

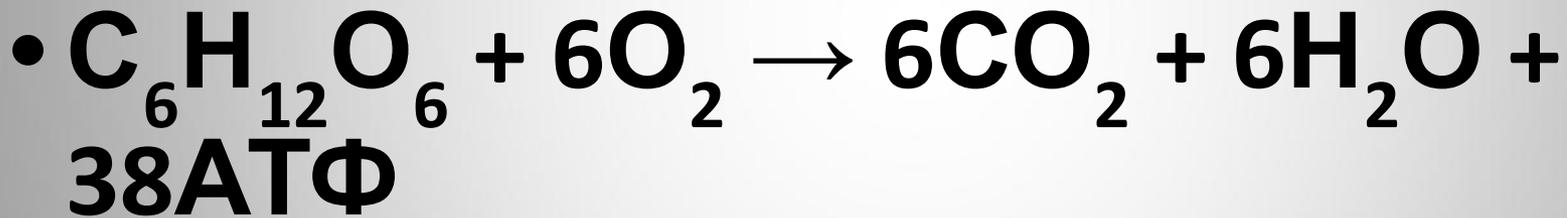
Тема лекции:

**Цикл трикарбоновых кислот  
(Ц.Кребса). Подсчёт  
суммарного энергетического  
эффекта аэробного  
окисления глюкозы**

**Лектор: доцент Васильева С.В.**

- **В аэробных условиях глюкоза в реакциях гликолиза окисляется не до молочной, а до пировиноградной кислоты.**
- **Что значит «в аэробных условиях»?  
Это значит, что процесс окисления глюкозы требует:**
  - **присутствия кислорода**
  - **присутствия ферментов биологического окисления**

# Суммарное уравнение аэробного окисления ГЛЮКОЗЫ:



- **Часть этого процесса нам уже известна – это гликолиз.**
- **Но в гликолизе вырабатывается 2 молекулы ПВК и только 2 АТФ.**
- **Вероятно, есть какой-то процесс, где ПВК вступает в реакции и в этих реакциях образуется 18 АТФ.**



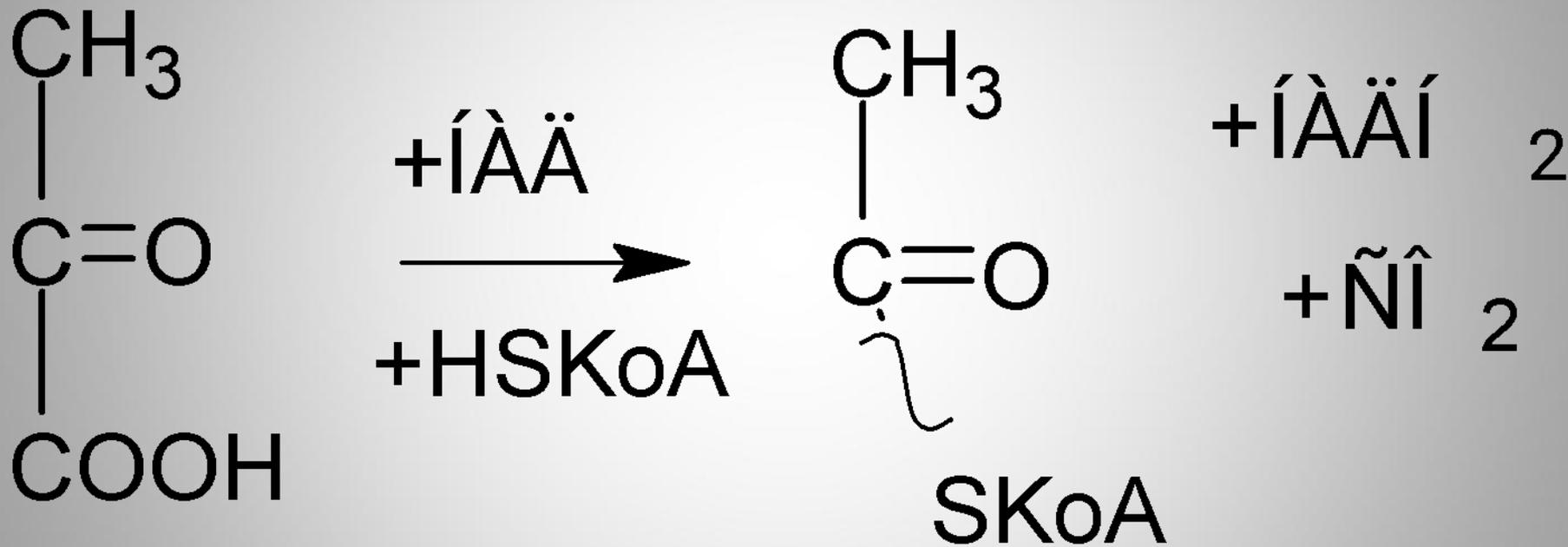
**Ганс Адольф  
Кребс (1900 – 1981)  
Открыл и описал  
цикл лимонной  
кислоты в 1937  
году.  
В 1953 году за это  
открытие получил  
Нобелевскую  
премию.**

- **Вспомним, что важнейший процесс образования АТФ в клетке – это окислительное фосфорилирование.**
- **Полная цепь биологического окисления идёт с образованием 3 АТФ (начинается с НАД)**
- **Укороченная цепь биологического окисления идёт с образованием 2 АТФ (начинается с ФАД)**

# Вернёмся к гликолизу

- Итак, мы остановились на образовании пирувиноградной кислоты.
- Молекула ПВК в присутствии ферментов аэробного окисления подвергается воздействию ***пируват-дегидрогеназного комплекса***. В этот комплекс входят три фермента и пять коферментов (НАД, ФАД, витамин В<sub>1</sub>, амид

**В результате окислительного  
декарбоксилирования образуется  
молекула ацетил-коэнзим А**



ацетат

ацетил-коэнзим А

- В этой реакции помимо образования молекулы ацетил-КоА мы видим перенос водорода на НАДН<sub>2</sub>
- Эта восстановленная форма НАДН<sub>2</sub> далее передаёт водород на полную цепь биологического окисления.
- Также заметим, что выделяется молекула СО<sub>2</sub>

- **Заметим также, что в молекуле ацетил-КоА содержится тиоэфирная связь, которая является макроэргической.**
- **Энергия этой связи будет использована в следующей реакции.**

- **Рассмотренная реакция является «мостиком» между гликолизом и циклом Кребса.**

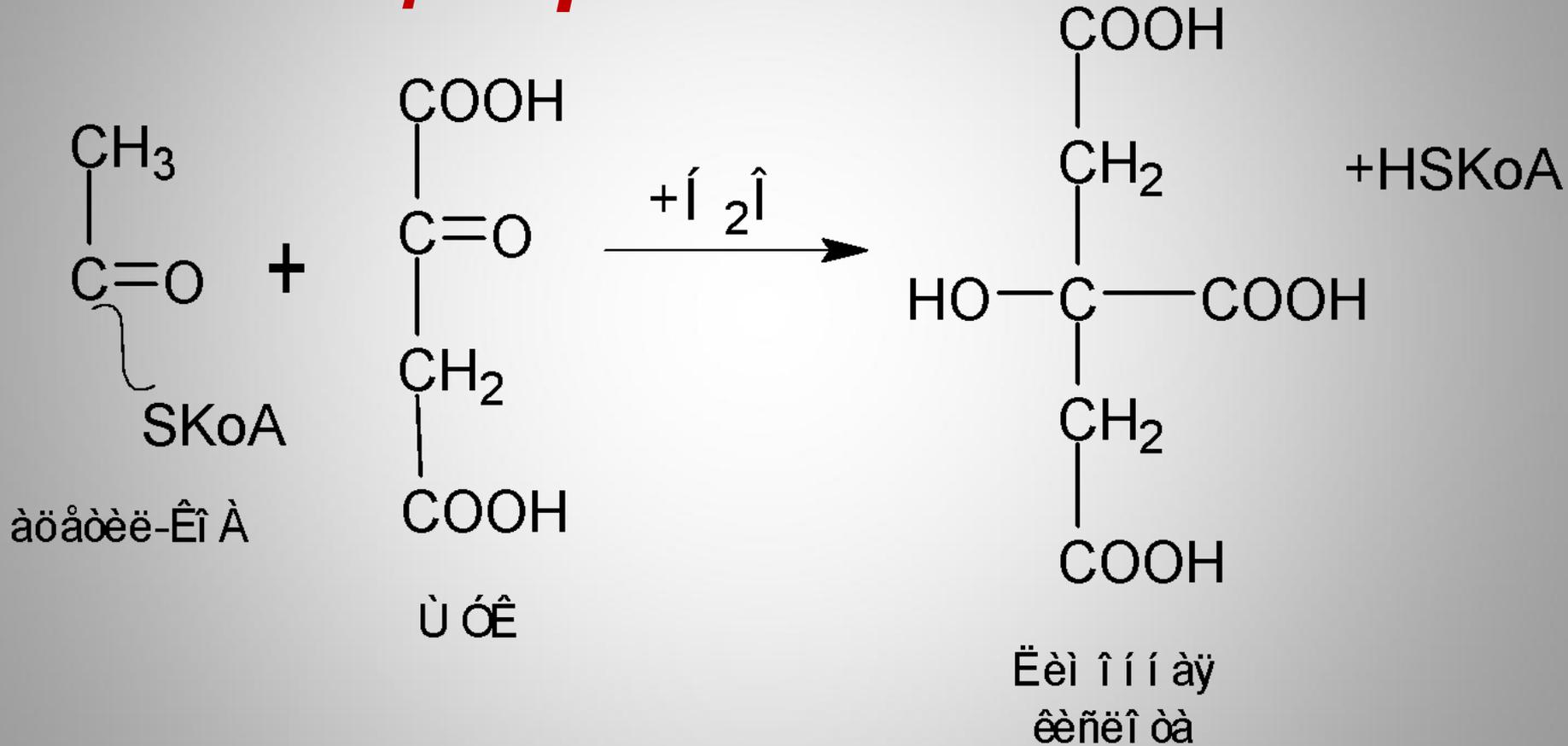
**Цикл Кребса**

**Цикл трикарбоновых  
кислот**

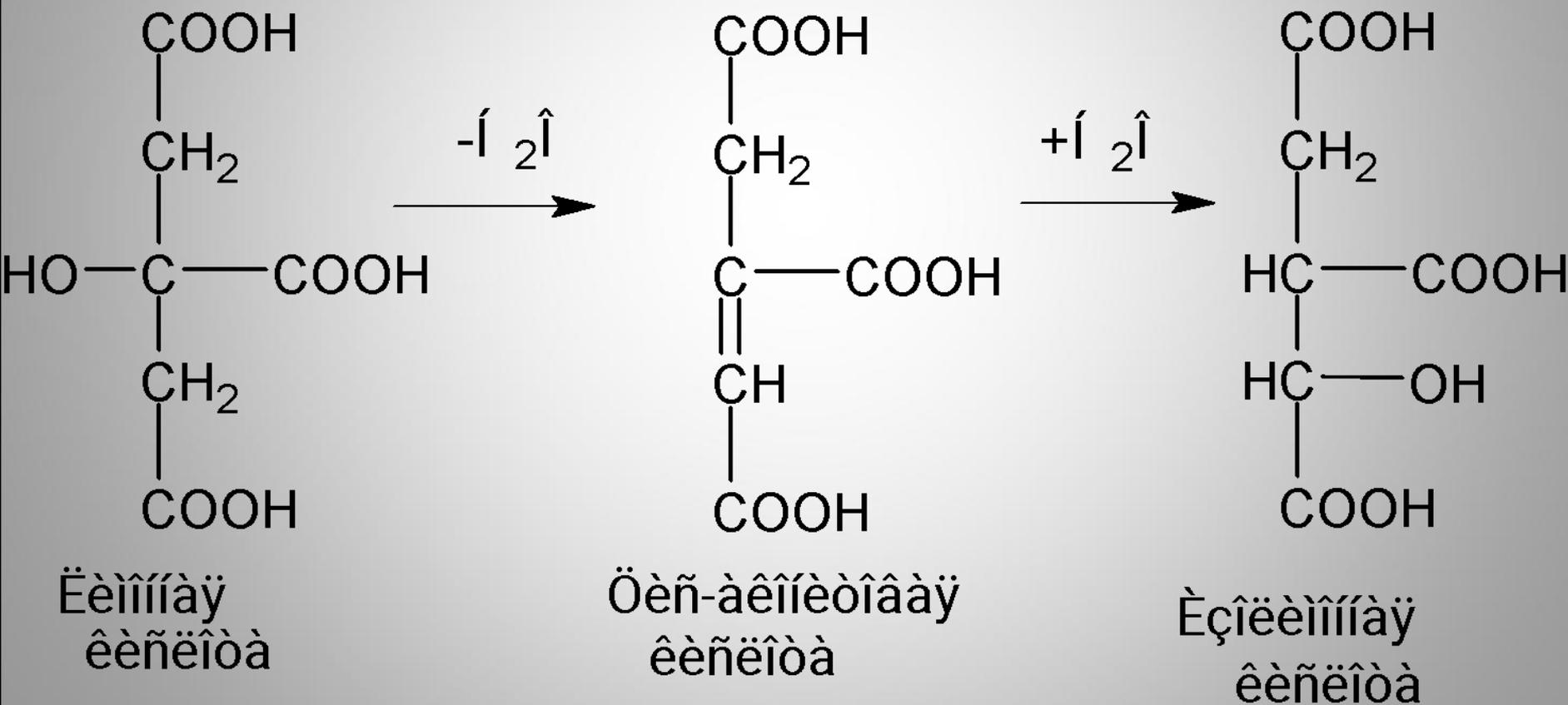
**Цикл лимонной кислоты  
цитратный цикл**

# Первая реакция идёт с участием фермента

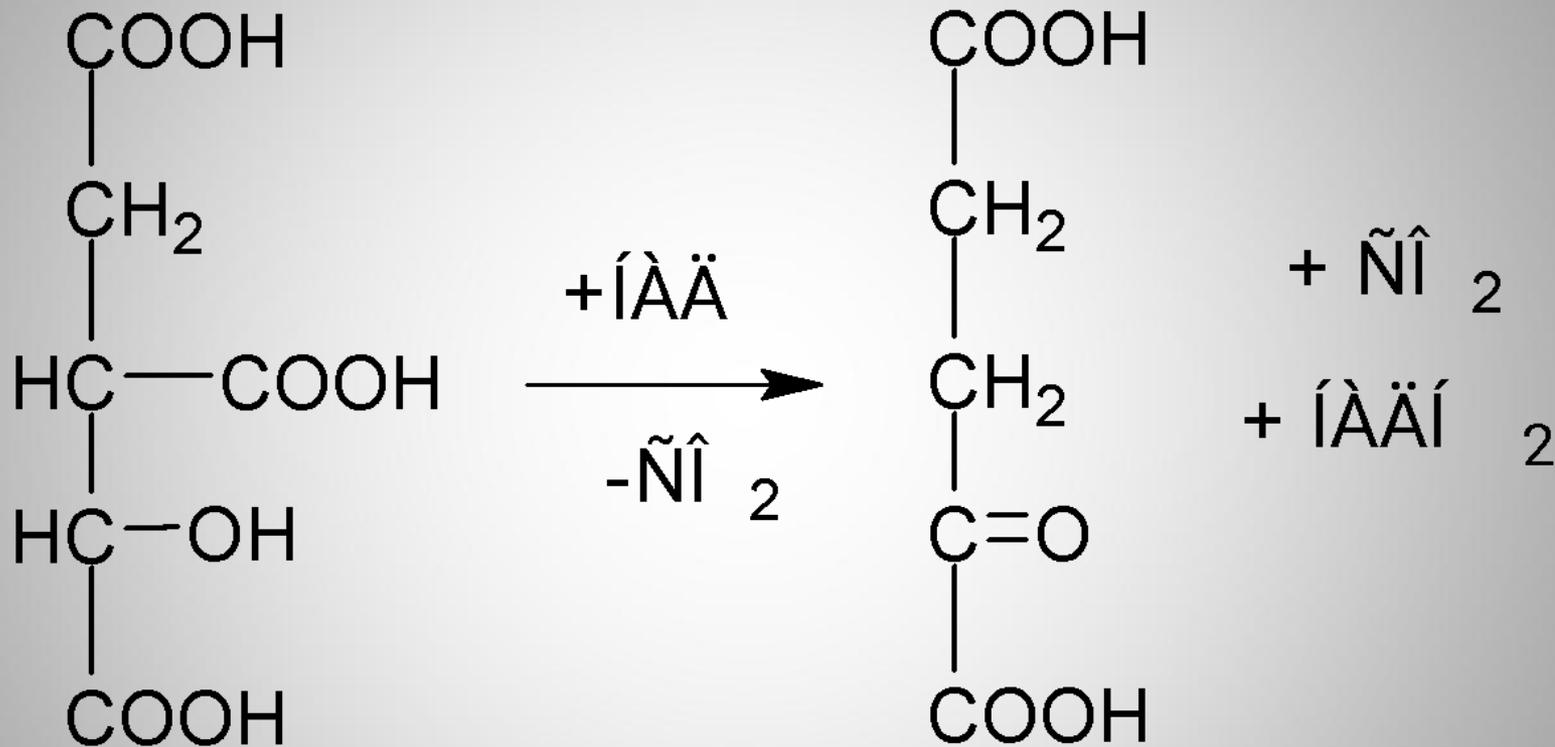
## *цитратсинтазы*



Во второй реакции с участием фермента **аконитазы** лимонная кислота превращается в свой изомер – **изолимонную**.



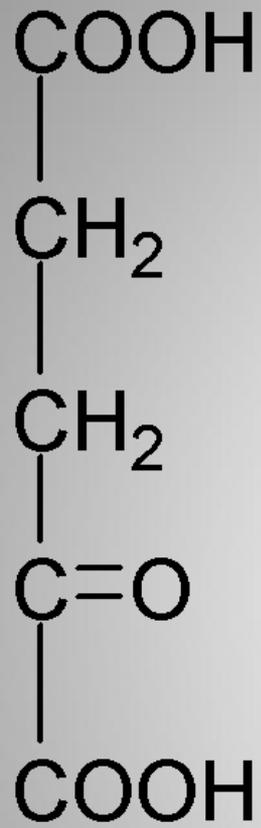
**Изоцитратдегидрогеназа** катализирует третью реакцию. Здесь мы видим перенос водорода на НАД и выделение  $\text{CO}_2$



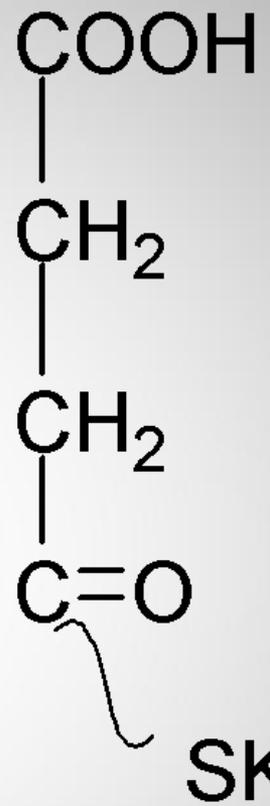
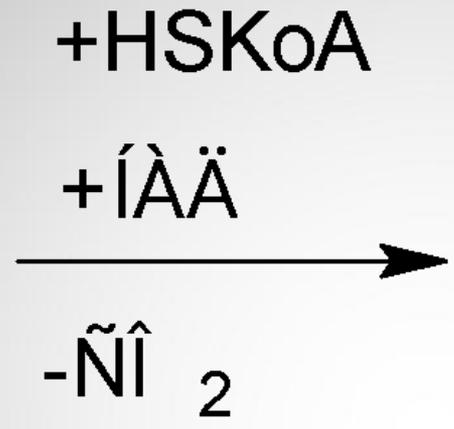
Изоцитрат  
 3-оксоисоцитрат

$\alpha$ -кетоглутарат  
 3-оксоисоцитрат

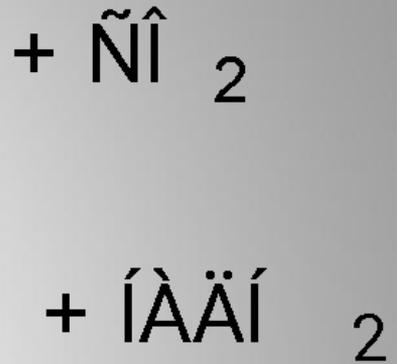
- Четвёртая реакция идёт при участии ***альфа-кетоглутарат-дегидрогеназного комплекса*** (аналог пируват-дегидрогеназного)
- В реакции участвуют те же пять коферментов
- Здесь также переносится водород на НАД, образуется тиоэфирная связь в составе сукцинил-КоА и выделяется  $\text{CO}_2$



α-ketoglutarate  
 enolate



α-ketoglutarate-SKoA



- В пятой реакции будет использована макроэргическая тиоэфирная связь.
- Её разрыв сопровождается выделением энергии, которая будет использована на образование ГТФ из ГДФ и неорганического фосфата (путём субстратного фосфорилирования)
- Фермент – ***тиокиназа***

COOH

CH<sub>2</sub>

CH<sub>2</sub>

C=O

SKoA

+ Í 3ĐÎ 4

+ ÃÄÔ



COOH

CH<sub>2</sub>

CH<sub>2</sub>

COOH

+ HSKoA

+ ÃTÔ

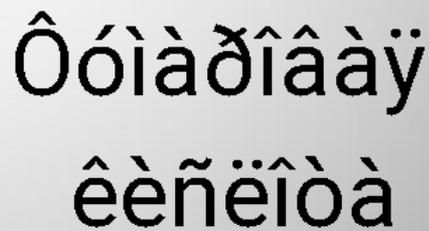
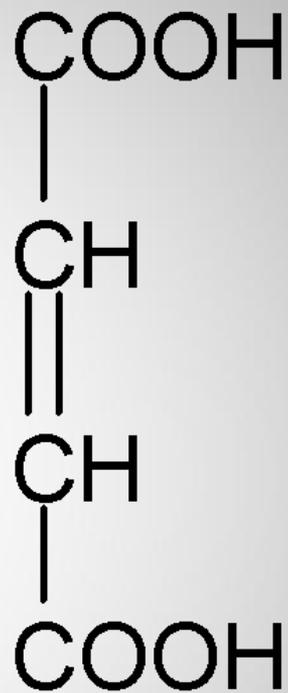
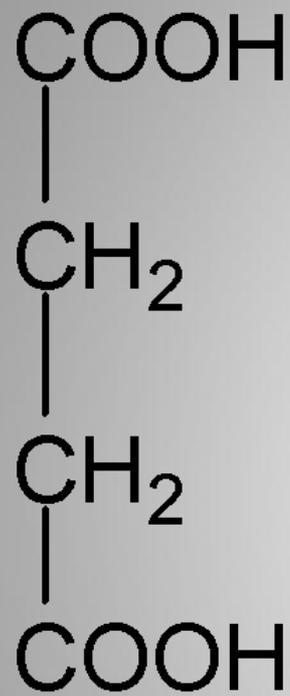
Ñóëöèíèè -ÊîÀ

Βίòàđíàÿ

êèñëîà

- Молекула ГТФ эквивалентна АТФ
- ГТФ легко превращается в АТФ под влиянием фермента *нуклеозиддифосфаткиназы*

- Янтарная кислота окисляется в фумаровую кислоту в сукцинат-дегидрогеназной реакции
- *Сукцинат-дегидрогеназа* – железо-серосодержащий фермент, коферментом которого является ФАД.

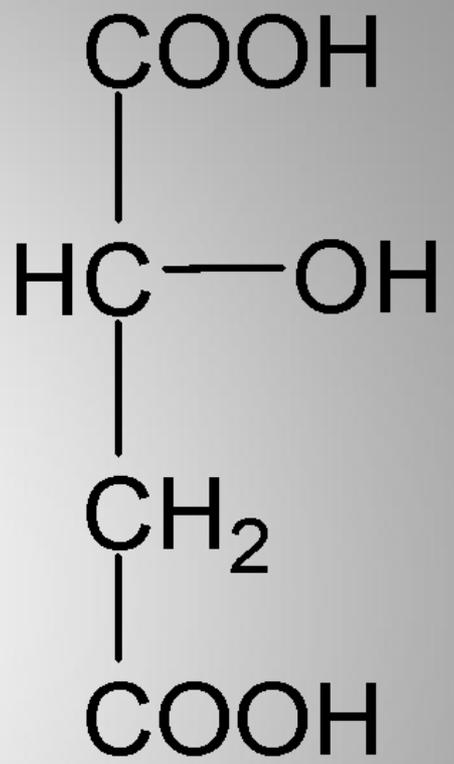
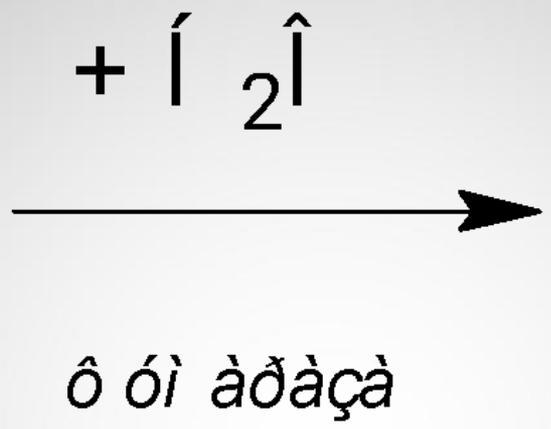


β-oxidation  
 cycle

α-ketoglutarate  
 cycle

- **ФАДН<sub>2</sub> передаёт водород на укороченную цепь биологического окисления**

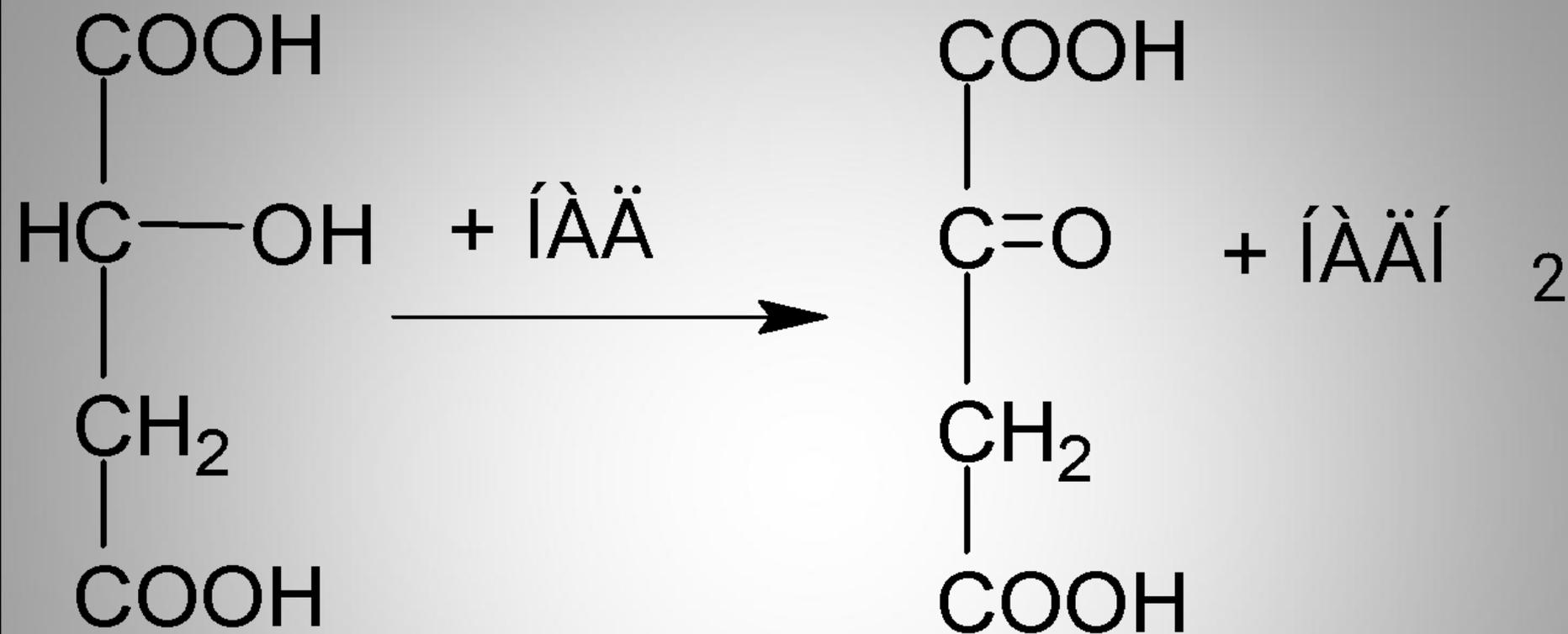
- Следующая реакция идёт с участием фермента **фумаразы**.  
К фумаровой кислоте присоединяется вода
- В результате образуется яблочная кислота



Ôóìàđíâàÿ  
 êèñëîà

Βάει÷íàÿ  
 êèñëîà

- В последней реакции цикла Кребса яблочная кислота окисляется до щавелевоуксусной
- При этом водород переносится на НАД
- Фермент - *малатдегидрогеназа*



β-кетоглютарат  
 2 молекулы

α-кетоглютарат

- **Итак, цикл замкнулся.**  
**Вспомним, что в первой реакции цикла взаимодействовали молекулы ацетил-КоА и ЩУК**
- **Ацетил-КоА образовался из ПВК (из глюкозы), а молекула ЩУК образовалась в предыдущем витке цикла Кребса**

- **Полученная в нашем цикле молекула ЦУК будет конденсировать с новой молекулой ацетил-КоА.**
- **И так будет повторяться снова и снова.**

# Подведём итог. Сколько молекул АТФ образуется в цикле Кребса?

1. Изоцитрат  $\rightarrow$   $\alpha$ -кетоглутарат (3 АТФ)
2.  $\alpha$ -кетоглутарат  $\rightarrow$  сукцинил-КоА (3АТФ)
3. Сукцинил-КоА  $\rightarrow$  янтарная кислота (1 АТФ)
4. Янтарная к-та  $\rightarrow$  фумаровая к-та (2 АТФ)
5. Яблочная к-та  $\rightarrow$  ЩУК (3 АТФ)

**ИТОГО: 12 АТФ**



ацетил-КоА

НАД Н  
НАД<sup>+</sup>

ЦУК

лимонная  
кислота

яблоч-  
ная  
кислота

изо-  
лимонная  
кислота

Цикл  
Кребса

H<sub>2</sub>O

фумаро-  
вая  
кислота

НАД<sup>+</sup>  
НАД Н  
CO<sub>2</sub>

α-кето-  
глута-  
ровая  
кислота

КоА

ФАД Н<sub>2</sub>  
ФАД

янтарная  
кислота

сукци-  
нил-  
КоА

НАД  
НАД Н  
CO<sub>2</sub>

ГТФ  
ГДФ  
АДФ  
АТФ

# Энергетический эффект аэробного окисления глюкозы

- Цикл Кребса –  $12 \text{ АТФ} * 2 = 24 \text{ АТФ}$
- Гликолиз –  $2 \text{ АТФ}$
- ПВК  $\square$  ацетил-КоА –  $3 \text{ АТФ} * 2 = 6 \text{ АТФ}$
- $\text{НАДН}_2$  из гликолиза –  $3 \text{ АТФ} * 2 = 6 \text{ АТФ}$

**ИТОГО: 38 АТФ**

**Спасибо за внимание!**