

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ОБМЕН

*ЛЕКЦИЯ*

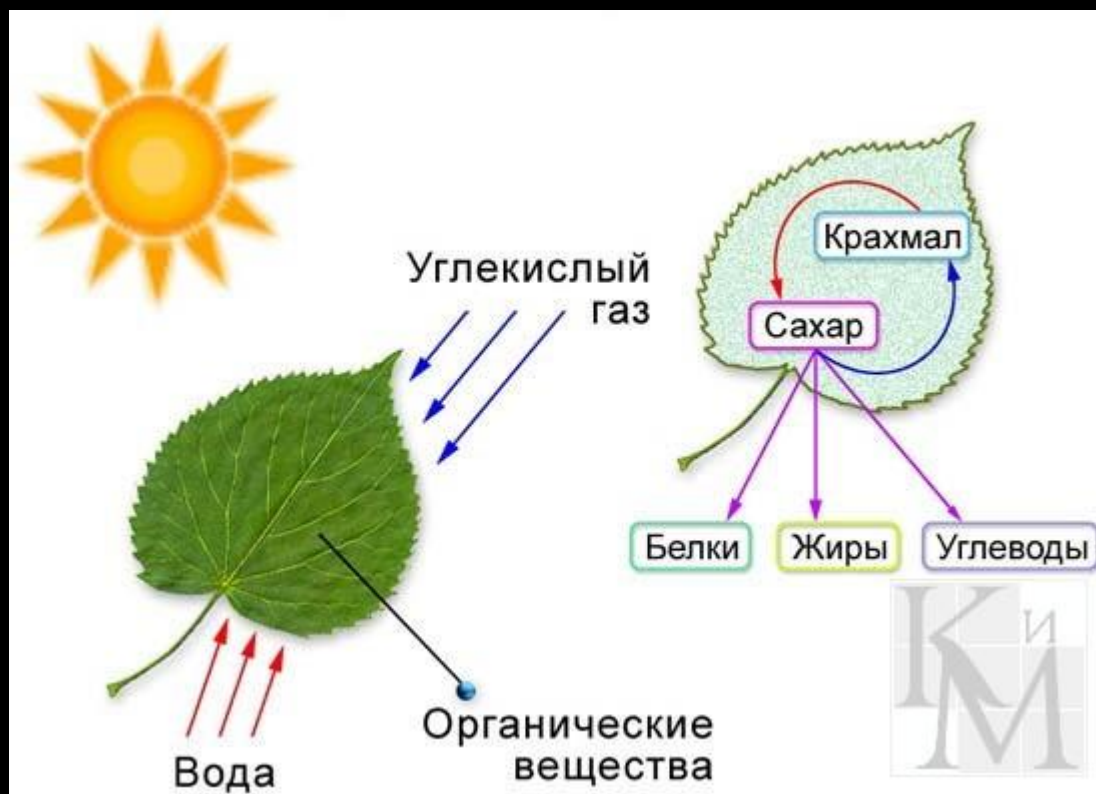
- **1. Превращение энергии в живых клетках;**
- **2. Структура АТФ и её роль в энергетическом обмене;**

# 1. Превращение энергии в живых клетках

- Функционирование живых организмов основано на биохимических реакциях;
- Они протекают как в цитоплазме клеток, так и в межклеточных жидкостях;
- Эти реакции требуют обеспечения энергией;
- Первичный источник энергии на нашей планете – излучение Солнца;
- ***Все живые организмы в зависимости от формы извлечения, преобразования и использования энергии окружающей среды делятся на 2 группы:***
  - - **ФОТОТРОФЫ;**
  - - **ХЕМОТРОФЫ.**

# 1. Превращение энергии в живых клетках

- Фототрофы – это растения и многоклеточные водоросли;
- Они преобразуют солнечный свет в реакциях фотосинтеза, используя углекислый газ и воду;
- Хемотрофы - запасают эту энергию в форме химической энергии в химических связях различных веществ;



# ФОТОСИНТЕЗ

- Суммарное уравнение фотосинтеза:
- $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$
- Затем образовавшаяся глюкоза превращается в крахмал и целлюлозу.
- Зеленые растения и водоросли (мирового океана) ежегодно поглощают из атмосферы около 200 млрд тонн  $\text{CO}_2$ . При этом освобождается в атмосферу около 130 млрд тонн  $\text{O}_2$
- И синтезируется 50 млрд тонн органических соединений углерода, в основном – углеводов.

# 1. Превращение энергии в живых клетках

- Поскольку на Земле преобладают аэробные условия, то большую часть энергии живые организмы получают за счет окислительно-восстановительных процессов – за счет окисления органических веществ атмосферным кислородом (хемотробы);

# 1. Превращение энергии в живых клетках

- Совокупность ферментативных химических реакций в организме, которые обеспечивают его веществами и энергией, необходимыми для жизнедеятельности называется **МЕТАБОЛИЗМОМ** или **обменом веществ**;
- Способность к обмену веществ – главное отличие живых организмов от неживых тел;
- С прекращением обмена веществ – прекращается и жизнь;



# 1. Превращение энергии в живых клетках

- В Метаболизме принято выделять два противоположных процесса: катаболизм и анаболизм.
- Катаболизм – это процесс распада веществ с выделением энергии;

# КАТАБОЛИЗМ

- Катаболизм включает 3 основных этапа:
- На **1 этапе** крупные пищевые молекулы расщепляются на составляющие их *строительные блоки*: аминокислоты, моносахариды, жирные кислоты и др.;
- На **2 этапе** продукты, образовавшиеся на 1 стадии, превращаются в более простые молекулы, число которых невелико - *ацетил-КоА* и др.;
- На **3 этапе** эти продукты окисляются до  $\text{CO}_2$  и *воды*.

# 1. Превращение энергии в живых клетках

- **АНАБОЛИЗМ** – процесс синтеза сложных молекул из более простых, сопровождающийся потреблением энергии;
- Так, из образовавшихся в результате расщепления биополимеров аминокислот, жирных кислот и моносахаридов в клетках синтезируются новые клеточные белки, фосфолипиды мембран и полисахариды.

# 1. Превращение энергии в живых клетках

- Выделяющаяся в результате катаболизма (окисления углеводов и жирных кислот) свободная энергия должна каким-либо образом улавливаться и сохраняться, иначе она перейдет в тепло и будет потеряна.
- **Единственным способом сохранения свободной энергии является превращение ее в химическую энергию - энергию химических связей.**

# 1. Превращение энергии в живых клетках

- Энергия в клетках аккумулируется в виде АТФ;
- Энергия нужна для обеспечения:
  - - процесса биосинтеза самих клеток и клеточных компонентов;
  - - транспорта веществ в клетку;
  - - механической работы:
    - - по сокращению;
    - - по передвижению в пространстве и др.;
- Молекула АТФ (аденозинтрифосфата) – главный переносчик энергии в организме человека;

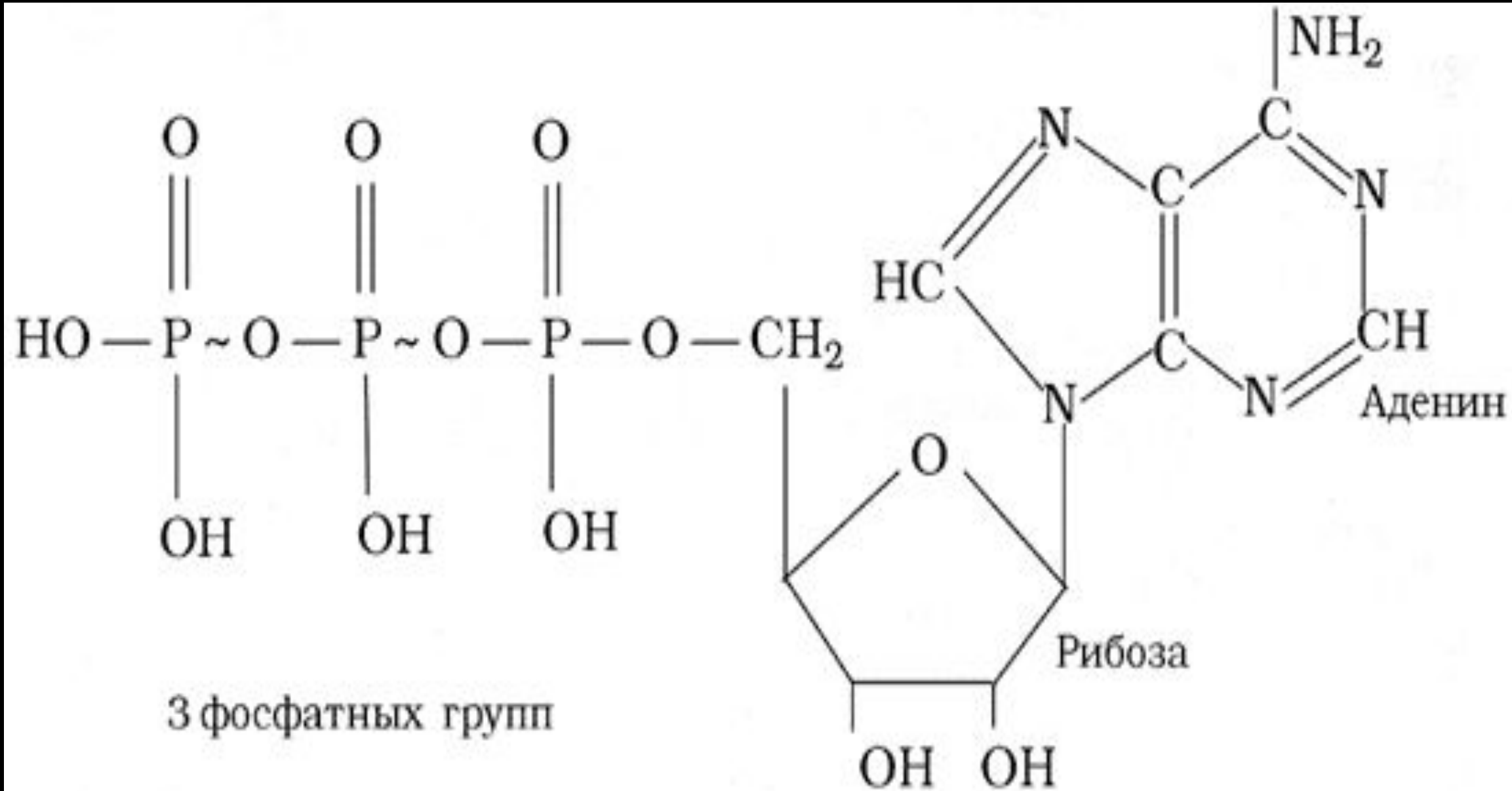
## 2. Структура АТФ и ее роль в энергетическом обмене

- Почему именно молекула **АТФ** является основным поставщиком химической энергии для биохимических процессов?
- Молекула АТФ построена из:
  - - азотистого основания – аденина;
  - - моносахарида – рибозы;
  - - трех остатков фосфорной кислоты.

*Азотистые основания — гетероциклические органические соединения, входящие в состав нуклеиновых кислот.*

АТФ представляет собой формулу:

Аденин – рибоза – фосфат ~ фосфат ~ фосфат.



- Энергия в молекуле АТФ содержится в **двух макроэнергических связях между остатками фосфорной кислоты.**



## 2. Структура АТФ и ее роль в энергетическом обмене

- **Макроэргические** - это связи, при гидролизе которых изменения энергии составляют более 30 кДж/моль;  
Их обозначают знаком ~ (тильда);
- Соединения, обладающие такими связями, называют **макроэргами**.
- К **макроэргическим соединениям** (кроме АТФ) относятся также **УТФ, ГТФ, ЦТФ, ТТФ; креатинфосфат**, **нужный для энергообеспечения мышечной работы**; некоторые тиоэфиры (ацил-КоА) и некоторые другие соединения.

## 2. Структура АТФ и ее роль в энергетическом обмене

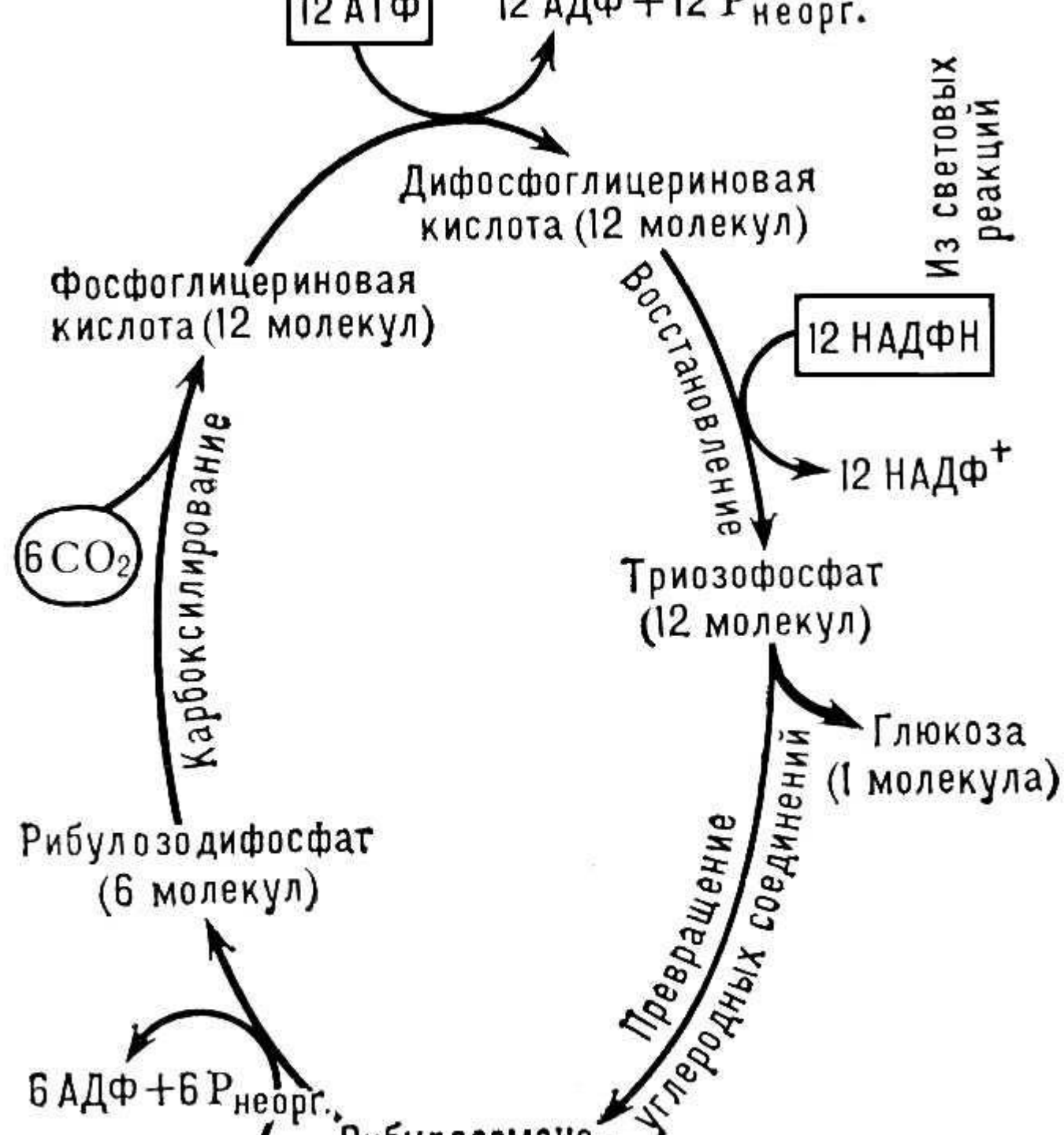
- При гидролизе этих макроэнергетических связей молекулы АТФ и высвобождается значительное количество **свободной энергии**.
- Гидролиз – обменная реакция между веществом и водой, когда исходное вещество разлагается с образованием новых соединений.
- Гидролиз АТФ – химическая реакция распада АТФ при взаимодействии с водой под влиянием фермента АТФазы.
- $\text{АТФ} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{АДФ} + \text{H}_3\text{PO}_4$        $\Delta G_0' = -31,8$  кДж/моль;
- $\text{АДФ} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{АМФ} + \text{H}_3\text{PO}_4$        $\Delta G_0' = -31,8$  кДж/моль

## 2. Структура АТФ и ее роль в энергетическом обмене

- **Чтобы расходовать энергию ее нужно создавать и запасать.**
- **Поэтому биосинтез АТФ - основная задача живых организмов;**
- В живой природе он происходит путём фосфорилирования АДФ и называется ресинтезом;
- **РЕСИНТЕЗ АТФ – химическая реакция образования АТФ из АДФ путем фосфорилирования (присоединения остатка фосфорной кислоты):**

# Способы синтеза АТФ в живой природе

- 1) **Фотосинтетическое фосфорилирование** - в зелёных растениях (используется солнечная энергия);
- Энергия запасается и в этом случае в макроэргических связях АТФ.



- **2) Окислительное фосфорилирование** – происходит в живых организмах и организме человека *в аэробных условиях.*
- **3) Субстратное фосфорилирование** - протекает в анаэробных условиях, т.е. без участия кислорода
- Донором фосфатной группы ( $\sim\text{PO}_3\text{H}_2$ ) для синтеза АТФ являются промежуточные продукты процессов **гликолиза** и **цикла трикарбоновых кислот.**

- **Основной источник энергии в клетке - окислительное фосфорилирование - или биологическое окисление, т. е. окисление субстратов кислородом воздуха.**
- **Суть этого процесса заключается в переносе электронов и протонов с окисляемого субстрата с помощью системы окислительно-восстановительных ферментов во внутренней мембране митохондрий к кислороду.**

- Биологическое окисление – многоступенчатый ферментативный процесс распада сложных органических веществ: углеводов, жиров и белков с постепенным высвобождением химической энергии;
- Этот процесс также называют тканевым дыханием.
- Около 40% энергии, выделяющейся при окислении, организм превращает в энергию макроэргических связей АТФ.
- Таким путем клетка превращает химическую энергию питательных веществ, поступивших извне, в утилизируемую метаболическую энергию;



# Аэробное окисление

- Выделяют 2 вида окисления:
- 1. Аэробное окисление – с обязательным участием кислорода.
- Протекает в митохондриях клеток;
- Его конечные продукты – углекислый газ и вода;

# Анаэробное окисление

- 2. Анаэробное окисление – без участия кислорода;
- Протекает в цитоплазме клеток;
- Его конечные продукты – недоокисленные вещества:
  - при окислении углеводов – молочная кислота;
  - при окислении жиров и жирных кислот – кетоновые тела;
  - при окислении белков и аминокислот – окси-, кето-; и органические кислоты.



# ГЛИКОЛИЗ

- При аэробных условиях глюкоза полностью окисляется до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  (в митохондриях);
- Если содержание кислорода недостаточно (в активно сокращающейся мышце) – тогда образуется молочная кислота.
- Но и в том, и в другом случае – это путь получения ЭНЕРГИИ!

## ГЛИКОЛИЗ

- В энергетическом плане аэробный гликолиз наиболее выгодный процесс: при окислении **одной молекулы** глюкозы синтезируется **38 молекул АТФ!!!**
- Но в анаэробных условиях гликолиз – единственный процесс в организме, поставляющий энергию для обеспечения физиологических функций;
- Анаэробный гликолиз включает 12 последовательных химических реакций; Его катализируют одиннадцать ферментов!
- **Энергетический эффект – 2 молекулы АТФ.**

# ГЛИКОГЕНОЛИЗ

Это процесс анаэробного окисления глюкозы, которая образуется при распаде гликогена (основной формы хранения глюкозы в организме);

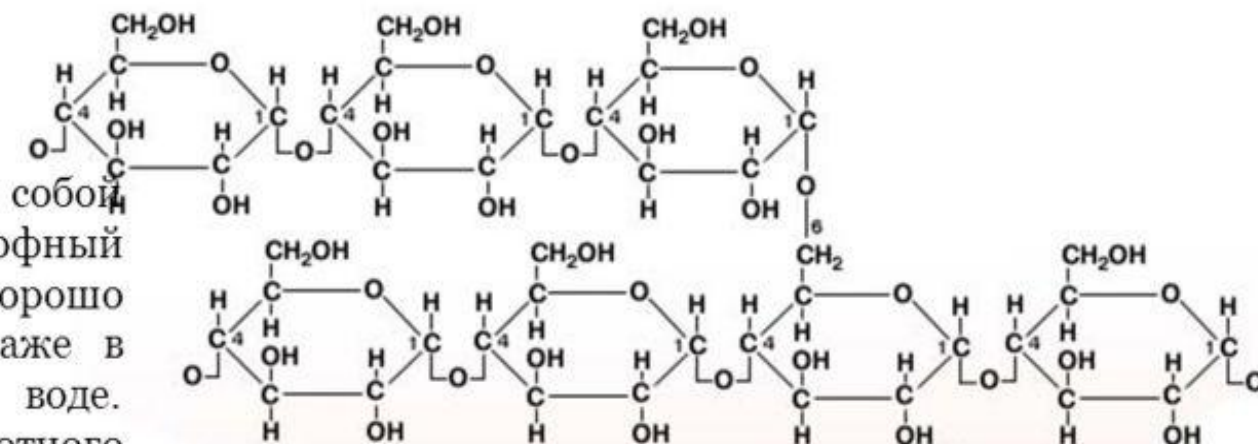
Конечный продукт окисления – также молочная кислота;

**Энергетический эффект – 3 молекулы АТФ.**

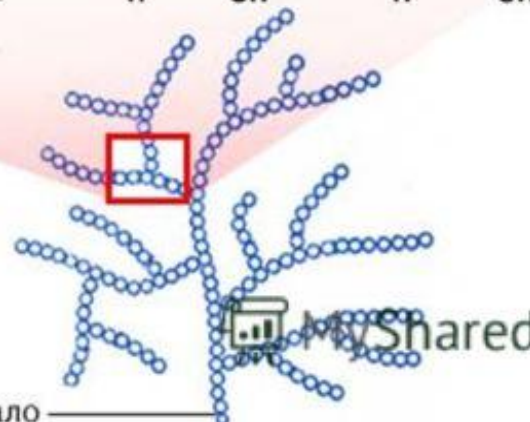
# Гликоген

В животном мире роль «запасного крахмала» играет родственный крахмалу полисахарид - гликоген. Гликоген содержится во всех животных тканях. Особенно много его в печени (до 20%) и в мышцах (4%).

Гликоген представляет собой белый аморфный порошок, хорошо растворимый даже в холодной воде. Молекула животного крахмала построена по типу молекул амилопектина, отличаясь лишь большей ветвистостью. Молекулярная масса гликогена исчисляется миллионами.



○ - Глюкозный остаток



Альдегидное начало

MyShared

# КЕТОНОВЫЕ ТЕЛА

- Кетоновые тела это:
  - - ацетоуксусная к-та;
  - - бета-оксимасляная к-та;
  - - ацетон;
- Они являются недоокисленными продуктами распада жиров;
- Основное место образования - печень.
- *Их усиленное образование в организме - КЕТОЗ.*
- *Накопление в крови – КЕТОНЕМИЯ;*
- *Выделение с мочой – КЕТОНУРИЯ.*



# Кетоновые тела

- В крови здорового человека кетоновые тела содержатся в очень малом количестве: в сыворотке крови 0,03–0,2 ммоль/л;
- У лиц с сахарным диабетом, при голодании концентрация кетоновых тел в крови увеличивается и может достигать 16–20 ммоль/л.
- Они - важный источник энергии в условиях недостатка глюкозы – поставщики «топлива» для мышц;
- Мышцы утилизируют их в цикле КРЕБСА.

# ОКИСЛЕНИЕ ЛИПИДОВ

- - как источник энергии на втором месте после окисления углеводов;
- - при окислении одной молекулы липидов образуется даже больше молекул АТФ, чем при окислении глюкозы:
- -энергетический эффект от окисления глицерина в аэробных условиях - 22 молекулы АТФ;
- от окисления 1 молекулы жирной кислоты – около 100 молекул АТФ !!

# Почему тогда этот путь образования энергии не является главным?

- 1. Для окисления липидов требуется значительно больше кислорода, чем при окислении глюкозы (*окисление одной молекулы ВЖК требует в 4 раза больше кислорода, чем окисление 1 молекулы углеводов*);
- 2. Липиды включаются в энергообмен при нагрузках длительностью не менее получаса (т.е. только при развитии качества выносливости).

# Биоэнергетика мышечной

## деятельности

- Мышечная ткань составляет около 40% от веса тела человека. Биохимические процессы, протекающие в мышцах, оказывают большое влияние на весь организм.
- **Важнейшей особенностью функционирования мышц является то, что в процессе мышечного сокращения происходит преобразование химической энергии АТФ непосредственно в механическую энергию сокращения и движения.**

- У животных и человека имеется **два основных типа мышц: поперечно-полосатые и гладкие.**
- **Поперечно-полосатые** мышцы прикрепляются к костям, т.е. к скелету, и поэтому ещё называются **скелетными.**
- **Поперечно-полосатые** мышечные волокна также составляют основу сердечной мышцы – **миокарда.**
- **Гладкие мышцы** образуют мускулатуру стенок кровеносных сосудов, кишечника, находятся в тканях внутренних органов и коже.

- Каждая **поперечно-полосатая мышца** состоит из нескольких тысяч **волокон**, объединенных **прослойками** из соединительной ткани и такой же оболочкой – **фасцией**.
- **Мышечные волокна** (или мышечные клетки - миоциты) представляют собой сильно вытянутые **многоядерные клетки**: длина их достигает от **0,1 до 2-3 см**, а в некоторых мышцах – более **10 см**. **Толщина** мышечных клеток **0,1-0,2 мм**;
- **Мышечные волокна объединены в пучки**.



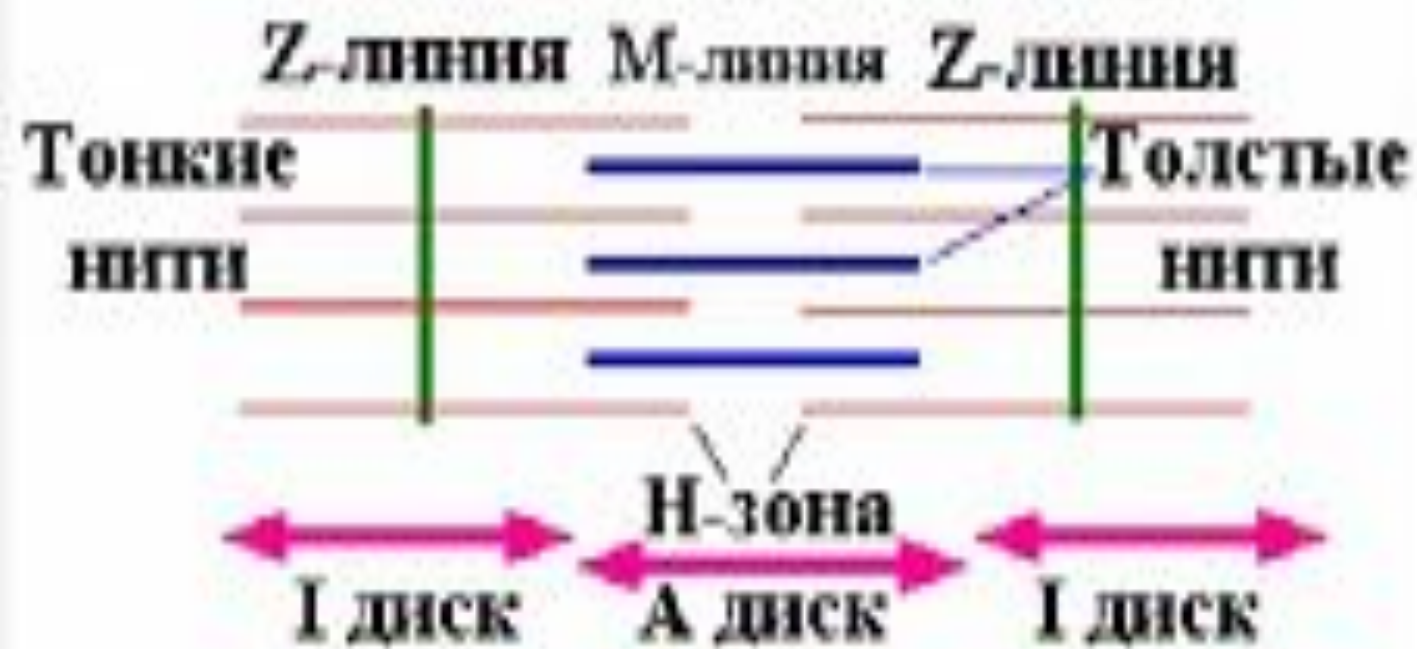
- Как и любая клетка, **миоцит** содержит обязательные органеллы: *ядро*;
- *митохондрии*;
- *цитоплазматическую сеть* (саркоплазматическая сеть);
- клеточную оболочку мышечной клетки – *сарколемму*.



- Основной особенностью **миоцитов** является наличие сократительных элементов – **миофибрилл**;
- Миофибриллы занимают большую часть мышечных клеток, их диаметр около **1 мкм**.
- В саркоплазме миоцитов есть белок - **миоглобин**, который как и гемоглобин крови **связывает кислород**, создавая его запас;
- Основной **углевод** мышечной ткани – **гликоген**.  
Концентрация гликогена колеблется в пределах от 0,2 до 4%.

- При изучении структуры миофибрилл с помощью электронного микроскопа было установлено, что **миофибриллы** являются сложными структурами, простроенными из большого числа **мышечных нитей** двух типов – **толстых** и **тонких**.
- **Толстые** нити имеют диаметр **15 нм**, **тонкие** – **7 нм**;
-

Саркомер



- В середине пучка тонких нитей поперечно располагается **тонкая пластинка из белка**, которая фиксирует положение мышечных нитей в пространстве. Она называется **Z-линией**.
- **Участок миофибриллы между соседними Z-линиями называется саркомером.**
- **Длина саркомера достигает 2-2,5 мкм. Каждая миофибрилла состоит из нескольких тысяч саркомеров.**
- **Саркомер - структурно-функциональная единица мышечной ткани;**
- **Толстые и тонкие нити состоят только из белков: актина и миозина;**

- Мышечное сокращение является сложным процессом, в ходе которого происходит преобразование энергии химических связей АТФ в механическую работу, совершаемую мышцей.
- **Источником энергии**, необходимой для сокращения мышц, является **АТФ**.
- В этом процессе участвуют мышечные белки и **ионы  $Ca^{2+}$**  в саркоплазме миоцитов, концентрация которых повышается при прохождении нервного импульса – сигнала к сокращению;
- Во время мышечных сокращений происходит **скольжение тонких нитей вдоль толстых**, что приводит к **укорочению миофибрилл** и всего **мышечного волокна**.

- Расслабление мышц тоже сопровождается затратой энергии.
- Где же ее взять?
- Универсальный источник - АТФ;
- Содержание АТФ в мышце относительно постоянно: около 0,25% массы мышцы.
- Запасов АТФ в мышце достаточно только на 3 - 4 одиночных сокращения.
- ПОЭТОМУ необходимо постоянное и интенсивное восполнение АТФ;
- Что и происходит в мышцах (очень быстрый ресинтез АТФ).

# Механизмы энергообеспечения МЫШЦ

1. Специальные реакции субстратного фосфорилирования;
2. Гликолиз, гликогенолиз;
3. Окислительное фосфорилирование.
  - *Первые 2 пути – без кислорода!*

реакции субстратного фосфорилирования

- **1. Синтез АТФ из креатинфосфата - креатинфосфокиназная реакция;**
- Креатинфосфат (КТФ) - макроэргическое вещество, которое при исчерпании запасов АТФ в работающей мышце отдает фосфорильную группу на АДФ;





- Это самый быстрый способ ресинтеза АТФ;
  - Запасов креатинфосфата хватает для обеспечения мышечной работы в течение 20 сек.
  - **Этот путь максимально эффективен:**
    - - не требует присутствия кислорода;
    - - не дает нежелательных побочных продуктов;
    - - включается мгновенно.
- Его недостаток - резерва КТФ хватает только на 20 секунд мышечной работы.

- **2. Миокиназная реакция.**

- Протекает только в мышечной ткани.
- Суть ее состоит в том, что при взаимодействии 2 молекул АДФ образуется 1 молекула АТФ:
- $\text{АДФ} + \text{АДФ} = \text{АТФ} + \text{АМФ}$ .
- Реакция катализируется миокиназой (аденилаткиназой);
- Условия для включения миокиназной реакции возникают при выраженном мышечном утомлении;
- Эта реакция мало эффективна;
- Но накопление в саркоплазме миоцитов АМФ активирует ферменты гликолиза, что приводит к повышению скорости анаэробного ресинтеза АТФ.

# ГЛИКОЛИЗ и ГЛИКОГЕНОЛИЗ

- Энергетический эффект гликолиза невелик: 2 молекулы АТФ при окислении 1 молекулы глюкозы;
- *Примерно половина всей выделяемой энергии в данном процессе превращается в тепло и не может использоваться при работе мышц; а температура мышц повышается до 40 градусов и даже выше!*  
Кроме того, конечный продукт гликолиза – молочная кислота: мышцы закисляются; ферменты, регулирующие сокращение мышц угнетаются;
- **Гликолиз начинается не сразу – а только через 10-15 с после начала мышечной работы.**

- Но все равно этот путь энергообеспечения очень важен для упражнений, длительность которых составляет от 30 до 150 с.
- К ним относятся бег на средние дистанции, плавание на 100 и 200 м, велосипедные гонки на треке и др.
- Также за счет энергии гликолиза совершаются длительные ускорения по ходу и на финише дистанции.

# Окислительное фосфорилирование

- Преимущества:
- Это наиболее энергетически выгодный процесс - синтезируется 38 молекул АТФ при окислении одной молекулы глюкозы.
- Имеет самый большой резерв субстратов: может использоваться глюкоза, гликоген, глицерин, кетоновые тела.
- Продукты распада ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) практически безвредны.
- Недостаток:
- требует повышенных количеств кислорода.

Важную роль в обеспечении мышечной клетки кислородом играет миоглобин, у которого сродство к кислороду больше, чем у гемоглобина: при парциальном давлении кислорода, равном 30 мм. рт.ст., миоглобин насыщается кислородом на 100 %, а гемоглобин - всего на 30 %. Поэтому миоглобин эффективно отнимает у гемоглобин доставляемый им кислород.

# Изменение метаболизма при мышечной работе

- Уменьшение концентрации АТФ приводит к использованию КТФ (в креатинфосфокиназной реакции);
- Далее включается гликолиз;
- **Так как системе окислительного фосфорилирования необходима 1 мин для запуска.**
- Это пусковая фаза мышечной работы;
- **Дальше изменения метаболизма зависят от интенсивности мышечной работы.**



# Изменение метаболизма при мышечной работе

- 1. Если мышечная работа длительная и небольшой интенсивности, то в дальнейшем клетка получает энергию путем окислительного фосфорилирования - это работа в "аэробной зоне";
- 2. Если мышечная работа субмаксимальной интенсивности, то дополнительно к окислительному фосфорилированию включается гликолиз - это наиболее тяжелая мышечная работа - возникает "кислородный долг»;
- Это - работа "в смешанной зоне";

# Изменение метаболизма при мышечной работе

- 3. Если мышечная работа максимальной интенсивности, но непродолжительная, то механизм окислительного фосфорилирования не успевает включаться;
- Работа идет исключительно за счет гликолиза;
- После окончания максимальной нагрузки лактат поступает из крови в печень, где идут реакции глюконеогенеза, или лактат превращается в пируват, который дальше окисляется в митохондриях;
- Для окисления пирувата нужен кислород, поэтому после мышечной работы максимальной и субмаксимальной интенсивности потребление кислорода мышечными клетками повышено - возвращается кислородная задолженность (долг).

- Таким образом, энергетическое обеспечение разных видов мышечной работы различно.
- Поэтому существует специализация мышц, причем обеспечение энергией у разных мышечных клеток принципиально различается: есть "красные" мышцы и "белые" мышцы.

- **Красные мышцы** - "медленные" оксидативные мышцы. Они имеют хорошее кровоснабжение, много митохондрий, высокая активность ферментов окислительного фосфорилирования. Предназначены для работы в аэробном режиме. Например, такие мышцы служат для поддержания тела в определенном положении (позы, осанка).
- **Белые мышцы** - "быстрые", гликолитические. В них много гликогена, у них слабое кровоснабжение, высока активность ферментов гликолиза, креатинфосфокиназы, миокиназы. Они обеспечивают работу максимальной мощности, но кратковременную.

- **У человека нет специализированных мышц, но есть специализированные волокна:** в мышцах-разгибателях больше "белых" волокон, в мышцах спины больше "красных" волокон.
- **Существует наследственная предрасположенность к мышечной работе** - у одних людей больше "быстрых" мышечных волокон - им рекомендуется заниматься теми видами спорта, где мышечная работа максимальной интенсивности, но кратковременная (тяжелая атлетика, бег на короткие дистанции и тому подобное). Люди, в мышцах которых больше "красных" ("медленных") мышечных волокон, наибольших успехов добиваются в тех видах спорта, где необходима длительная мышечная работа средней интенсивности, например, марафонский бег (дистанция 40 км). Для определения пригодности человека к определенному типу мышечных нагрузок используется пункционная биопсия мышц.
- В результате скоростных тренировок (bodybuilding) утолщаются миофибриллы, кровоснабжение возрастает, но непропорционально увеличению массы мышечных волокон, количество актина и миозина возрастает, увеличивается активность ферментов гликолиза и креатинфосфокиназы.
- Более полезны для организма тренировки "на выносливость". При этом мышечная масса не увеличивается, но увеличивается количество миоглобина, митохондрий и активность ферментов ГБФ-пути.

-энергетический эффект от  
окисления глицерина в  
аэробных условиях - 22  
молекулы АТФ;  
Окисления 1 молекулы жирной  
кислоты – около 100 молекул  
АТФ