

ОБМЕН ВЕЩЕСТВ И ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ

МЕТАБОЛИЗМ

ФОТОСИНТЕЗ

ХЕМОСИНТЕЗ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ОБМЕН

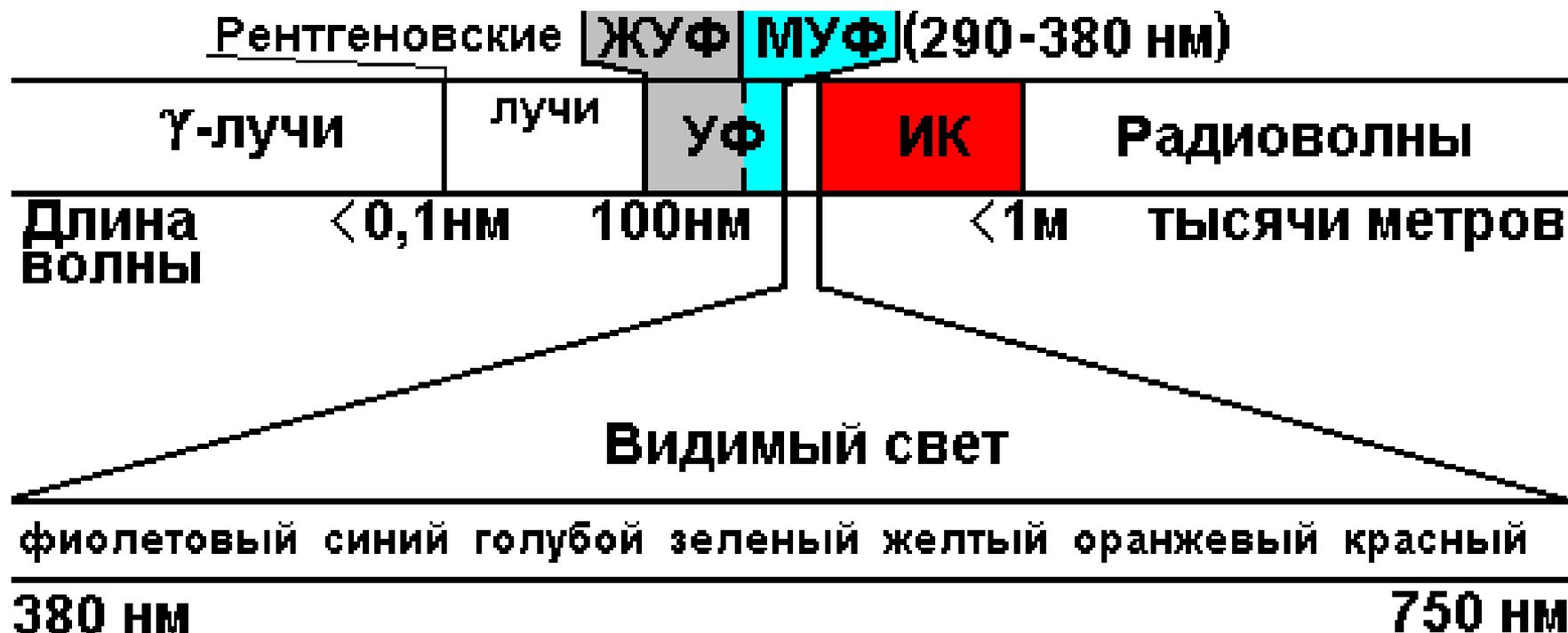
Все живые организмы, обитающие на Земле, являются **открытыми системами**, для которых характерен непрерывно протекающий обмен веществ и энергии с окружающей средой.

Совокупность реакций обмена, протекающих в организме, называется ***метаболизмом***.

Анаболизм (ассимиляция, пластический обмен) — совокупность эндотермических реакций биосинтеза, которые приводят к образованию сложных веществ из более простых (синтез белка, гликогена; фотосинтез, хемосинтез).

Катаболизм (диссимиляция, энергетический обмен) — совокупность экзотермических реакций распада и окисления высокомолекулярных веществ до более простых

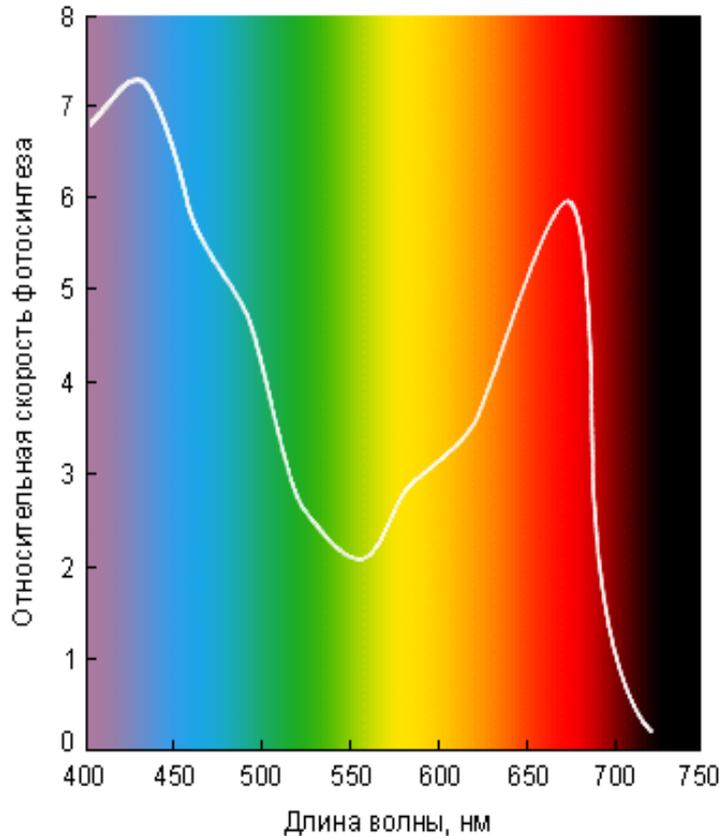
Фотосинтез. Свет, физические характеристики



Фактор, поставляющий энергию для жизнедеятельности фотоавтотрофных организмов и обеспечивающий синтез основной части органического вещества на Земле, поддерживающий определенную температуру на поверхности Земли. Для живых организмов наиболее важны: свет ультрафиолетовой части спектра, видимый свет и инфракрасное излучение.

Жесткий ультрафиолет с длиной волны менее 290 нм губителен для живых клеток, до поверхности Земли не доходит, так как отражается озоновым экраном.

Свет, физические характеристики

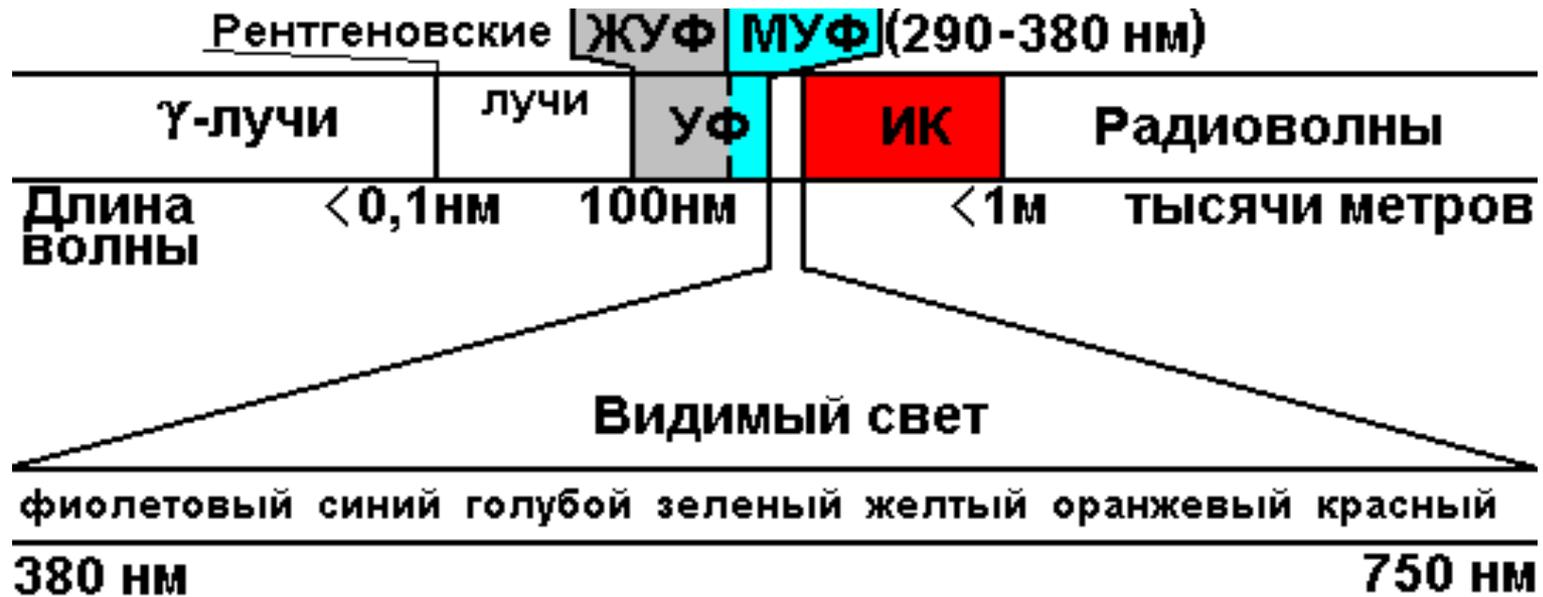


Мягкий ультрафиолет с длиной волны от 290 до 380 нм несет много энергии и вызывает образование витамина D в коже человека, он же воспринимается органами зрения многих насекомых.

Видимый свет с длиной волны от 380 до 750 нм используется для фотосинтеза фототрофными организмами (растениями, фотосинтезирующими бактериями, сине-зелеными) и животными для ориентации.

Для фотосинтеза используются, в основном, *синие и красные лучи света*.

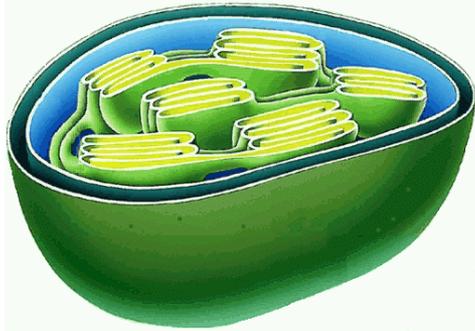
Свет, физические характеристики



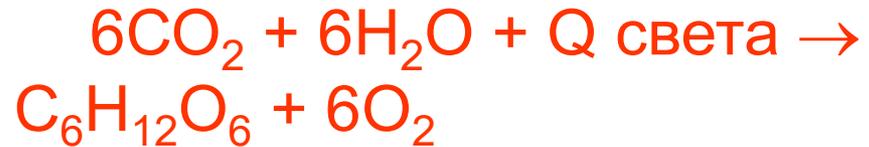
Инфракрасная часть солнечного спектра (тепловые лучи) с длиной волны более 750 нм вызывает нагревание предметов, особенно важна эта часть спектра для животных с непостоянной температурой тела — **пойкилотермных**.

Количество энергии, которое несет свет обратно пропорционально длине волны, то есть меньше всего энергии несут инфракрасные лучи.

Световая фаза фотосинтеза

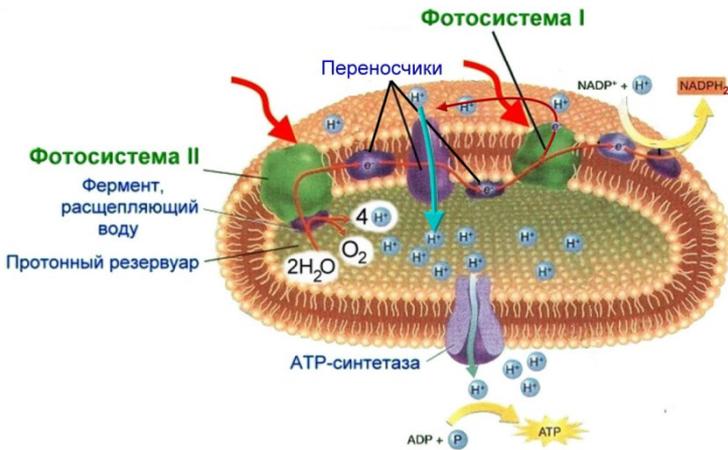


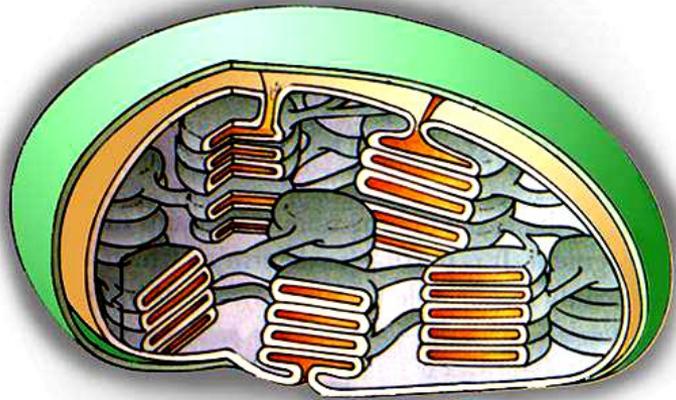
Фотосинтез — процесс образования органических веществ из углекислого газа и воды за счет энергии света, при этом выделяется кислород.



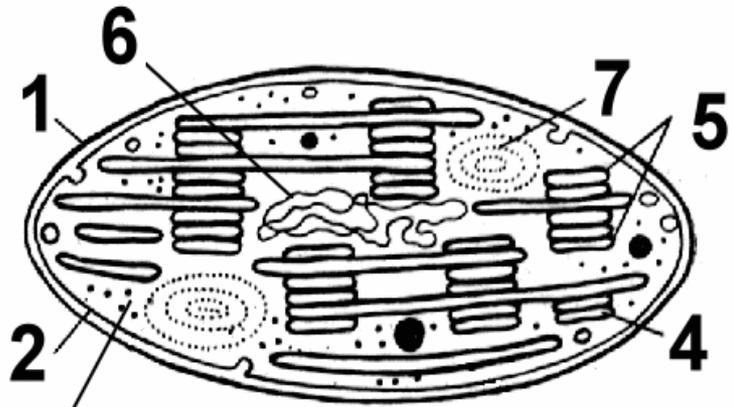
Главным органом фотосинтеза является лист, в клетках которого имеются специализированные органоиды, ответственные за фотосинтез — **хлоропласты**.

В процессе фотосинтеза различают две фазы: **световую** и **темновую**.



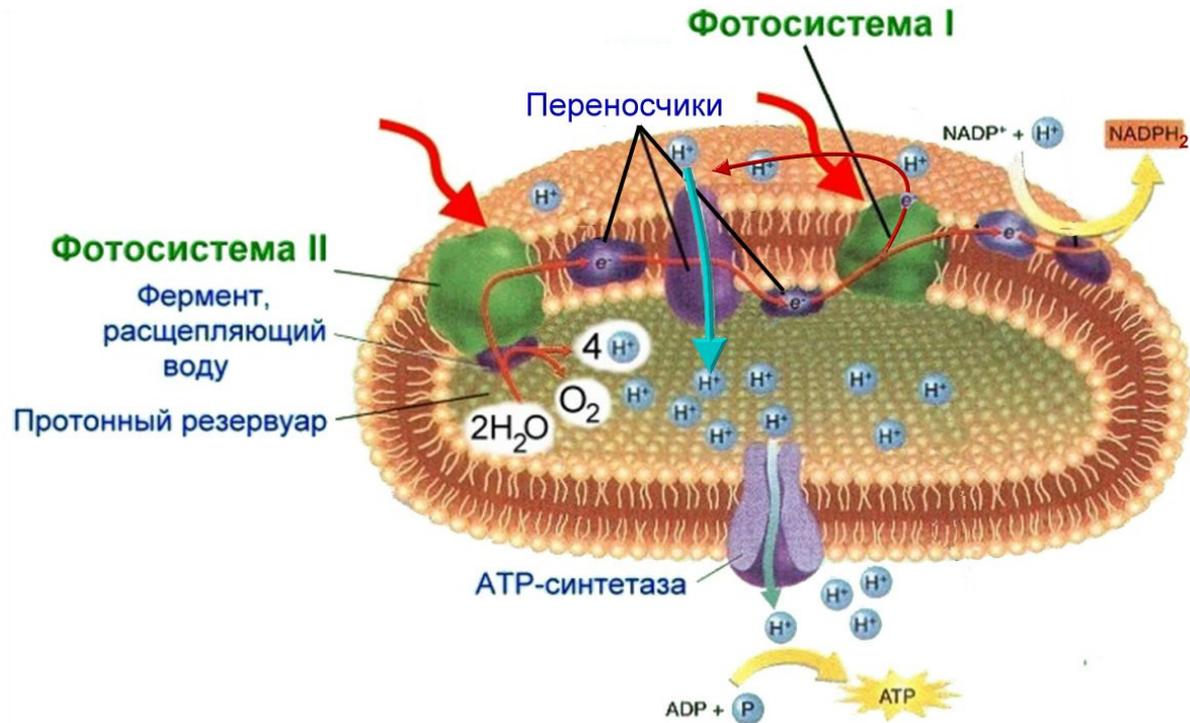


- 1 – наружная мембрана
- 2 – внутренняя мембрана
- 3 – строма с рибосомами 70-S
- 4 – тилакоид
- 5 – грана
- 6 – кольцевая ДНК
- 7 – зерно первичного крахмала



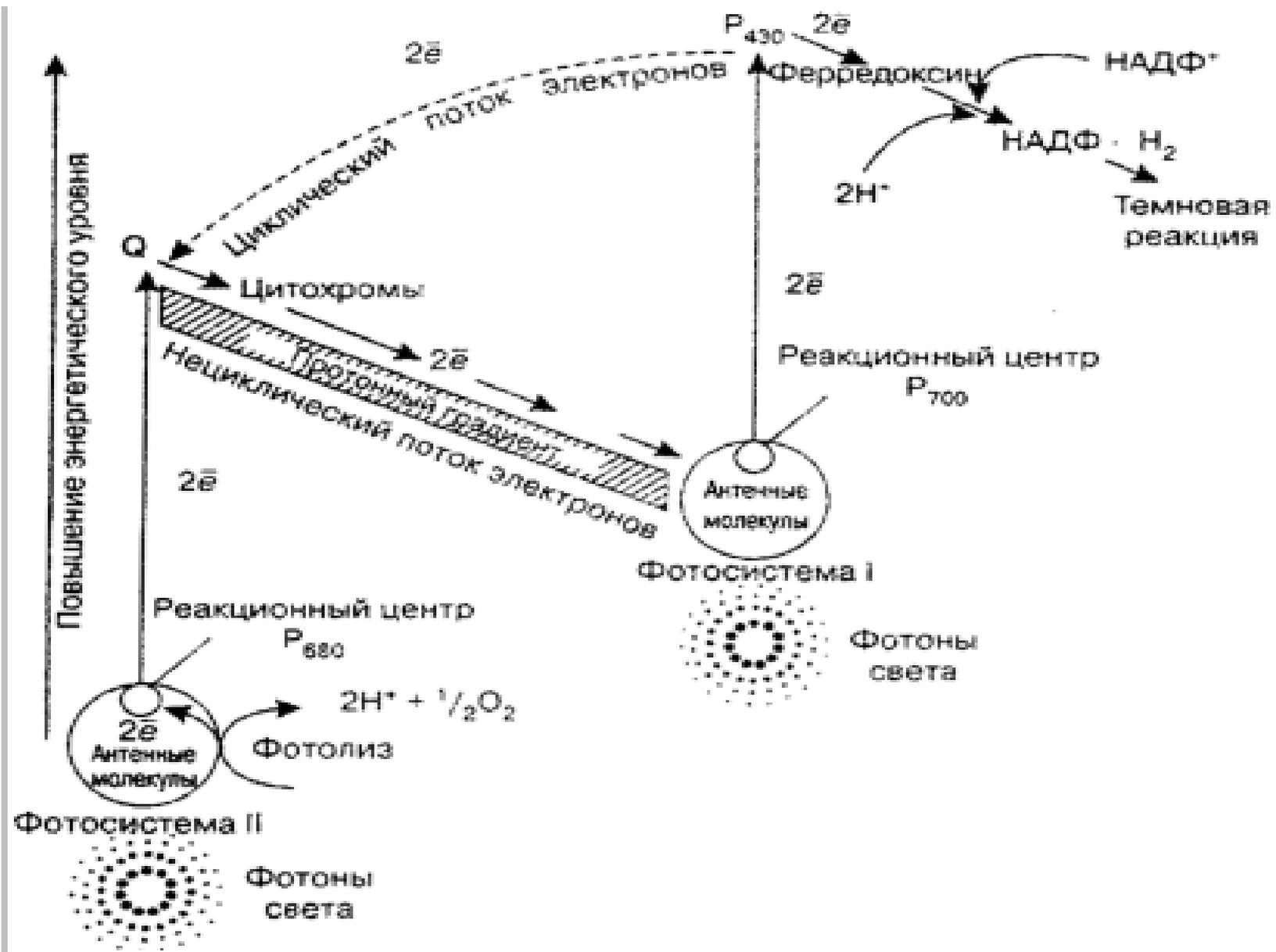
Хлоропласт

Световая фаза фотосинтеза



Молекулы хлорофилла в мембранах тилакоидов организованы в *фотосистемы*

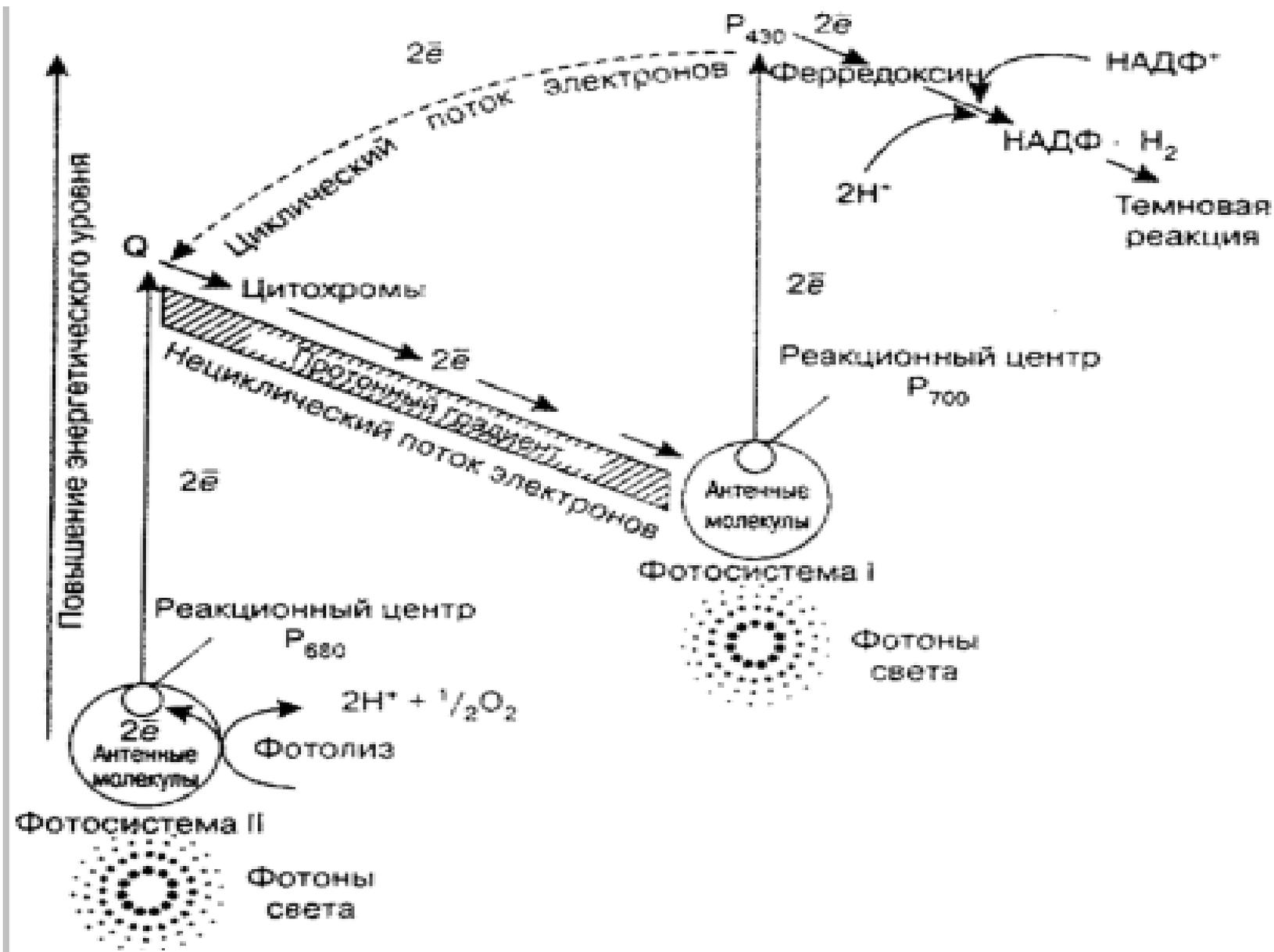
Световая фаза фотосинтеза



Все молекулы пигментов улавливают энергию солнечного света и передают ее на молекулы реакционного центра P_{680} , при этом $2e^-$ переходят на более высокий энергетический уровень и улавливаются акцептором Q. От акцептора начинается электронный поток, в котором электроны «спускаются» по электронно-транспортной цепи к фотосистеме I. Компоненты этой цепи — цитохромы (белки, содержащие железо и серу), хиноны (фенольные соединения) и пластоцианин (белок, содержащий медь). При этом происходит **фотофосфорилирование**, то есть синтез из АДФ и остатка фосфорной кислоты молекулы АТФ.

Молекула P_{680} , потерявшая свои электроны, восстанавливается за счет электронов донора, которым является вода. Происходит **фотолиз** — светозависимое расщепление воды. Ферменты, ответственные за фотолиз воды, располагаются на внутренней стороне мембраны тилакоидов. Фотолиз воды участвует в создании градиента протонов через мембрану, где высокая концентрация протонов оказывается во внутреннем пространстве тилакоидов. Протонный градиент способствует синтезу АТФ.

Световая фаза фотосинтеза



В фотосистеме I энергия света от антенных пигментов поступает в реакционный центр **P₇₀₀**. Возбужденные электроны передаются на электронный акцептор **P₄₃₀** (белок, содержащий железо и серу). **P₄₃₀** передает свои электроны на другой железосодержащий белок — **ферредоксин**, а последний **на кофермент НАДФ+** который восстанавливается до **НАДФН₂**. Молекула **P700** в ходе процесса окисляется, но затем **восстанавливает потерянные электроны за счет электронов, поступающих по электронно-транспортной цепи от ФС-II.**

Однонаправленный поток называется *нециклическим потоком электронов*, а образование АТФ — *нециклическим фотофосфорилированием*.

ФС-I может работать независимо от ФС-II. Этот процесс называют циклическим потоком электронов. В ходе него не происходит фотолиз воды, выделение O₂ и образование НАДФН₂, однако образуется АТФ. Так как синтез АТФ связан с *циклическим потоком электронов*, его называют *циклическим фотофосфорилированием*. У эукариотических клеток он осуществляется редко, однако у фотосинтезирующих бактерий лежит в основе процессов анаэробного фотосинтеза.

Световая фаза фотосинтеза

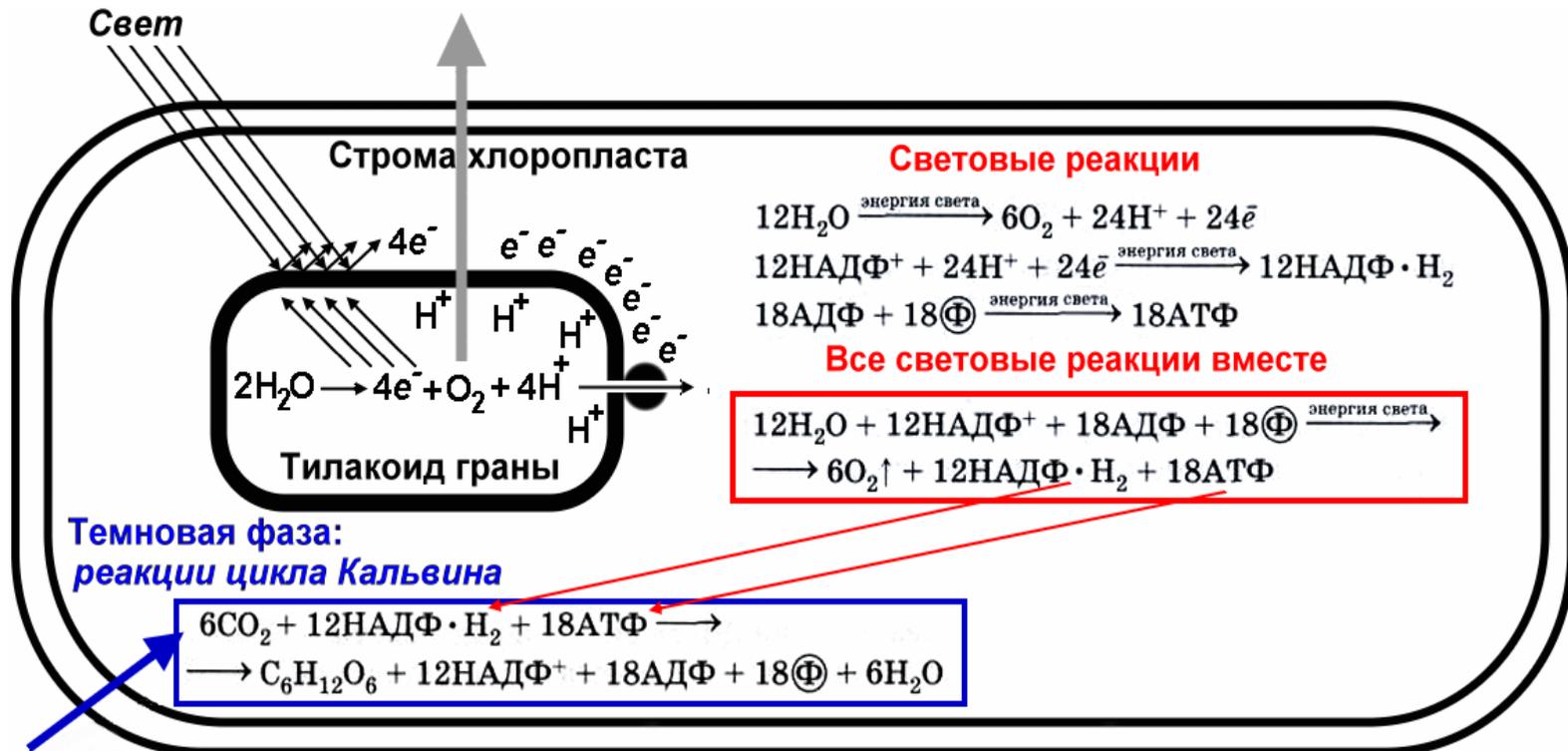
Суммарные уравнения и частные реакции фотосинтеза

Общая реакция фотосинтеза	$12\text{H}_2\text{O} + 6\text{CO}_2 \xrightarrow{\text{энергия света}} \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
Фотолиз воды	$12\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{энергия света}} 6\text{O}_2 + 24\text{H}^+ + 24\text{e}^-$
Образование восстановителя	$12\text{НАДФ}^+ + 24\text{H}^+ + 24\text{e}^- \xrightarrow{\text{энергия света}} 12\text{НАДФ} \cdot \text{H}_2$
Фото-фосфорилирование	$18\text{АДФ} + 18\text{Ⓢ} \xrightarrow{\text{энергия света}} 18\text{АТФ}$
Все световые реакции вместе	$12\text{H}_2\text{O} + 12\text{НАДФ}^+ + 18\text{АДФ} + 18\text{Ⓢ} \xrightarrow{\text{энергия света}} 6\text{O}_2\uparrow + 12\text{НАДФ} \cdot \text{H}_2 + 18\text{АТФ}$

Таким образом, *конечными соединениями световой фазы* являются: **АТФ, восстановленный НАДФН₂, O₂**.

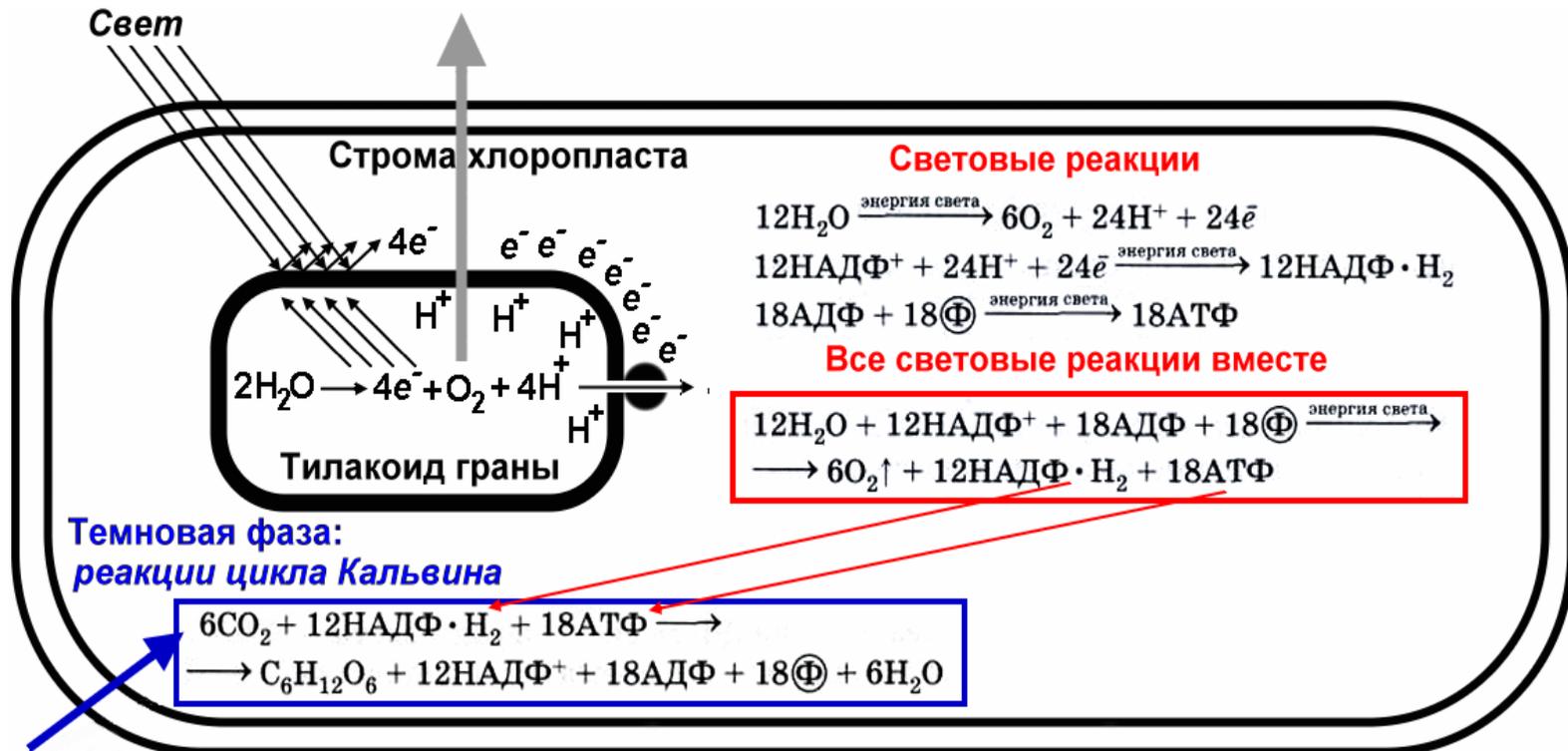
Свободный кислород поступает в атмосферу, АТФ и НАДФН₂ транспортируются в строму хлоропласта и участвуют в процессах темновой фазы.

Темновая фаза фотосинтеза



Темновая фаза протекает в другое время и в другом месте — в **строме** хлоропласта. Для ее реакций не нужна энергия света. Происходит фиксация углекислого газа, содержащегося в воздухе, причем акцептором углекислого газа является пятиуглеродный сахар **рибулозобисфосфат**.

Темновая фаза фотосинтеза



Мелвин Кальвин, лауреат Нобелевской премии, показал, как происходит образование углеводов в темновую фазу фотосинтеза. Происходит поглощение CO_2 и карбоксилирование пятиуглеродного сахара **рибулозобисфосфата** с образованием 6-углеродного соединения. Затем происходит **цикл реакций Кальвина**, в которых через ряд промежуточных продуктов происходит образование глюкозы.

Цикл Кальвина



Одна молекула РБФ соединяется с молекулой CO_2 с образованием *шестиуглеродной молекулы* [C_6], которая непрочна и быстро распадается на две трехуглеродные молекулы *фосфоглицериновой кислоты*, ФГК (C_3). Затем происходит цикл реакций, в которых через ряд промежуточных продуктов фосфоглицериновая кислота преобразуется в две молекулы *фосфоглицероальдегида* (ФГА), затем одна молекула ФГА идет на регенерацию РБФ, а вторая — на образование глюкозы. В этих реакциях используются энергия АТФ и НАДФН, образованных в световой фазе. Цикл этих реакций получил название «цикл Кальвина».

Суммарное уравнение синтеза глюкозы:



Кроме глюкозы, в процессе фотосинтеза из ФГК образуются другие мономеры сложных органических соединений — аминокислоты, глицерин, жирные кислоты, нуклеотиды.

Факторы, влияющие на фотосинтез

Свет — скорость фотосинтеза прямо пропорциональна интенсивности света; при повышении интенсивности скорость фотосинтеза замедляется, так как разрушаются молекулы хлорофилла. **Время**: чем больше период освещенности, тем дольше продолжается фотосинтез.

Концентрация углекислого газа (в норме в атмосфере содержится 0,03-0,04%); при концентрации CO_2 до 0,1 % повышается скорость темновых реакций фотосинтеза.

Вода — субстрат фотосинтеза; при уменьшении содержания воды закрываются устьица, и CO_2 не может диффундировать.

Температура — оптимальная температура для фотосинтеза $+25\text{ }^\circ\text{C}$ (для растений средней полосы); снижение приводит к замедлению работы ферментов.

Достаточная концентрация хлорофилла.

Необходимо достаточное минеральное питание (Mn, Fe, Mg, N и др.).

Хemosинтез. Хемоавтотрофный тип питания



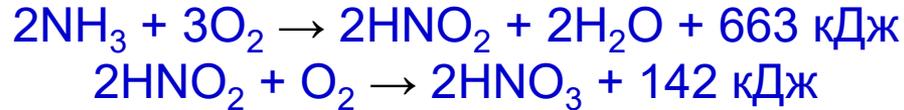
С.Н.Виноградский
1856 - 1953

Кроме фотосинтеза, существует еще одна форма автотрофной ассимиляции — хemosинтез, наблюдаемый у некоторых бактерий. Такие бактерии называются *хemosинтетиками*.

Хemosинтез — это способность хemosинтетиков при окислении неорганических веществ использовать выделившуюся энергию для образования органических веществ, идущих на построение клеток своего тела. Хemosинтетика, в отличие от фотоавтотрофов, используют в процессе синтеза не солнечный свет, а энергию экзотермических реакций.

Хемоавтотрофный тип питания

Нитрифицирующие бактерии способны окислять аммиак, образующийся при гниении органических остатков, сначала до азотистой, а затем до азотной кислоты:

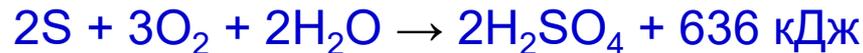


Азотная кислота, реагируя с минеральными соединениями почвы, образует нитраты, которые хорошо усваиваются растениями.

Бесцветные серобактерии окисляют сероводород и накапливают в своих клетках серу:



При недостатке сероводорода бактерии производят дальнейшее окисление серы до серной кислоты:



Железобактерии окисляют двухвалентное железо до трехвалентного:



Водородные бактерии используют энергию, выделяющуюся при окислении молекулярного водорода:



«Энергетический обмен»

Энергетический обмен. Гликолиз

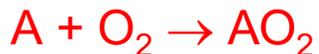
Обмен веществ (метаболизм) = ассимиляции + диссимиляции

Органические вещества пищи являются основным источником не только *материи*, но и *энергии* для жизнедеятельности клеток организма.

При образовании сложных органических молекул была затрачена энергия, потенциально она находится в форме образованных химических связей.

В результате реакций энергетического обмена происходит окисление сложных молекул до более простых и разрушение химических связей, при этом происходит высвобождение энергии.

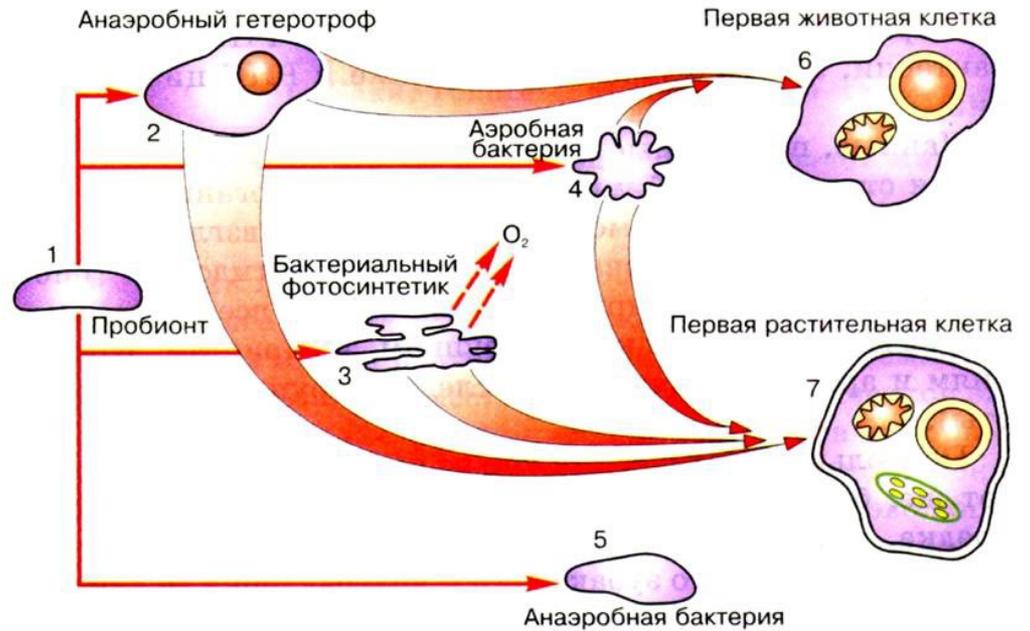
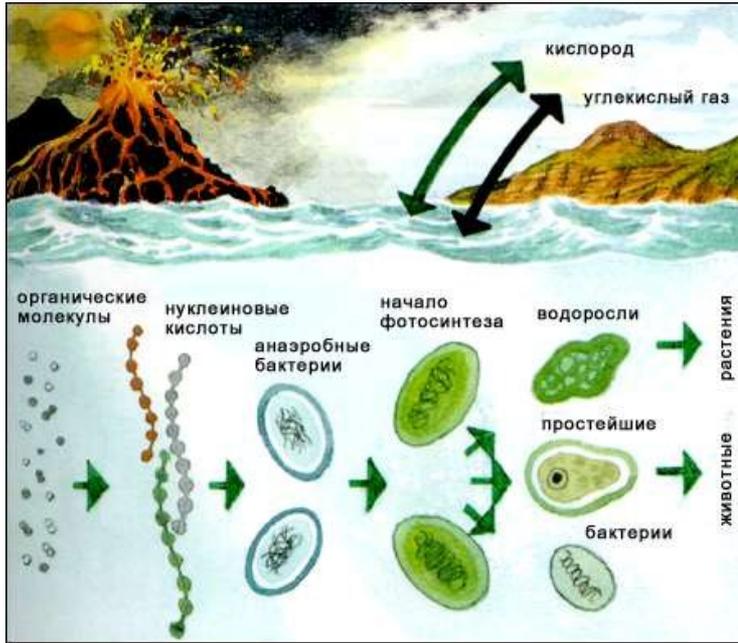
Биологическое окисление в клетках происходит *с участием O₂*:



и без его участия, *за счет дегидрирования* или *переноса электронов* от одного вещества к другому:



Энергетический обмен. Гликолиз



Древнейшие организмы, как полагают, существовали в первичной бескислородной атмосфере Земли и были анаэробными и гетеротрофами. Обеспечение клеток энергией шло за счёт процессов типа гликолиза.

Энергетический обмен.



Процесс энергетического обмена можно разделить на три этапа:

на первом этапе происходит пищеварение, то есть **сложные органические молекулы расщепляются до мономеров**;

на втором происходит **бескислородное окисление этих мономеров, субстратное фосфорилирование**;

последнем этапе происходит **окисление с участием кислорода в митохондриях**.

Энергетический обмен

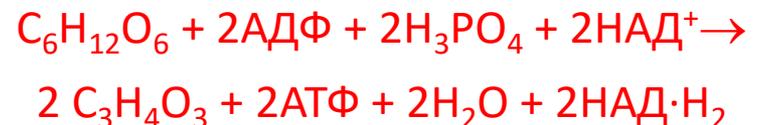
	I подготовительный этап
Где происходит расщепление?	В органах пищеварения. В лизосоме в клетке.
Чем активизируется расщепление?	Ферментами пищеварительных соков.
До каких веществ расщепляются соединения клетки?	Белки → аминокислоты. Жиры → глицерин + жирные кислоты. Углеводы → глюкоза.
Сколько выделяется энергии?	Мало, рассеивается в виде тепла.
Сколько синтезируется энергии в виде АТФ?	—

Первый этап называется **подготовительным** и заключается в распаде крупных органических молекул до более простых: полисахаридов — до моносахаридов, липидов — до глицерина и жирных кислот, белков — до аминокислот. Внутри клетки распад органических веществ происходит в лизосомах под действием целого ряда ферментов. В ходе этих реакций энергии выделяется мало, при этом она не запасается в виде АТФ, а рассеивается в виде тепла.

Энергетический обмен. Гликолиз

Гликолиз — это многоступенчатый процесс бескислородного расщепления молекулы глюкозы, содержащей 6 атомов углерода ($C_6H_{12}O_6$), до двух молекул трехуглеродной пировиноградной кислоты, или ПВК ($C_3H_4O_3$). Реакции гликолиза катализируются многими ферментами, и протекают они в цитоплазме клеток.

В ходе гликолиза при расщеплении глюкозы выделяется 200 кДж энергии, но 60% (120 кДж) рассеивается в виде тепла. Оставшихся 40% (80 кДж) энергии оказывается достаточно для синтеза из двух молекул АДФ двух молекул АТФ.



	I подготовительный этап	II бескислородный этап
Где происходит расщепление?	В органах пищеварения. В лизосоме в клетке.	Внутри клетки.
Чем активизируется расщепление?	Ферментами пищеварительных соков.	Ферментами мембран клеток.
До каких веществ расщепляются соединения клетки?	Белки → аминокислоты. Жиры → глицерин + жирные кислоты. Углеводы → глюкоза.	Глюкоза → 2 молекулы молочной кислоты + энергия.
Сколько выделяется энергии?	Мало, рассеивается в виде тепла.	За счет 40% - синтезируется АТФ, 60% - рассеивается в виде тепла.
Сколько синтезируется энергии в виде АТФ?	—	2 молекулы АТФ.

Энергетический обмен. Гликолиз



Дальнейшая судьба ПВК зависит от присутствия O_2 в клетке. Если O_2 нет, у дрожжей и растений происходит *спиртовое брожение*, при котором сначала происходит образование уксусного альдегида, а затем этилового спирта:



У животных и некоторых бактерий при недостатке O_2 происходит *молочнокислое брожение* с образованием молочной кислоты:

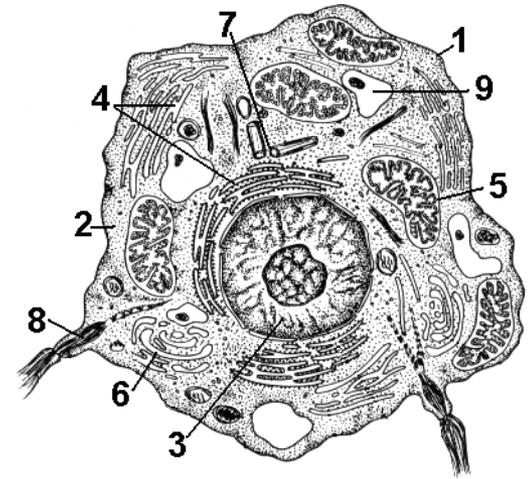
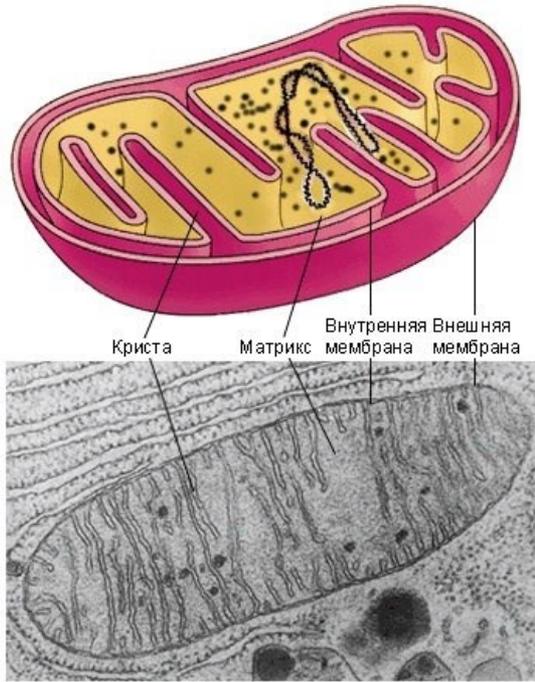
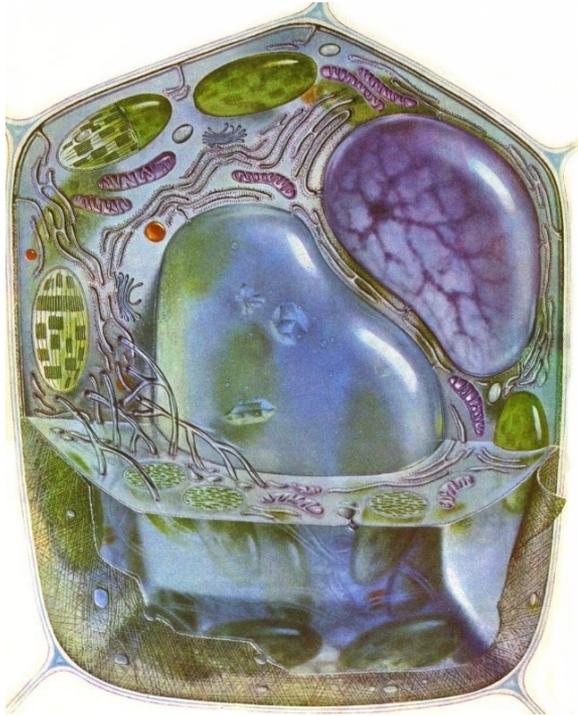


Кислородное окисление, дыхание

	I подготовительный этап	II бескислородный этап	III кислородный этап
Где происходит расщепление?	В органах пищеварения. В лизосоме в клетке.	Внутри клетки.	В митохондриях.
Чем активизируется расщепление?	Ферментами пищеварительных соков.	Ферментами мембран клеток.	Ферментами митохондрий.
До каких веществ расщепляются соединения клетки?	Белки → аминокислоты. Жиры → глицерин + жирные кислоты. Углеводы → глюкоза.	Глюкоза → 2 молекулы молочной кислоты + энергия.	Пировиноградная кислота до CO_2 и H_2O
Сколько выделяется энергии?	Мало, рассеивается в виде тепла.	За счет 40% - синтезируется АТФ, 60% - рассеивается в виде тепла.	Более 55% энергии запасается в виде АТФ.
Сколько синтезируется энергии в виде АТФ?	—————	2 молекулы АТФ.	36 молекул АТФ.

Этапы энергетического обмена веществ.

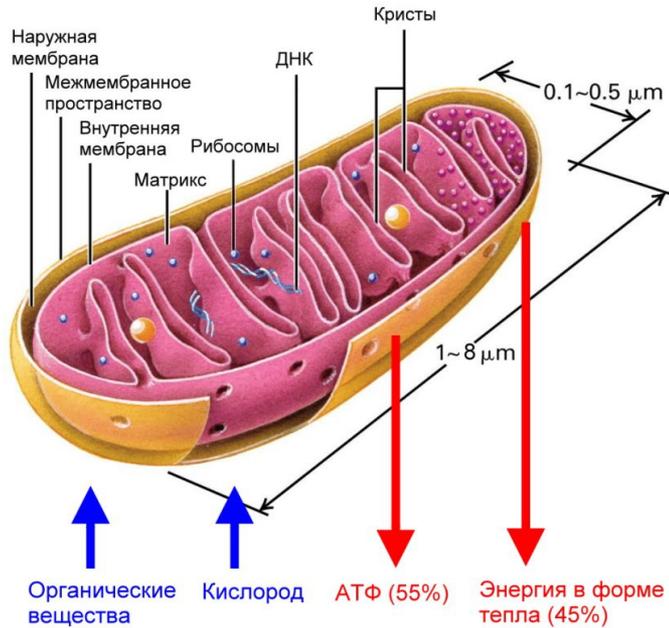
Кислородное окисление, дыхание



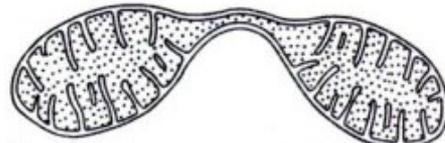
Кислородное окисление, дыхание

Третий этап энергетического обмена — **кислородное окисление**, или **дыхание**, происходит в митохондриях.

- Как устроены митохондрии?
- Каковы функции митохондрий?
- Каково происхождение митохондрий?
- Как образуются новые митохондрии?



Отшнуровывание митохондрий



Деление митохондрии

Анаэробная эукариотическая клетка



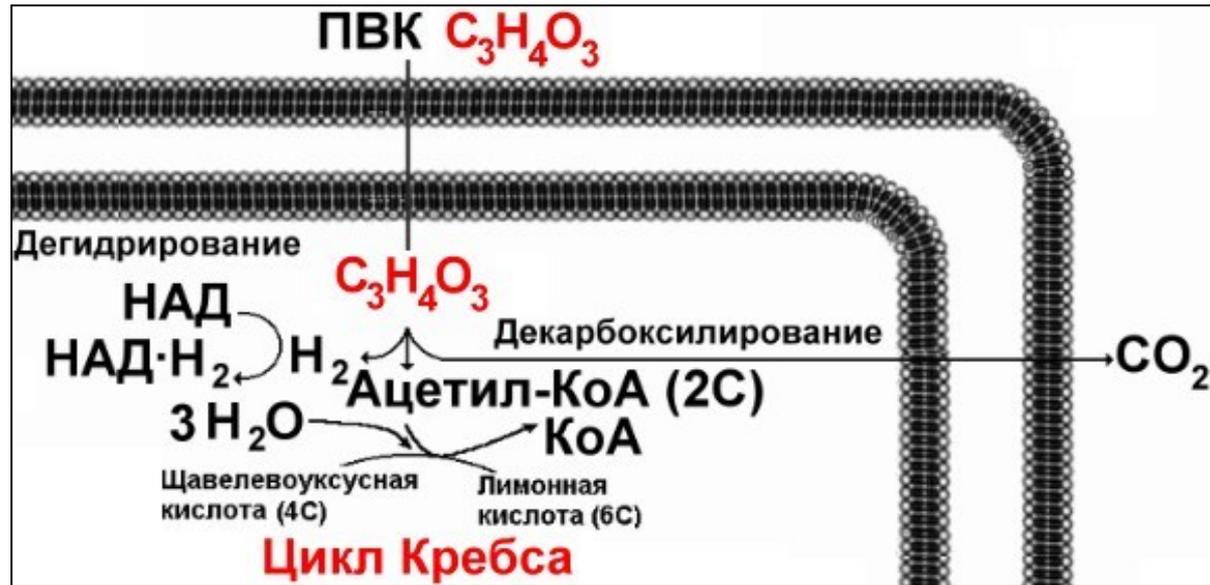
Кислородное окисление, дыхание

	III кислородный этап
Где происходит расщепление?	В митохондриях.
Чем активизируется расщепление?	Ферментами митохондрий.
До каких веществ расщепляются соединения клетки?	Пировиноградная кислота до CO_2 и H_2O
Сколько выделяется энергии?	Более 55% энергии запасается в виде АТФ.
Сколько синтезируется энергии в виде АТФ?	36 молекул АТФ.

В результате ферментативного **бескислородного** расщепления **глюкоза распадается** не до конечных продуктов (CO_2 и H_2O), а **до соединений, которые еще богаты энергией** и, окисляясь далее, могут дать ее в больших количествах.

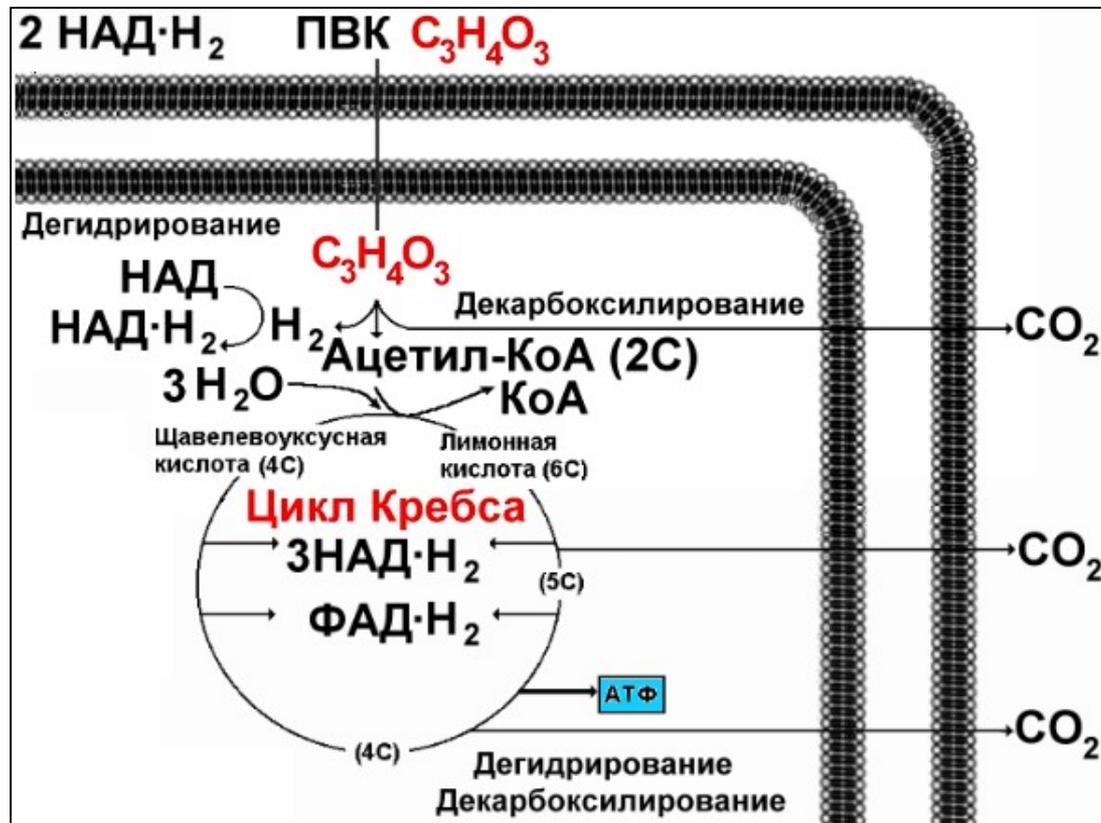
Поэтому в аэробных организмах после гликолиза следует завершающий этап энергетического обмена — **полное кислородное расщепление, или клеточное дыхание**. В процессе этого третьего этапа органические вещества, образовавшиеся в ходе второго этапа при бескислородном расщеплении и содержащие большие запасы химической энергии, окисляются до конечных продуктов CO_2 и H_2O .

Кислородное окисление, дыхание



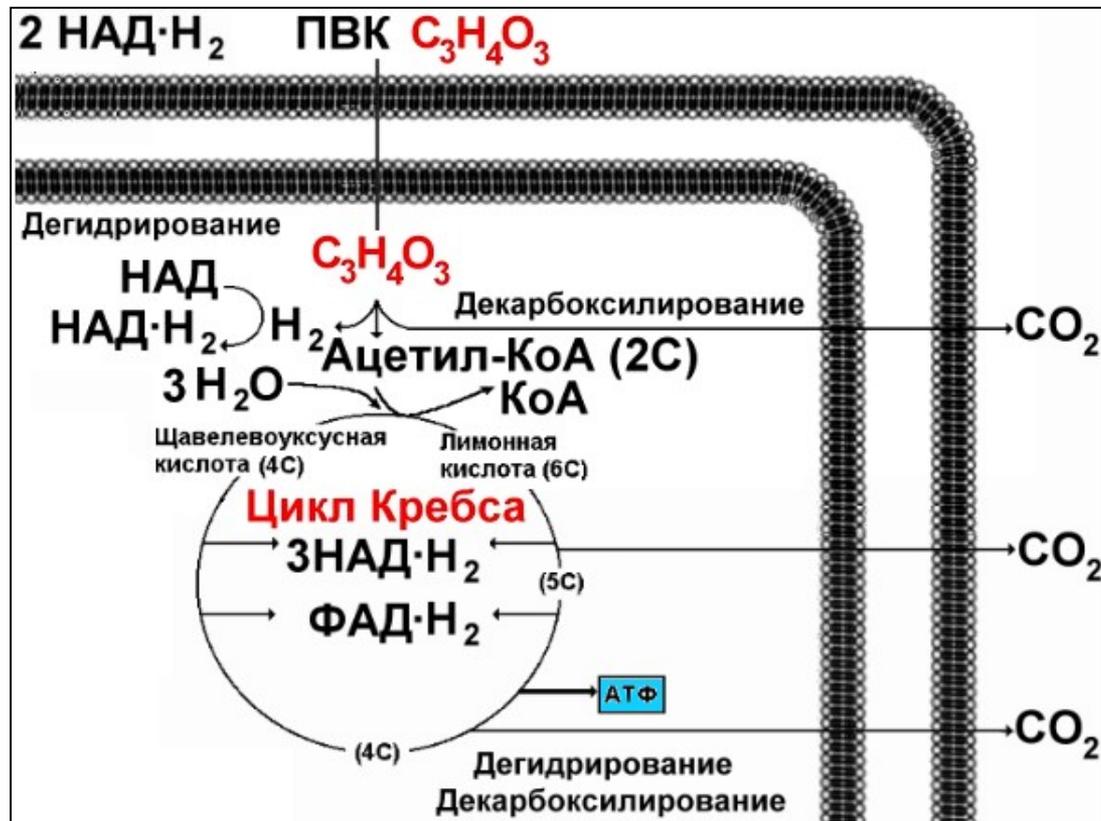
На первой стадии 3 этапа пировиноградная кислота проникает в митохондрии, где происходит ее **дегидрирование** (отщепление водорода) и **декарбоксилирование** (отщепление углекислого газа) с образованием **двууглеродной ацетильной группы**, которая вступает в цикл реакций, получивших название реакций цикла Кребса.

Кислородное окисление, дыхание



В цикле Кребса происходит дальнейшее окисление, связанное с **дегидрированием и декарбосилированием**. В результате на каждую разрушенную моль ПВК из митохондрии удаляется 3 моль CO_2 , образуется **5 пар атомов водорода**, связанных с переносчиками ($4 НАДН_2$, $ФАДН_2$), а также **моль АТФ**.

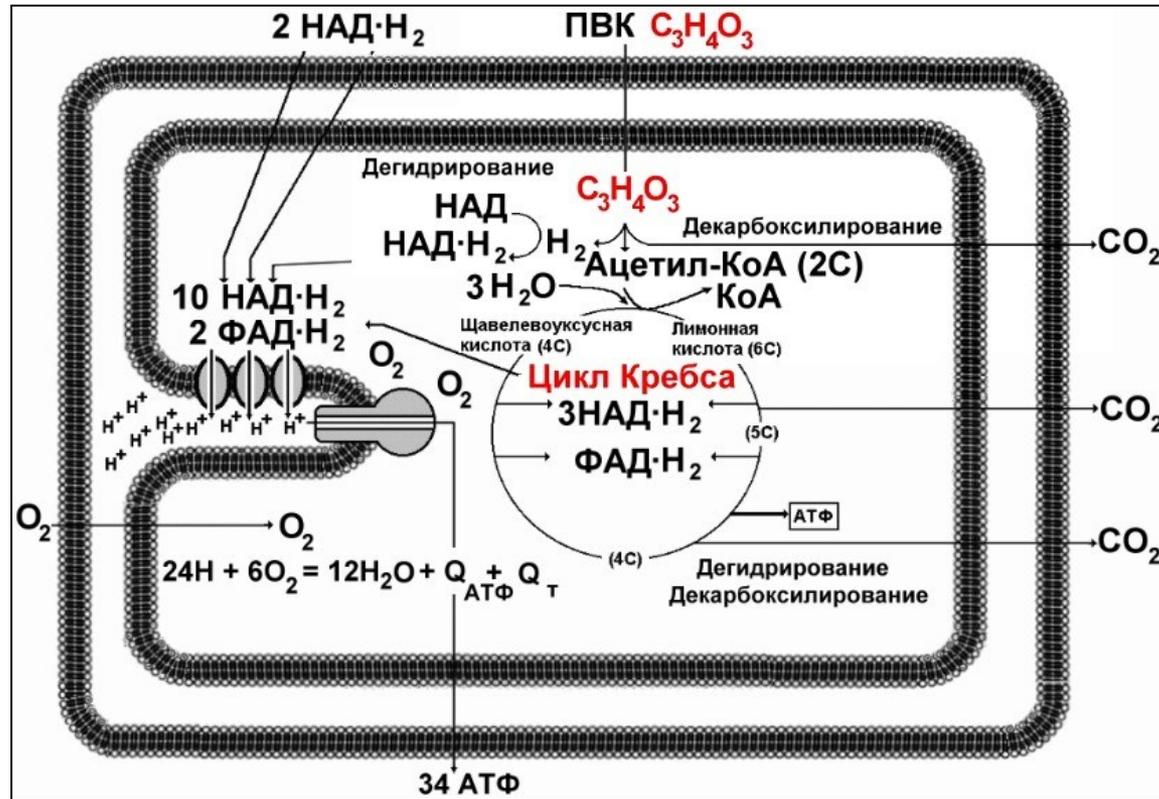
Кислородное окисление, дыхание



Суммарная реакция гликолиза и разрушения ПВК в митохондриях до водорода и углекислого газа выглядит следующим образом:

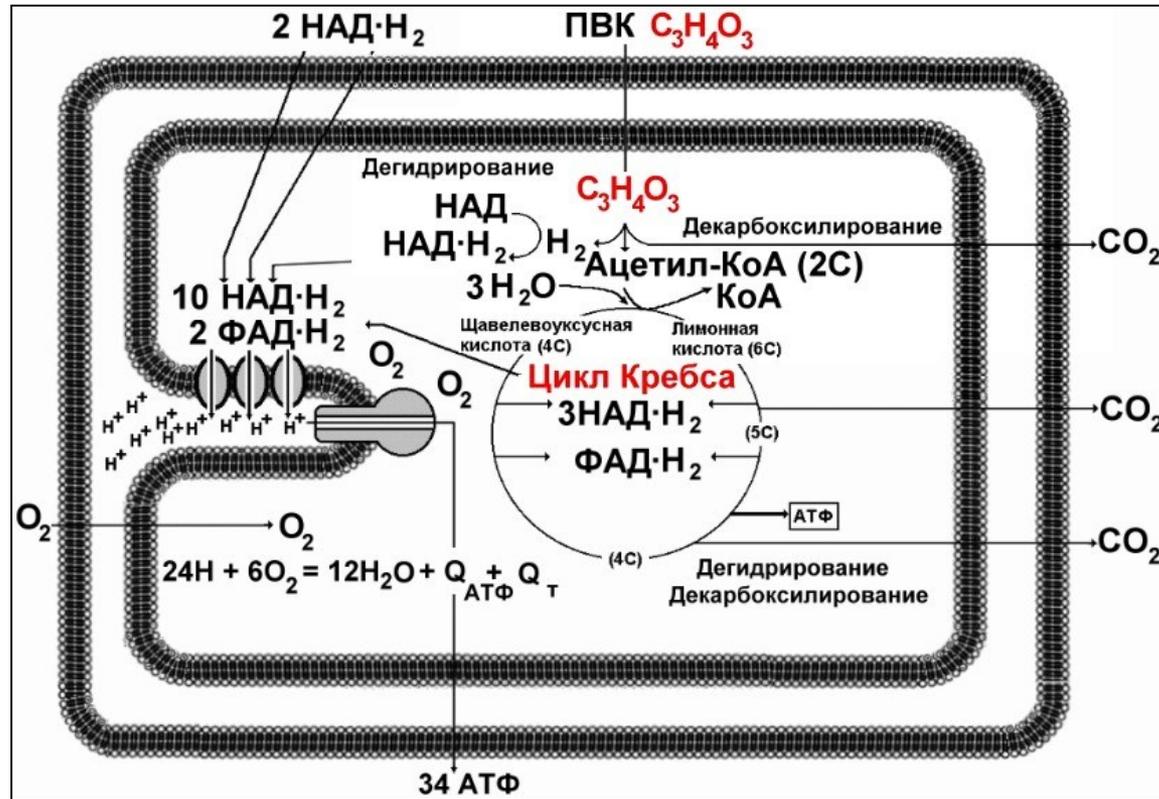


Кислородное окисление, дыхание



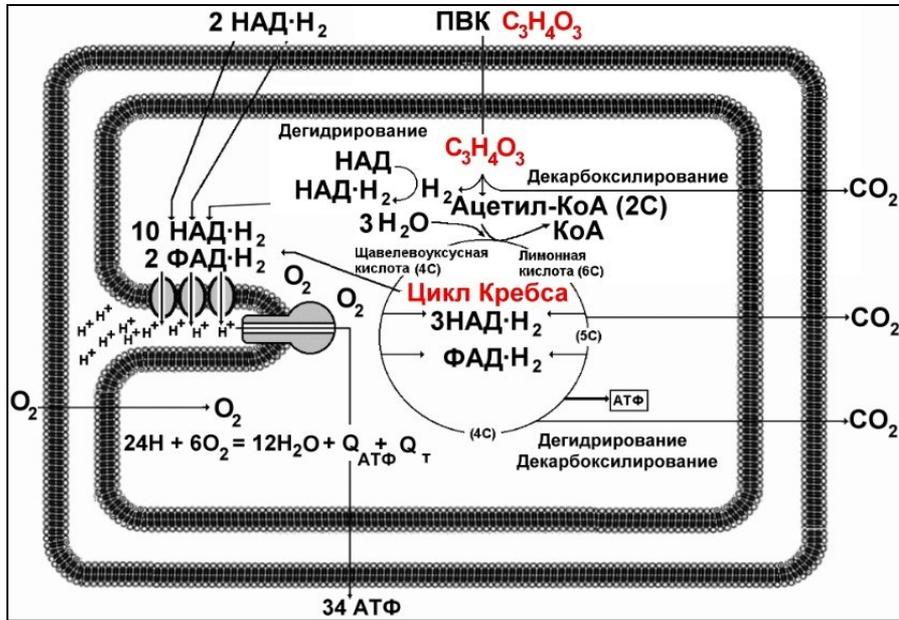
Затем происходит **окисление пар атомов водорода с участием O_2 до H_2O с одновременным фосфорилированием АДФ до АТФ**. Этот процесс называется **окислительным фосфорилированием** и происходит на внутренней мембране митохондрий. Водород передается по трем большим ферментным комплексам дыхательной цепи (**флавопротеин, кофермент Q, цитохромы**).

Кислородное окисление, дыхание



У водорода отбираются электроны, а протоны закачиваются в межмембранное пространство митохондрий, в «*протонный резервуар*». Внутренняя мембрана непроницаема для ионов водорода. Электроны передаются по ферментам дыхательной цепи на *цитохромоксидазу*.

Кислородное окисление, дыхание



Ферменты дыхательной цепи и АТФ-синтетаза на кристах:



Таким образом, в митохондрии образуется всего **36 АТФ** – 55%, 45% - рассеивается в форме тепла.

Кислородное окисление, дыхание

	I подготовительный этап	II бескислородный этап	III кислородный этап
Где происходит расщепление?	В органах пищеварения. В лизосоме в клетке.	Внутри клетки.	
Чем активизируется расщепление?	Ферментами пищеварительных соков.	Ферментами мембран клеток.	
До каких веществ расщепляются соединения клетки?	Белки → аминокислоты. Жиры → глицерин + жирные кислоты. Углеводы → глюкоза.	Глюкоза → 2 молекулы молочной кислоты + энергия.	
Сколько выделяется энергии?	Мало, рассеивается в виде тепла.	За счет 40% - синтезируется АТФ, 60% - рассеивается в виде тепла.	
Сколько синтезируется энергии в виде АТФ?	—————	2 молекулы АТФ.	

Различия между фотосинтезом и аэробным дыханием

Фотосинтез	Аэробное дыхание
Анаболический процесс, в результате которого из простых неорганических соединений синтезируются молекулы углеводов	Процесс диссимиляции, в результате которого молекулы углеводов расщепляются до простых неорганических соединений
Энергия АТФ накапливается и запасается в углеводах	Энергия запасается в виде АТФ
Кислород выделяется	Кислород расходуется
Углекислый газ и вода потребляются	Углекислый газ и вода выделяются
Происходит увеличение органической массы	Происходит уменьшение органической массы
У эукариот процесс протекает в хлоропластах	У эукариот процесс протекает в митохондриях
Происходит только в клетках, содержащих хлорофилл, на свету	Происходит во всех клетках в течение жизни непрерывно

Подведем итоги:

	I подготовительный этап	II бескислородный этап
Где происходит расщепление?		
Чем активизируется расщепление?		
До каких веществ расщепляются соединения клетки?		
Сколько выделяется энергии?		
Сколько синтезируется энергии в виде АТФ?		

Подведем итоги:

Что происходит с энергией, выделяющейся на подготовительном этапе энергообмена:

Рассеивается в форме тепла.

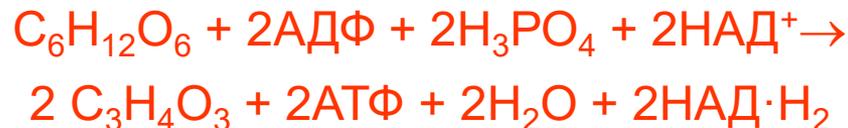
Где расположены ферменты бескислородного этапа энергообмена:

В цитоплазме клеток.

Сколько энергии образуется при гликолизе молекулы глюкозы:

При этом образуется 200 кДж энергии, 120 рассеивается в форме тепла, 80 кДж запасается в форме 2 молекул АТФ.

Какие продукты образуются при гликолизе молекулы глюкозы:



Что образуется в животных клетках в результате гликолиза при недостатке кислорода:



Что образуется в растительных клетках в результате гликолиза при недостатке кислорода:



Подведем итоги:

Каков КПД гликолиза?

Образуется 200 кДж энергии, 120 рассеивается в форме тепла, 80 кДж запасается в форме 2 молекул АТФ – 40%.

Как происходит биологическое окисление?

С участием O₂: A + O₂ → AO₂,

за счет дегидрирования: AH₂ + B → A + BH₂,

за счет потери электрона: Fe²⁺ → Fe³⁺ + e⁻.

Кем были первичные организмы Земли по типу питания?

Древнейшие организмы, как полагают, существовали в первичной бескислородной атмосфере Земли и были анаэробами и гетеротрофными организмами.

Подведем итоги:

Гликолиз:



При этом образуется 200 кДж энергии, 120 рассеивается в форме тепла, 80 кДж запасается в форме 2 моль АТФ

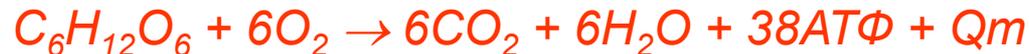
Суммарная реакция гликолиза и разрушения ПВК в митохондриях до водорода и углекислого газа выглядит следующим образом:



Ферменты дыхательной цепи и АТФ-синтетаза на кристах:



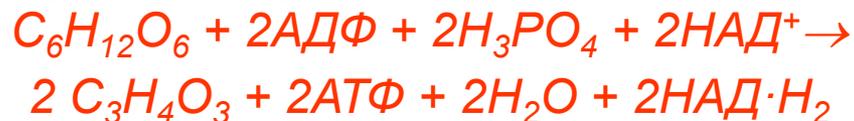
Суммарная реакция энергетического обмена выглядит так:



Если внутренняя мембрана повреждена, то окисление НАД·Н₂ продолжается, но не работает АТФ-синтетаза и образования АТФ не происходит, вся энергия выделяется в форме тепла.

Подведем итоги:

Сколько моль ПВК образуется при гликолизе молекулы глюкозы?

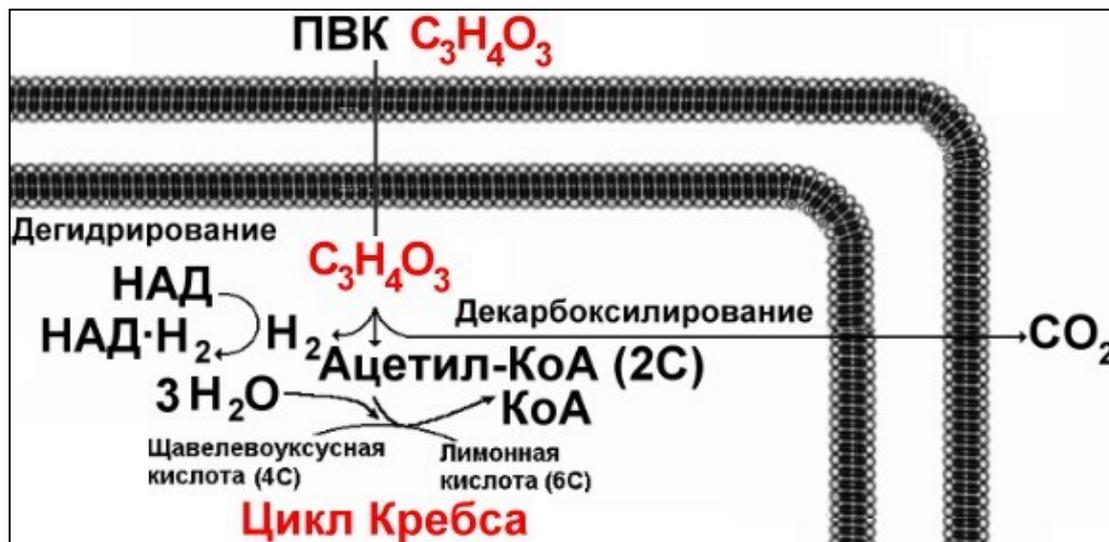


Сколько при этом образуется энергии? Сколько запасается в форме АТФ?

200 кДж энергии, 120 рассеивается в форме тепла, 80 кДж запасается в форме 2 молекул АТФ.

Что происходит с ПВК сразу после ее поступления в митохондрию?

Дегидрирование, декарбоксилирование и образование ацетил-КоА.



Подведем итоги:

Где происходят реакции третьего этапа энергетического обмена, кислородного окисления?

В митохондриях.

Что образуется при полном разрушении 2 молекул пировиноградной кислоты в митохондриях?



Какая часть энергии запасается в митохондриях в форме АТФ, какая часть – рассеивается в форме тепла?

55% - в форме АТФ, 45% - в форме тепла.

Сколько всего молекул АТФ образуется в реакциях энергетического обмена при полном разрушении молекулы глюкозы?

38 молекул, 2 – при гликолизе, 36 – в митохондриях.

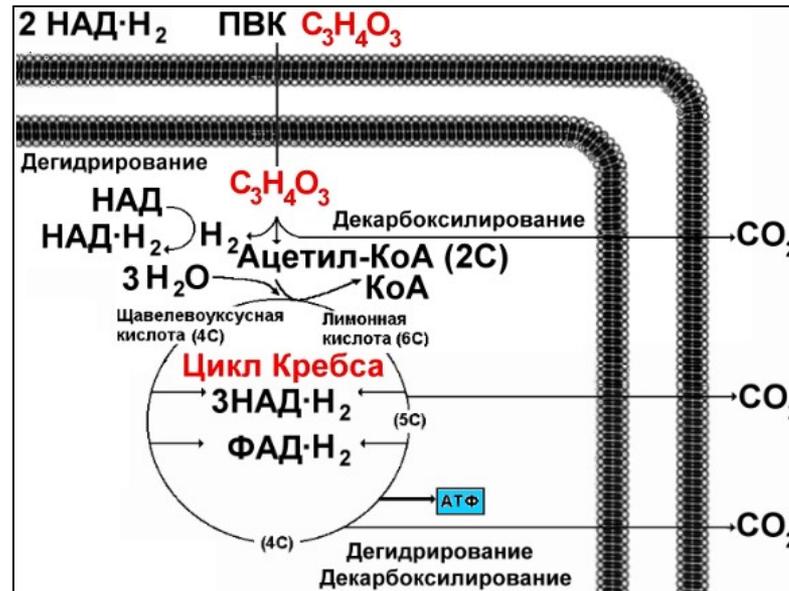
Какие вещества, кроме углеводов, могут использоваться в энергетическом обмене?

Липиды, белки, однако мономеры белков, т. е. аминокислоты, слишком нужны клетке для синтеза собственных белковых структур. Поэтому белки обычно представляют собой «неприкосновенный запас» клетки и редко расходуются для получения энергии .

Подведем итоги:

Что происходит в цикле Кребса?

Разрушение лимонной кислоты до щавелевоуксусной с образованием молекулы АТФ, 4 пары водорода захватываются переносчиками.

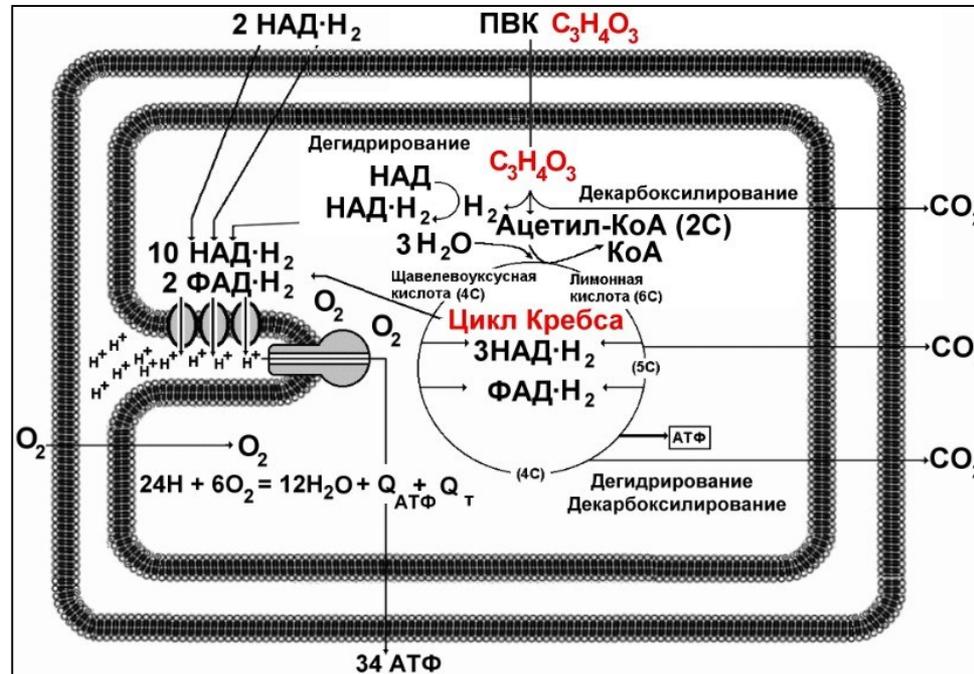


Как выглядит суммарная реакция гликолиза и разрушения ПВК в митохондриях до водорода и углекислого газа?



Подведем итоги:

Сколько АТФ образуется АТФ-синтетазой в расчете на 12 пар H^+ ?



Сколько всего АТФ образуется всего при полном окислении молекулы глюкозы:

