

# Законы биоэнергетики



# **Владимир Петрович Скулачев**

Академик РАН, директор Научно-исследовательского института физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского и декан факультета биоинженерии и биоинформатики МГУ им. М.В. Ломоносова.

В.П.Скулачев - выдающийся российский биохимик с мировым именем, лауреат Государственной премии и ряда других российских и международных премий, один из основателей Европейской Академии.

Его основные работы посвящены целому ряду фундаментальных проблем биохимии, в первую очередь, биоэнергетики - разделу биохимии, который изучает процессы получения и трансформации энергии в живых системах.

# 1-й закон

Живая клетка избегает прямого использования энергии внешних ресурсов для совершения полезной работы. Она сначала превращает их в одну из трех конвертируемых форм энергии («энергетических валют»), а именно: в АТФ, протонный или натриевый потенциал, которые затем расходуются для осуществления различных энергоемких процессов.

## 2-й закон

Любая живая клетка всегда располагает как минимум **двумя** "энергетическими валютами": водорастворимой (АТФ) и связанной с мембраной ( $\Delta\bar{\mu}_{\text{H}^+}$  и  $\Delta\bar{\mu}_{\text{Na}^+}$ ).

## 3-й закон

«Энергетические валюты» клетки могут превращаться одна в другую. Поэтому получения хотя бы одной из них за счет внешних ресурсов достаточно для поддержания жизнедеятельности.

**Таким образом,**

**Биологические виды энергии зависят от места локализации.**

Энергетические превращения в живой клетке подразделяют на две группы: локализованные в мембранах и протекающие в цитоплазме. В каждом случае для «оплаты» энергетических затрат используется своя «валюта»: в мембране это  $\Delta\mu\text{H}^+$  или  $\Delta\mu\text{Na}^+$ , а в цитоплазме – макроэнергетические соединения.

# **Макроэргические соединения**

**Макроэргические соединения** (macroergic compounds) [греч. makros — большой и ergon — работа, действие] — органические соединения, содержащие богатые энергией (макроэргические) связи.

Макроэргические соединения присутствуют во всех живых клетках и участвуют в накоплении и превращении энергии; они образуются в результате фотосинтеза, хемосинтеза и биологического окисления.

**Макроэргические связи** - это **ковалентные** связи, которые гидролизуются с выделением значительного количества энергии: 30 кДж/моль и более (свободная энергия гидролиза).

Термин «макроэргическая связь» используется исключительно для связей, энергия которых используется в метаболизме и не указывает на истинную величину энергии связей.

Энергия связи всегда положительна, т.е. требуется энергия для разрыва связи.

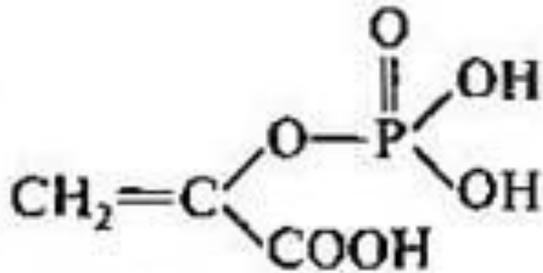
Свободная энергия, высвобождающаяся при гидролизе высокоэргичных соединений обязана своим происхождением не разрыву связи, а тому что *продукты гидролиза содержат меньше свободной энергии, чем исходные вещества.*

# Виды макроэргических связей

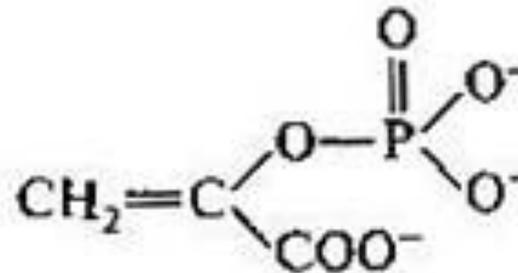
## Енолфосфатная связь

$$\Delta G^{0'} = -61.9 \text{ кДЖ/моль}$$

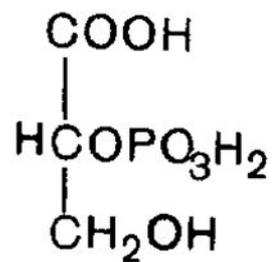
Представители: фосфоенолпируват



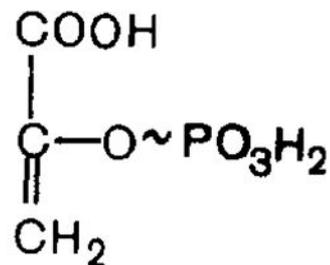
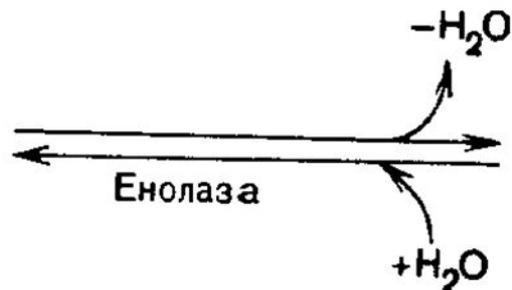
фосфоенолпировиноградная кислота



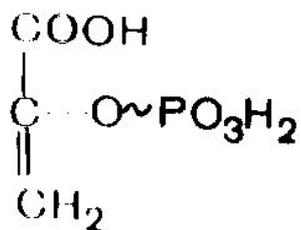
фосфоенолпируват



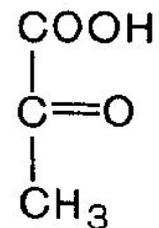
2-Фосфоглицерат



Фосфоенолпируват



Фосфоенолпируват



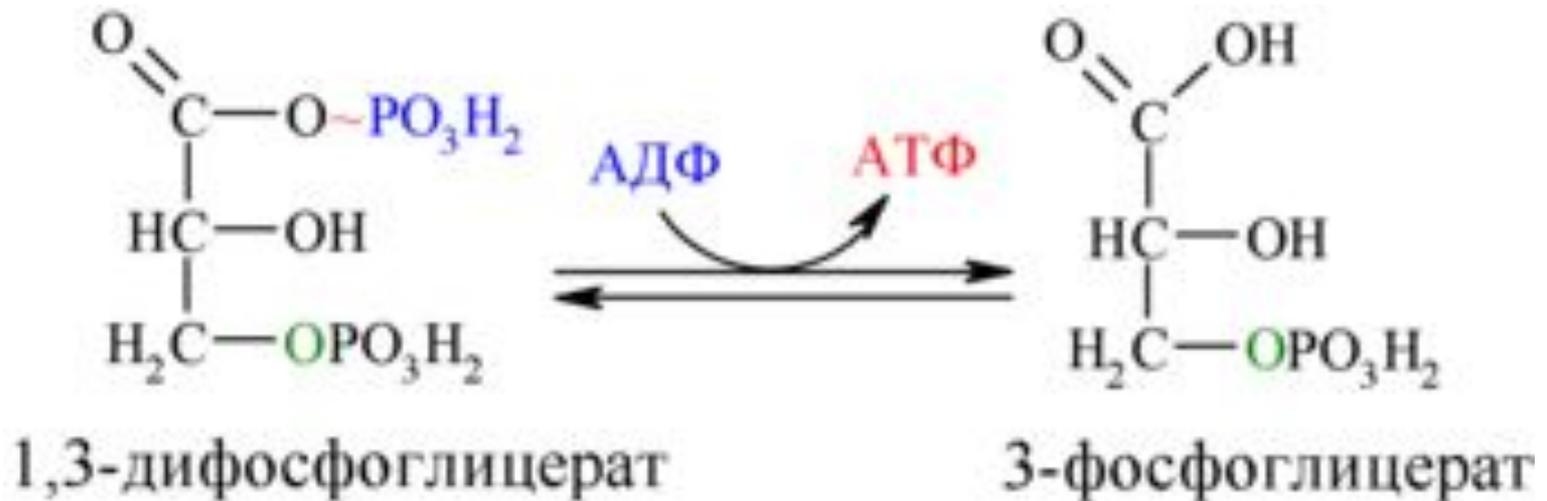
Пируват

+АТФ

# Ацилфосфатная связь

$$\Delta G^{0'} = -46 \text{ кДЖ/моль.}$$

Представители: 1,3-дифосфоглицерат





1. креатинфосфат + АДФ



2. креатин + АТФ



3. АТФ + Н<sub>2</sub>О



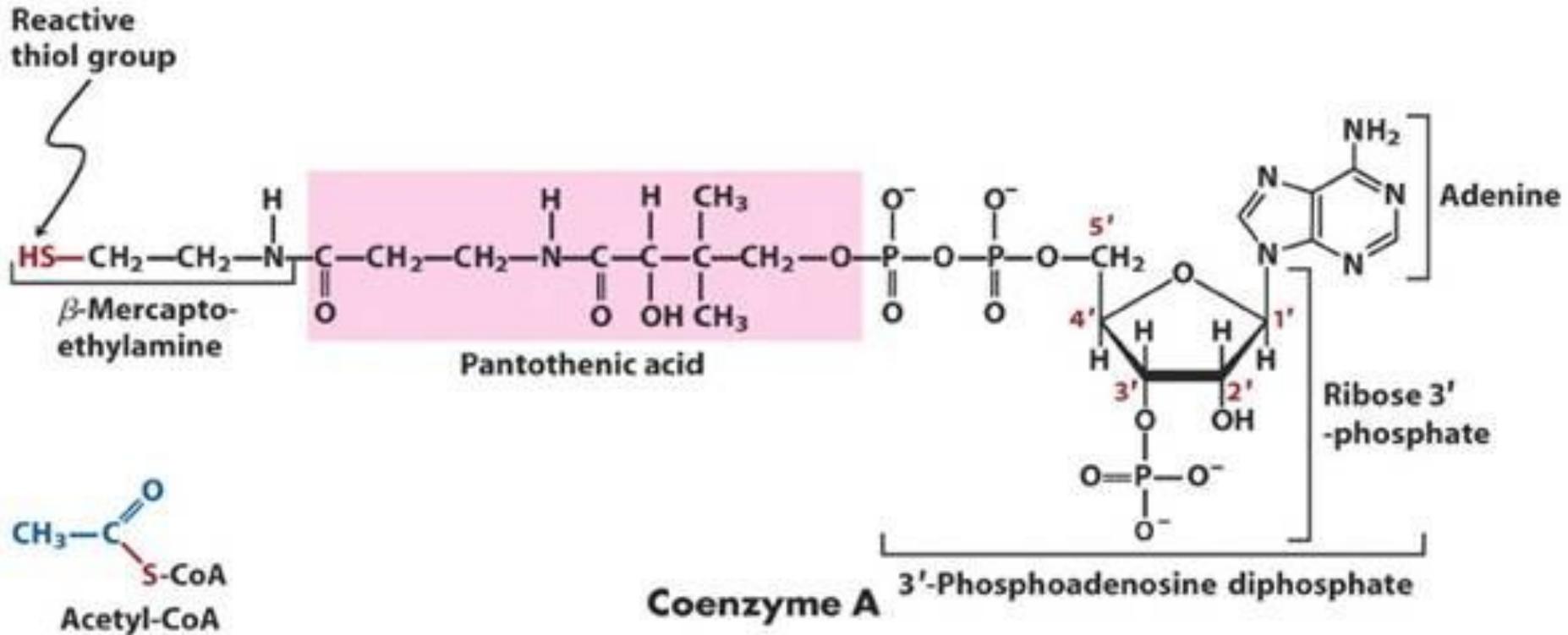
4. Э + Н<sub>3</sub>РО<sub>4</sub> + АДФ

Алактатные реакции.

# Тиоэфирная связь

$$\Delta G^{0'} = -34 \text{ кДЖ/моль.}$$

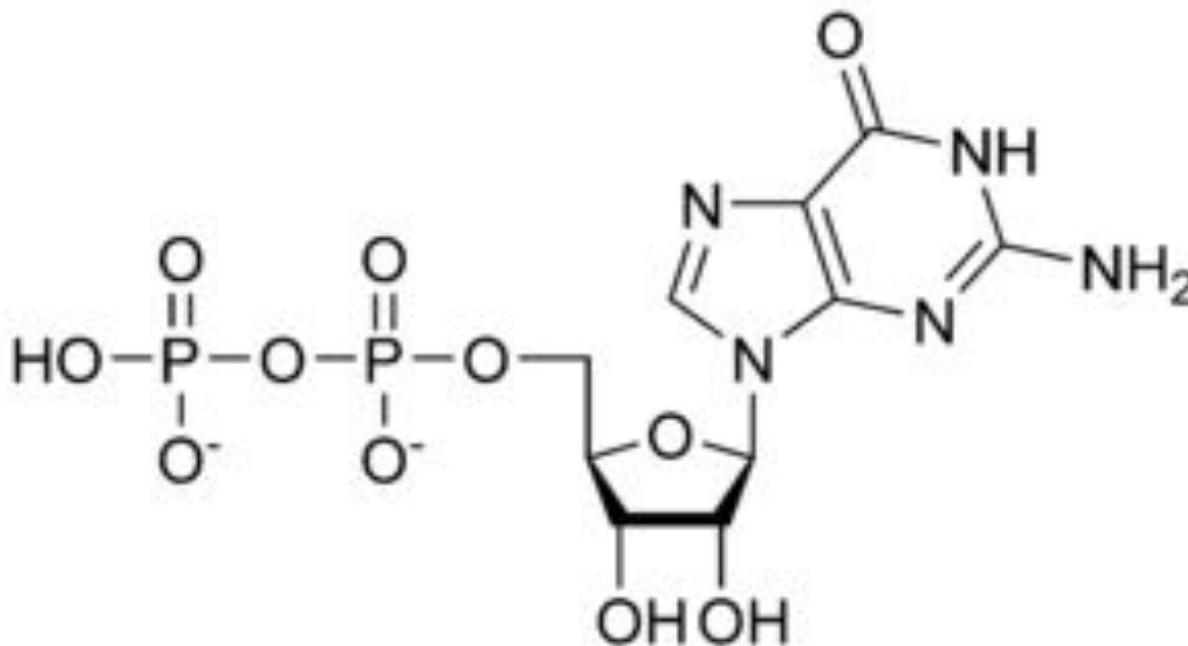
Представители: ацетил-КоА, сукцинил-КоА.



# Фосфоангидридная связь

$$\Delta G^{0'} = - 32 \text{ кДж/моль}$$

Представители: все нуклеозидтрифосфаты и нуклеозиддифосфаты (АТФ, ГДФ и их аналоги)



Макроэргическое соединение	$\Delta G^{0'}$ кДж/моль
Фосфоенолпируват	<b>-61.9</b>
Ацетилфосфат	<b>-43.1</b>
Креатинфосфат	<b>- 43</b>
Пирофосфат	<b>- 33.5</b>
АТФ	<b>- 30.5</b>
Глюкозо-1-фосфат	<b>-20.9</b>
Глюкозо-6-фосфат	<b>- 13.8</b>
Глицеро-1-фосфат	<b>-9.2</b>

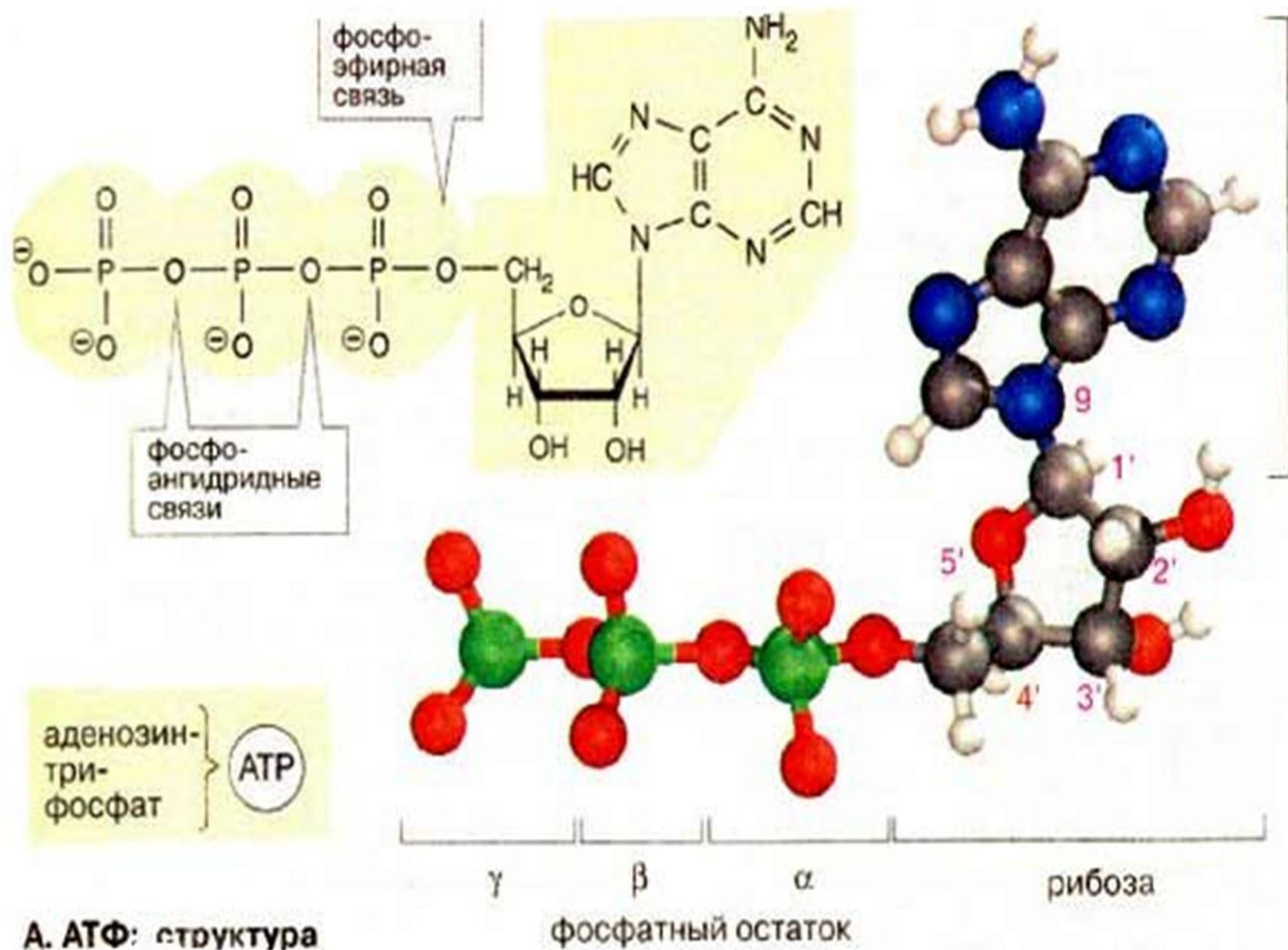
# **Аденозинтрифосфорная кислота**

АТФ был открыт в 1929 году Карлом Ломанном.

В 1940-41 гг. немецким биохимиком Фрицем Липманом была создана концепция АТФ-азного цикла: в процессе фото- или хемосинтеза энергия депонируется в форме АТФ.

## **АТФ в клетке расходуется на:**

электрическую работу  
химическую работу  
тепловую работу  
механическую  
световую работу.



А. АТФ: структура

В клетках организмов животных есть три основных источника ~P для синтеза АТФ.

1) окислительное фосфорилирование – механизм образования АТФ, использующий для этого энергию градиента электрохимического потенциала, возникающего на внутренней мембране митохондрий.

2) субстратное фосфорилирование – механизм синтеза АТФ, использующий энергию макроэргических соединений, образующихся в процессе метаболизма (1,3- дифосфоглицериновая кислота, сукцинил-КоА и т.д.).

3) синтез АТФ с использованием макроэргов, выполняющих своеобразную роль молекул – депо макроэргических связей (креатинфосфат).

Сумму всех адениловых нуклеотидов в клетке (АТФ, АДФ и АМФ) называют **адениловой системой**.

Процессы гидролиза и синтеза АТФ происходят с высокой скоростью, поскольку общий фонд АТФ очень мал и для поддержания процессов жизнедеятельности в клетке его хватает только на несколько секунд.

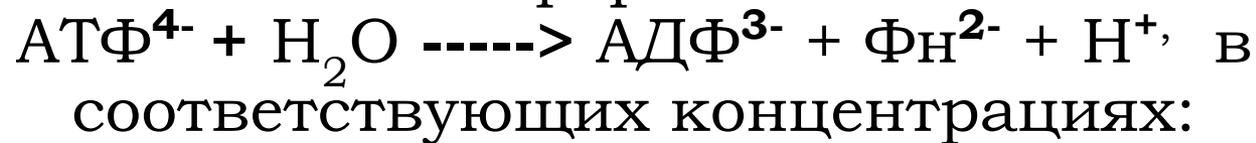
Таблица 14-4. Концентрация адениновых нуклеотидов, неорганического фосфата и креатинфосфата (КФ) в некоторых клетках, мМ<sup>1)</sup>

	АТФ	АДФ	АМФ	P <sub>i</sub>	КФ
Печень крысы	3,38	1,32	0,29	4,8	0
Мышцы крысы	8,05	0,93	0,04	8,05	28
Эритроциты человека	2,25	0,25	0,02	1,65	0
Мозг крысы	2,59	0,73	0,06	2,72	4,7
<i>E. coli</i>	7,90	1,04	0,82	7,9	0

Причины макроэргичности АТФ:

## 1 причина.

АТФ присутствует в клетках в диссоциированной форме:



$$10^{-3} \cdot (\text{АТФ}^{4-}); 10^{-3} \cdot (\text{АДФ}^{3-}); 10^{-3} \cdot (\text{Фн}^{2-}); 10^{-7} \cdot (\text{Н}^+).$$

Т. о. всякая работа в клетке сопровождается образованием  $\text{Н}^+$ , которые захватываются буферами.

**1 причина** макроэргичности: т. к. концентрация АТФ, АДФ и Фн одинакова (по  $10^{-3}$  моль), а концентрация  $\text{Н}^+ = 10^{-7}$  моль, согласно закону соотношения действующих масс равновесие сдвинуто вправо.

## **2 причина:**

в структуре АТФ имеется 3 фосфата и 2 ангидридные связи, за счет этого на хвосте молекулы АТФ создается конформационная напряженность, возникает сила электростатического отталкивания и АТФ отдает молекулу фосфата. И при этом она переходит в более выгодное состояние АДФ + Фн, которое более устойчиво.

### 3-я причина.

В клетках АТФ присутствует в виде магниевой соли. Существует точка зрения, что уровень  $Mg^{2+}$  отражает уровень АТФ.

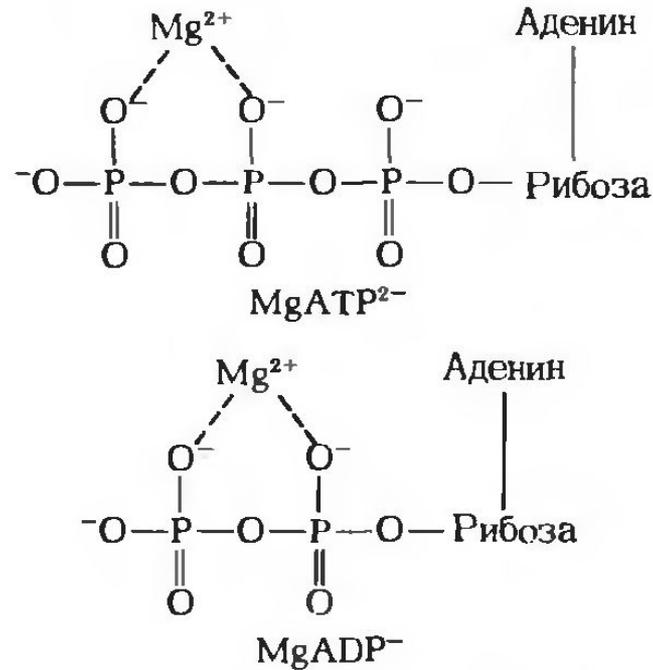


Рис. 14-4. Комплексы АТФ и АДФ с ионами  $Mg^{2+}$ .