферменты называют **дыхательными ферментами**, а последовательность их расположения в мембране – **дыхательной цепью**

# РАСПОЛОЖЕНИЕ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕНОСЧИКОВ В МЕМБРАНЕ МИТОХОНДРИЙ

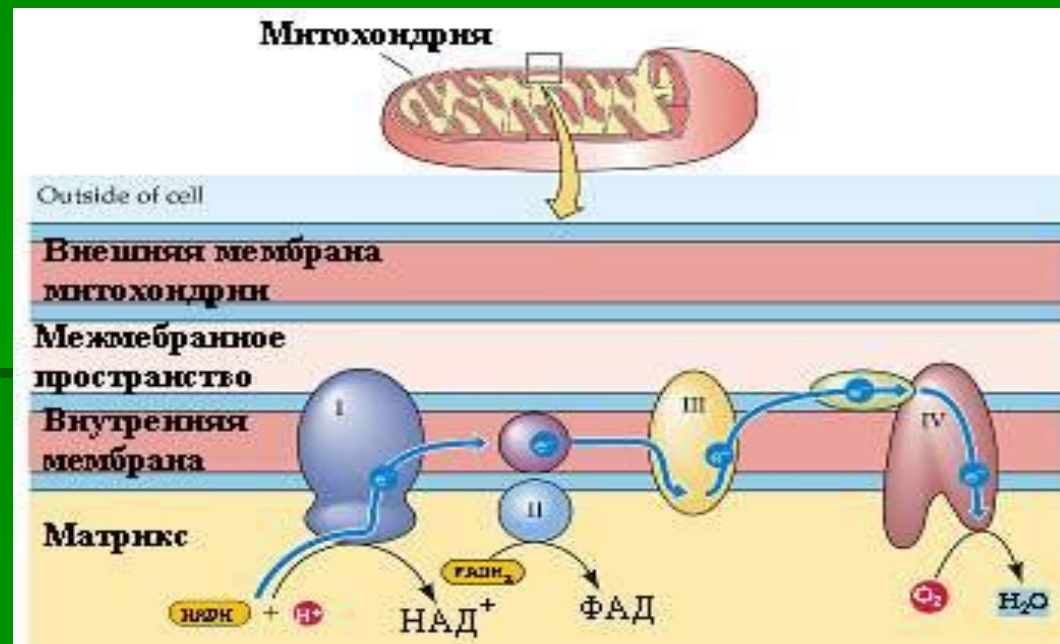
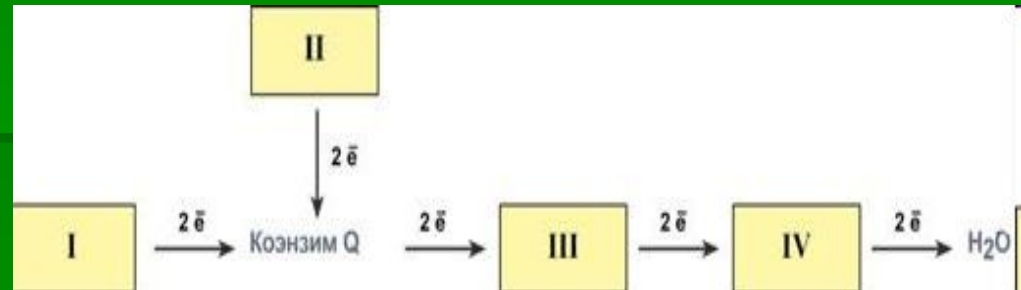
- Всего цепь переноса электронов включает в себя около 40 разнообразных белков, которые организованы в 4 больших мембраносвязанных мультферментных комплекса





# Дыхательная цепь включает множество белков-переносчиков

- **Комплекс I** осуществляет перенос электронов от **НАДН** к **убихинону**. Его субстрат-внутримитохондриальный НАДН, восстанавливающийся в ЦТК.
- **Комплекс II** катализирует окисление сукцината убихиноном.

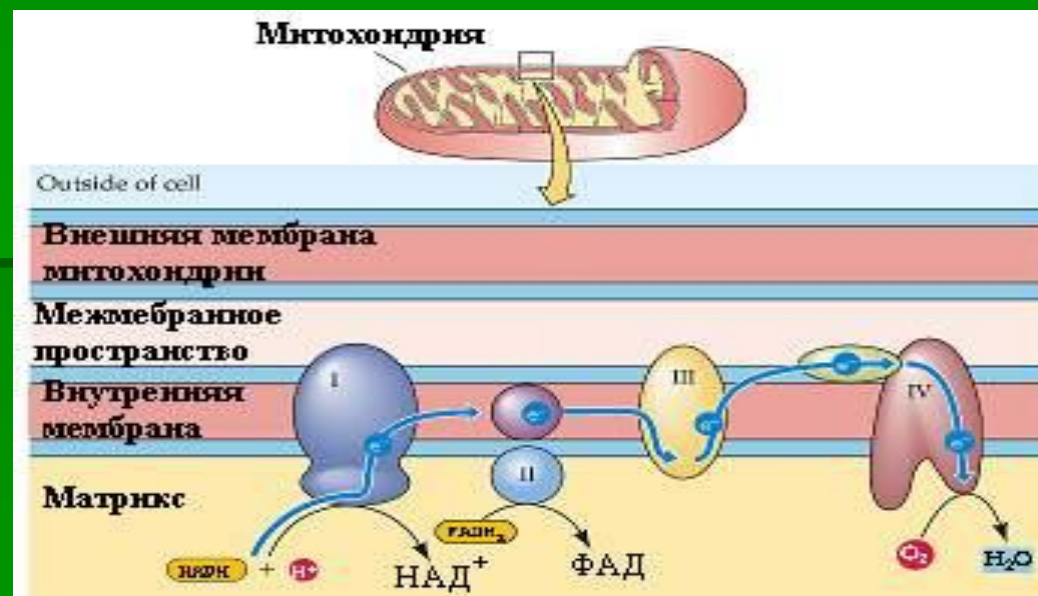
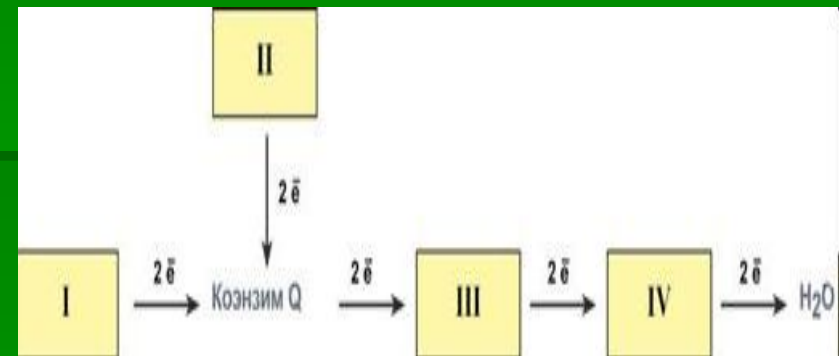


1961г. Грин. Все переносчики электронов в митохондриальной мембране сгруппированы в 4 комплекса.

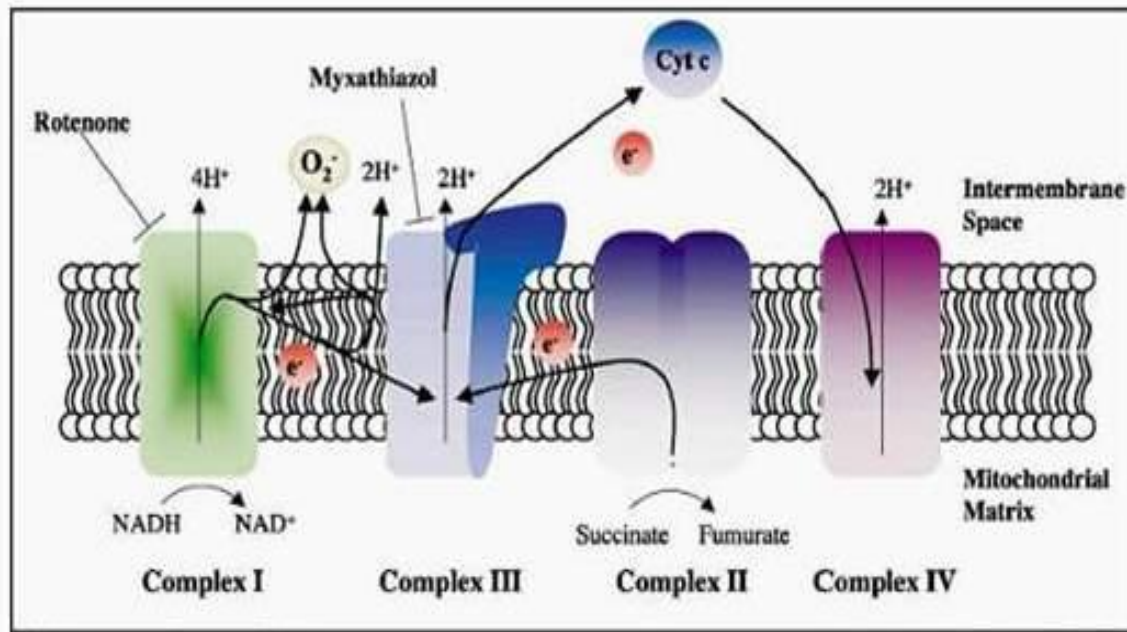


# Дыхательная цепь включает множество белков-переносчиков

- **Комплекс III** переносит электроны от восстановленного убихинона к цитохрому **C**, т.е функционирует как убихинол: цитохром C-оксиредуктаза.
- **Комплекс IV** электроны переносятся от цитохрома **c** к **O<sub>2</sub>**, т.е. этот комплекс является цитохром **c**.
- Существует еще **V комплекс**, участвующий не в переносе электронов, а синтезирующий АТФ.



# СХЕМА ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ ПО ДЫХАТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ



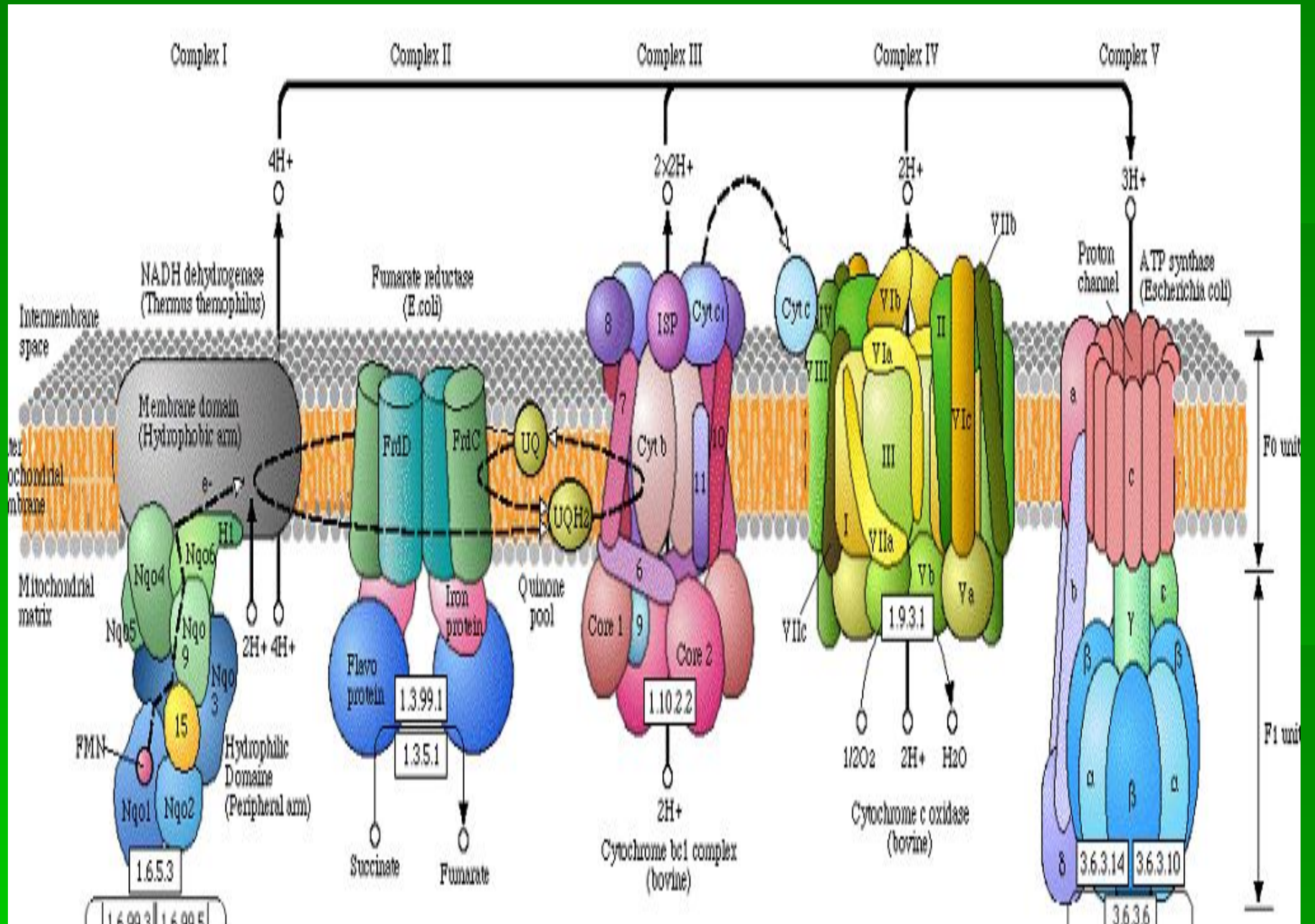
Электроны входят в электронтранспортную цепь при окислении НАДН (через комплекс I) или при окислении сукцината (через комплекс II)

Убихинон – липид-растворимый переносчик электронов и переносит их от комплексов I и II к комплексу III

Комплекс I – НАДН-Убихинон Оксидоредуктаза

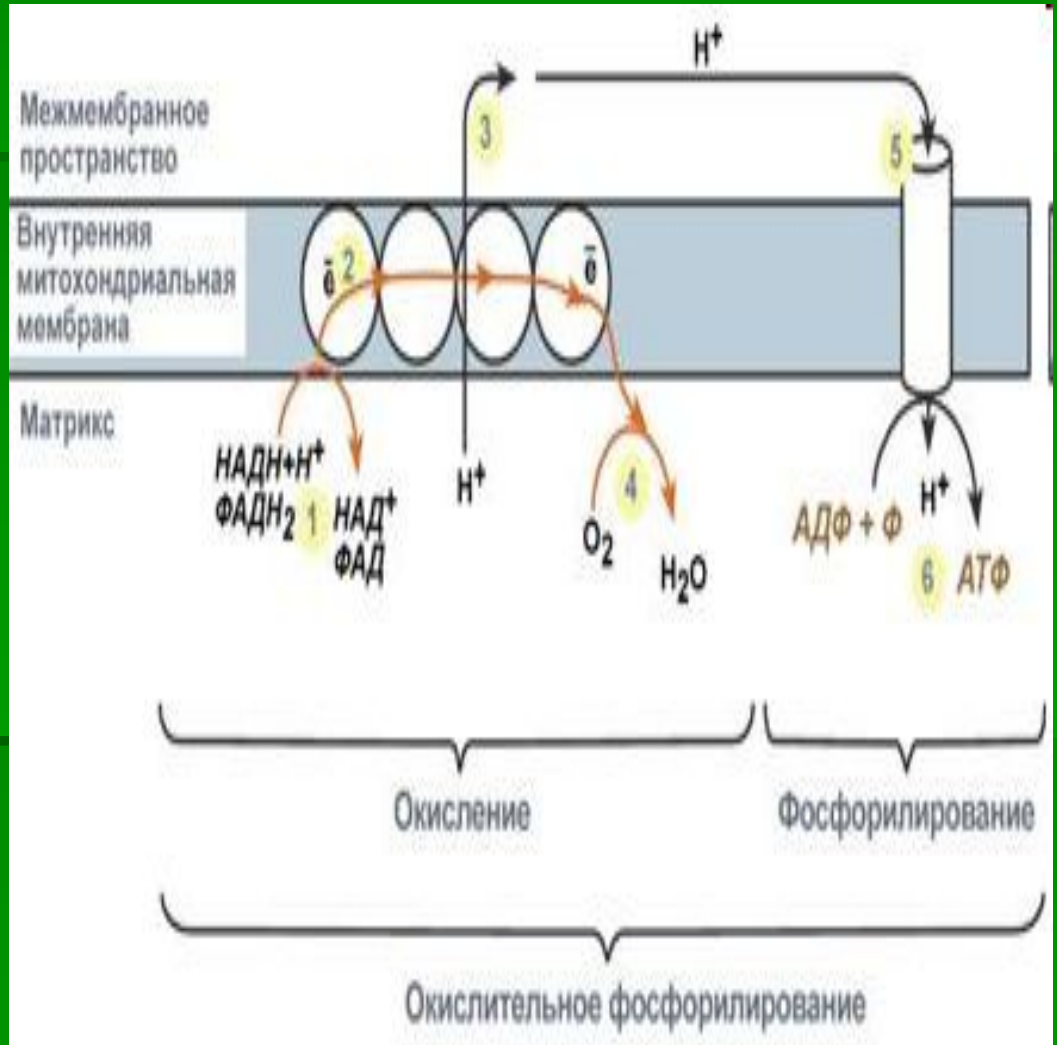
Комплекс II – СукцинатДегидрогеназа

Комплекс III – Убихинон-Цитохром C Оксидоредуктаза



# Принцип работы дыхательной цепи

- Образующиеся в реакциях НАДН и ФАДН<sub>2</sub> передают атомы водорода на ферменты дыхательной цепи.
- Электроны движутся по ферментам дыхательной цепи и теряют энергию.
- Эта энергия используется на выкачивание протонов H<sup>+</sup> из матрикса в межмембранное пространство.
- В конце дыхательной цепи электроны попадают на **кислород** и восстанавливают его до воды.

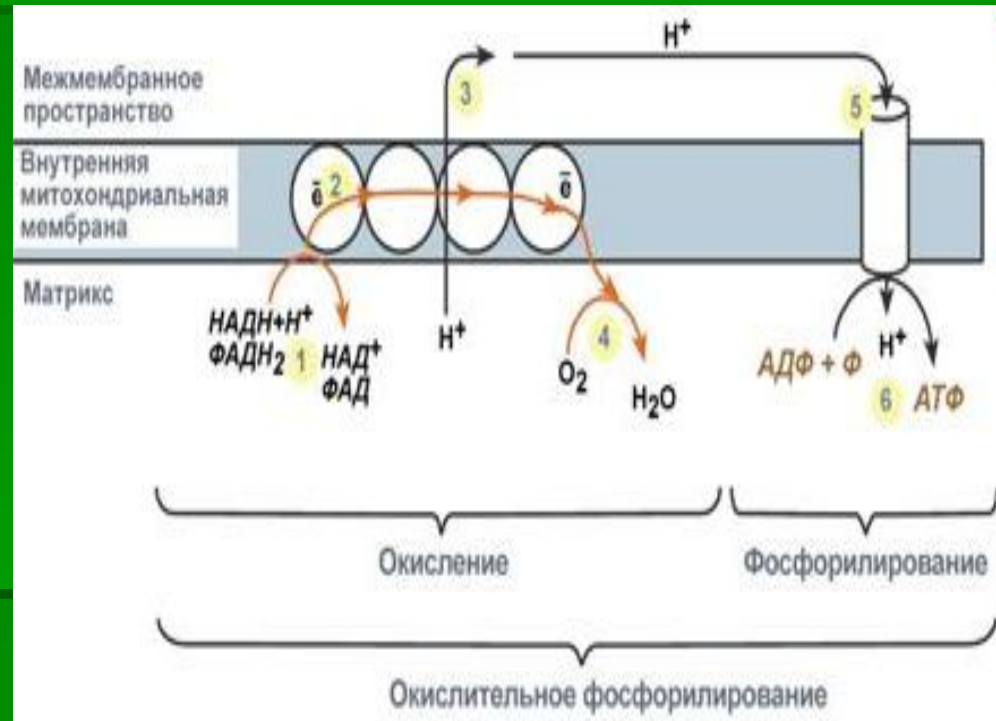


Общие принцип окислительного фосфорилирования



# Принцип работы дыхательной цепи

- Протоны  $H^+$  стремятся обратно в матрикс и проходят через АТФ-синтазу.
- При этом они теряют энергию, которая используется для синтеза АТФ.
- Таким образом, восстановленные формы НАД и ФАД окисляются ферментами дыхательной цепи, благодаря этому происходит присоединение фосфата к АДФ, т.е. **фосфорилирование**, а процесс - **окислительное фосфорилирование**.



# Строение ферментативных комплексов

- **1 комплекс. НАДН-КоQ-оксидоредуктаза**
- Этот комплекс также имеет рабочее название НАДН-дегидрогеназа, содержит ФМН, 22 белковых молекулы, из них 5 железосерных белков с общей молекулярной массой до 900 кДа.
- **Функция**
- Принимает электроны от НАДН и передает их на коэнзим Q (убихинон).
- Переносит 4 иона  $H^+$  на наружную поверхность внутренней митохондриальной мембраны.
- **2 комплекс. ФАД-зависимые дегидрогеназы**
- Он включает в себя ФАД-зависимые ферменты, расположенные на внутренней мембране – например, **ацил-SКоА-дегидрогеназа** (окисление жирных кислот), **сукцинатдегидрогеназа** (цикл трикарбоновых кислот), митохондриальная **глицерол-3-фосфат-дегидрогеназа** (челночный механизм переноса НАДН в митохондрию).
- **Функция**
- Восстановление ФАД в окислительно-восстановительных реакциях.
- Обеспечение передачи электронов от ФАДН<sub>2</sub> на железосерные белки внутренней мембраны митохондрий. Далее эти электроны попадают на коэнзим Q.

- **3 комплекс. КоQ-цитохром с-оксидоредуктаза**
- Данный комплекс включает **цитохромы b и c1**.
- Кроме цитохромов в нем имеются **2 железо-серных белка**. Всего насчитывается 11 полипептидных цепей общей молекулярной массой около 250 кДа.

- **Функция**

- Принимает электроны от **коэнзима Q** и передает их на **цитохром с**.
- Переносит 2 иона  $H^+$  на наружную поверхность внутренней митохондриальной мембраны.

- **4 комплекс. Цитохром с-кислород-оксидоредуктаза**

- В этом комплексе находятся **цитохромы a и a3**, он называется также **цитохромоксидаза**, всего содержит 6 полипептидных цепей. В комплексе также имеется 2 иона меди.

- **Функция**

- Принимает электроны **от цитохрома с** и передает их **на кислород с** образованием воды.
- Переносит 4 иона  $H^+$  на наружную поверхность внутренней митохондриальной мембраны.

## V комплекс

- это фермент **АТФ-синтаза**, состоящий из множества белковых цепей, подразделенных на две большие группы:
- одна группа формирует субъединицу **F<sub>o</sub>** (произносится со звуком "о", а не "ноль" т.к. олигомицин-чувствительная) – ее функция **каналообразующая**, по ней выкачанные наружу протоны водорода устремляются в матрикс.
- другая группа образует субъединицу **F<sub>1</sub>** – ее функция **каталитическая**, именно она, используя энергию протонов, синтезирует АТФ.
- Для синтеза 1 молекулы АТФ необходимо прохождение приблизительно 3-х протонов H<sup>+</sup>.



Каким образом энергия водорода преобразуется в энергию АТФ?

Механизм окислительного осфорилирования

- 1 Ферменты дыхательной цепи расположены в **строго определенной последовательности**: каждый последующий белок обладает **большим сродством к электронам**, чем предыдущий (он более электроположителен, т.е. обладает более положительным окислительно-восстановительным потенциалом). Это обеспечивает однонаправленное движение электронов.
- 2 Все атомы водорода, отщепленные дегидрогеназами от субстратов в аэробных условиях, достигают внутренней мембраны митохондрий в составе **НАДН** или **ФАДН<sub>2</sub>**.

# Механизм окислительного фосфорилирования

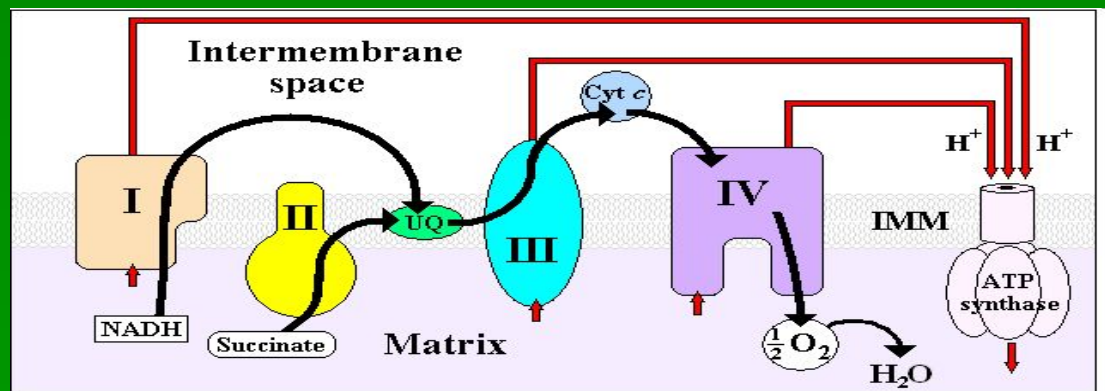
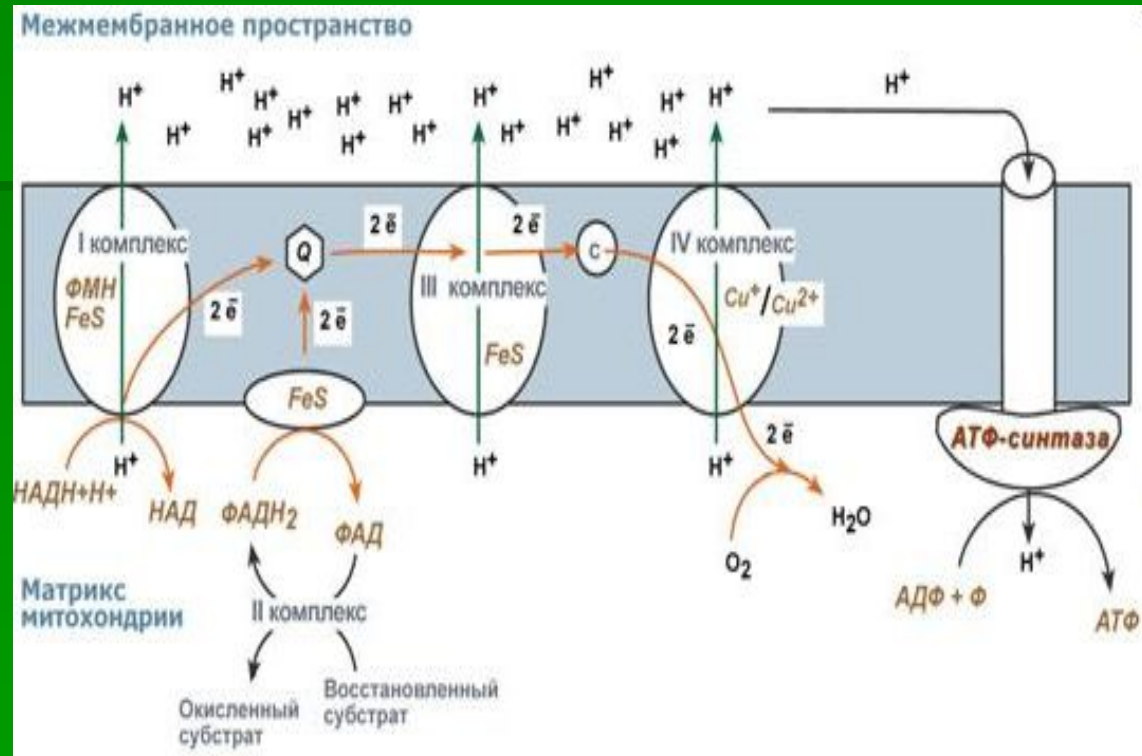
- 3. Здесь атомы водорода (от НАДН и ФАДН<sub>2</sub>) передают свои **электроны** в дыхательную ферментативную цепь, по которой электроны движутся (50-200 шт/сек) к своему конечному акцептору – **кислороду**. В результате образуется **вода**.
- 4. Поступающие в дыхательную цепь **электроны богаты свободной энергией**. По мере их продвижения по цепи они теряют энергию

## Участки сопряжения (фосфорилирования)

5 Перенос ионов водорода через мембрану (выкачивание) происходит не случайно, а в строго определенных участках мембраны.

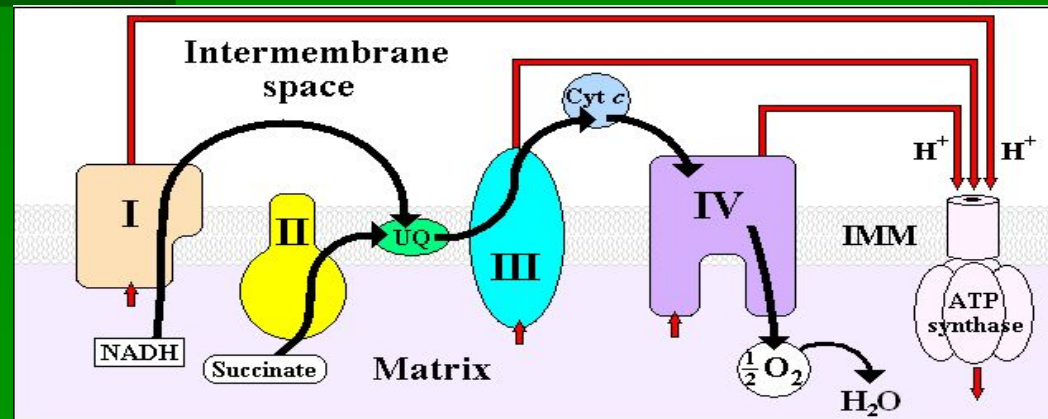
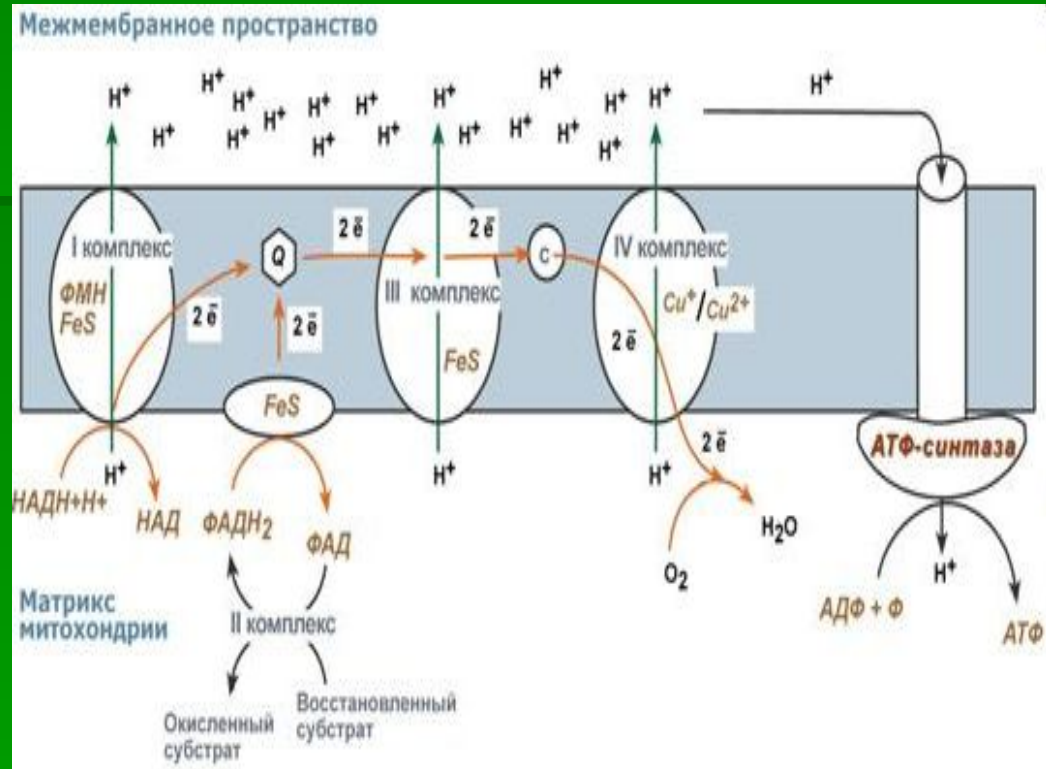
Эти участки называются участки сопряжения (фосфорилирования).

Они представлены I, III, IV комплексами дыхательных ферментов.



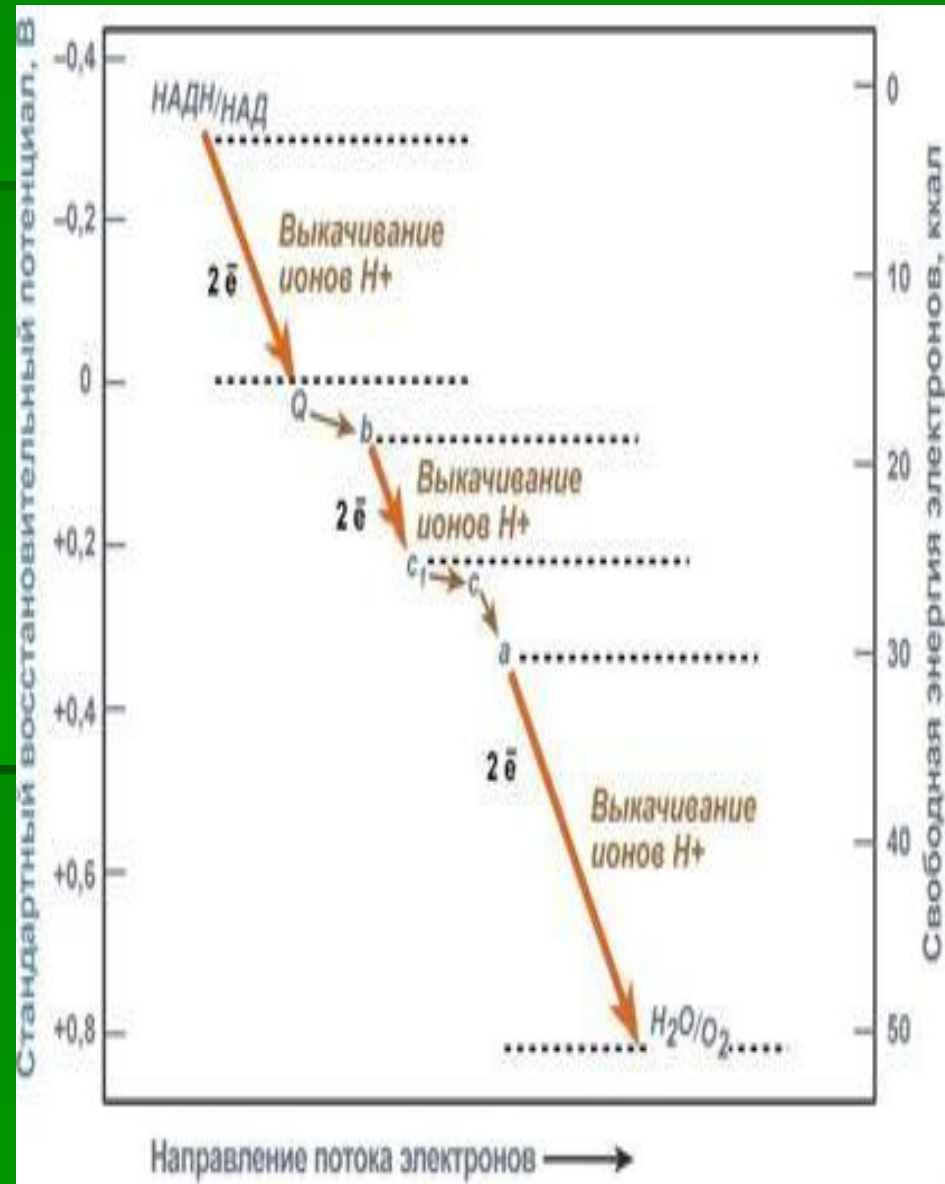
## Участки сопряжения (фосфорилирования)

- В результате работы этих комплексов формируется градиент ионов водорода между внутренней и наружной поверхностями внутренней митохондриальной мембраны.
- Благодаря этим трем ферментным комплексам **энергия реакций окисления** может передаваться на **фосфорилирование**, т.е. существует сопряжение (связывание) двух процессов.



# Энергетические соотношения в дыхательной цепи митохондрий и участки переноса ионов $H^+$ через мембрану

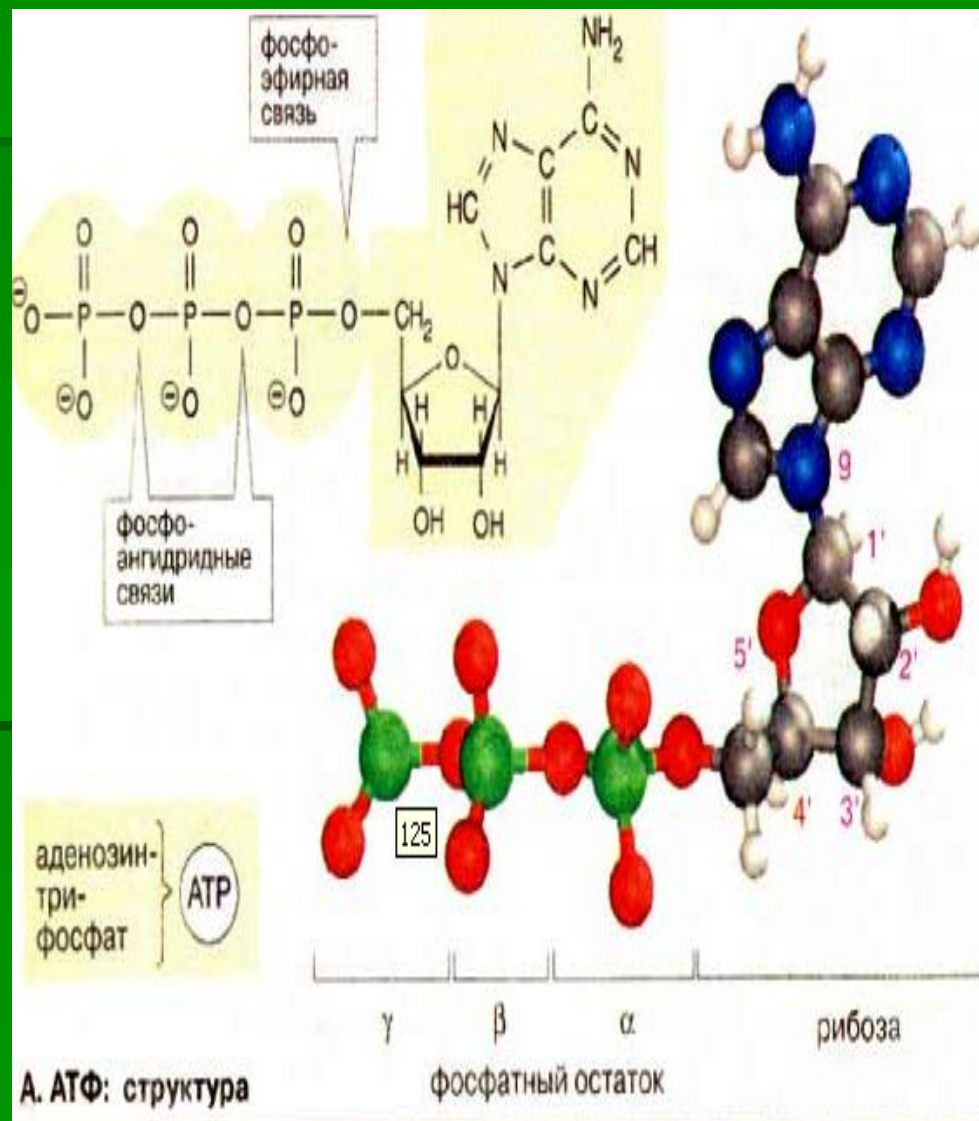
- Движущей силой транспорта водорода в дыхательной цепи является разность потенциалов.
- В связи с этим расположение отдельных переносчиков в дыхательной цепи, определяется величиной их **окислительно-восстановительного потенциала (О/В)**.
- В начале цепи расположен НАД, обладающий наибольшей отрицательной величиной О/В потенциала (**-0,32 В**), а в конце — кислород с наиболее положительной величиной (**+0,82 В**).
- Остальные переносчики ФАД, КоQ цитохромы расположены между ними в порядке последовательного повышения положительного потенциала.
- Это и позволяет электронам передвигаться по направлению к кислороду (наивысший положительный потенциал).





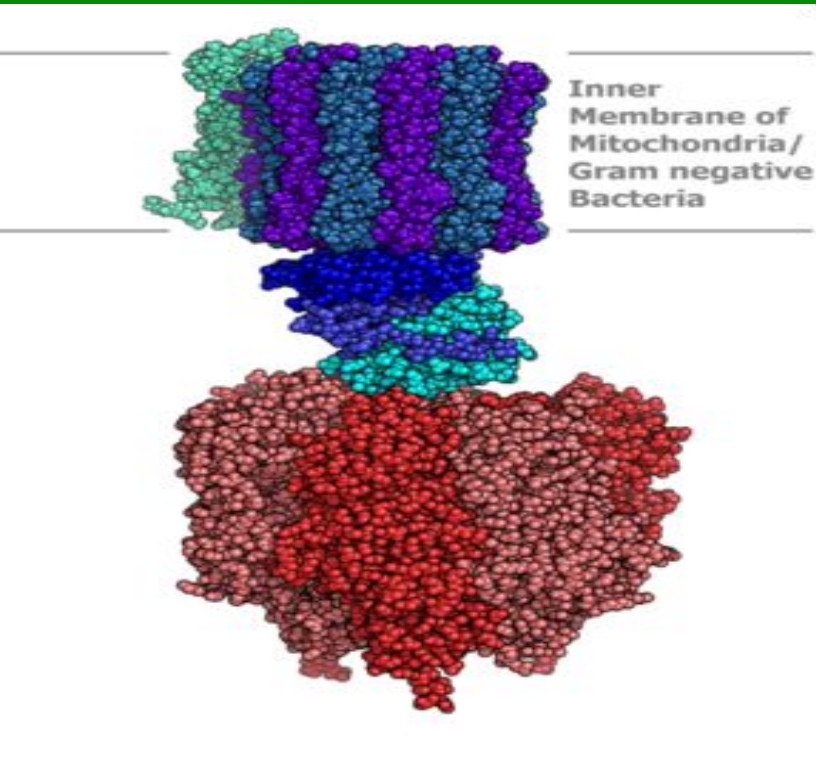
# Энергоноситель - АТФ

- АТФ образуется при дыхании путем окислительного фосфорилирования – затрачивается энергия электрона по ЭТЦ
- субстратного фосфорилирования – на уровне субстрата при окислении дегидрогеназами

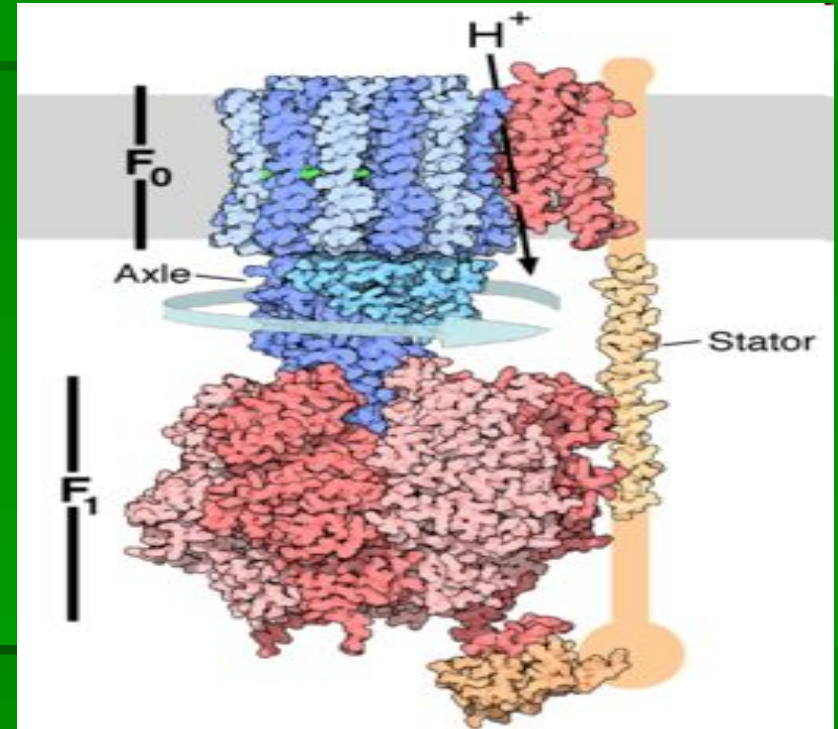


# Структура АТФ

Молекулярная модель АТФ-синтазы



Структура АТФ-синтазы.  
Протонный канал F<sub>0</sub> и вращающаяся часть показаны синим, компонент F<sub>1</sub> — красным, мембрана — серым.

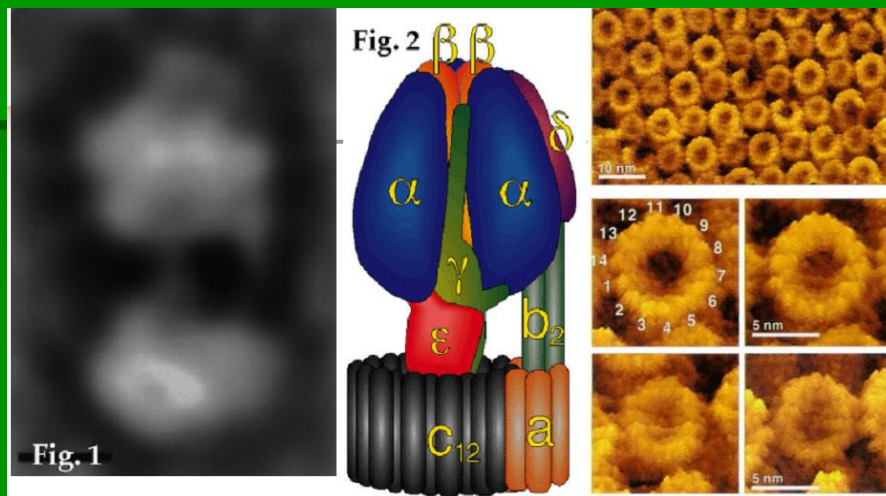
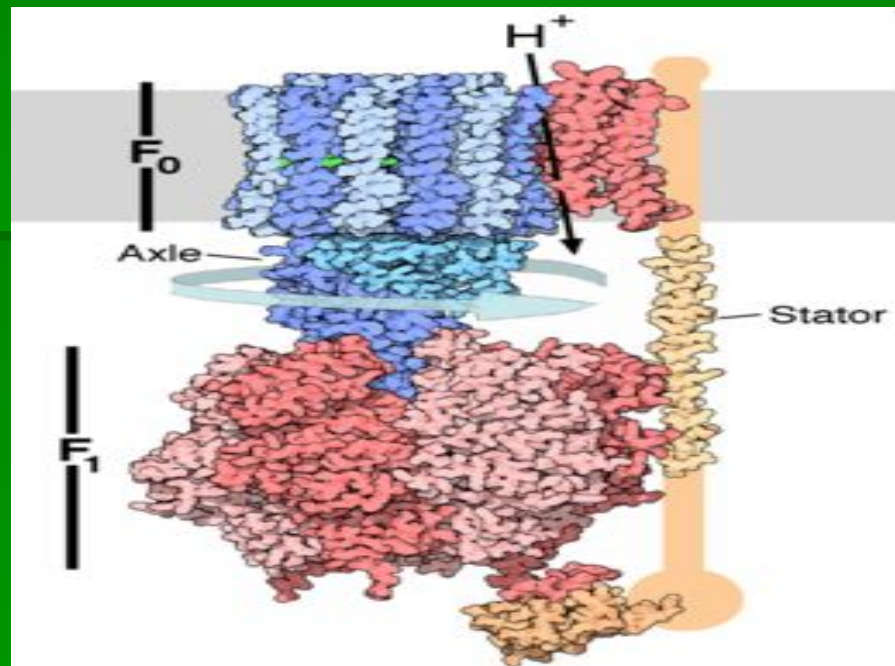


компонент F<sub>0</sub> — трансмембранный домен,  
компонент F<sub>1</sub> находится вне мембраны, в матриксе.

АТФ-синтазный комплекс F<sub>0</sub>F<sub>1</sub> по форме напоминает плодовое тело гриба,  
у которого компонент F<sub>1</sub> — это шляпка, ножка — это  $\gamma$ -субъединица компонента F<sub>1</sub>,  
а «корни» гриба — компонент F<sub>0</sub>, заякоренный в мембране.

# Механизм действия АТФ-синтазы

- Кристалл **F<sub>1</sub>** состоит из перемежающихся **α-** и **β-** субъединиц (по 3 каждого вида), расположенных как дольки апельсина вокруг асимметричной **γ-** субъединицы.
- Градиент электрического поля, направленный поперек внутренней митохондриальной мембраны и обусловленный электронной транспортной цепочкой, заставляет протоны проходить сквозь мембрану через АТФ-синтазный компонент **F<sub>0</sub>**.



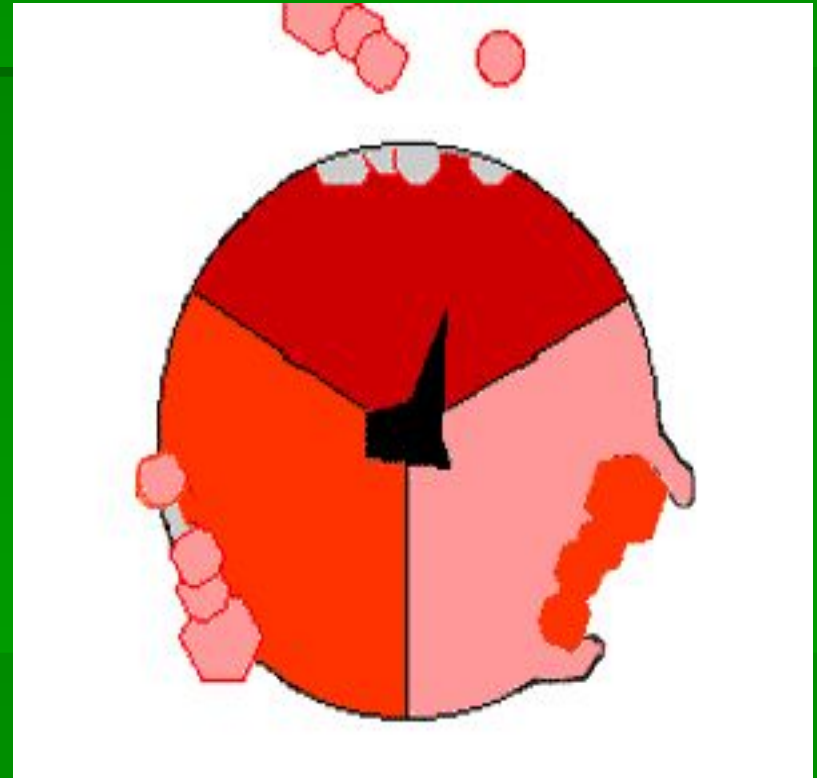
Электронная фотография синтетазы

Фотография атомно-силового микроскопа



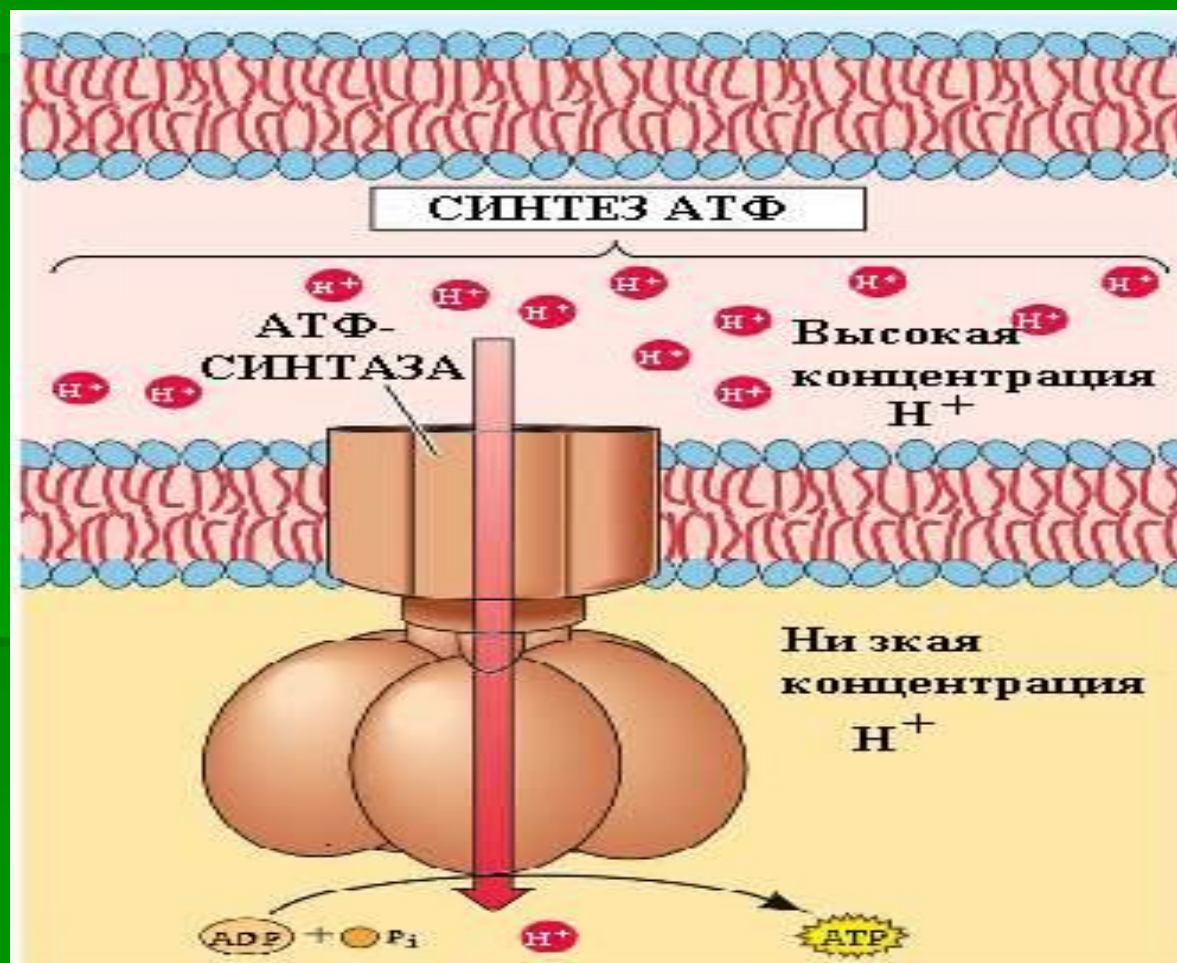
## Механизм действия АТФ-синтазы

- Часть компонента F<sub>0</sub> вращается, когда протоны проходят через мембрану.
- Это **c-кольцо** жестко связано с центральной ножкой, которая в свою очередь вращается внутри участка компонента F<sub>1</sub>.
- Это приводит к тому, что три участка катализа, связывающиеся с нуклеотидами, претерпевают изменения в конфигурации, приводящие к синтезу АТФ.



Механизм действия АТФ-синтазы. **АТФ** показан красным, **АДФ и фосфат** — розовым, вращающаяся субъединица  $\gamma$  — черным.

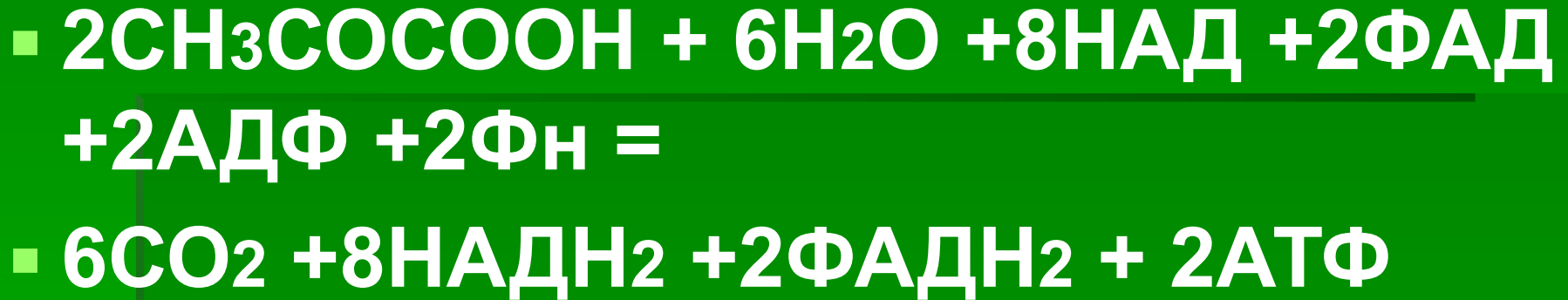
# СХЕМА СИНТЕЗА АТФ ПО ХЕМИОСМОТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ МИТЧЕЛА



# Протонная АТФ-синтаза

- 3 субъединицы способствуют целостности АТФ-синтазы
- $\beta$  субъединица является основной функциональной единицей. Она имеет 3 конформации:
- **L-конформация** - присоединяет АДФ и Фосфат (поступают в митохондрию из цитоплазмы с помощью специальных переносчиков)
- **T-конформация** - к АДФ присоединяется фосфат и образуется АТФ
- **O-конформация** - АТФ отщепляется от  $\beta$ -субъединицы и переходит на  $\alpha$ -субъединицу.
- Для того, чтобы субъединица изменила конформацию **необходим протон водорода**, так как конформация меняется 3 раза необходимо **3 протона водорода**. Протоны перекачиваются из межмембранного пространства митохондрии под действием электрохимического потенциала.
- $\alpha$ -субъединица транспортирует АТФ к мембранному переносчику, который "выбрасывает" АТФ в цитоплазму. Взамен из цитоплазмы этот же переносчик транспортирует АДФ.
- Такие переносчики называются транслоказами.

## Суммарное уравнение ЦТК



Если окисление происходит по ПФЦ, то глюкоза поставляет в цикл Кребса 1 молекулу ПВК.

**ЦТК** → место синтеза белкового, жирового и углеводного обмена (синтез АК, ЖК, углеводов, пигментов)

**ЦТК** → источник НАДН<sub>2</sub> и ФАДН<sub>2</sub> → **ЭТЦ.**

# Значение ЦТК

- Цикл лимонной кислоты является механизмом, обеспечивающим улавливание большей части свободной энергии, освобождаемой в процессе окисления углеводов, липидов и белков.
- В процессе окисления ацетил-СоА благодаря активности ряда специфических дегидрогеназ происходит образование восстановительных эквивалентов в форме водорода или электронов. Последние поступают в дыхательную цепь;
- при функционировании этой цепи происходит окислительное фосфорилирование, то есть синтезируется АТФ.

# Энергетический баланс процесса дыхания

- суммарное уравнение гликолиза:
- **глюкоза + 2АТФ + 2НАД<sup>+</sup> + 2Ф<sub>н</sub> + 4АДФ →**  
**2 пирувата + 4АТФ + 2НАД·Н<sub>2</sub> + 2АДФ.** } 8 АТФ
- В цикле Кребса = 2 АТФ субстратное фосфорилирования + 28 АТФ в ЭТЦ
- **Итого: 38 АТФ**
- суммарное уравнение ПФЦ:
- **3Глюкоза (С<sub>6</sub>) + 6НАДФ<sup>+</sup> + 3Н<sub>2</sub>О =**  
**2 Глюкоза + ФГА + 6НАДФ·Н<sub>2</sub> + 3 СО<sub>2</sub>** } 17 АТФ
- При окислении глюкозы по ПФЦ в ЦТК идет 1ПВК, значит в ЭТЦ обр-ся 14 АТФ (гликолиз)
- В цикле Кребса = 1АТФ + 34АТФ в ЭТЦ + 2 АТФ при гликолизе
- **Итого: 37 АТФ**

## Энергетический баланс процесса дыхания

- Окисление одной молекулы пировиноградной кислоты сопровождается образованием 3СО<sub>2</sub> 15 молекул АТФ.
- Однако при распаде молекулы глюкозы образовались две молекулы пировиноградной кислоты.
- Следовательно, всего в аэробной фазе дыхания образуется 6 молекул СО<sub>2</sub> и 30 молекул АТФ плюс 8АТФ в анаэробной фазе (гликолиз).
- Итого 6 молекул СО<sub>2</sub> и 38 молекул АТФ образуется в процессе окислительно-дыхательного распада молекулы гексозы.

■



# Выделение энергии:

2600 кДж - на 2 моля

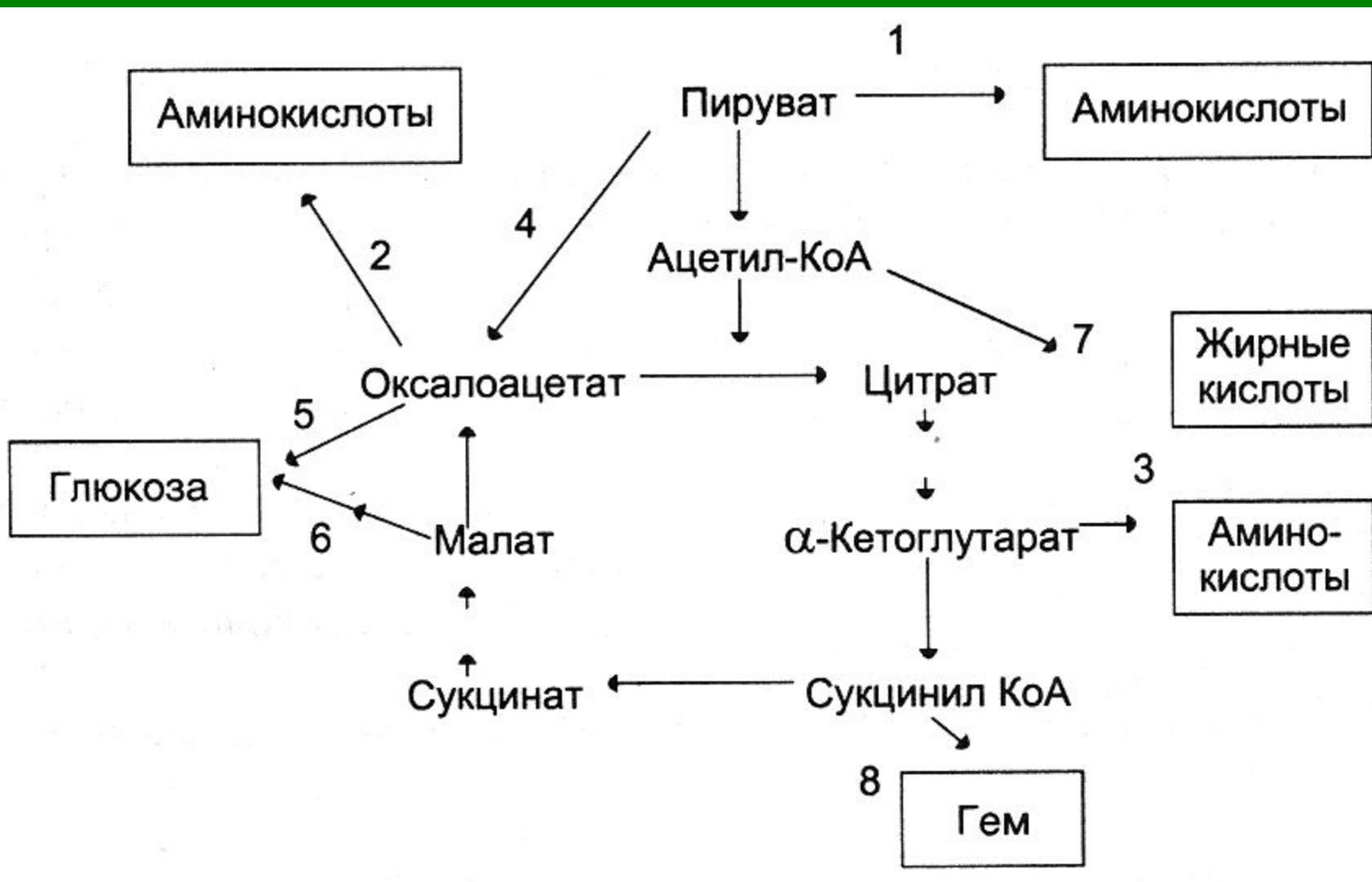


45%

Рассеивается  
в виде тепла

55%

Сберегается  
в виде АТФ



**Использование метаболитов ЦТК в синтезе различных соединений:  
 1 – 3 – синтез заменимых аминокислот; 4 – 6 синтез глюкозы; 7 – синтез жирных кислот; 8 – синтез гема**

- Влияние различных факторов на процесс дыхания –  
САМОСТОЯТЕЛЬНО!