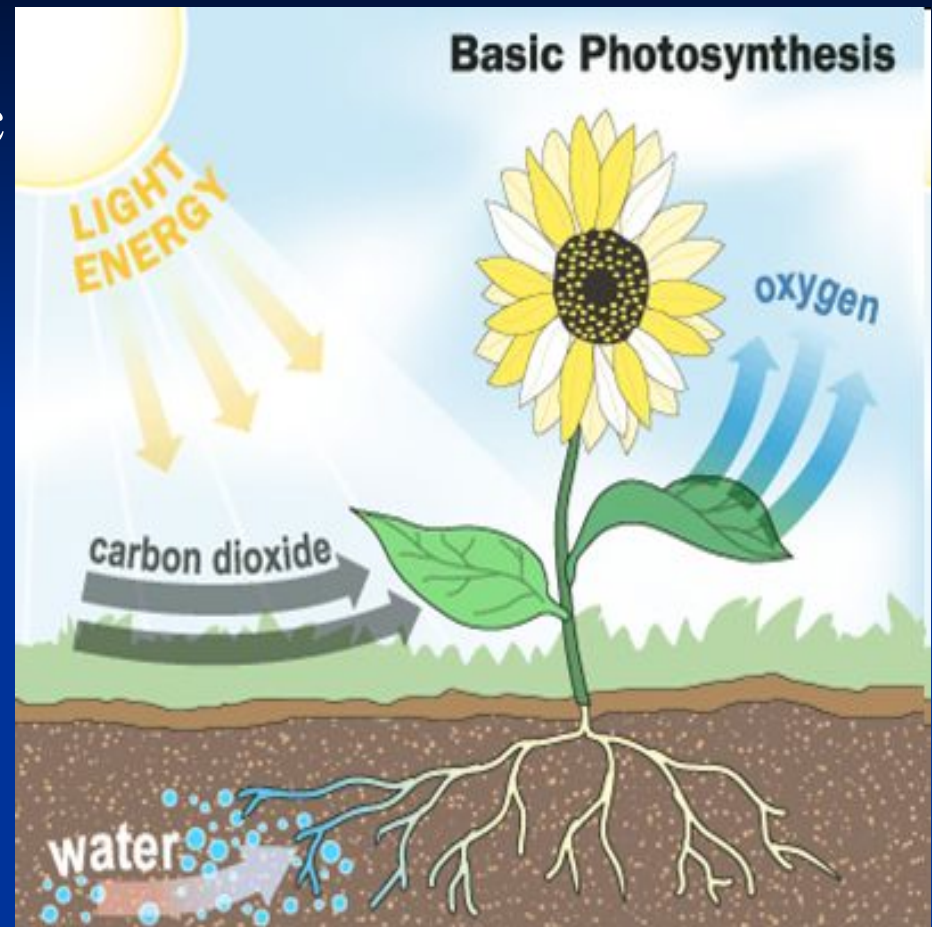




# Фотосинтез

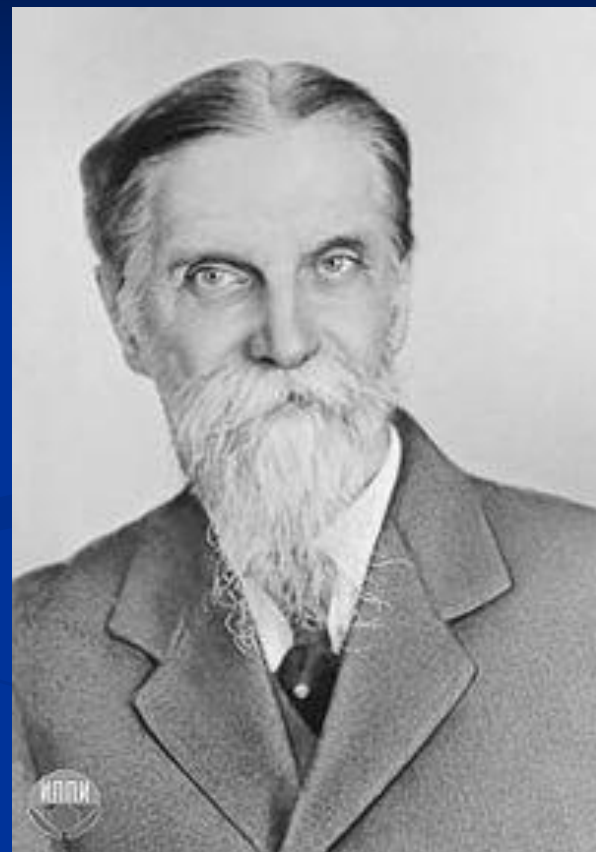
**Фотосинтез** – это процесс трансформации поглощенной организмом энергии света в химическую энергию органических (неорганических) соединений.

Главная роль - восстановление  $\text{CO}_2$  до уровня углеводов с использованием энергии света.



# Развитие учения о фотосинтезе

**Климент Аркадьевич Тимирязев** (22 мая (3 июня) 1843, Петербург— 28 апреля 1920, Москва) Научные труды Тимирязева, посвящены вопросу о разложении атмосферной углекислоты зелёными растениями под влиянием солнечной энергии. Изучение состава и оптических свойств зелёного пигмента растений (хлорофилла), его генезиса, физических и химических условий разложения углекислоты, определение составных частей солнечного луча, принимающих участие в этом явлении, изучение количественного отношения между поглощенной энергией и произведённой работой.

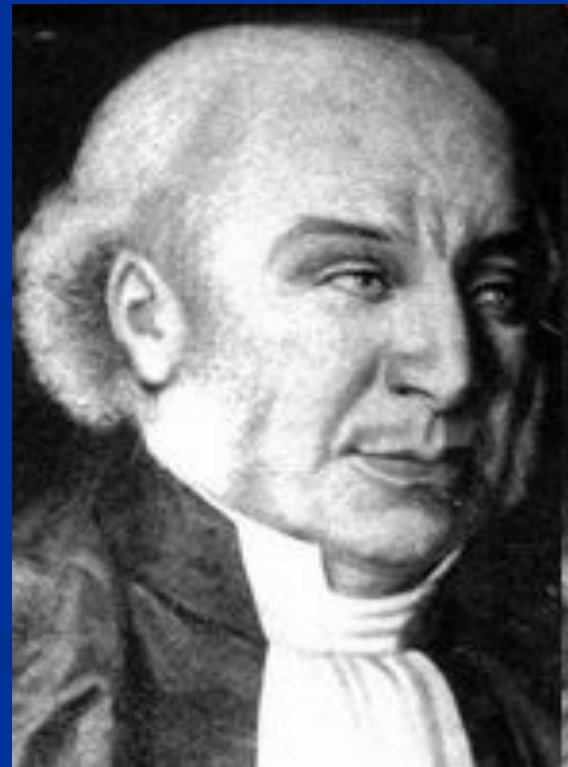
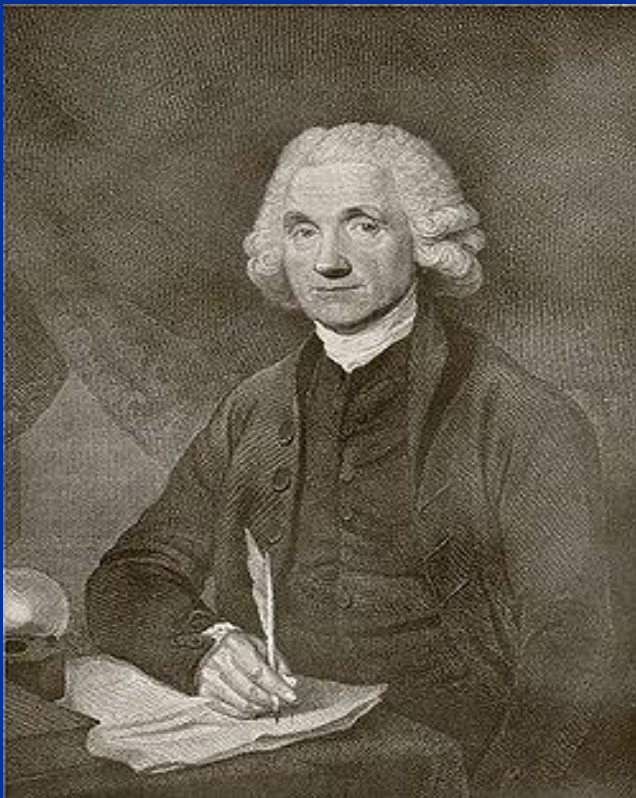


**Джозеф Пристли** (13 марта 1733—6 февраля 1804) — британский священник-диссентер, естествоиспытатель, философ, общественный деятель. Вошёл в историю прежде всего как выдающийся химик, открывший кислород и углекислый газ

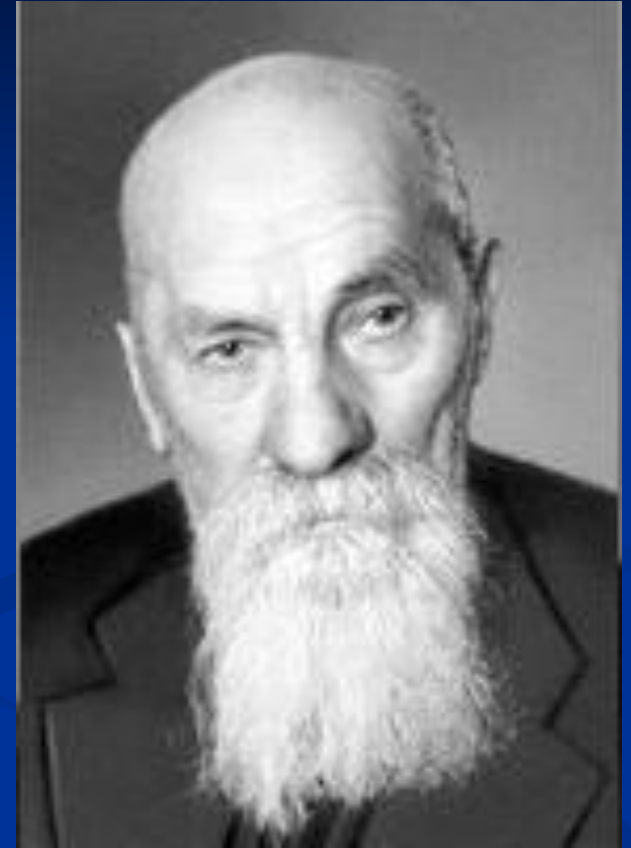


**Пьер Жозеф Пельтье** — (22 марта 1788 — 19 июля 1842) — французский химик и фармацевт, один из основателей химии алкалоидов.

В 1817 году, вместе с **Жозеф Бьенеме Каванту**, он выделил зелёный пигмент из листьев растений, который они назвали хлорофиллом.



**Алексей Николаевич Бах**  
(5 (17) марта 1857 — 13 мая, 1946) — советский биохимик и физиолог растений. Высказал мысль о том, что ассимиляция  $\text{CO}_2$  при фотосинтезе является сопряженным окислительно-восстановительным процессом, происходящим за счет водорода и гидроксила воды, причем кислород выделяется из воды через промежуточные перекисные соединения.



# Общее уравнение фотосинтеза

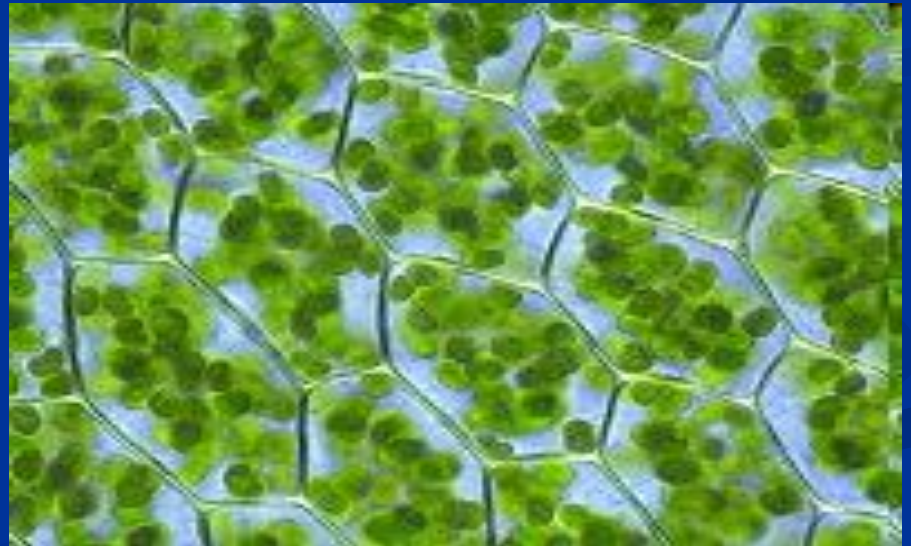


У высших растений фотосинтез осуществляется в специализированных клетках органоидов листьев – **хлоропластах.**

**Хлоропласты** – это округлые, или дискообразные тельца длиной 1-10 мкм, толщиной до 3 мкм. Содержание их в клетках от 20 до 100.

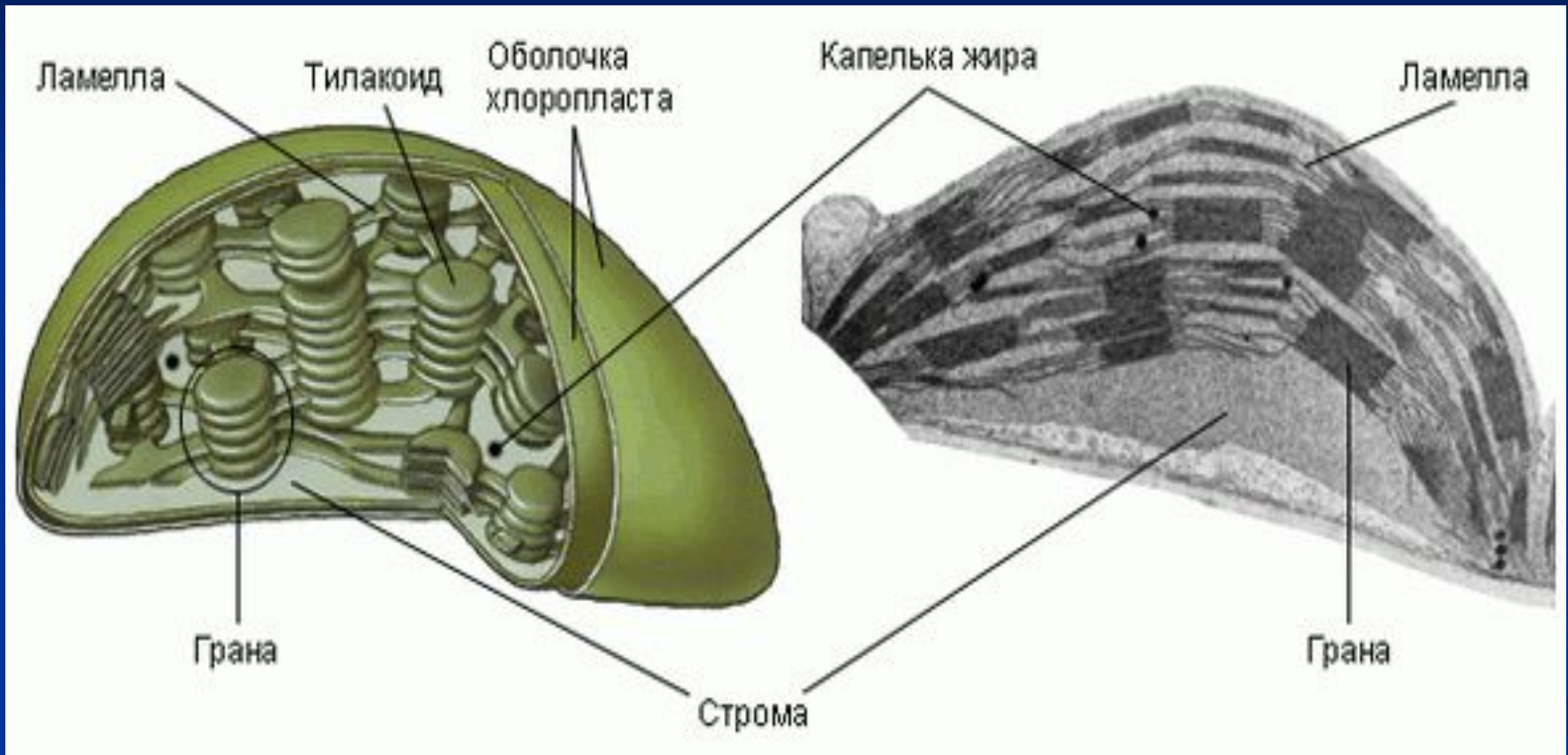
Химический состав (% на сухую массу):

- Белок - 35-55
- Липиды – 20-30
- Углеводы – 10
- РНК – 2-3
- ДНК – до 0,5
- Хлорофилл – 9
- Каротиноиды – 4,5





# Строение Хлоропласта



# Происхождение хлоропластов

Виды формирования хлоропластов:

- Деление
- Почкование
- Ядерный путь

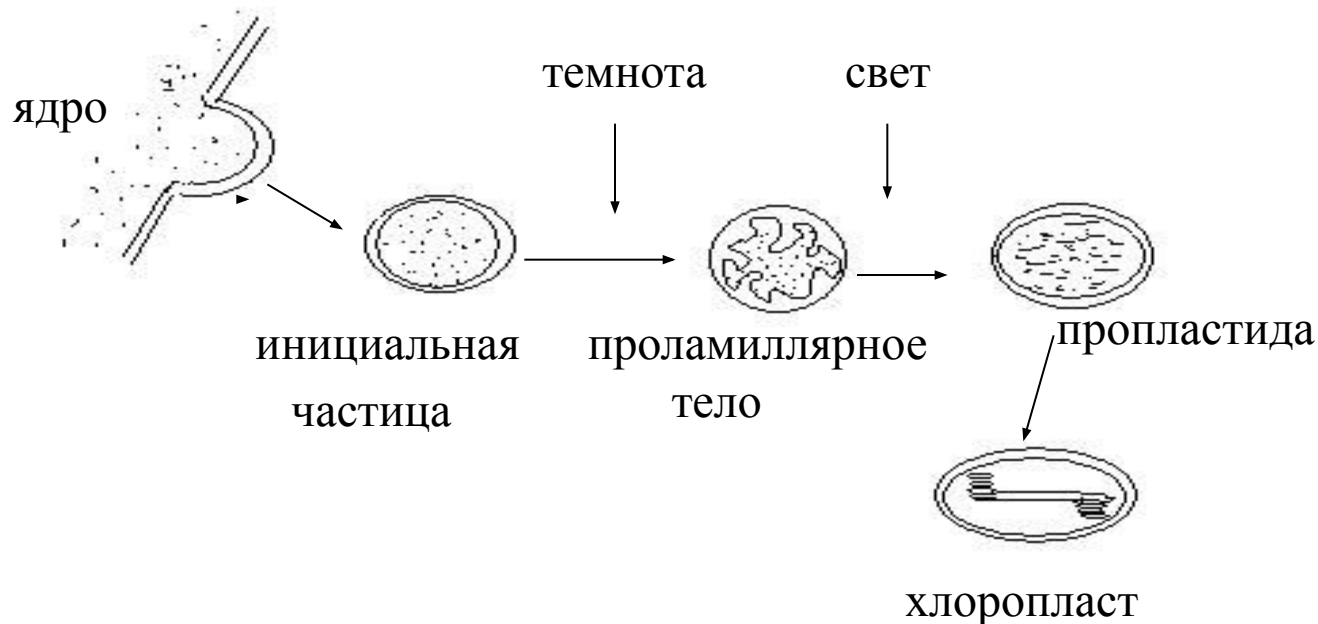
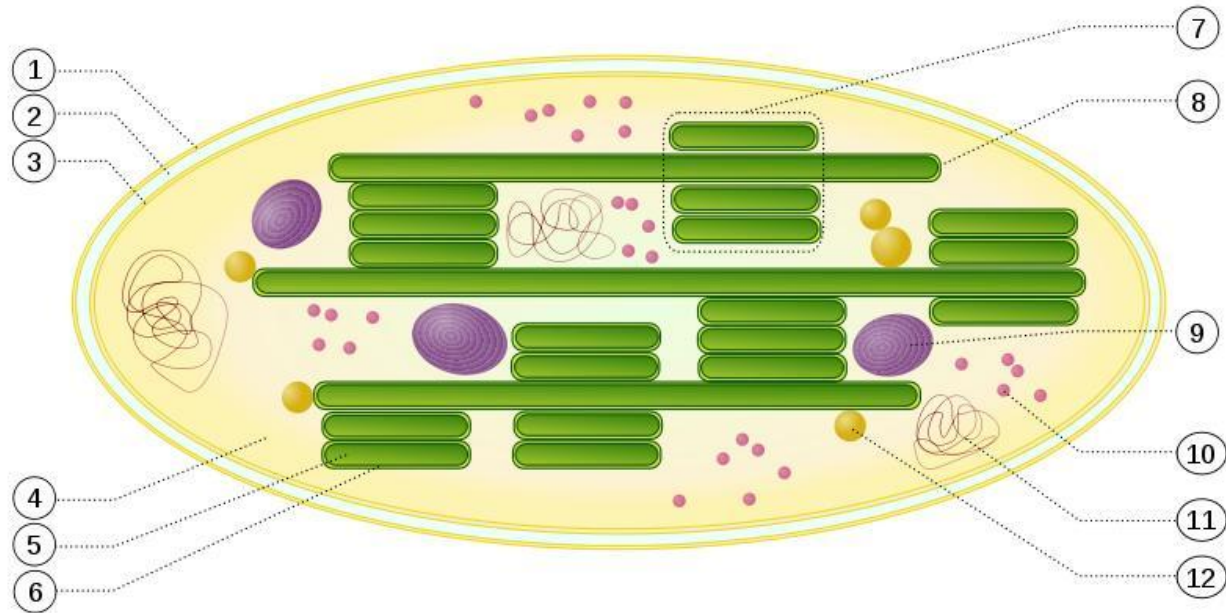


схема ядерного пути

# Онтогенез хлоропластов



**Хлоропласты** — зелёные пластиды, которые встречаются в клетках растений и водорослей.



Ультраструктура хлоропласта:

1. наружная мембрана
2. межмембранное пространство
3. внутренняя мембрана (1+2+3: оболочка)
4. строма (жидкость)
5. тилакоид с просветом (диаметром) внутри
6. мембрана тилакоида
7. грана (стопка тилакоидов)
8. тилакоид (ламела)
9. зерно крахмала
10. рибосома
11. пластидная ДНК
12. пастоглобула (капля жира)

# Пигменты фотосинтезирующих растений

хлорофиллы



фикобилины



каротиноиды

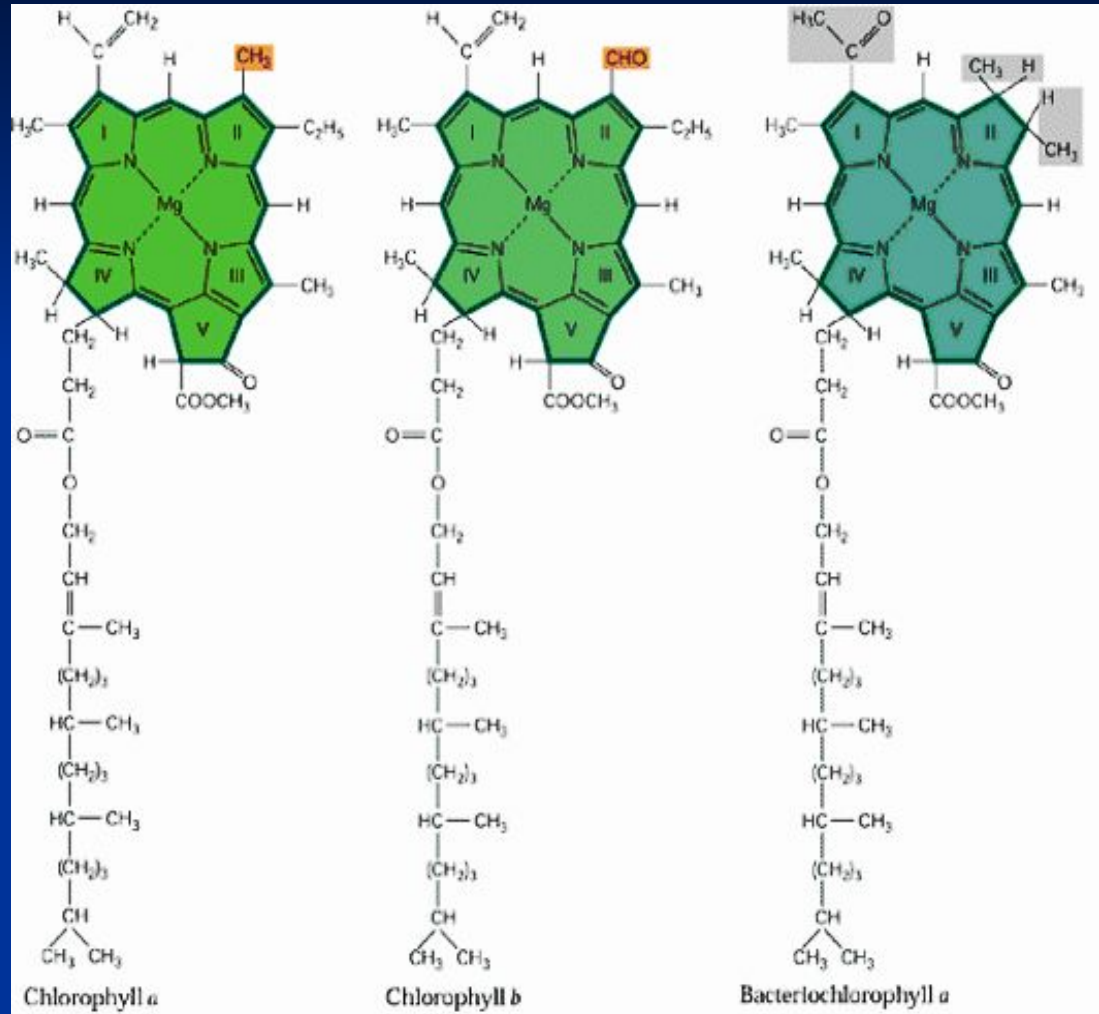


флавоноидные  
пигменты



# Хлорофиллы

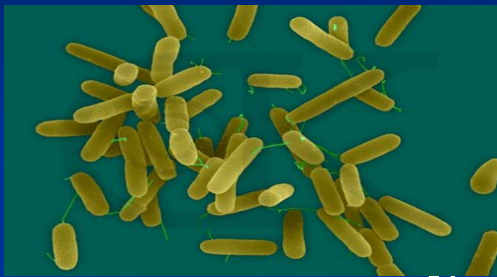
**Хлорофилл** — зелёный пигмент, обуславливающий окраску хлоропластов растений в зелёный цвет. По химическому строению хлорофиллы — магниевые комплексы различных тетрапирролов. Хлорофиллы имеют порфириновое строение.



# Хлорофиллы

Хлорофилл «а»

(сине-зеленые  
бактерии)



Хлорофилл «b»

(высшие растения,  
зеленые, харовые  
водоросли)



Хлорофилл «с»

(бурые водоросли)



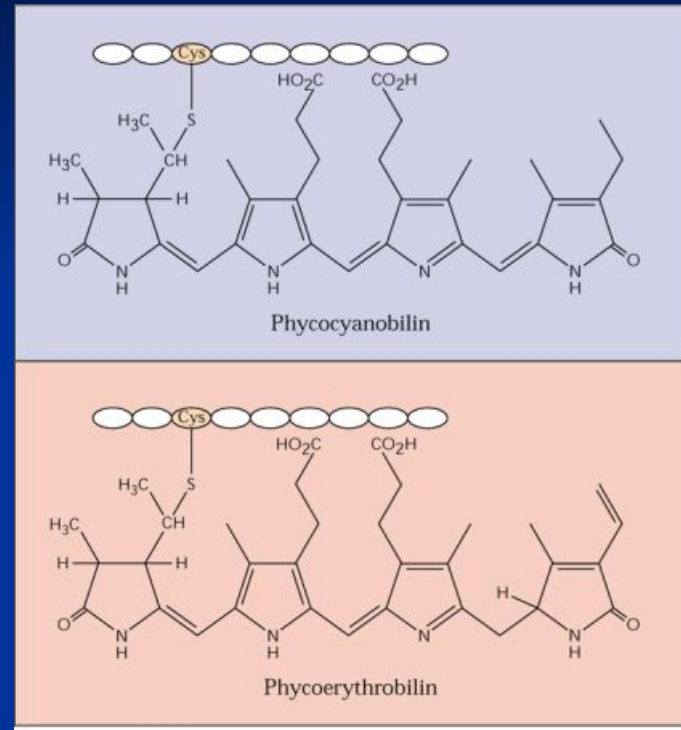
Хлорофилл «d»

(красные водоросли)



# Фикобилины

Фикобилины – это пигменты, представляющие собой вспомогательные фотосинтетические пигменты, которые могут передавать энергию поглощенных квантов света на хлорофилл, расширяя спектр действия фотосинтеза.

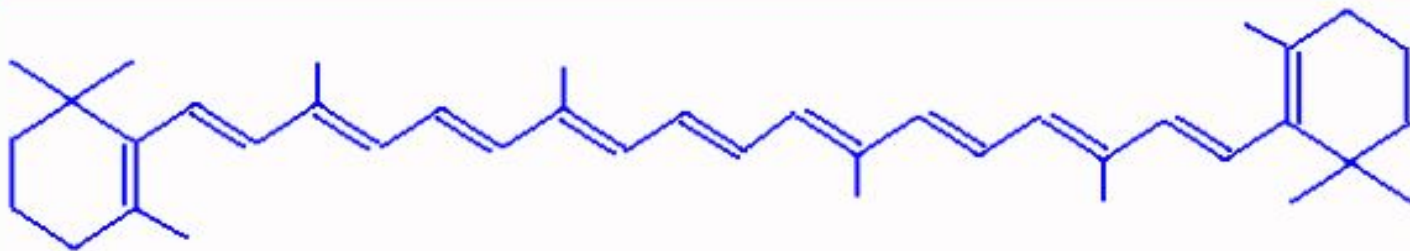


Открытые тетрапиррольные структуры.

Встречаются у водорослей.



# Каротиноиды



**Beta-Carotene (in carrots and as an accessory pigment in all green leaves)**

Структурная формула

**Каротиноиды** – это жирорастворимые пигменты желтого, красного и оранжевого цвета. Придают окраску большинству оранжевых овощей и фруктов.



## Группы каротиноидов:

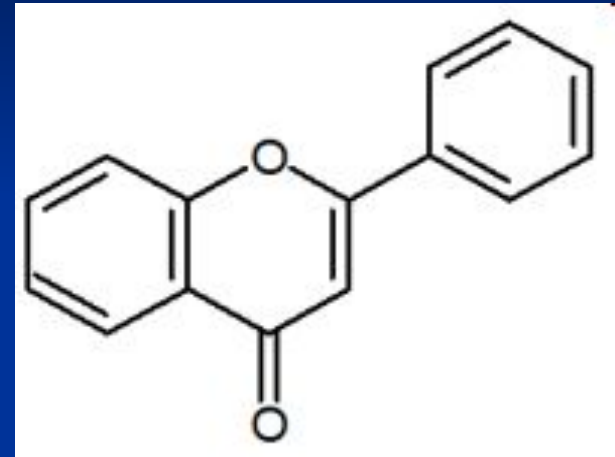
1. **Каротины** — жёлто-оранжевый пигмент, непредельный углеводород из группы каротиноидов. Формула  $C_{40}H_{56}$ . Нерастворим в воде, но растворяется в органических растворителях.



- Содержится в листьях всех растений, а также в корне моркови, плодах шиповника и др. Является провитамином витамина А.
2. **Ксантофиллы** — растительный пигмент, кристаллизуется в призматических кристаллах жёлтого цвета.

# Флавоноидные пигменты

**Флавоноиды** — это группа водорастворимых природных фенольных соединений. Представляют собой гетероциклические кислородсодержащие соединения преимущественно желтого, оранжевого, красного цвета. Они принадлежат к соединениям C<sub>6</sub>-C<sub>3</sub>-C<sub>6</sub> ряда — в их молекулах имеются два бензольных ядра, соединенных друг с другом трехуглеродным фрагментом.



Структура флавонов

## Флавоноидные пигменты:

- **Антоцианы** — природные вещества, красящие растения; относятся к гликозидам.



- **Флавоны и флавонолы.** Играют роль поглотителей УФ-лучей тем самым предохраняют хлорофилл и цитоплазму от разрушения.

# Стадии фотосинтеза



## **световая**

Осуществляется в гранах хлоропластов.

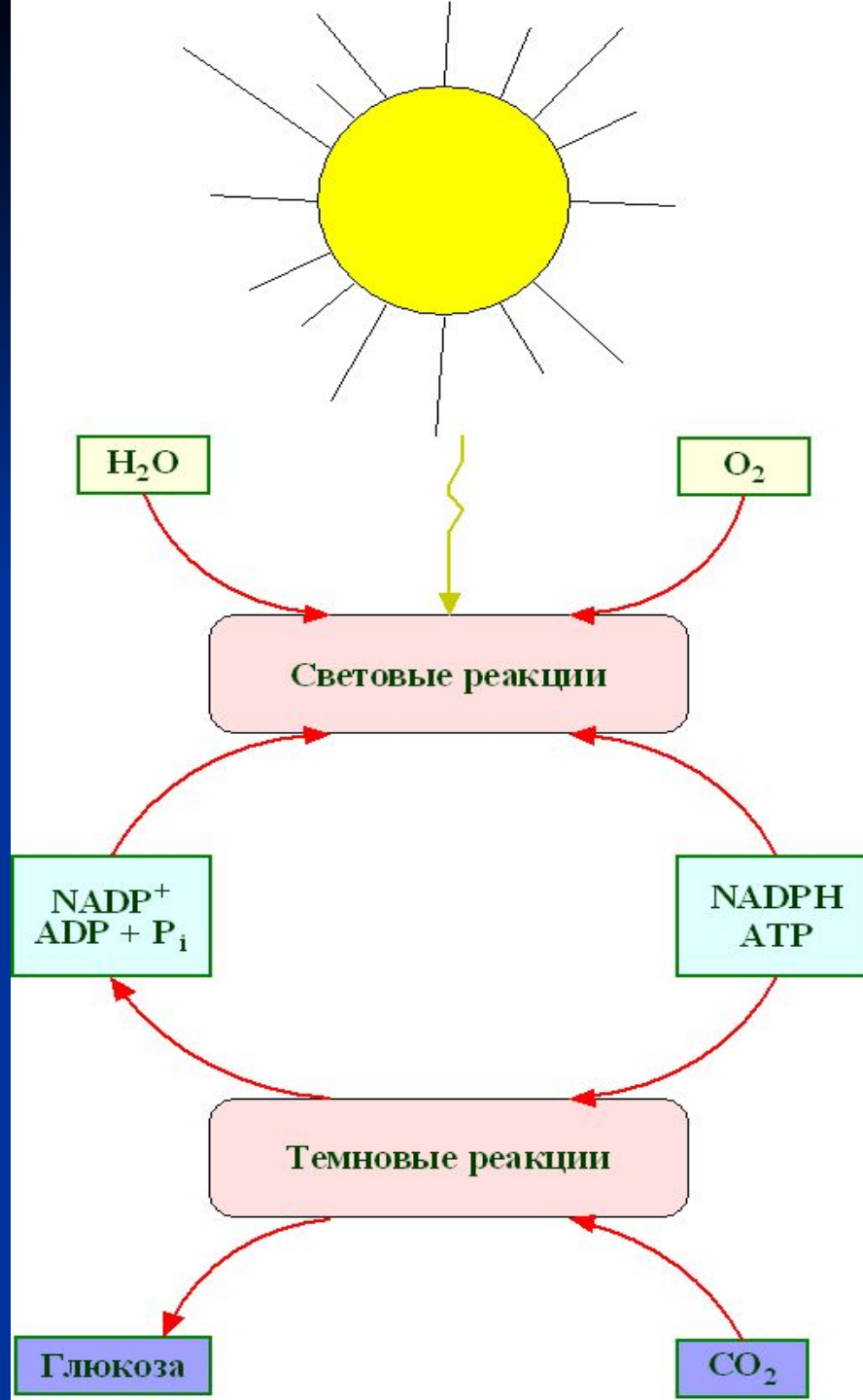
Протекает при наличии света Быстрые < 10 (-5) сек

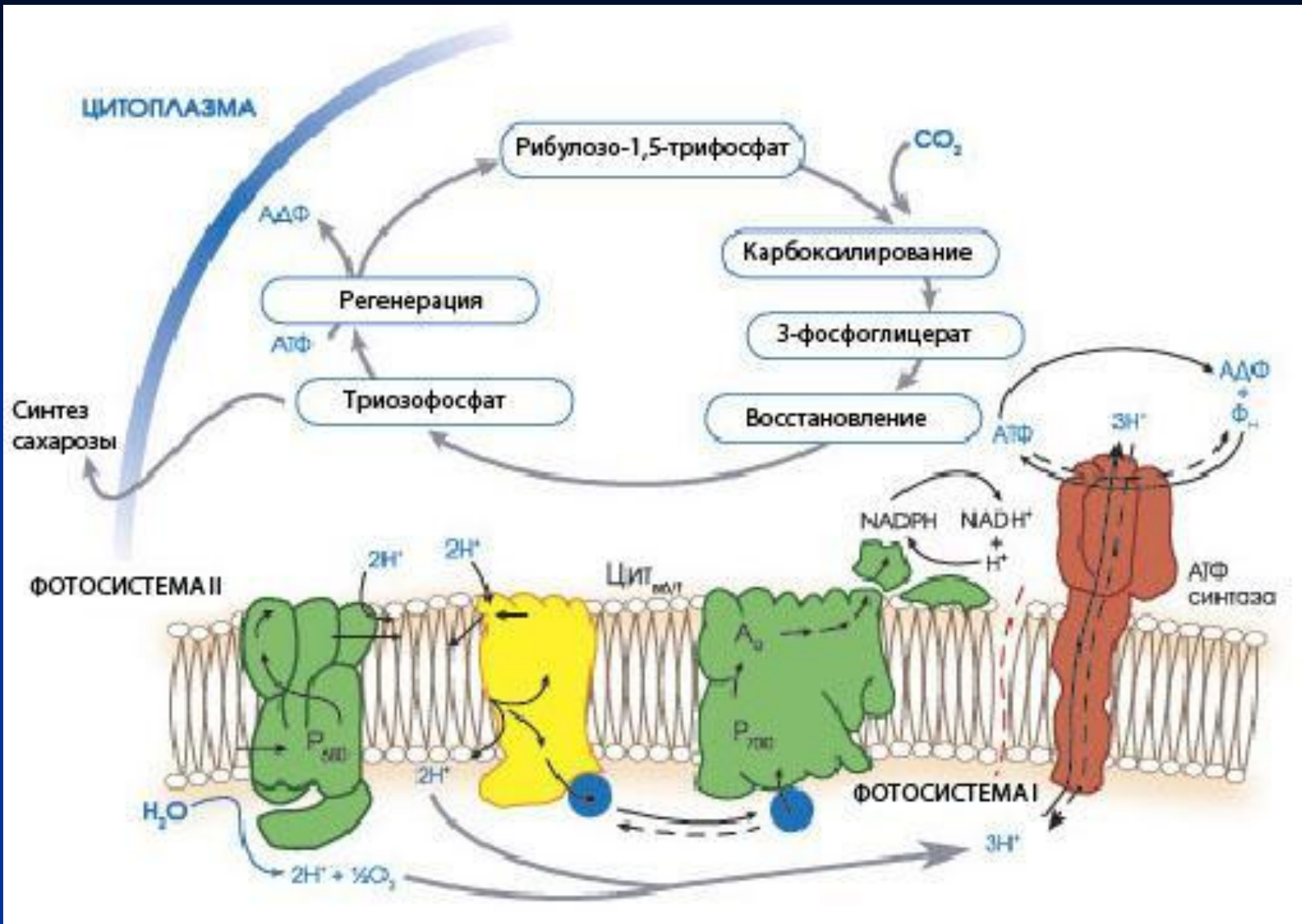
## **темновая**

Осуществляется в бесцветной белковой строме хлоропластов.

Для протекания свет необязателен

Медленные ~ 10 (-2) сек







# Световая стадия фотосинтеза

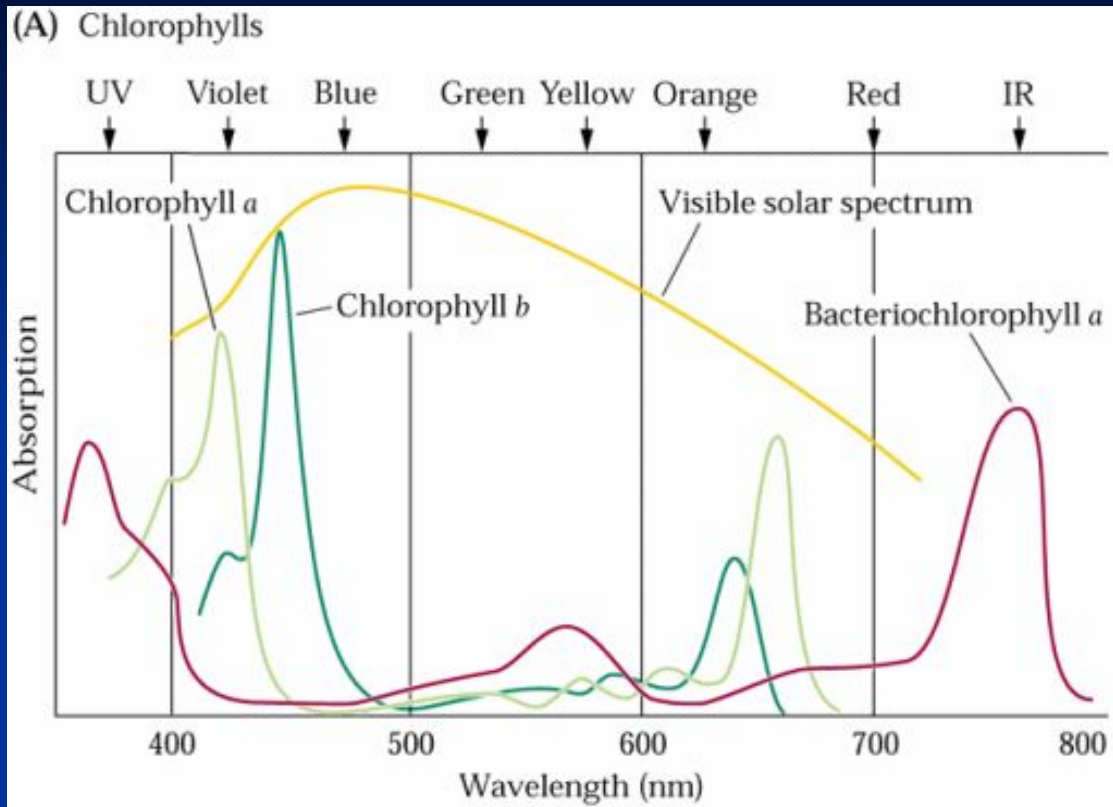
В ходе световой стадии фотосинтеза образуются высокоэнергетические продукты: АТФ, служащий в клетке источником энергии, и НАДФН, использующийся как восстановитель. В качестве побочного продукта выделяется кислород.

Общее уравнение:



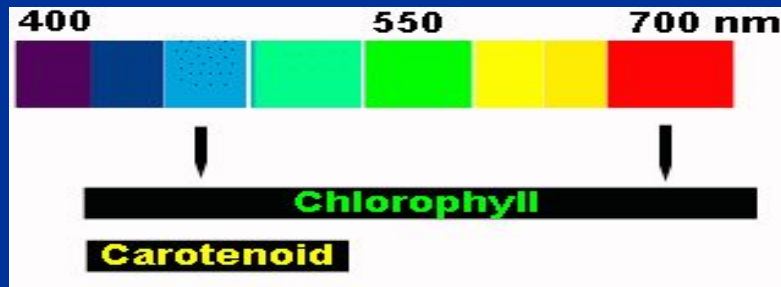
# Спектры поглощения

ФАР : 380 – 710 нм



Каротиноиды: 400-550 нм главный максимум: 480 нм

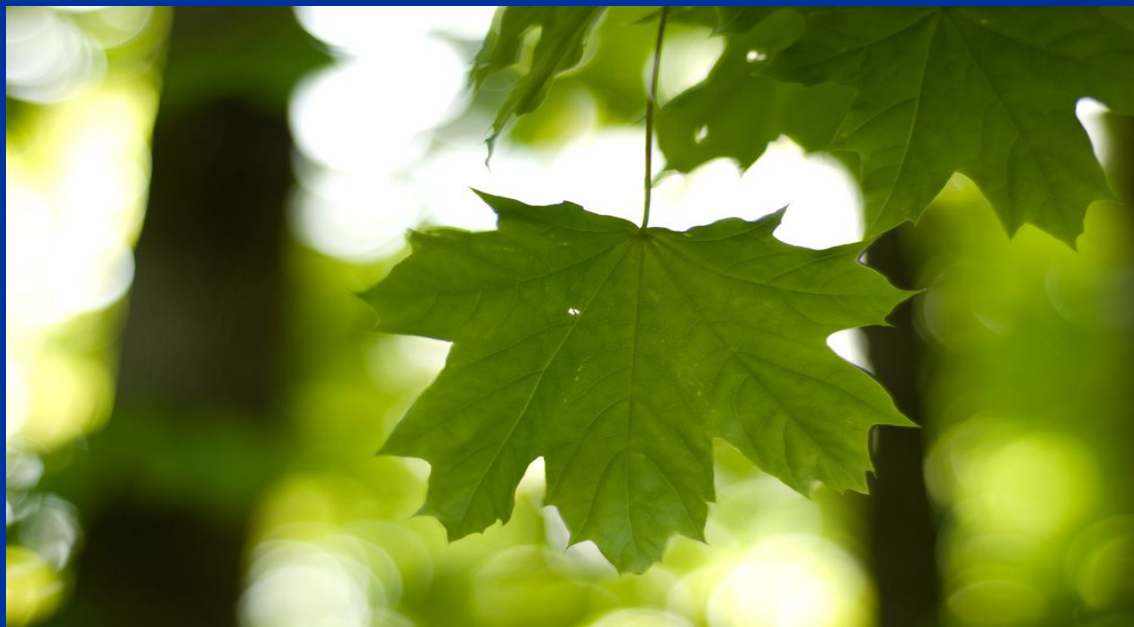
Хлорофиллы:  
в красной области спектра 640-700 нм  
в синей - 400-450 нм



# Уровни возбуждения хлорофилла

**1 уровень.** Связан с переходом на более высокий энергетический уровень электронов в системе сопряжения двух связей

**2 уровень.** Связан с возбуждением неспаренных электронов четырех атомов азота и кислорода в порфириновом кольце.



# Пигментные системы

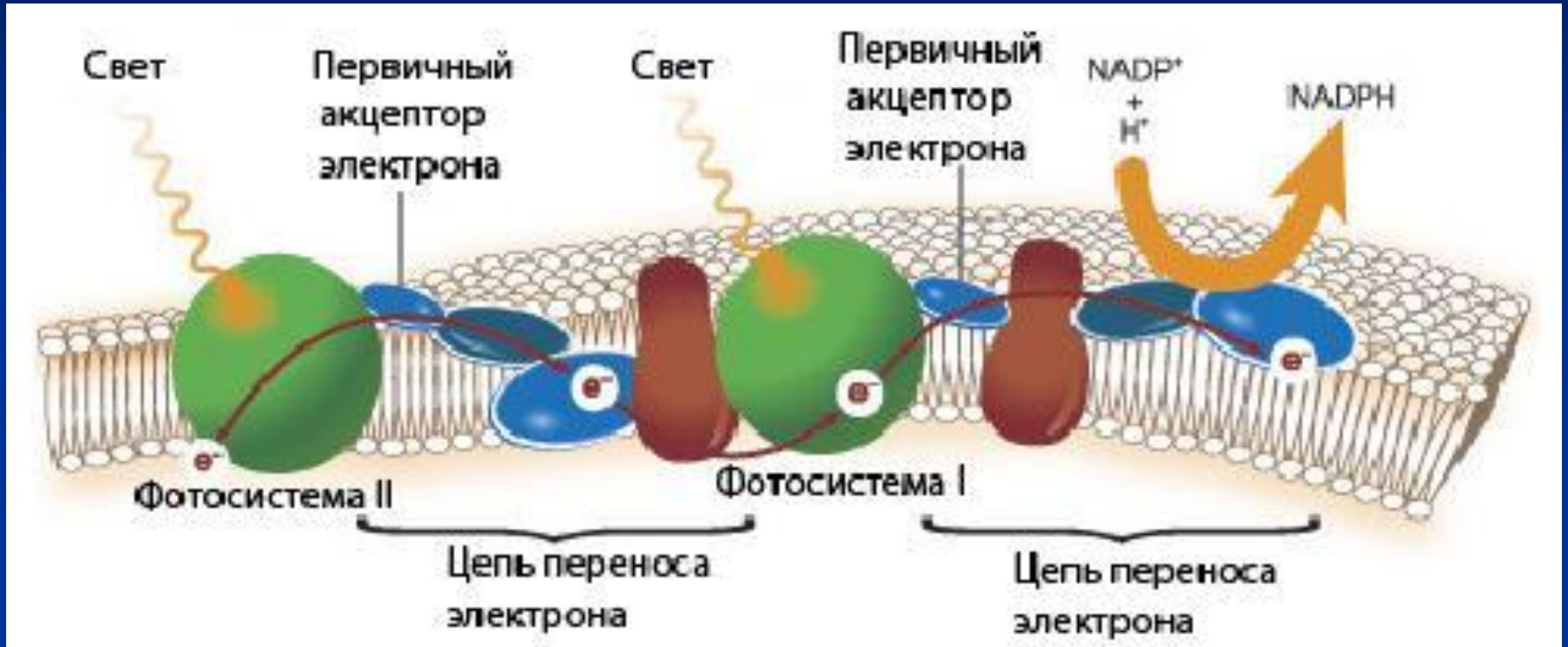
## Фотосистема I

Состоит из 200 молекул хлорофилла «a», 50 молекул каротиноидов и 1 молекулы пигмента (P<sub>700</sub>)

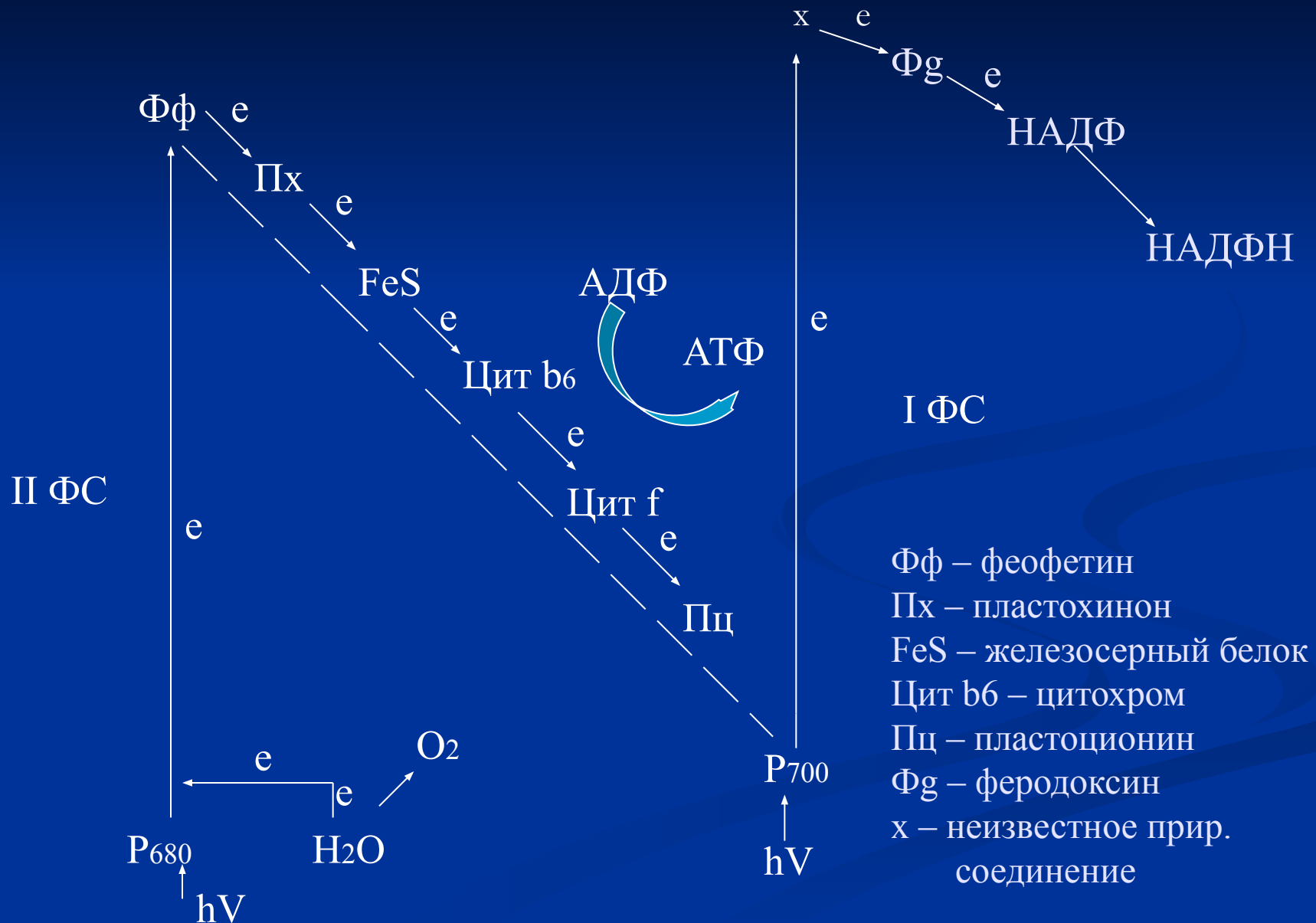
## Фотосистема II

Состоит из 200 молекул хлорофилла «a<sub>670</sub>», 200 молекул хлорофилла «b» и одной молекулы пигмента (P<sub>680</sub>)

# Локализация электрон и протон транспортных реакций в тилакоидной мембране



# Нециклическое фотосинтетическое фосфорилирование (Z – схема, или схема Говинджи)



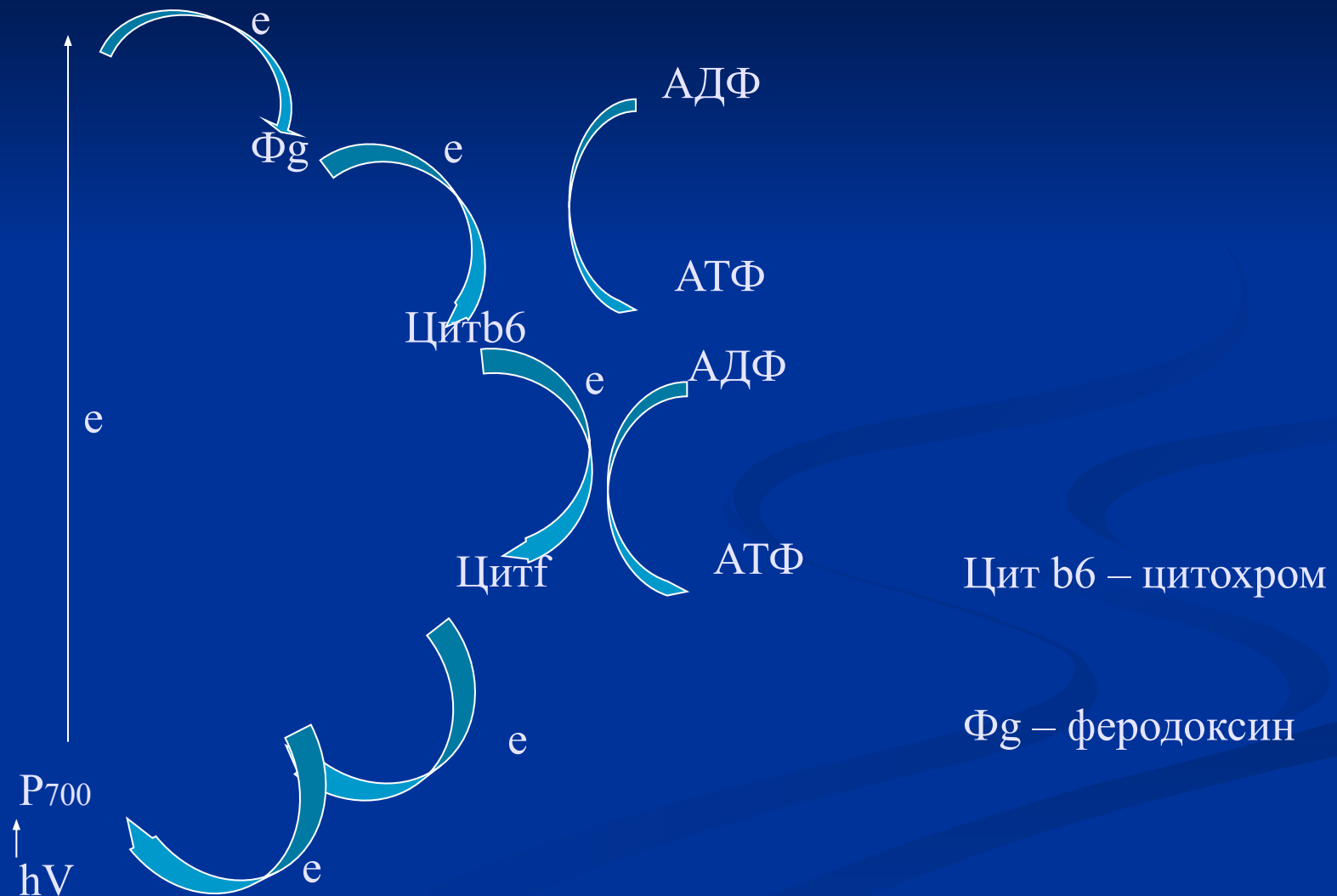
# Фотосинтетическое фосфорилирование

**Фотосинтетическое фосфорилирование** – это процесс образования энергии АТФ и НАДФН при фотосинтезе с использованием квантов света.

Виды:

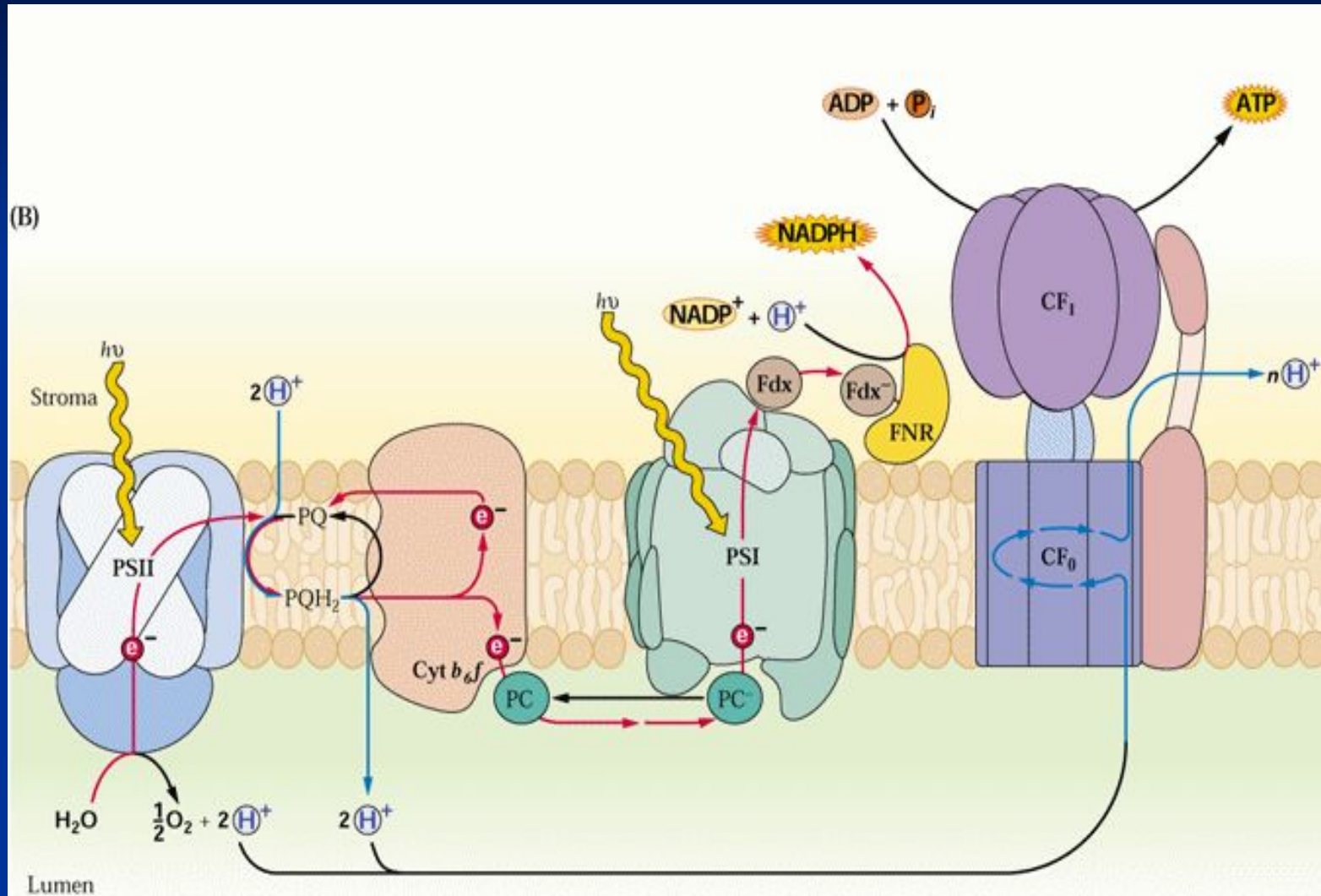
- **нециклическое (Z-схема).** Принимают участие две пигментные системы.
- **циклическое.** Принимает участие фотосистема I.
- **псевдоциклическое.** Идет по типу нециклического, но не наблюдается видимого выделения кислорода.

# Циклическое фотосинтетическое фосфорилирование





# Циклический и нециклический транспорт электронов в хлоропластах



# *Химизм фотосинтеза*

Фотосинтез осуществляется путем последовательного чередования двух фаз:

- световой, протекающей с большой скоростью и не зависящей от температуры;
- темновой, названной так потому, что для происходящих в этой фазе реакций световая энергия не требуется.

# Темновая стадия фотосинтеза

В темновой стадии с участием АТФ и НАДФН происходит восстановление  $\text{CO}_2$  до глюкозы ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ). Хотя свет не требуется для осуществления данного процесса, он участвует в его регуляции.

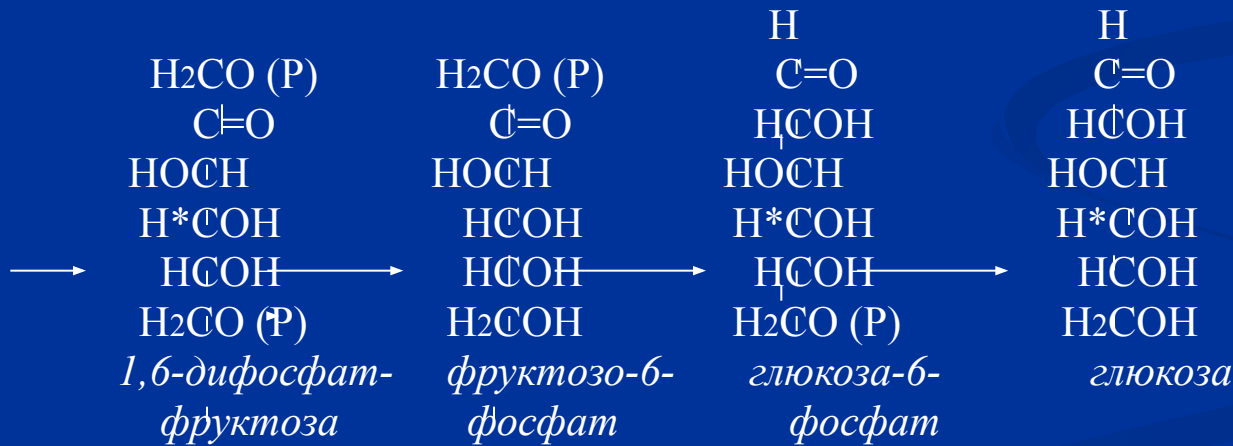
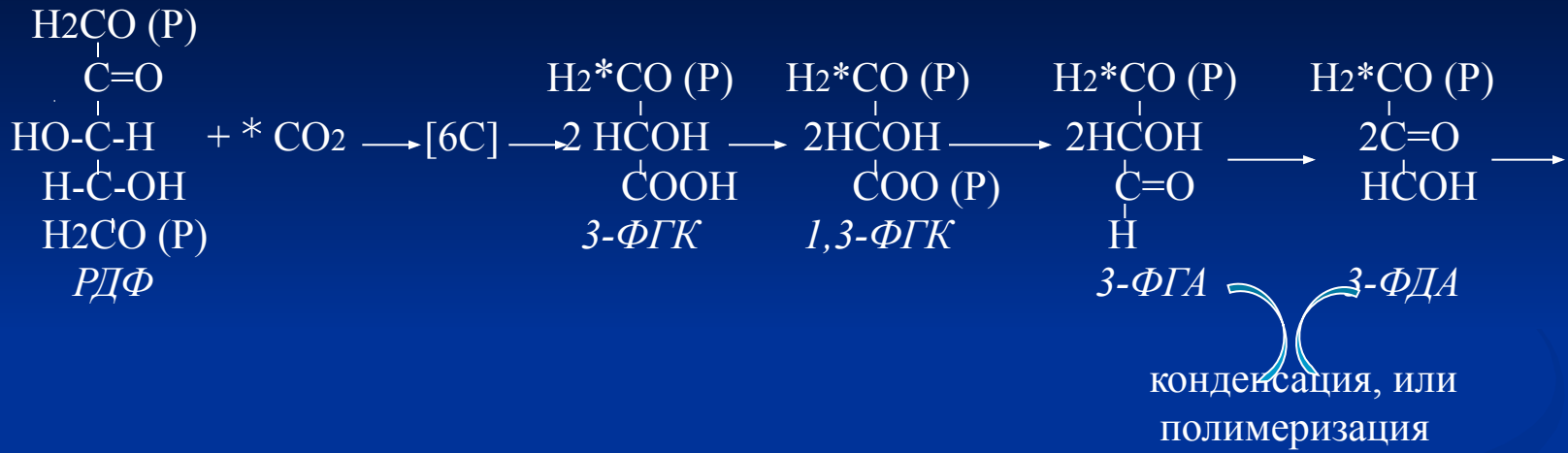


# C3-фотосинтез, цикл Кальвина

Цикл Кальвина или восстановительный пентозофосфатный цикл состоит из трёх стадий:

- **Карбоксилирования РДФ.**
- **Восстановления.** Происходит восстановление 3-ФГК до 3-ФГА.
- **Регенерация акцептора РДФ.** Осуществляются в серии реакций взаимопревращений фосфорилируемых сахаров с различным числом углеродных атомов (триоз, тетроз, пентоз, гексоз, и т.д.)

# Общее уравнение цикла Кальвина



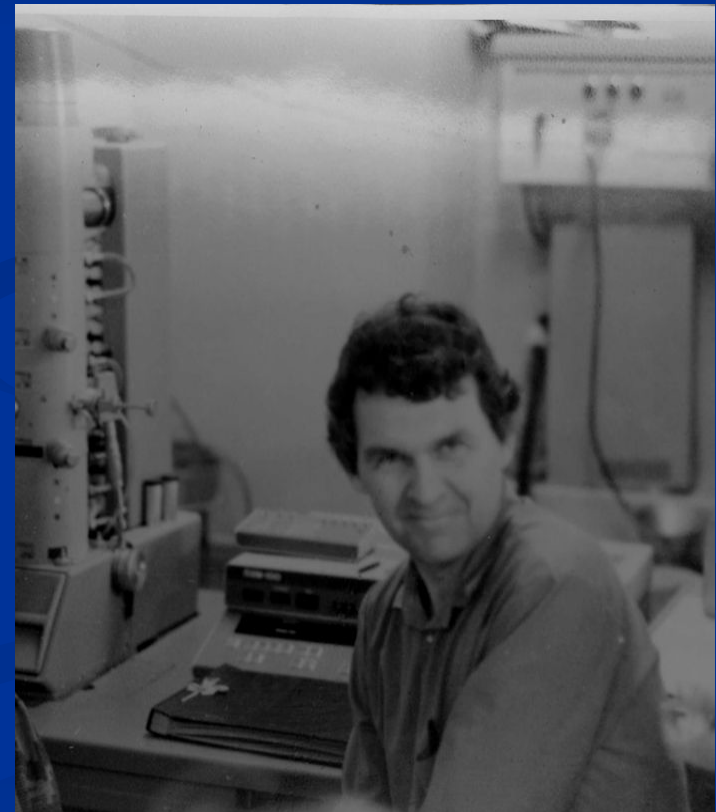
# C<sub>4</sub>-фотосинтез

(путь Хэтча – Слэка – Карпилова)

Осуществляется у растений с двумя типами хлоропласта.

Акцептором CO<sub>2</sub> помимо РДФ может быть трехуглеродное соединение – фосфоэнол ПВК (ФЕП)

C<sub>4</sub> –путь был впервые обнаружен у тропических злаков. В работах Ю.С.Карпилова, М.Хэтча, К.Слэка с использованием меченого углерода было показано, что первыми продуктами фотосинтеза у этих растений являются органические кислоты.



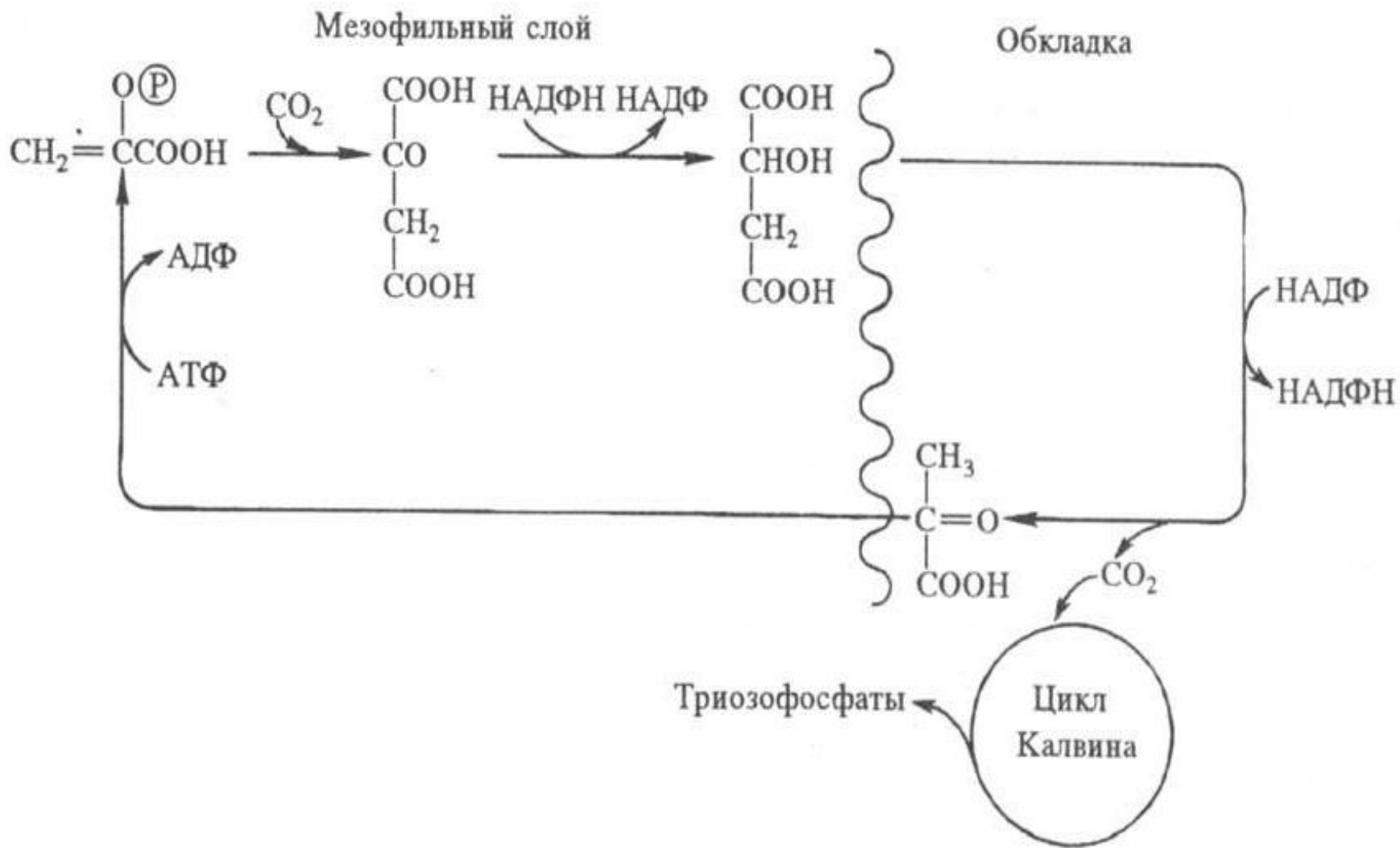


Рис. 5. С<sub>4</sub>-Цикл фиксации CO<sub>2</sub>.

# Фотосинтез по типу толстянковых

Характерно для растений суккулентов. В ночное время фиксируют углерод в органические кислоты по преимуществу в яблочные. Это происходит под действием ферментов пируваткарбоксилазы. Это позволяет в течении дня держать устьица закрытыми и таким образом сокращать транспирацию. Этот тип получил название САМ-фотосинтез.





# САМ фотосинтез

При САМ фотосинтезе происходит разделение ассимиляции  $\text{CO}_2$  и цикла Кальвина не в пространстве как у  $\text{C}_4$ , а во времени. Ночью в вакуолях клеток по аналогичному вышеописанному механизму при открытых устьицах накапливается малат, днём при закрытых устьицах идёт цикл Кальвина. Этот механизм позволяет максимально экономить воду, однако уступает в эффективности и  $\text{C}_4$ , и  $\text{C}_3$ .

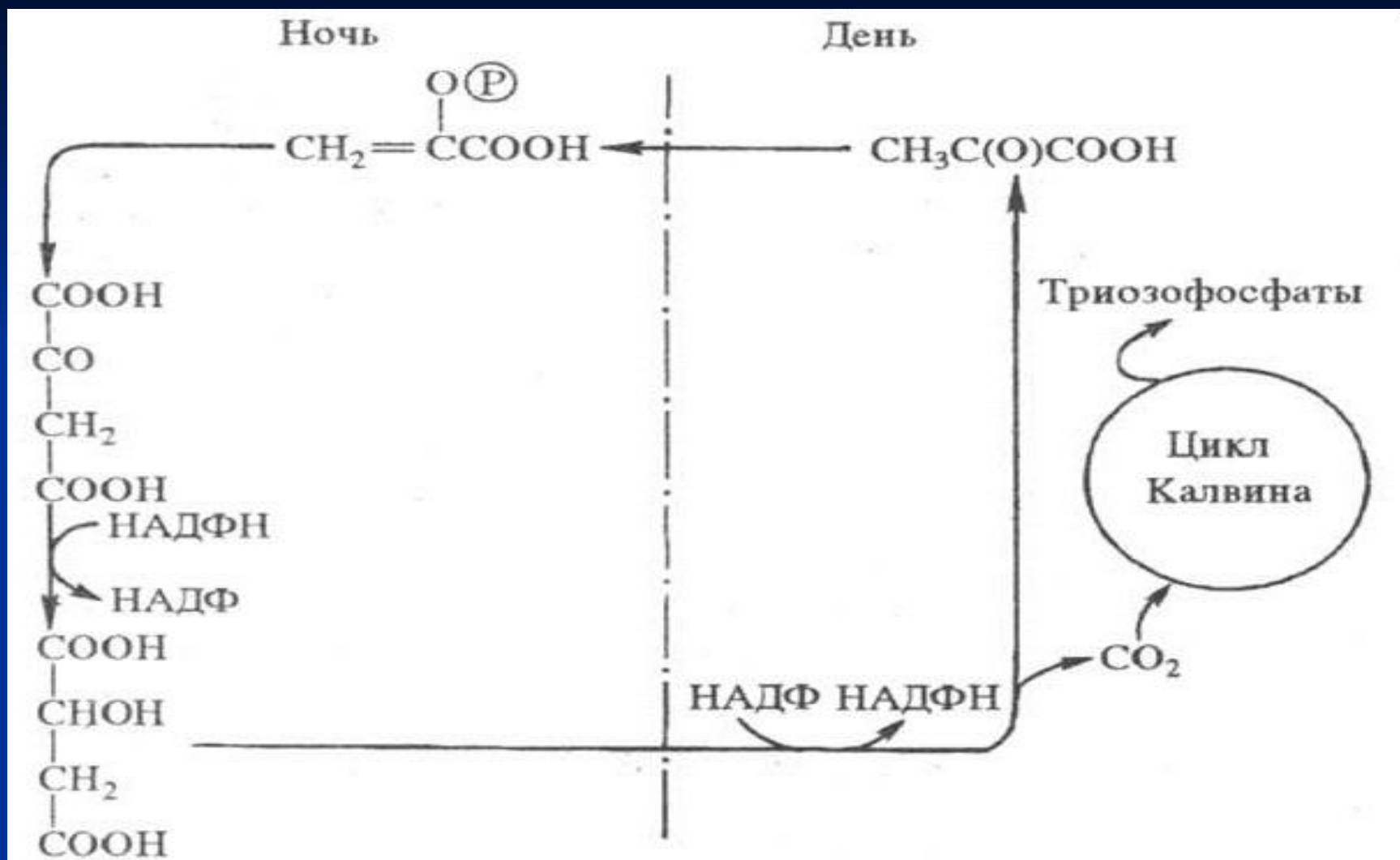
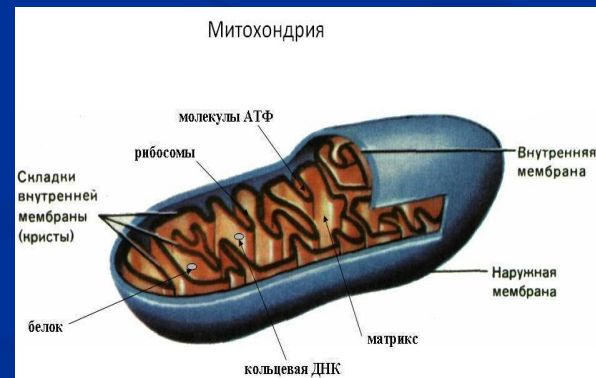
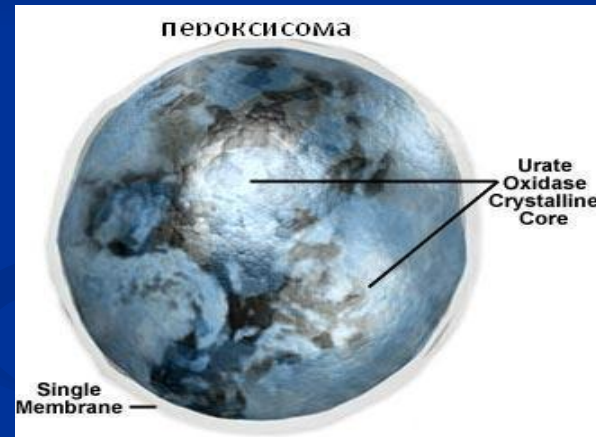
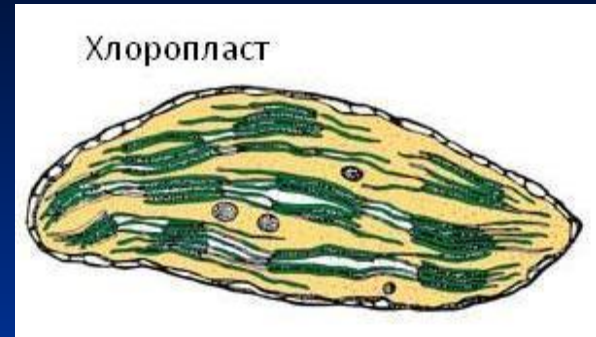
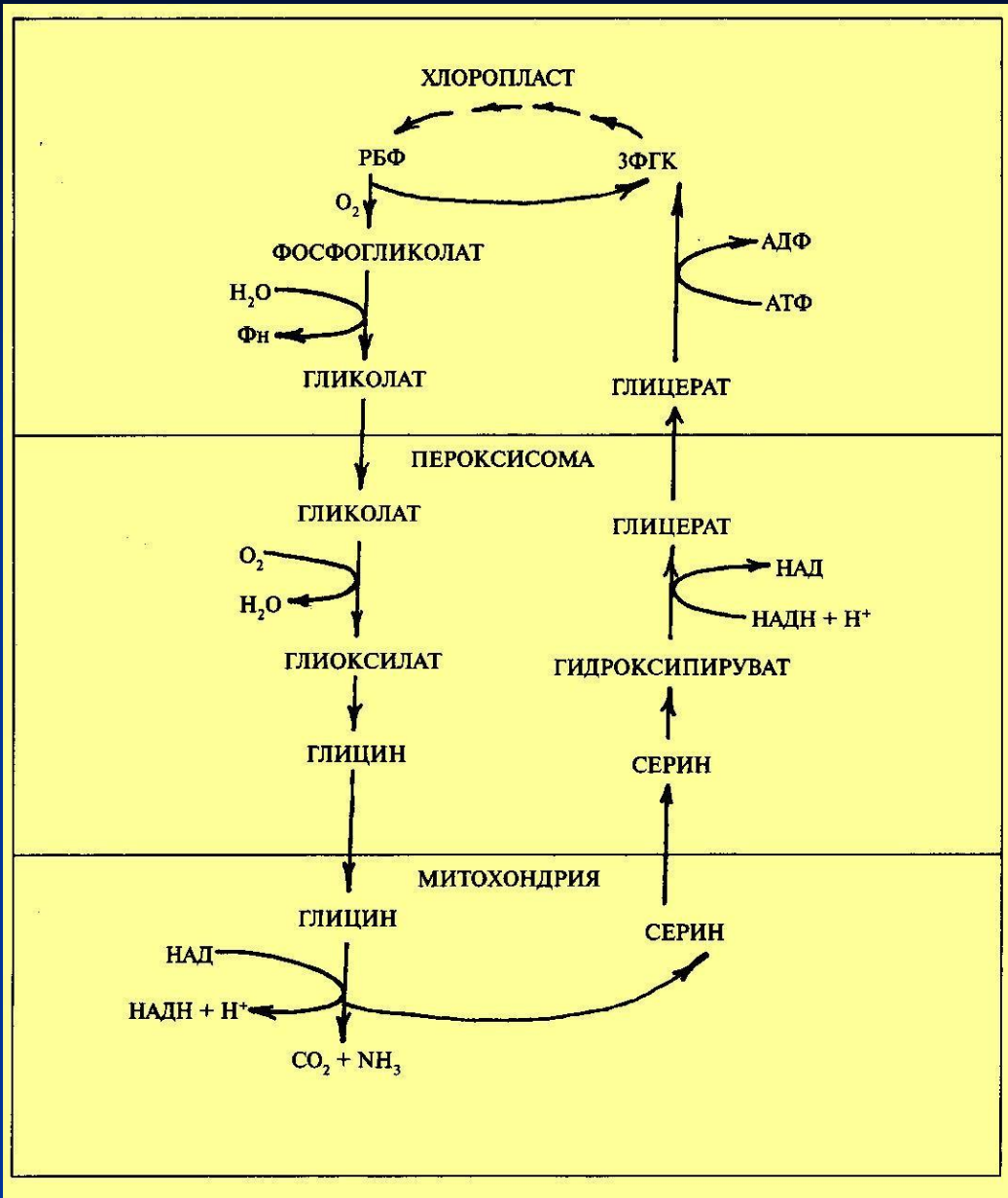


Рис. 6. САМ-тип углеродного обмена.

# Фотодыхание



# Влияние внутренних и внешних факторов на фотосинтез



Фотосинтез  
значительно  
изменяется из-за  
влияния на него  
комплекса часто  
взаимодействующих  
внешних и внутренних  
факторов.

# Факторы, влияющие на фотосинтез

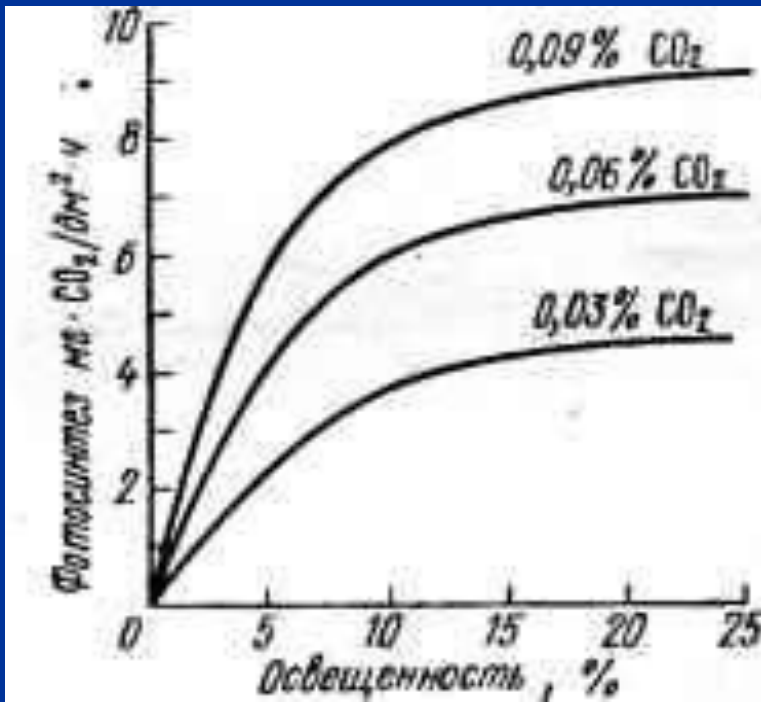
## 1. Онтогенетическое состояние растения.

Максимальная интенсивность фотосинтеза наблюдается во время перехода растений от вегетации в репродуктивную фазу. У стареющих листьев интенсивность фотосинтеза значительно падает.



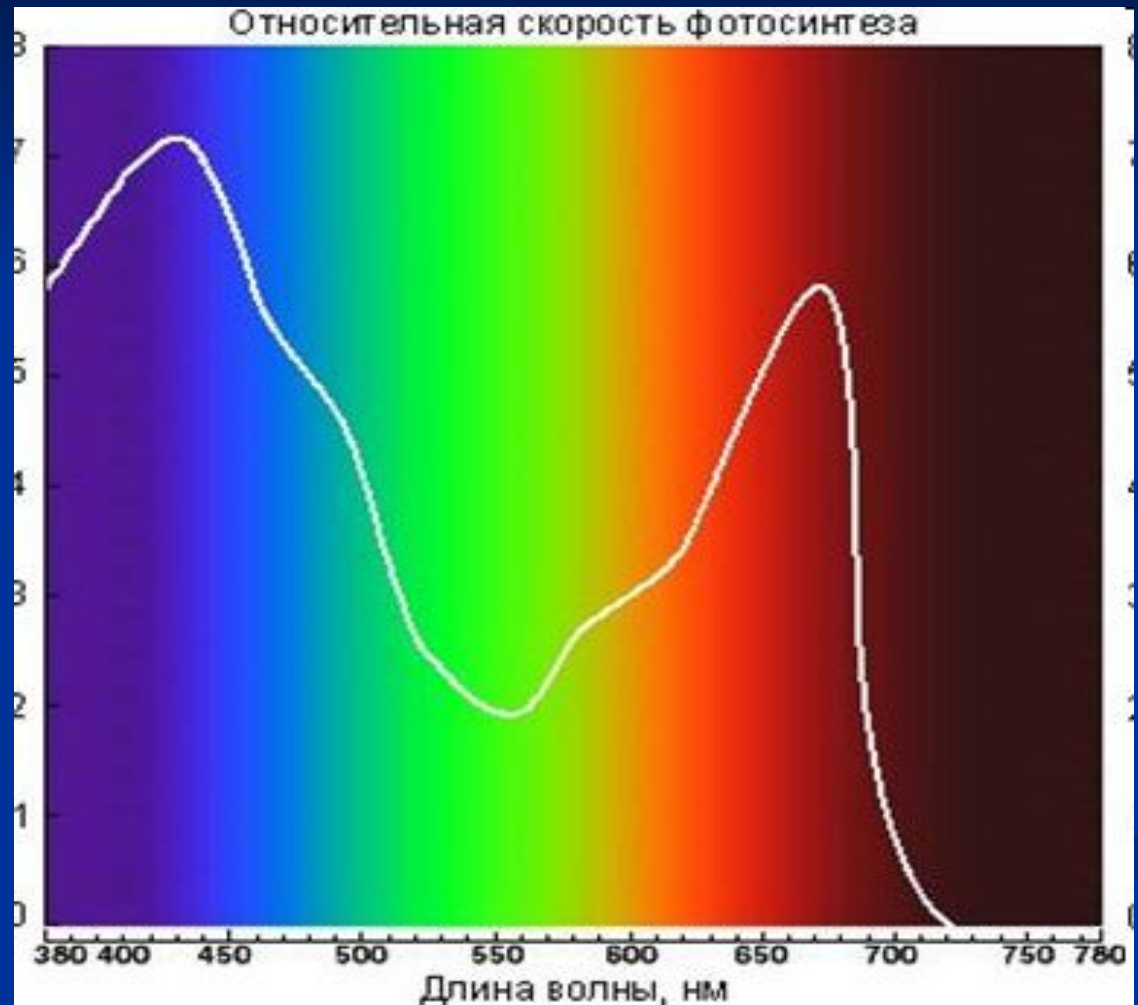
# Факторы, влияющие на фотосинтез

2. **Свет.** В темноте фотосинтез не происходит, так как образующийся при дыхании углекислый газ выделяется из листьев; с увеличением интенсивности света достигается компенсационная точка при которой поглощение углекислого газа при фотосинтезе и ее освобождение при дыхании уравниваются друг друга.



# Факторы, влияющие на фотосинтез

3. **Спектральный состав света.**  
Спектральный состав солнечного света испытывает некоторые изменения в течении суток и в течении года.



# Факторы, влияющие на фотосинтез

## 4. CO<sub>2</sub>.

Является основным субстратом фотосинтеза и от его содержания зависит интенсивность этого процесса. В атмосфере содержится 0,03% по объему; увеличение объема углекислого газа от 0,1 до 0,4% увеличивает интенсивность фотосинтеза до определенного предела, а затем сменяется углекислотным насыщением.

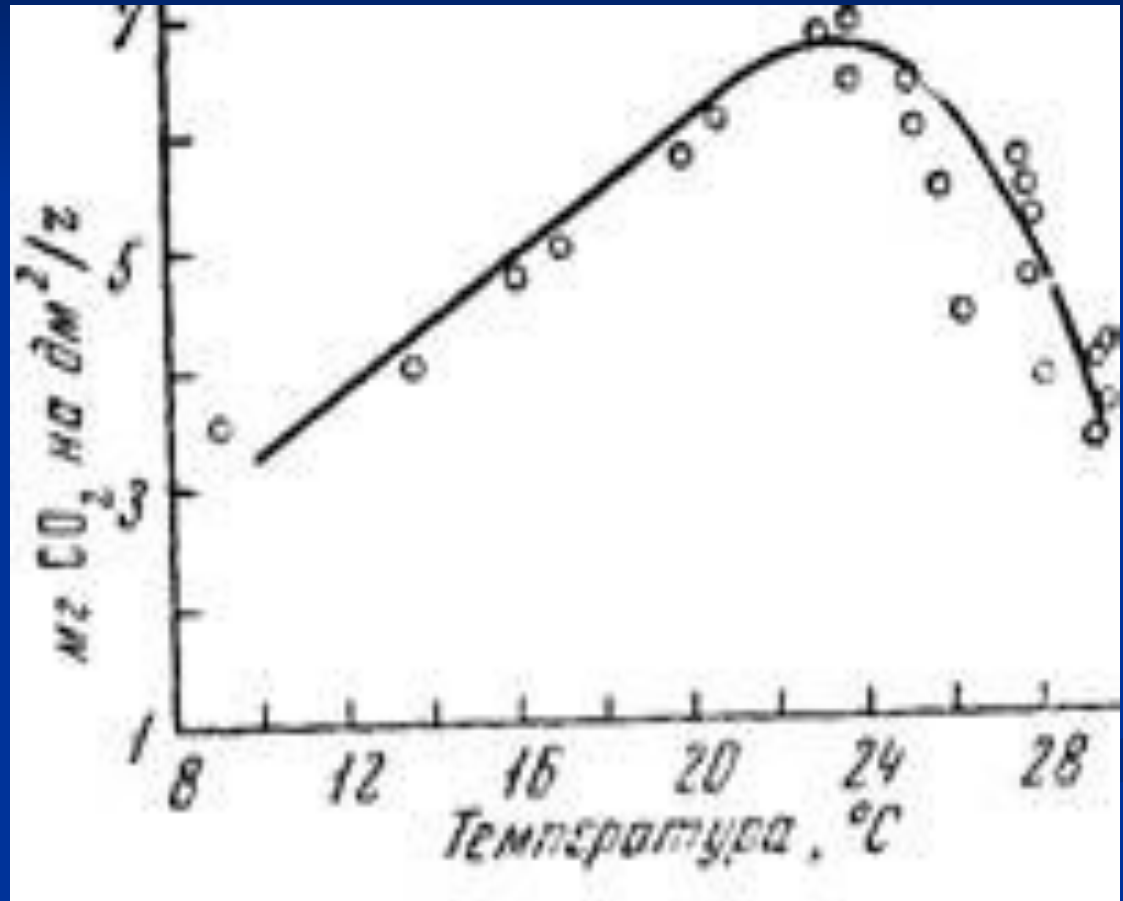




# Факторы, влияющие на фотосинтез

## 5. Температура.

У растений умеренной зоны оптимальная температура для фотосинтеза является 20-25; у тропических – 20-35.



# Факторы, влияющие на фотосинтез

## 6. Содержание воды.

Снижение обезвоженности тканей более чем на 20% приводит к уменьшению интенсивности фотосинтеза и к его дальнейшему прекращению, если потеря воды будет более 50%.



# Факторы, влияющие на фотосинтез

## 7. Микроэлементы.

Недостаток Fe вызывает хлороз и влияет на активность ферментов. Mn необходим для освобождения кислорода и для усвоения углекислого газа. Недостаток Cu и Zn снижает фотосинтез на 30%



Дефицит азота



Дефицит магния



Дефицит калия



Дефицит фосфата



Дефицит железа

# Факторы, влияющие на фотосинтез

## 8. Загрязняющие вещества и химические препараты.

Вызывают снижение фотосинтеза.

Наиболее опасные вещества:  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , взвешенные частицы.



# Суточный ход фотосинтеза

При умеренной дневной температуре и достаточной влажности дневной ход фотосинтеза примерно соответствует изменению интенсивности солнечной инсоляции. Фотосинтез, начинаясь утром с восходом солнца, достигает максимума в полуденные часы, постепенно снижается к вечеру и прекращается с заходом солнца. При повышенной температуре и уменьшении влажности максимум фотосинтеза сдвигается на ранние часы.

# Вывод

Таким образом фотосинтез – единственный процесс на Земле, идущий в грандиозных масштабах, связанный с превращением энергии солнечного света в энергию химических связей. Эта энергия, запасенная зелеными растениями, составляет основу для жизнедеятельности всех других гетеротрофных организмов на Земле от бактерий до человека.

