

Лекция №7

АТФ–АДФ. МЕТАБОЛИЗМ. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ОБМЕН

АТФ. Это сокращенное название **аденозинтрифосфорной кислоты**. АТФ содержится в каждой клетке животных и растений. Количество АТФ колеблется и в среднем составляет 0,04% (на сырую массу клетки). Наибольшее количество АТФ содержится в скелетных мышцах 0,2–0,5%. По химической структуре **АТФ является нуклеотидом**, и, как у всякого нуклеотида, в ней имеются азотистое основание (аденин), углевод (рибоза) и фосфорная кислота. Однако в части, содержащей фосфорную кислоту, молекула АТФ имеет существенные отличия от обычных нуклеотидов. У нее в этой части сконденсированы **три молекулы фосфорной кислоты** (рис. 10). Это очень неустойчивая структура. Самопроизвольно и значительно быстрее под влиянием фермента в АТФ разрывается связь между Р и О и к освободившимся связям присоединяется одна или две молекулы воды, при чем отщепляется одна или две молекулы фосфорной кислоты.

Если отщепляется одна молекула фосфорной кислоты, то АТФ переходит в АДФ, т.е. в аденозиндифосфорную кислоту. **Если отщепляются две молекулы фосфорной кислоты, то АТФ переходит в АМФ**, т. е. в аденозинмонофосфорную кислоту. Реакция отщепления каждой молекулы фосфорной кислоты от АТФ сопровождается **большим энергетическим эффектом**, а именно на отщепление одной грамм-молекулы фосфорной кислоты затрачивается 30,6 кДж/моль (7,3 ккал/моль). Все другие экзотермические реакции клетки сопровождаются значительно меньшим выходом энергии. Самые эффективные из них дают не более 8 кДж. Чтобы подчеркнуть такую особенно высокую энергетическую эффективность **фосфорнокислородной связи в АТФ, ее называют макроэргической связью** и наличие такой связи обозначают знаком ~. В АТФ имеются две макроэргические связи.

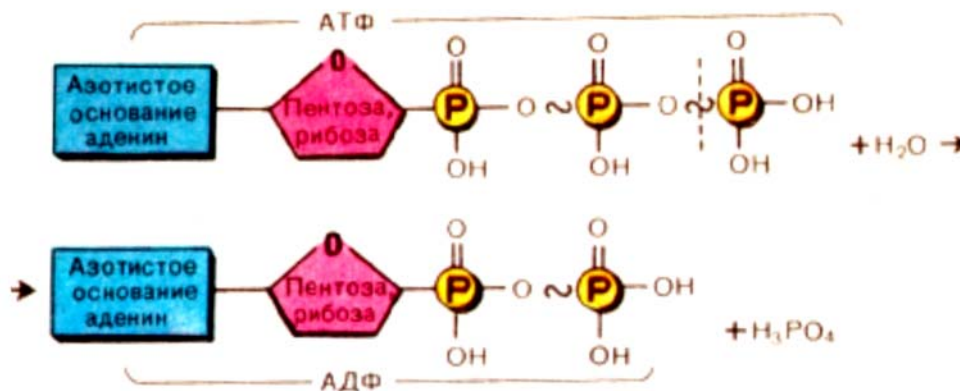


Рис. 10

Значение АТФ в жизни клетки очень велико. Она играет центральную роль в клеточных превращениях энергии. АТФ в реакциях, как правило, теряет одну молекулу фосфорной кислоты и переходит при этом в АДФ. Из АДФ путем присоединения фосфорной кислоты снова синтезируется АТФ. Понятно, что эта реакция идет с поглощением энергии 40 кДж/моль (10 ккал/моль).

За объяснение ферментативного механизма, лежащего в основе синтеза АТФ, два исследователя получили Нобелевскую премию: **Пол Д. Бойер, США и Джон Э. Уолкер, Великобритания (Нобелевская премия 1997 года)**.

Синтезом АТФ в митохондриях занимается молекулярная машина – АТФ-синтаза. Она состоит из двух частей. Первая погружена в мембрану называется F_0 (см. рис. 11). Она представляет собой протонный канал, то есть это дыра в мембране, по которой протон может попасть внутрь митохондрии, но попадает он внутрь с потерей энергии, которую улавливает вторая часть молекулярной машины, которая называется F_1 . Эта

часть АТФ-синтазы торчит внутрь митохондрии и использует энергию "падающих" через F_0 протонов для того, чтобы аденозиндифосфат соединился с фосфатом посредством макроэргической связи и образовал молекулу АТФ.

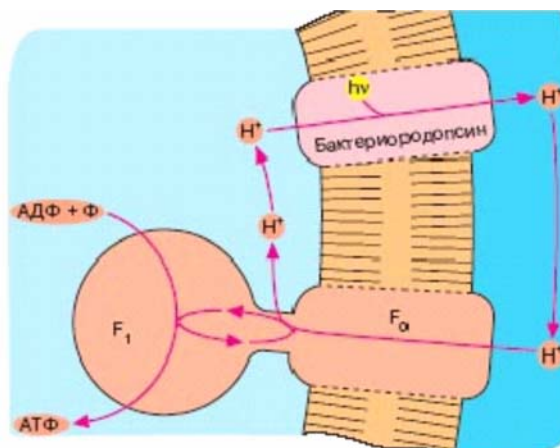


Рис. 11

Кратко опишем синтез АТФ. Представим АТФ в таком виде: $АТФ = АДФ \sim \Phi$. Собственно, почему при разрыве этой связи выделяется большое количество энергии? При разрыве образуется отрицательно заряженный фосфат, который гидратируется (покрывается «шубой» из молекул воды). Как вы помните, вода – это диполь (кислород имеет частично отрицательный заряд, а два водорода – положительный). И за счет гидратирования эта энергия и получается. Но если синтез АТФ идет в той среде, где воды нет, т.е. в гидрофобной среде, то макроэргической эта реакция не является. Показано, что когда происходит образование ковалентной связи между фосфатными группами молекул АДФ и Φ , ферменту практически не требуется энергии. Реакции синтеза и гидролиза АТФ в каталитическом центре фермента активно идут при отсутствии внешнего источника энергии. Условия, в которых находятся молекулы АДФ и Φ в каталитическом центре, существенно отличаются от условий протекания реакции в водной среде, благодаря чему образование молекулы АТФ в активном центре фермента может происходить энергетически "бесплатно". Энергия "падающих" протонов тратится потом на то, чтобы «выпихнуть» АТФ, отцепить его от каталитической субъединицы.

Таким образом, за счет электрохимического потенциала на внутренней мембране митохондрий внутри клетки или митохондрий совершается механическая работа, сопряженная с химическим синтезом.

На рисунке виден срез митохондрии (рис. 15). Внутри содержится матрикс и выросты (складки) – кристы, на которых и расположена АТФ-синтаза. Зачем нужны складки? Чтобы увеличить площадь поверхности. Количество складок внутри митохондрий зависит от того, насколько интенсивно ей приходится работать, сколько энергии нужно клетке. Митохондрии в клетках печени имеют гораздо меньше крист, чем, например, в клетках сердца.

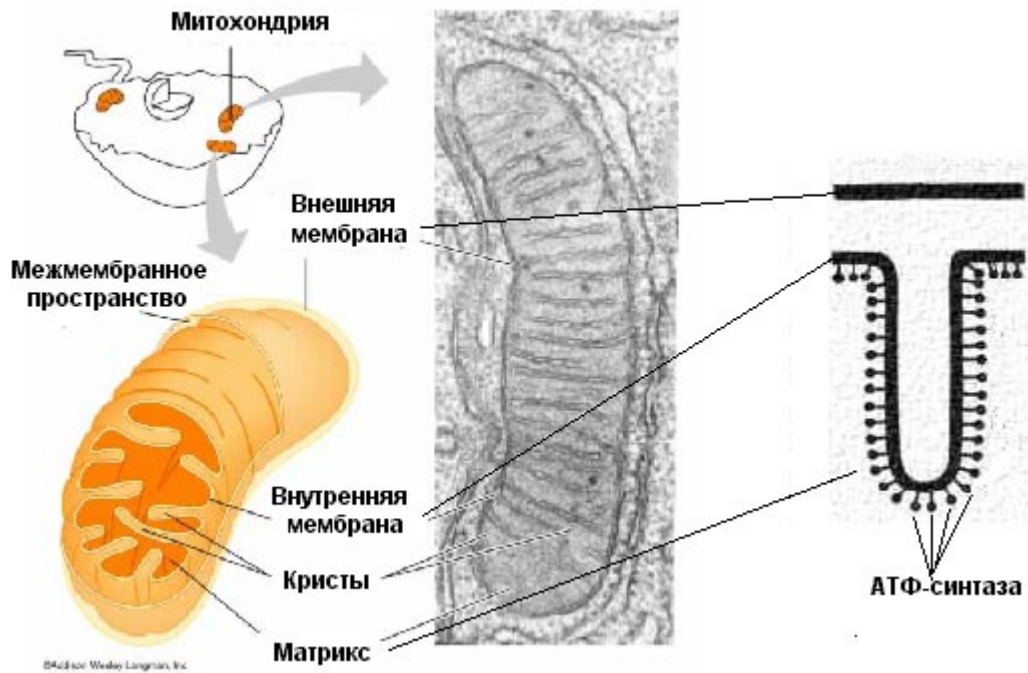


Рис. 15

В хлоропластах происходит точно такой же процесс синтеза АТФ, также работает АТФ-синтаза, как и в митохондриях, но источником протонного потенциала является уловленная энергия света. Там тоже есть складки, они называются тилакоидами. Только в хлоропластах все как бы вывернуто наизнанку. То есть протоны за счет энергии света накапливаются снаружи этих образований.

АТФ как единое и универсальное энергетическое вещество. Все проявления жизнедеятельности, все функции клетки осуществляются с затратой энергии. Энергия требуется для движения, биосинтетических реакций, переноса веществ через клеточные мембраны, для любых форм клеточной активности.

Источником энергии в живых клетках, обеспечивающим все виды их деятельности, является аденозинтрифосфорная кислота (АТФ). Освобождающаяся при расщеплении АТФ энергия обеспечивает любые виды клеточных функций – движение, биосинтез, перенос веществ через мембраны и др. (рис. 16). Так как запас АТФ в клетке невелик, то понятно, что по мере убыли АТФ содержание ее должно восстанавливаться. В действительности так и происходит. Биологический смысл остальных реакций энергетического обмена и состоит в том, что энергия, освобождающаяся в результате химических реакций окисления углеводов и других веществ, используется для синтеза АТФ, т.е. для восполнения ее запаса в клетке. При усиленной, но кратковременной работе, например при беге на короткую дистанцию, мышцы работают почти исключительно за счет распада содержащейся в них АТФ. После окончания бега спортсмен усиленно дышит, разогревается: в этот период происходит интенсивное окисление углеводов и других веществ для восполнения убыли израсходованной АТФ. При длительной и не очень напряженной работе содержание АТФ в клетках может существенно не изменяться, так как реакции окисления успевают обеспечить быстрое и полное восстановление израсходованной АТФ.

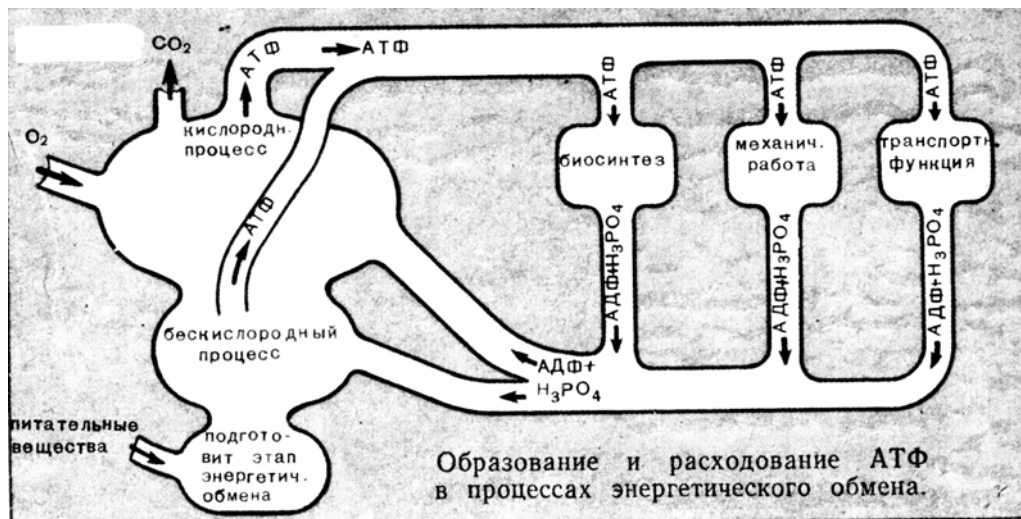
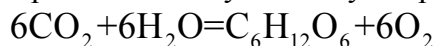


Рис. 16

Итак, АТФ представляет единый и универсальный источник энергии для функциональной деятельности клетки. Отсюда понятно, что возможна передача энергии из одних частей клетки в другие и заготовка энергии впрок. Синтез АТФ может происходить в одном месте клетки и в одно время, а использоваться она может в другом месте и в другое время.

Фотосинтез. Синтез органических соединений из простых, бедных энергией веществ нуждается в притоке энергии извне. Растительные клетки обладают специальным механизмом, позволяющим им преобразовывать световую энергию в химическую энергию. Синтез органических соединений, идущий за счет световой энергии, называют фотосинтезом.

Процесс фотосинтеза выражается следующим суммарным уравнением:



Как видно из уравнения, в ходе фотосинтеза вещества, бедные энергией (CO_2 и H_2O), переходят в углевод – сложное богатое энергией органическое вещество. Кроме углеводов, в результате фотосинтеза образуется также молекулярный кислород.

Общая продуктивность фотосинтеза громадна: ежегодно растительность Земли связывает 170 млрд. т углерода. Помимо того, растения вовлекают в синтез миллиарды тонн азота, фосфора, серы, кальция, магния, калия и других элементов. В результате ежегодно синтезируется около 400 млрд. т органических веществ.

При всей грандиозности масштабов природный фотосинтез – медленный и малоэффективный процесс: зеленый лист использует для фотосинтеза всего около 1% падающей на него солнечной энергии. Продуктивность фотосинтеза составляет примерно 1 г органических веществ на 1 м² площади листьев в час. Таким образом, летом 1 м² листы вырабатывает примерно 15—16 г органических веществ за сутки.

В изучение роли света и хлорофилла в процессе усвоения CO_2 при фотосинтезе большой вклад внес крупнейший русский ученый К.А. Тимирязев. Ему принадлежат и непревзойденные работы по популяризации знаний по фотосинтезу, о котором он писал так: «Это процесс, от которого в конечной инстанции за висят все проявления жизни на нашей планете». Такое утверждение вполне обосновано, так как фотосинтез не только основной поставщик органических соединений, но и единственный источник свободного кислорода на Земле.

Схема процесса фотосинтеза

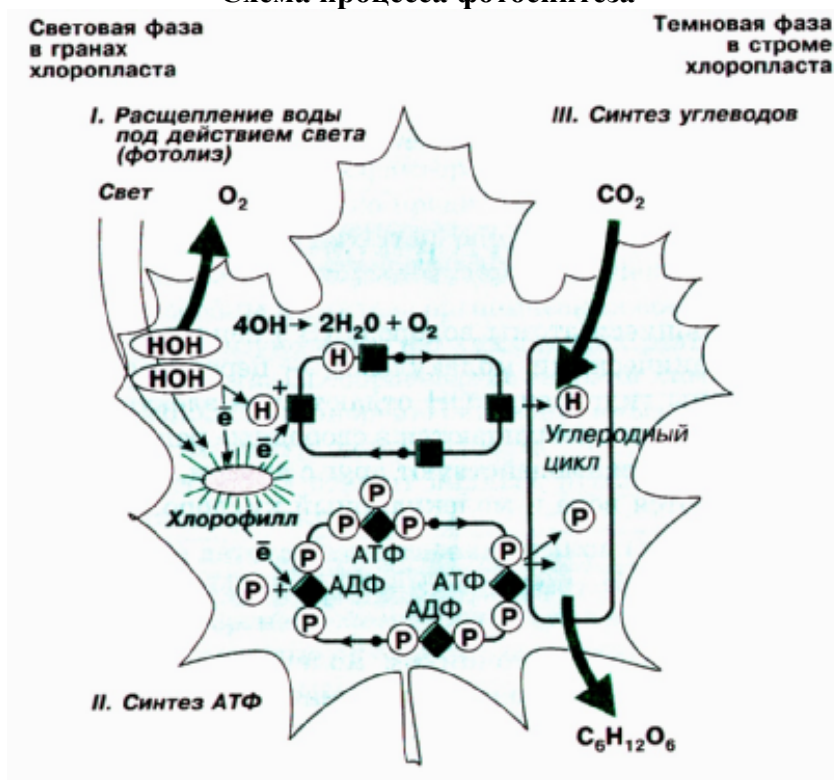


Рис. 17

Хемосинтез. Кроме клеток зеленых растений, автотрофность свойственна некоторым бактериям, у которых нет хлорофилла. Способ, с помощью которого они мобилизуют энергию для синтетических реакций, принципиально иной, нежели у растительных клеток. Этот тип автотрофов был открыт русским ученым микробиологом С.Н. Виноградским в 1887 г. Для синтеза бактерии используют энергию химических реакций. Они обладают специальным ферментным аппаратом, позволяющим им преобразовывать энергию химических реакций, в частности энергию реакций окисления неорганических веществ, в химическую энергию синтезируемых органических соединений. Этот процесс называют хемосинтезом. Энергии должно быть достаточно для образования АТФ (св. 10ккал/моль).

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://bio.fizteh.ru/student/files/biology/biolections/>
2. Скулачев В.П. Законы биоэнергетики // СОЖ 1997, №1, с. 9-14.
3. Виноградов А.Д. Преобразование энергии в митохондриях // СОЖ 1999, №9, с. 11-19.
4. Тихонов А.Н. Молекулярные моторы. Часть 1. Вращающиеся моторы живой клетки // СОЖ. 1999, №6, с. 8-16
5. Албертс Б., Брей Д., Льюис Дж. и др. Молекулярная биология клетки. 2-е изд. М.: Мир, 1994. Т. 1.