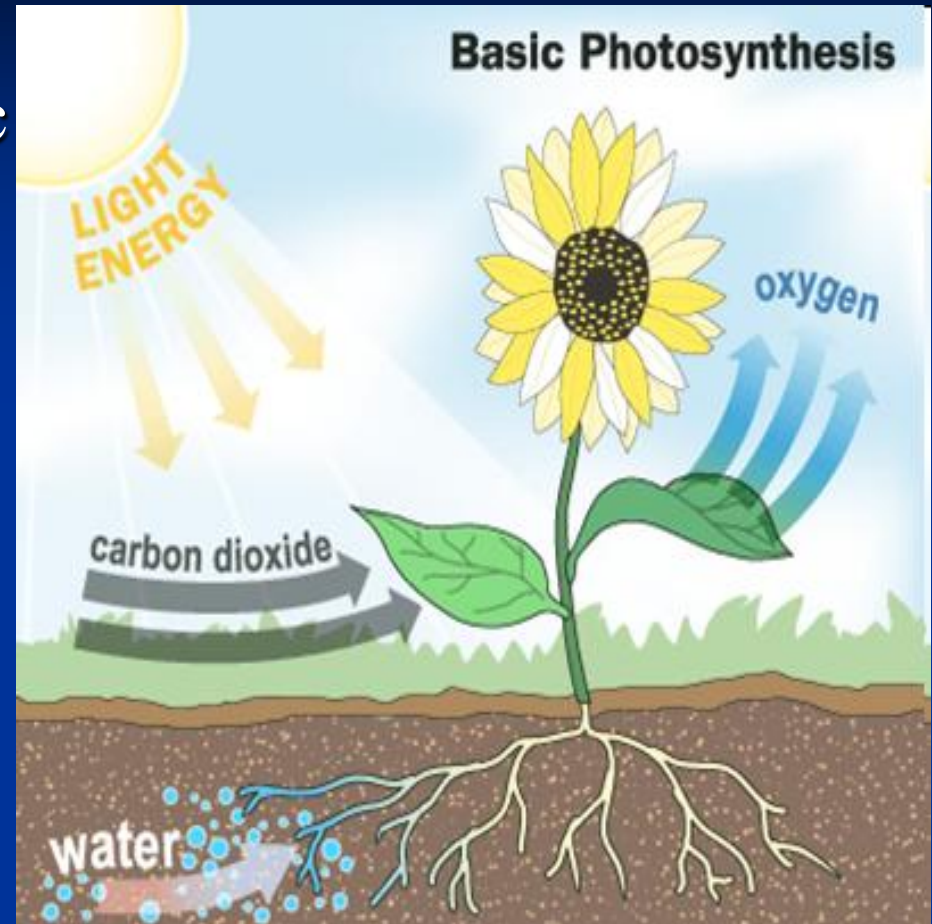




Фотосинтез

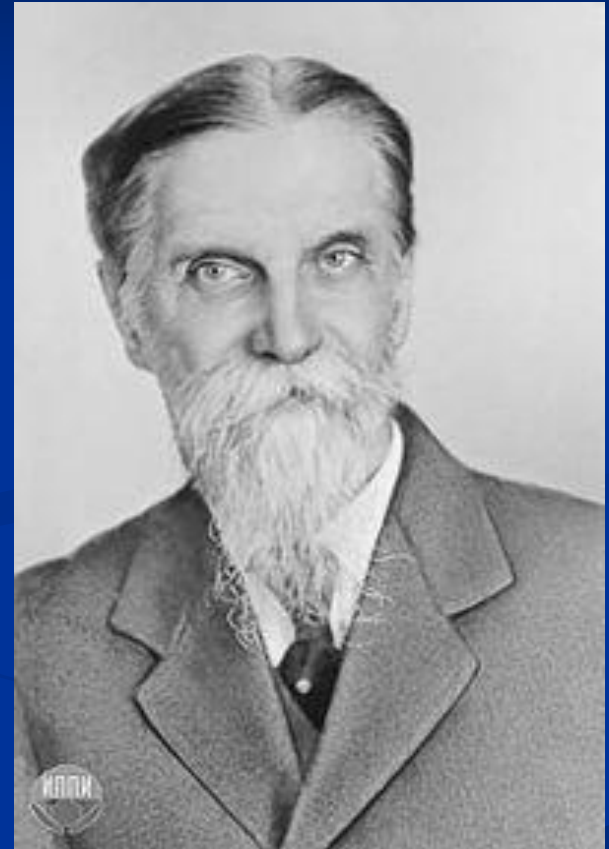
Фотосинтез — это процесс трансформации поглощенной организмом энергии света в химическую энергию органических (неорганических) соединений.

Главная роль - восстановление CO_2 до уровня углеводов с использованием энергии света.



Развитие учения о фотосинтезе

Климéнт Арка́дьевич 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.

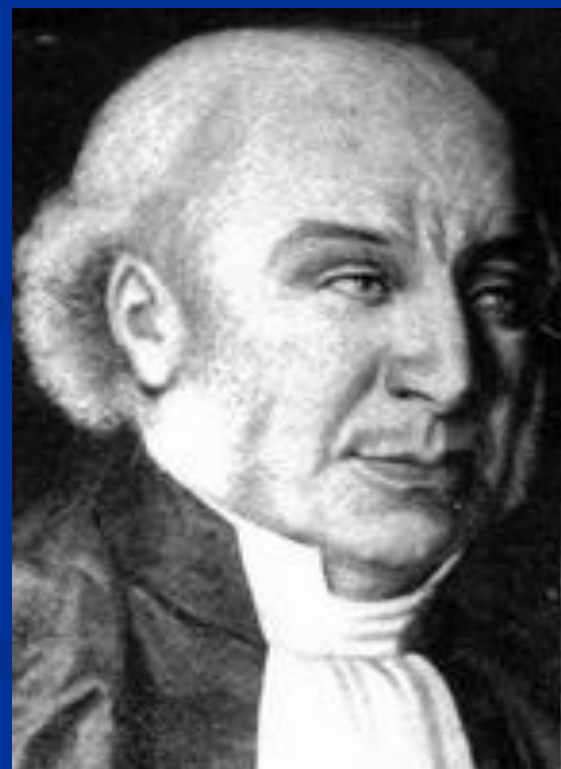
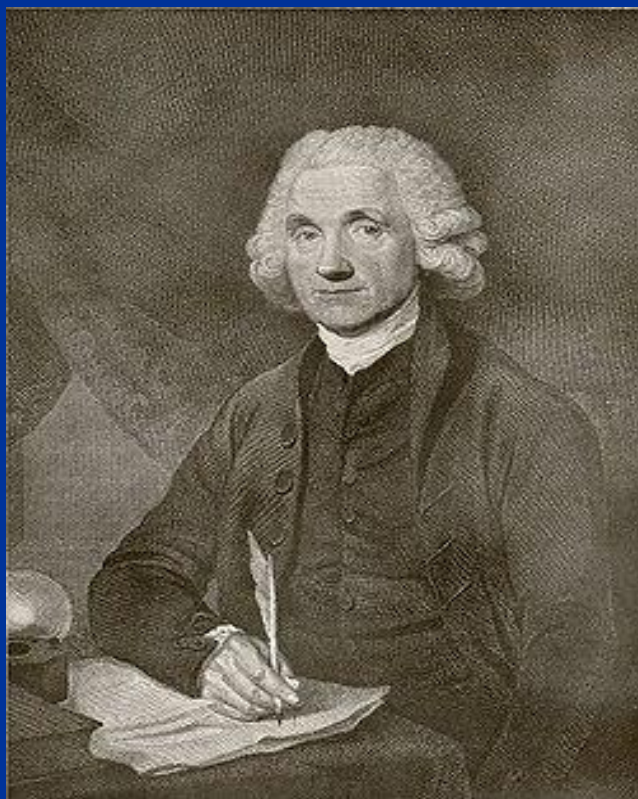


Джозеф Пристли (13 марта 1733—6 февраля 1804) — британский священник-диссентер, естествоиспытатель, философ, общественный деятель. Вошёл в историю прежде всего как выдающийся химик, открывший кислород и углекислый газ

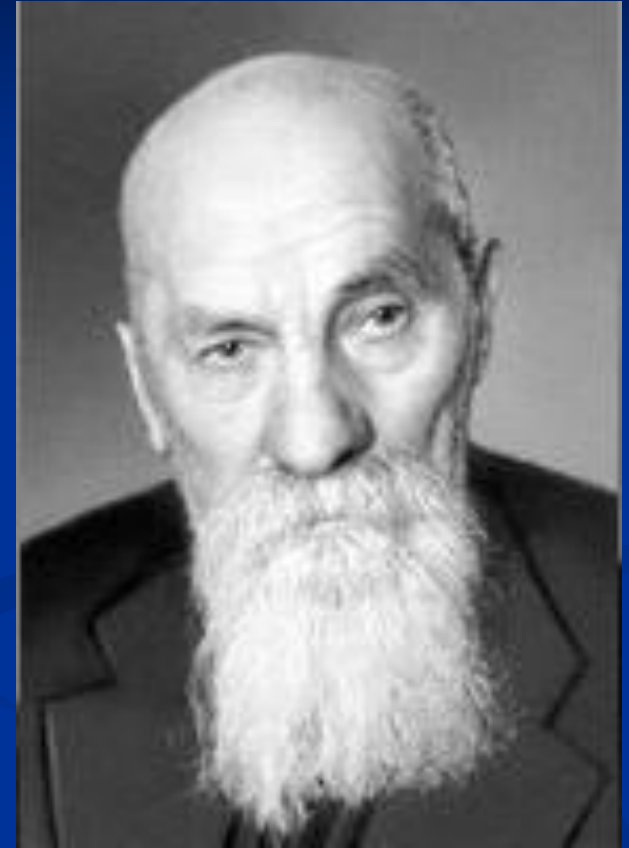


Пьер Жозеф Пельтье — (22 марта 1788 — 19 июля 1842) — французский химик и фармацевт, один из основателей химии алкалоидов.

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



Алексей Николаевич Бах
(5 (17) марта 1857 — 13 мая, 1946) — советский биохимик и физиолог растений. Высказал мысль о том, что ассимиляция 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

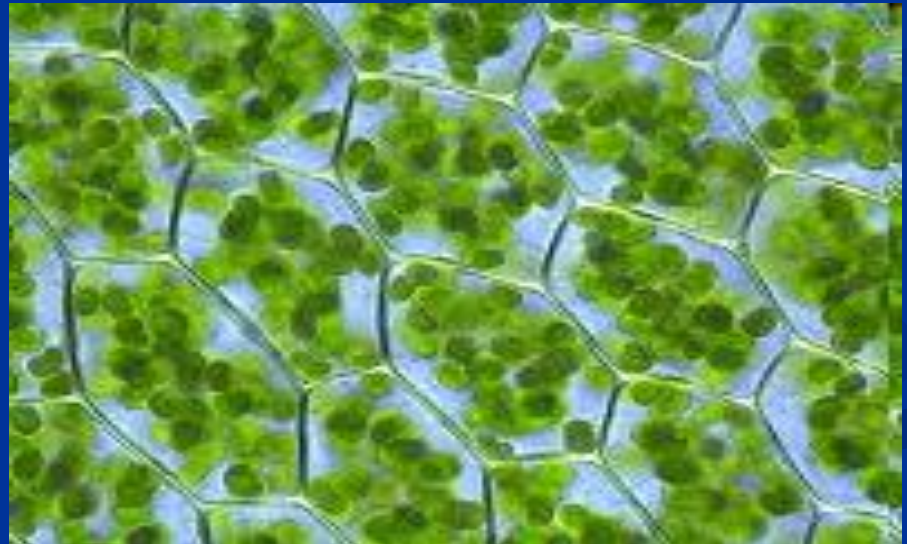


У высших растений фотосинтез осуществляется в специализированных клетках органоидов листьев — **хлоропластах**.

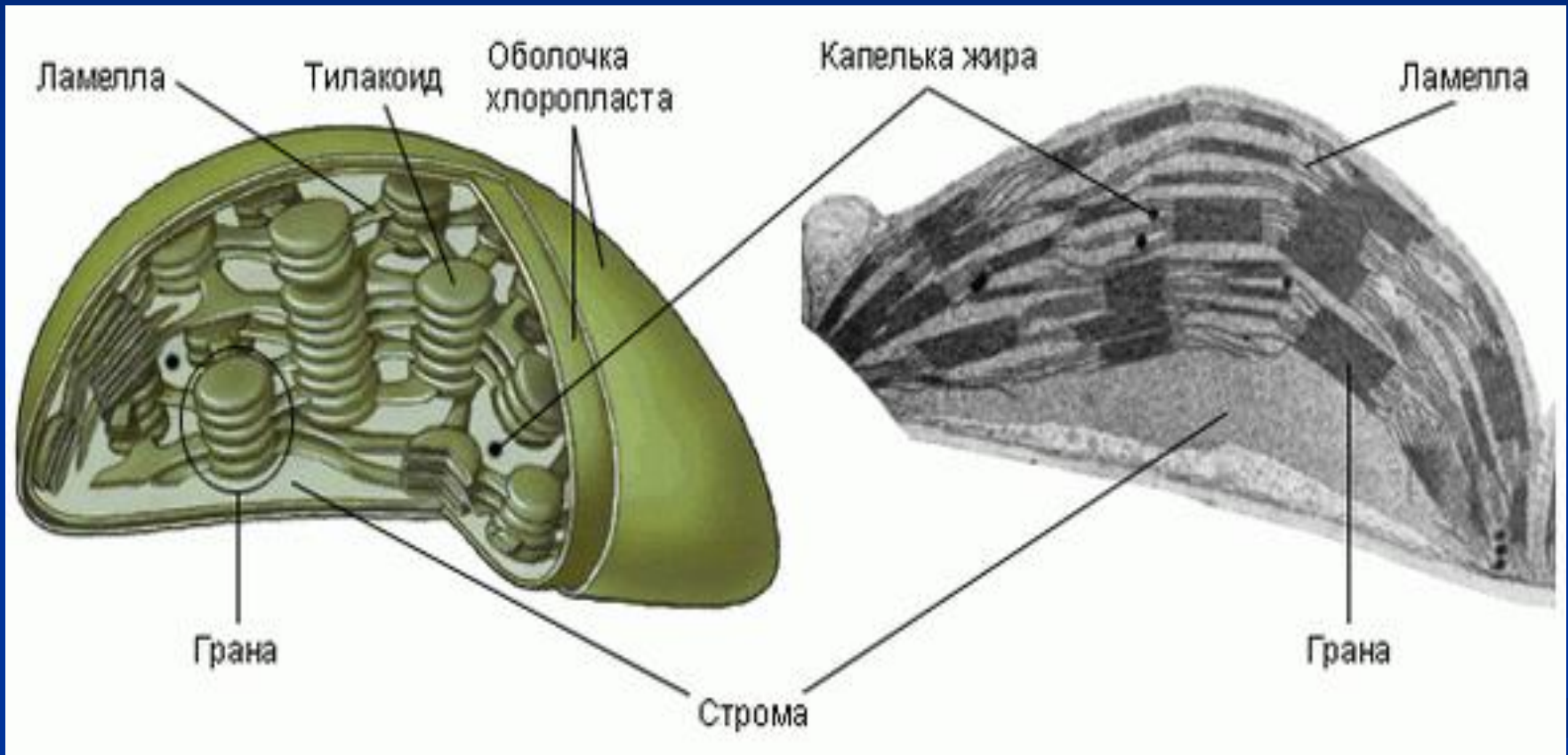
Хлоропласты — это округлые, или дискообразные тельца длиной 1-10 мкм, толщиной до 3 мкм. Содержание их в клетках от 20 до 100.

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

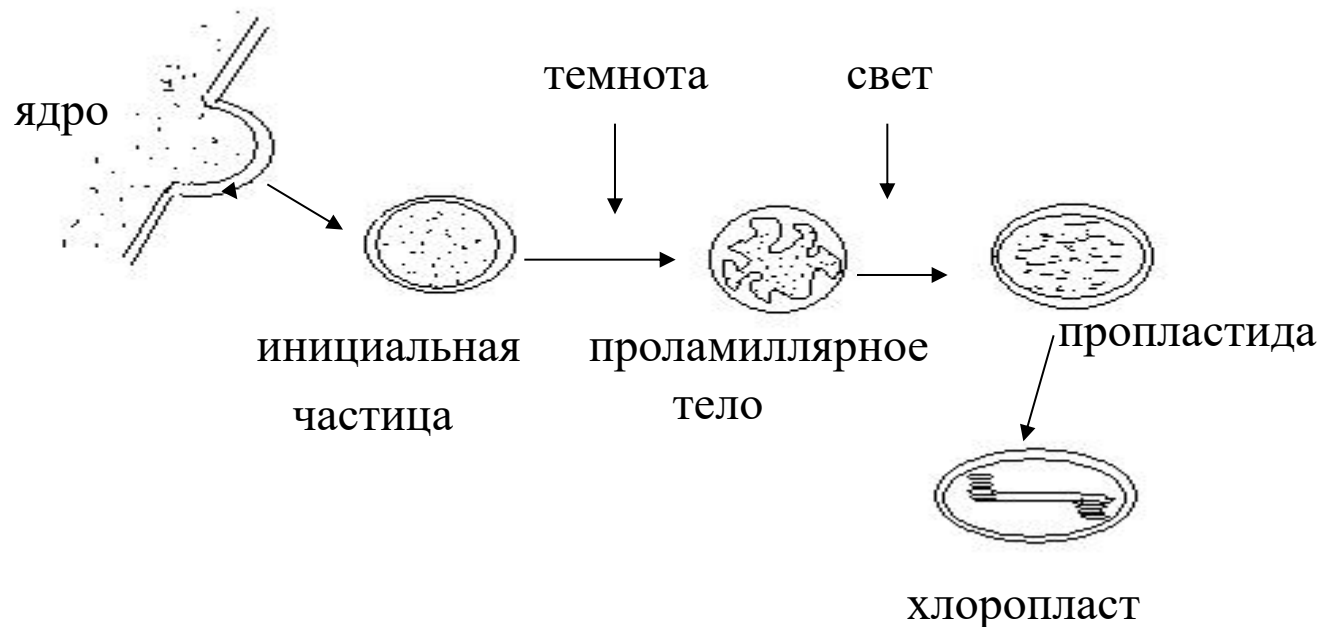
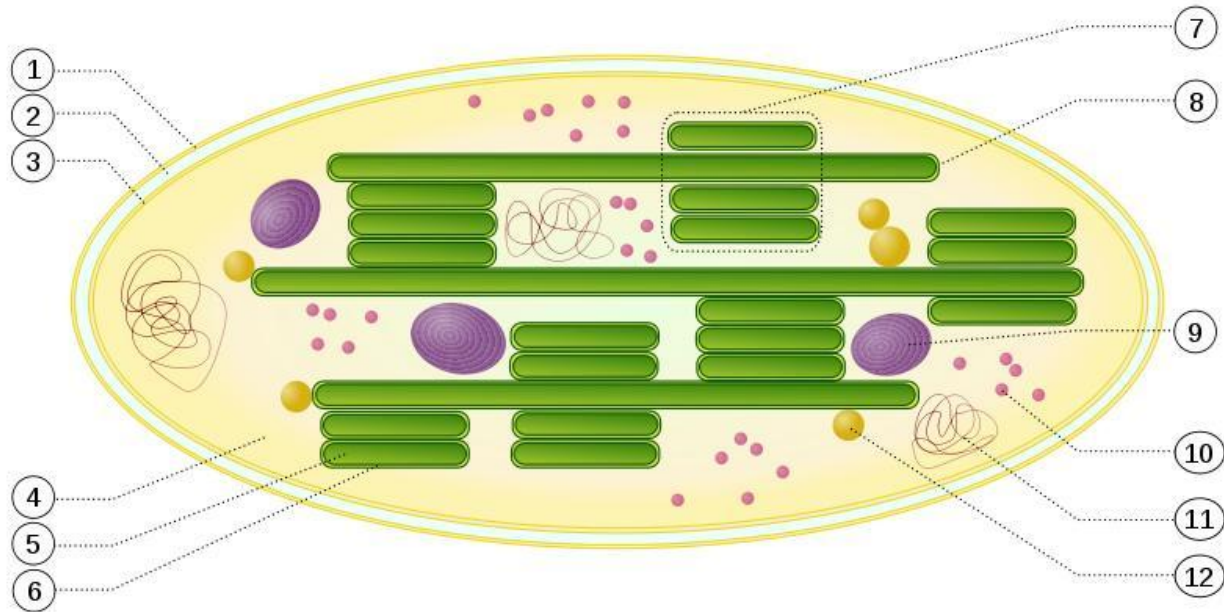


схема ядерного пути

Онтогенез хлоропластов



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



Ультраструктура хлоропласта:

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

Пигменты фотосинтезирующих растений

хлорофиллы



фикобилины



каротиноиды

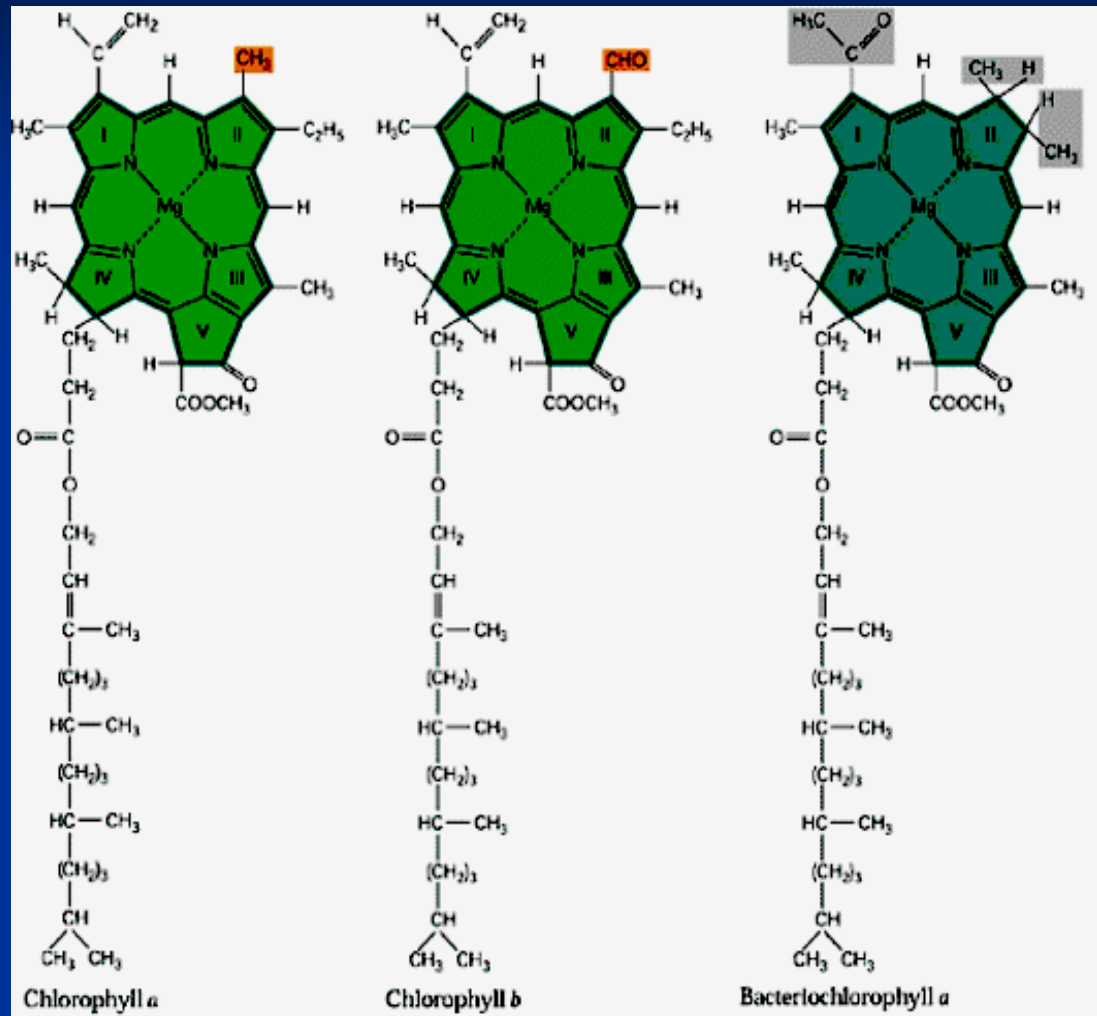


флавоноидные
пигменты



Хлорофиллы

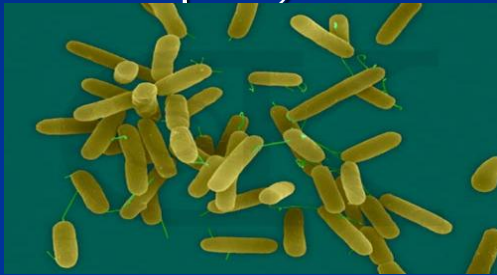
Хлорофилл — зелёный пигмент, обуславливающий окраску хлоропластов растений в зелёный цвет. По химическому строению хлорофиллы — магниевые комплексы различных тетрапирролов. Хлорофиллы имеют порфириновое строение.



Хлорофиллы

Хлорофилл «а»

(сине-зеленые
бактерии)



Хлорофилл «с»

(бурые водоросли)



Хлорофилл «b»

(высшие растения,
зеленые, харовые
водоросли)



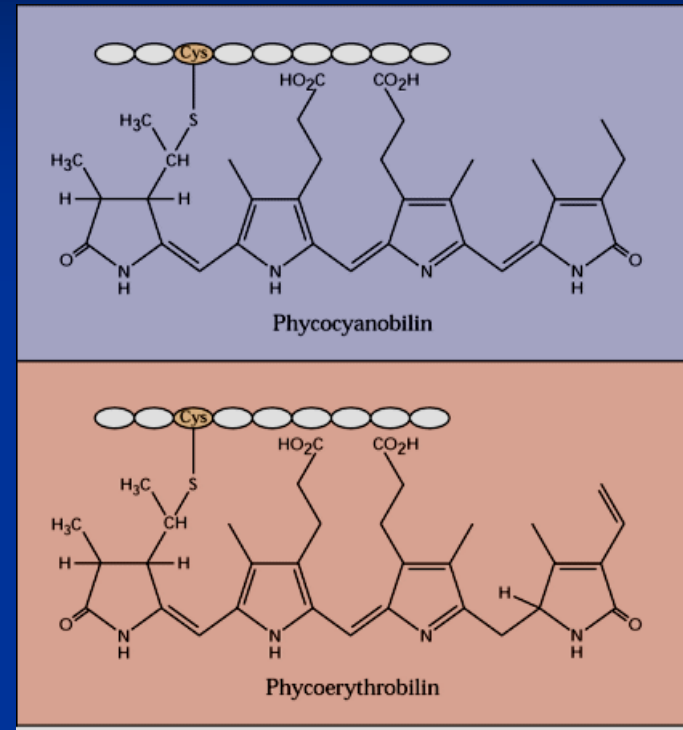
Хлорофилл «d»

(красные водоросли)



Фикобилины

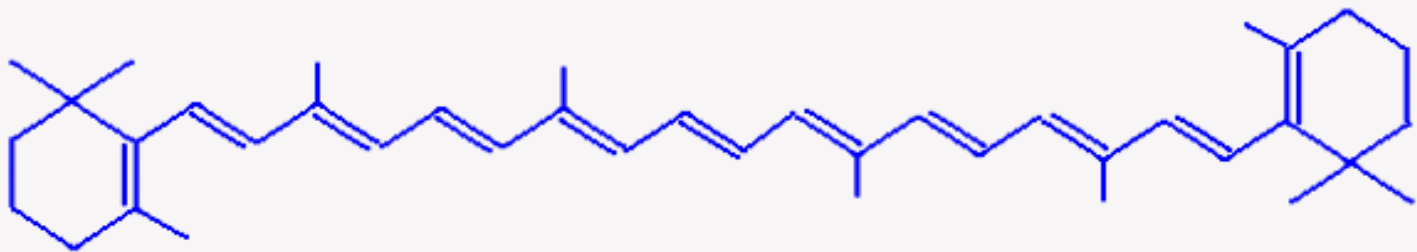
Фикобилины — это пигменты, представляющие собой вспомогательные фотосинтетические пигменты, которые могут передавать энергию поглощенных квантов света на хлорофилл, расширяя спектр действия фотосинтеза.



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.

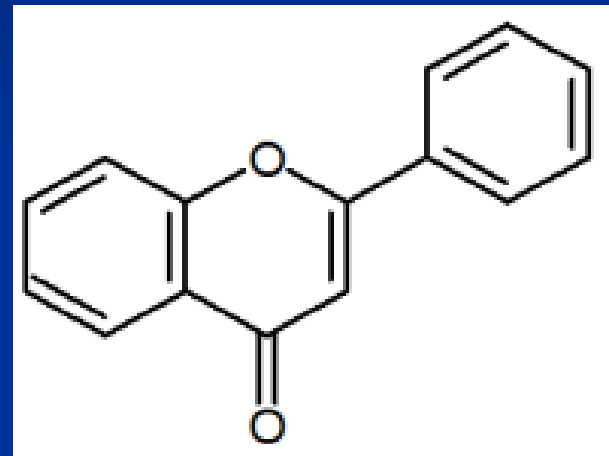


Содержится в листьях всех растений, а также в корне моркови, плодах шиповника и др. Является провитамином витамина А.

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 C6-C3-C6 ряда — в их молекулах имеются два бензольных ядра, соединенных друг с другом трехуглеродным фрагментом.



Структура флавонов

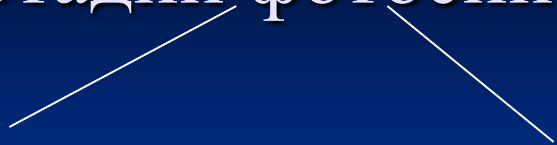
Флавоноидные пигменты:

- **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.

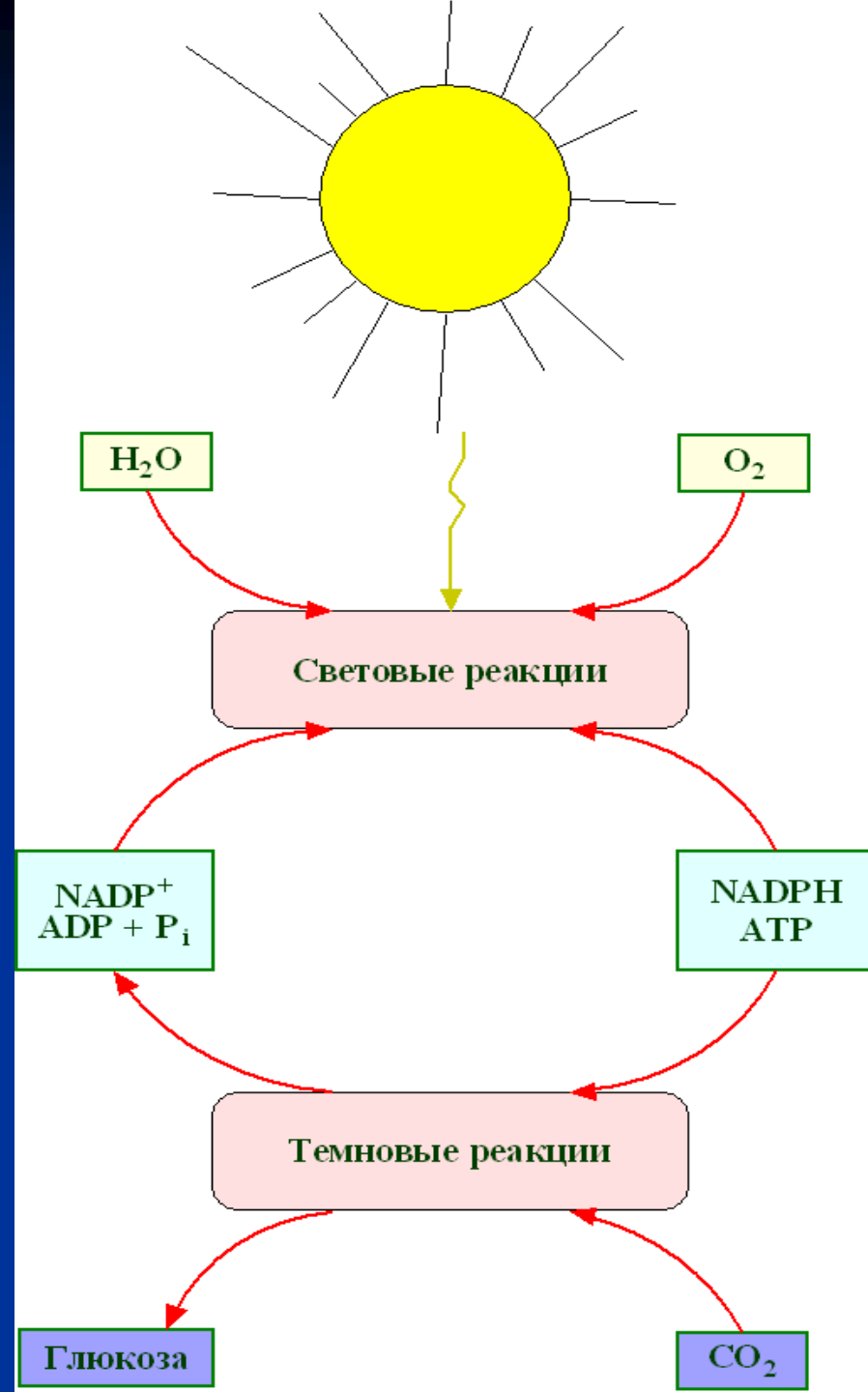
Протекает при наличии
света Быстрые < 10 (-5)
сек

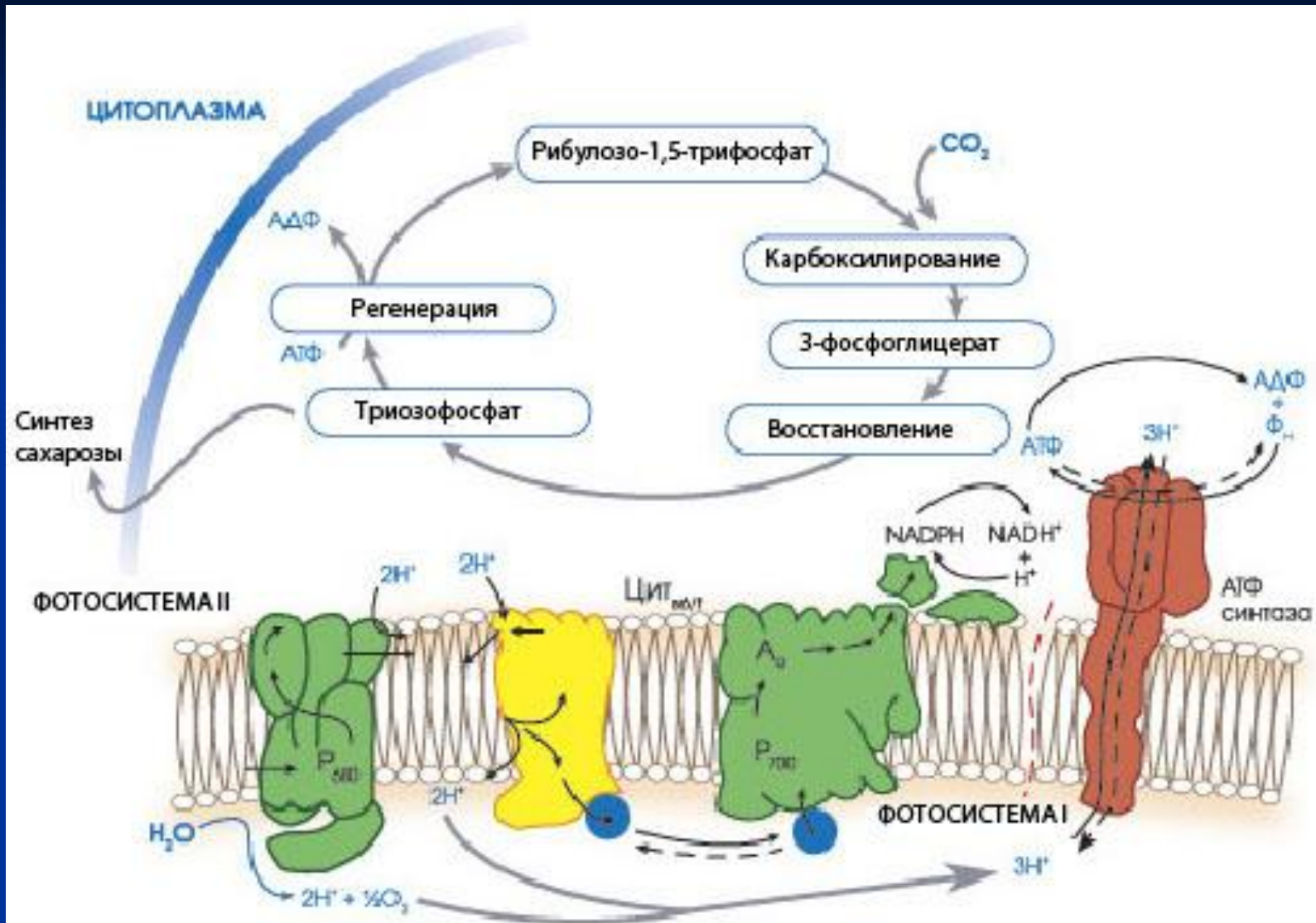
темновая

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:

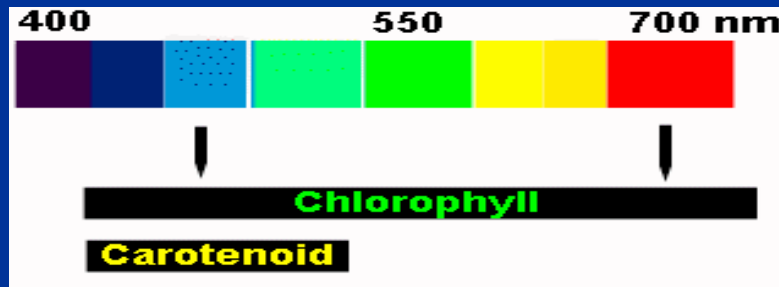
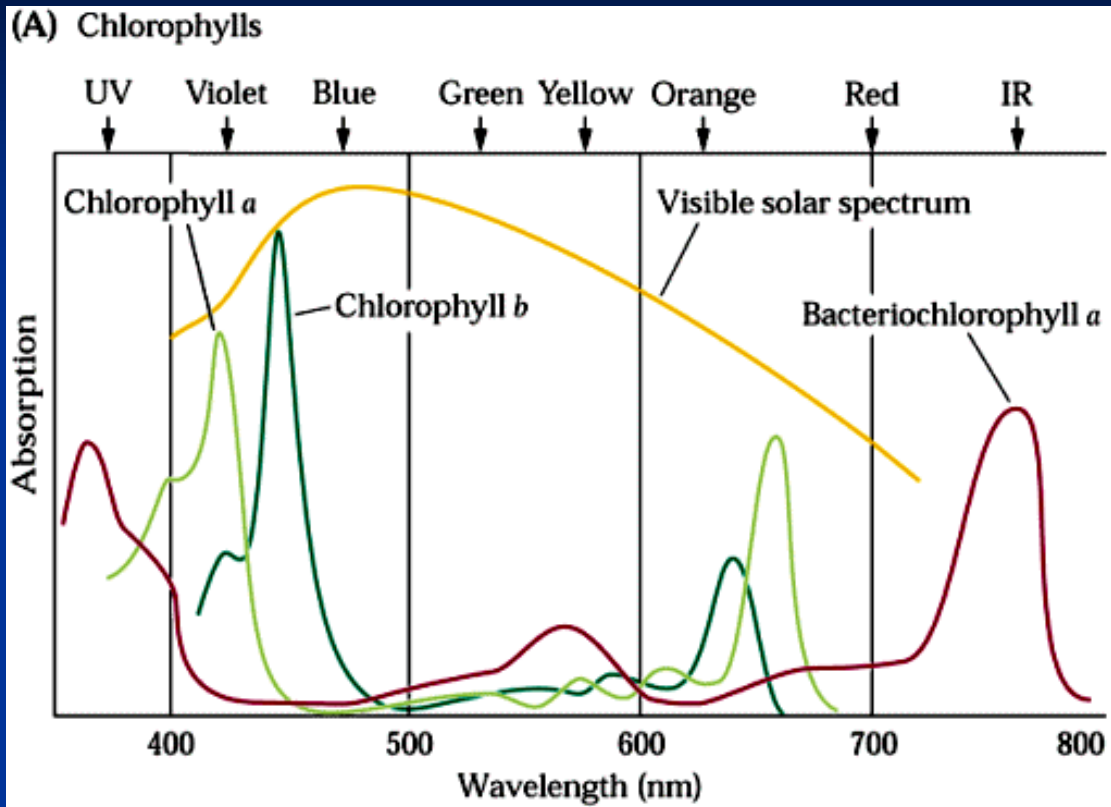


Спектры поглощения

ФАР : 380 – 710 нм

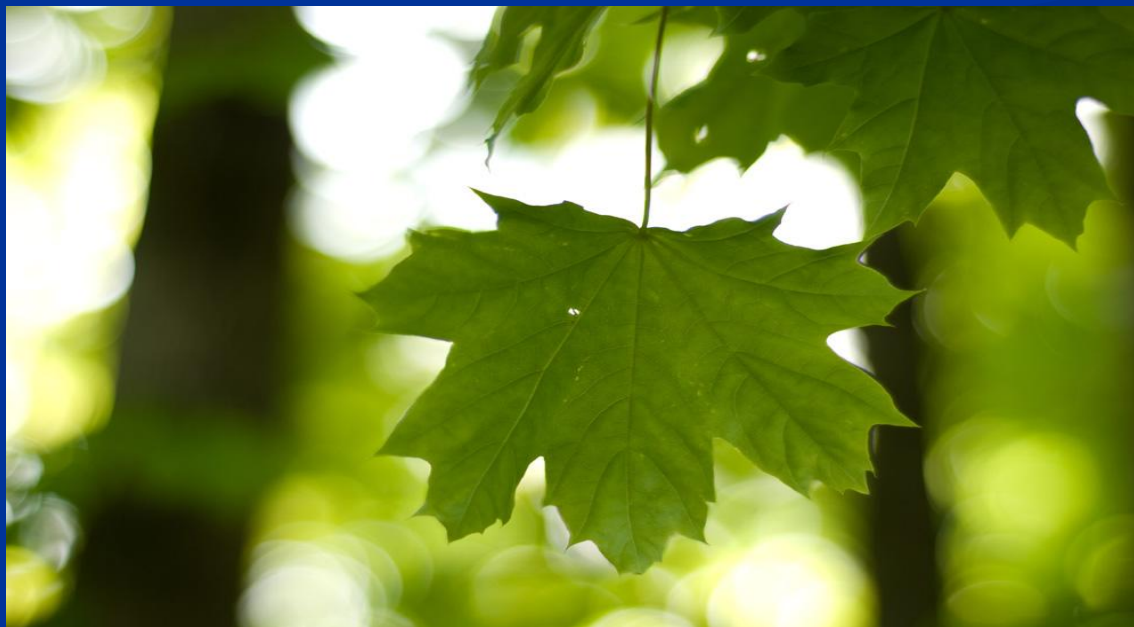
Каротиноиды: 400-550 нм главный максимум: 480 нм

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



```
graph TD; A[Пигментные системы] --> B[Фотосистема I]; A --> C[Фотосистема II];
```

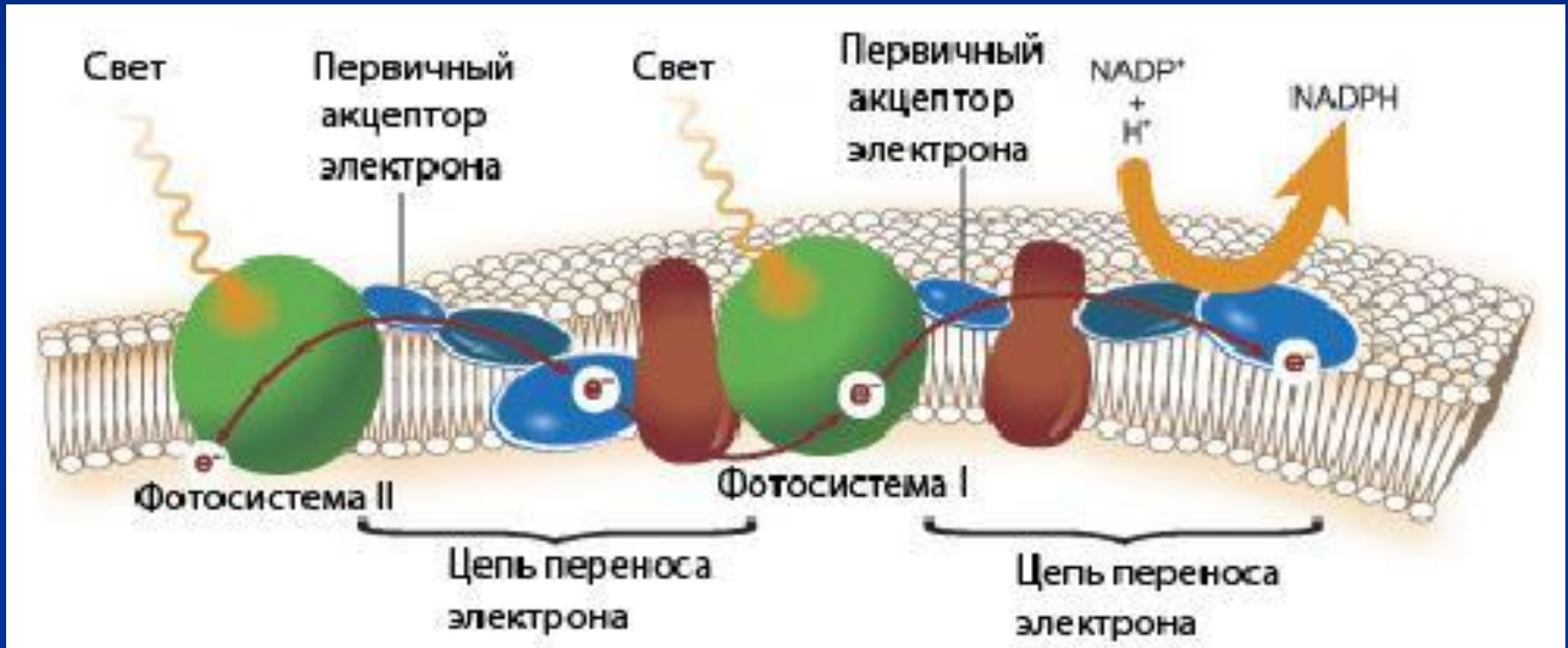
Фотосистема I

Состоит из 200 молекул хлорофилла «a», 50 молекул каротиноидов и 1 молекулы пигмента (P_{700})

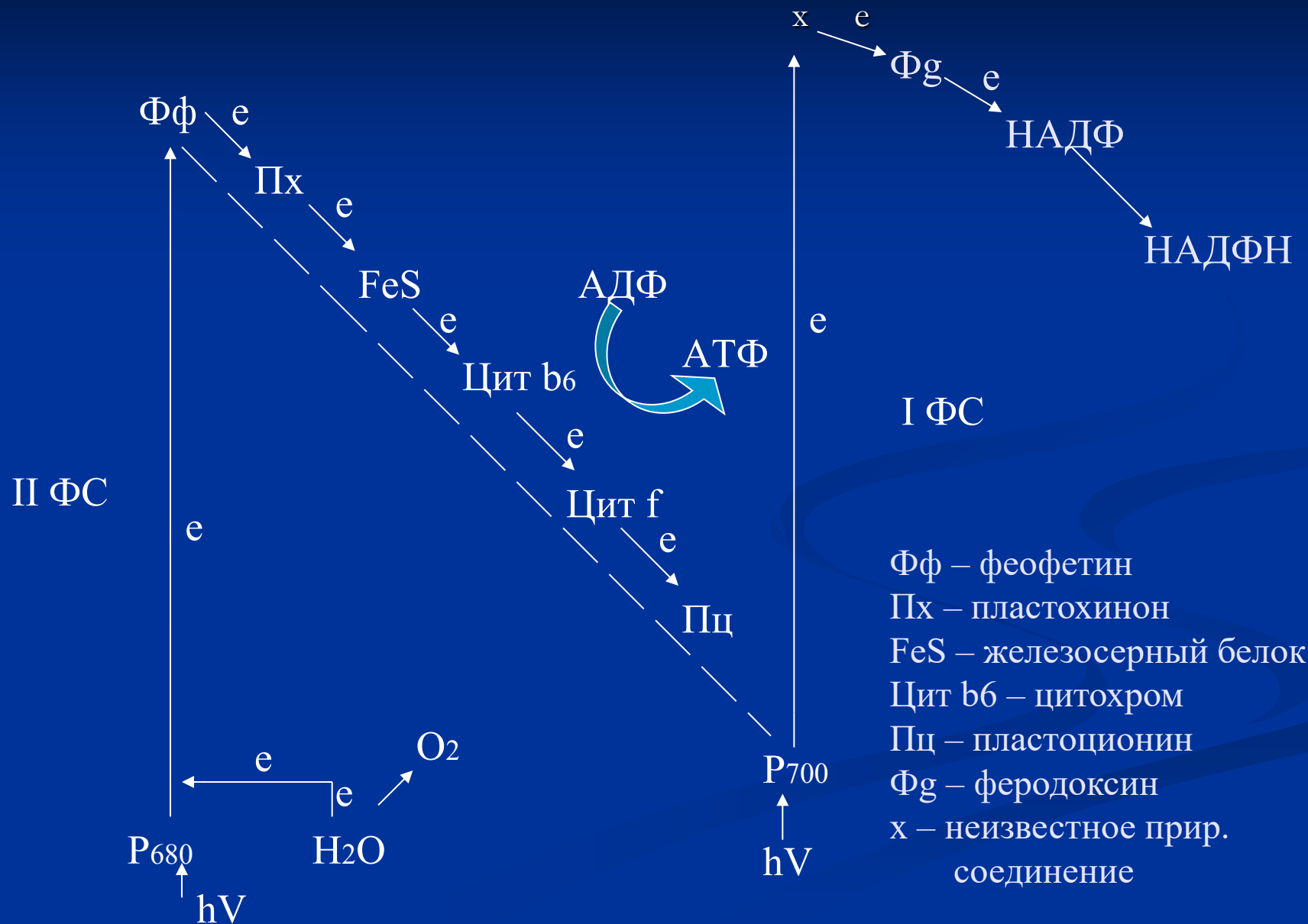
Фотосистема II

Состоит из 200 молекул хлорофилла « a_{670} », 200 молекул хлорофилла «b» и одной молекулы пигмента (P_{680})

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.

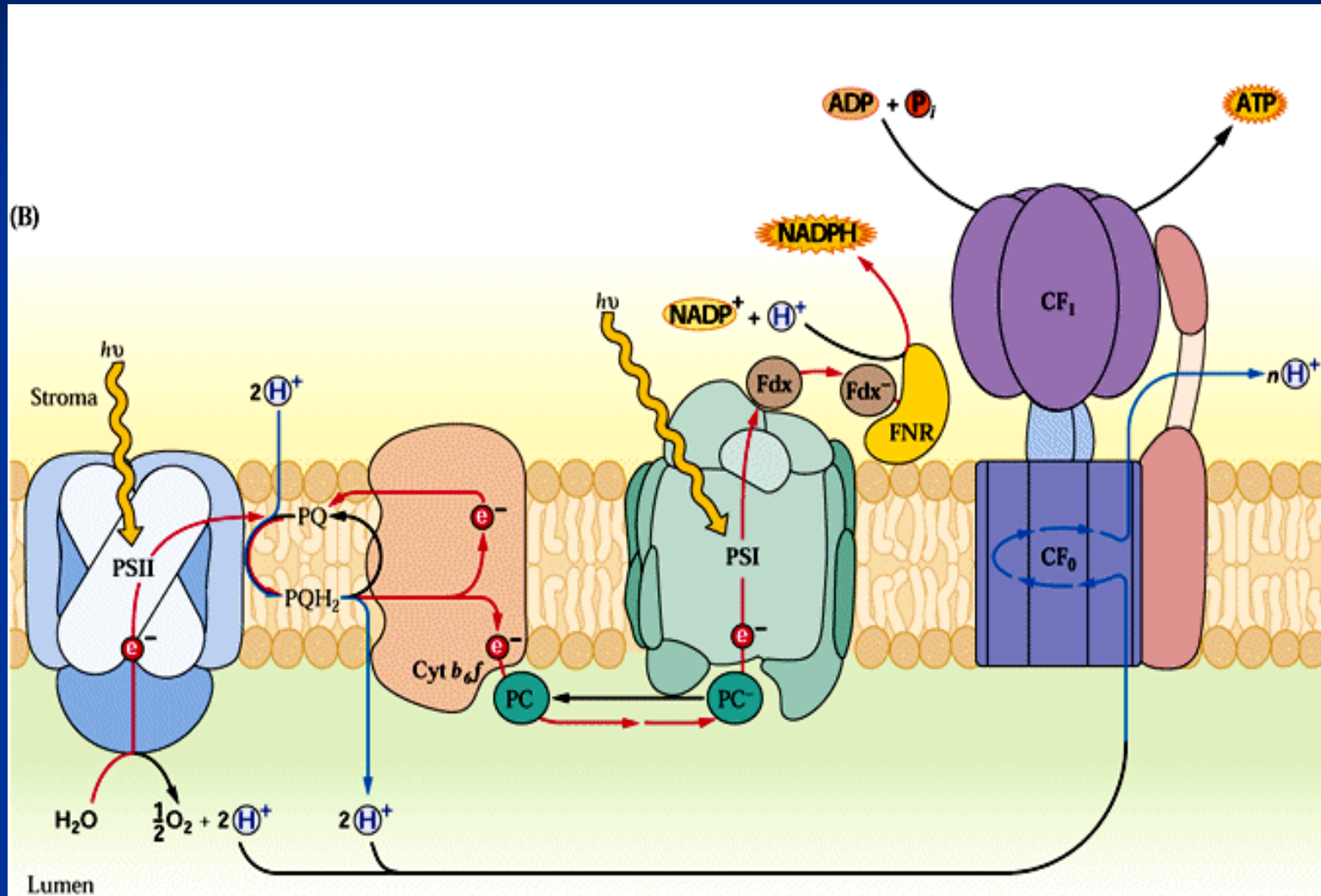
Виды:

- **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 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.

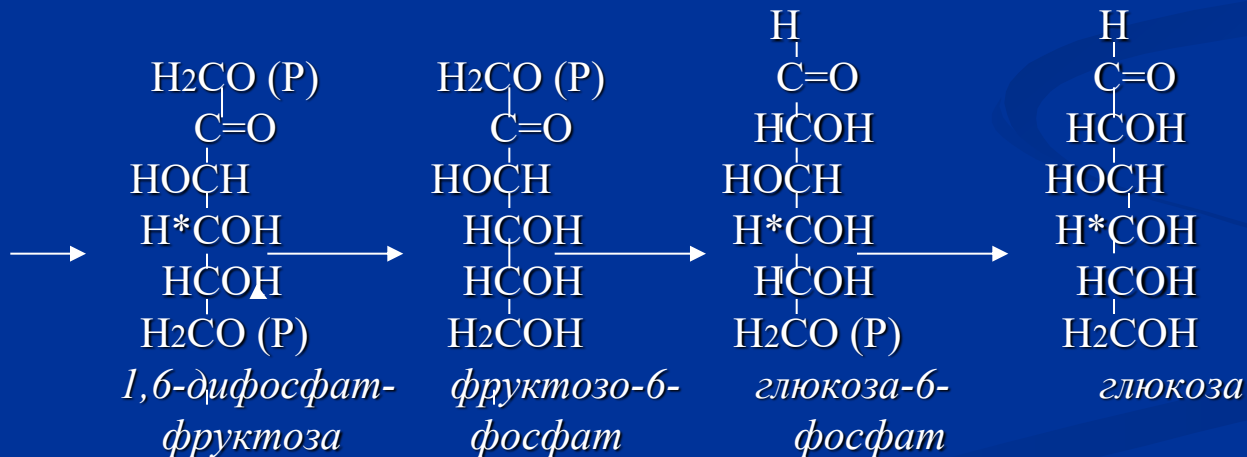
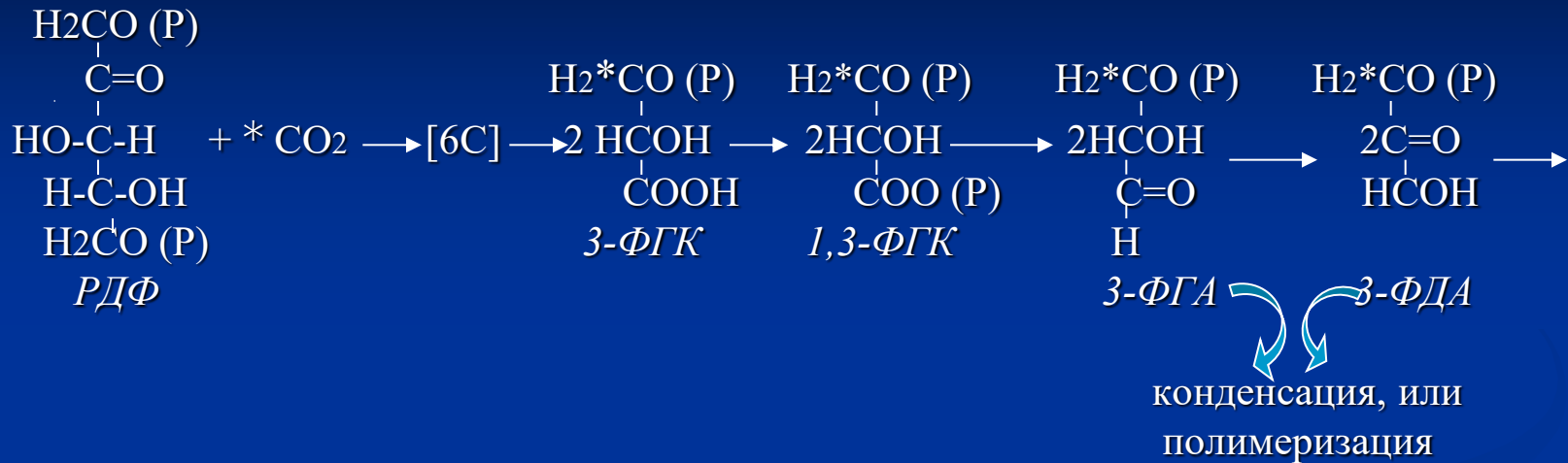


СЗ-фотосинтез, цикл Кальвина

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



С₄-фотосинтез (путь Хэтча – Слэка – Карпилова)

Осуществляется у растений с двумя типами хлоропласта.

Акцептором CO₂ помимо РДФ может быть трехуглеродное соединение – фосфоэнол ПВК (ФЕП)

С₄ – 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.



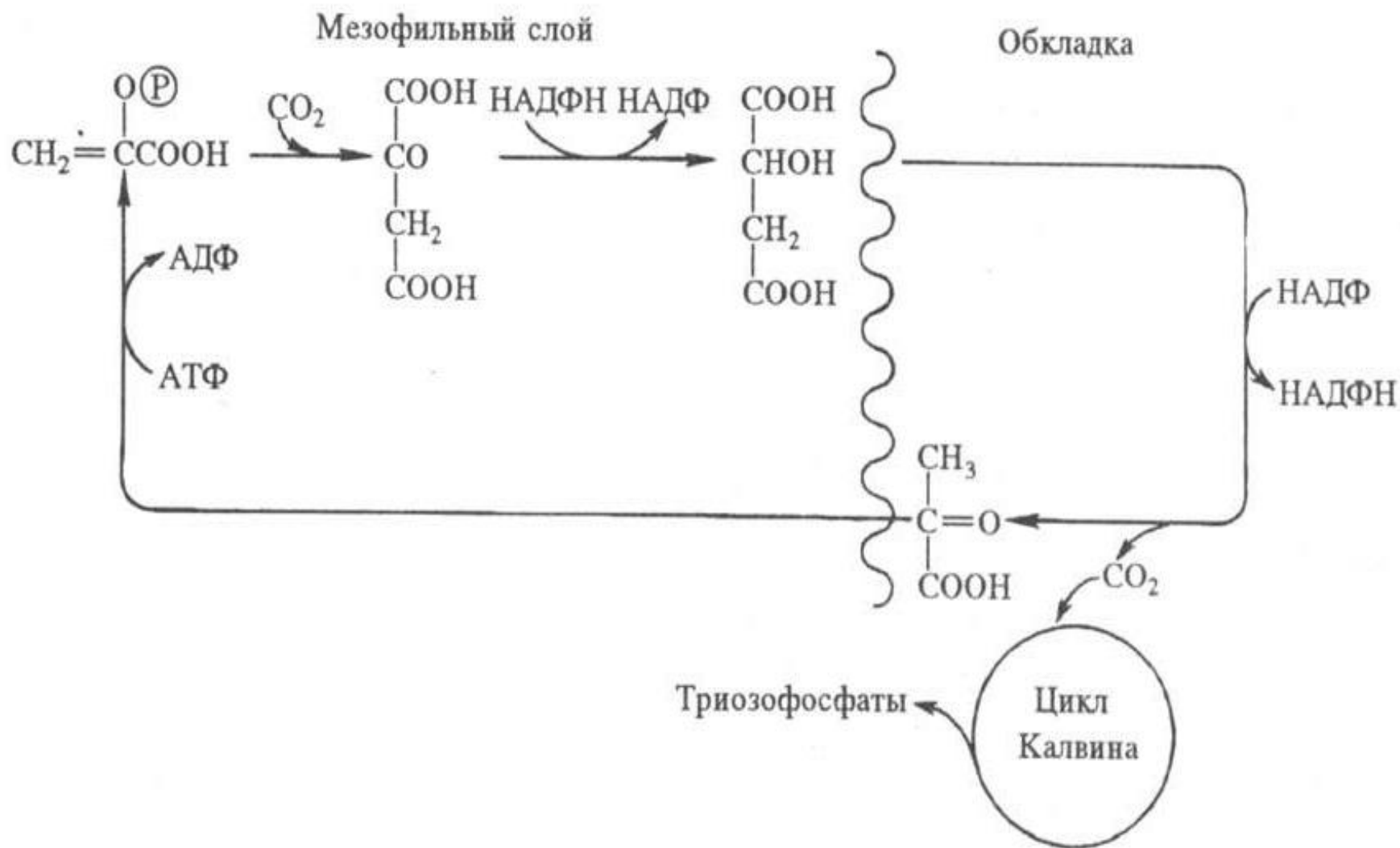


Рис. 5. С₄-Цикл фиксации CO₂.

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 CO_2 и цикла Кальвина не в пространстве как у 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 C_4 , и C_3 .

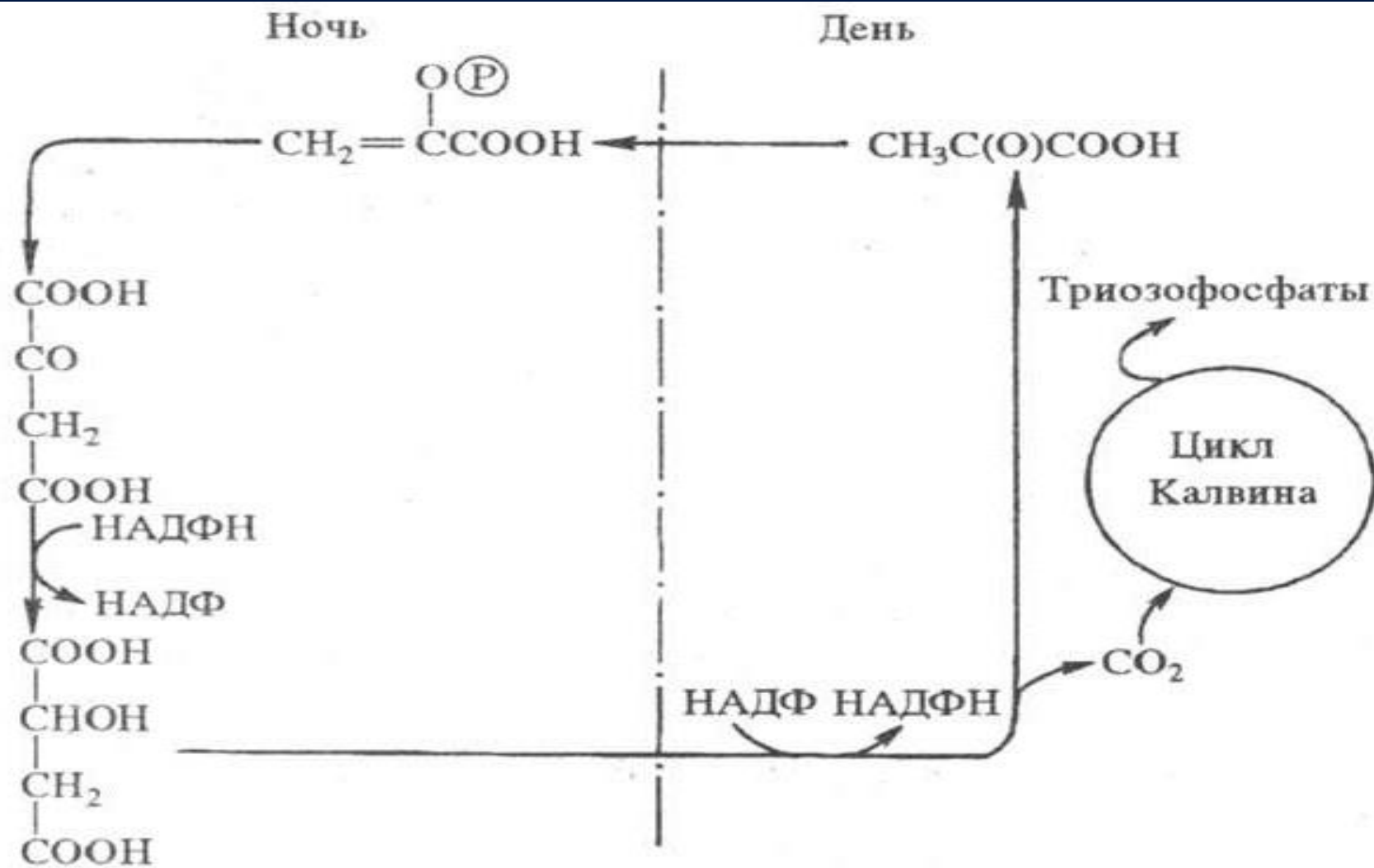
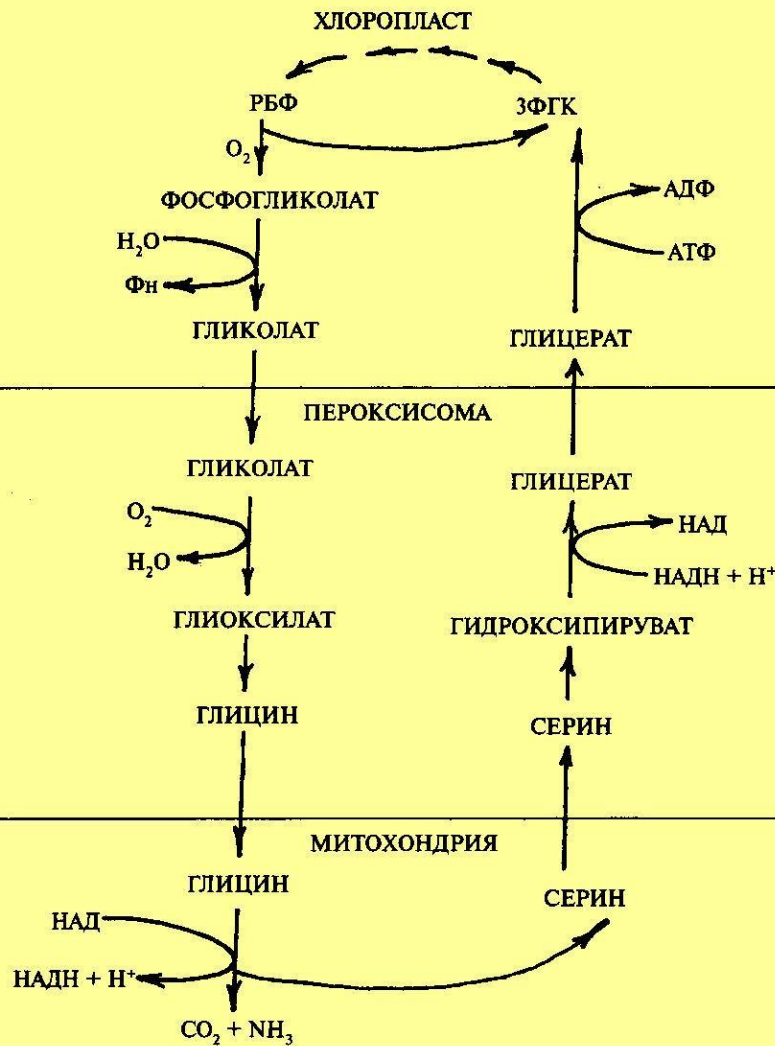
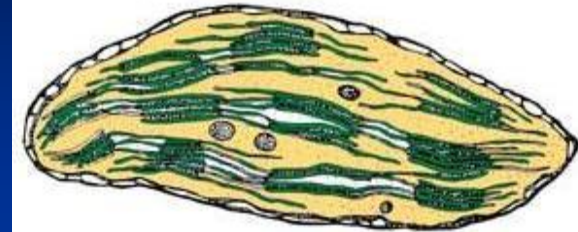


Рис. 6. САМ-тип углеродного обмена.

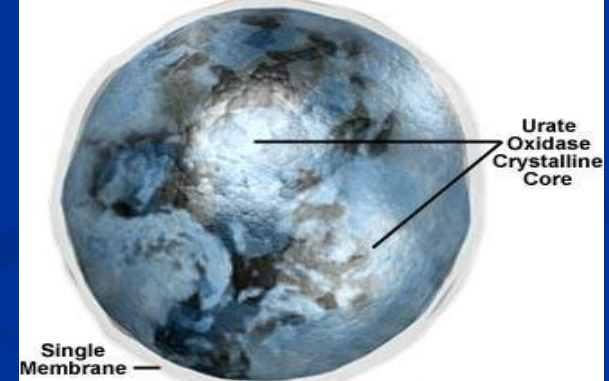
Фотодыхание



Хлоропласт



пероксисома



Митохондрия



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

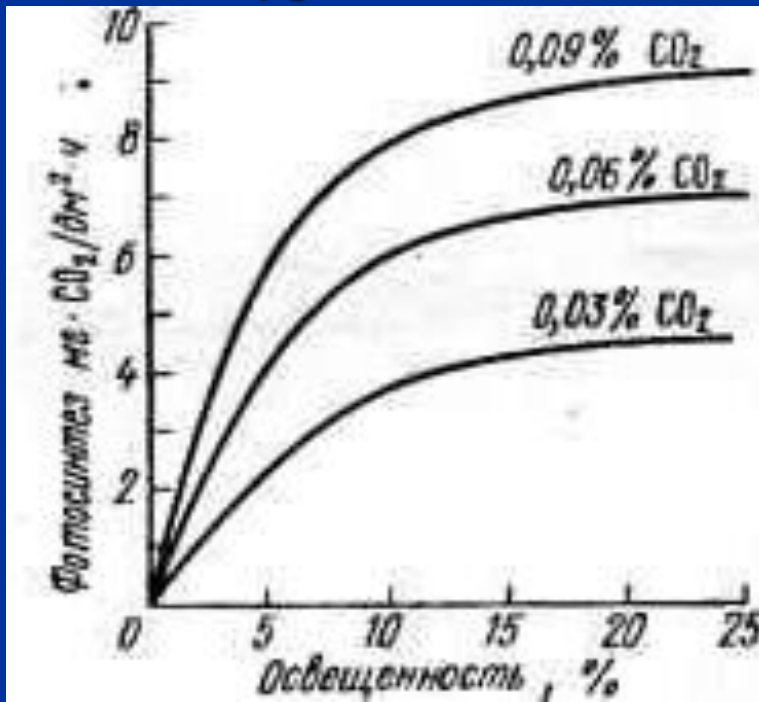
1. Онтогенетическое состояние растения.

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



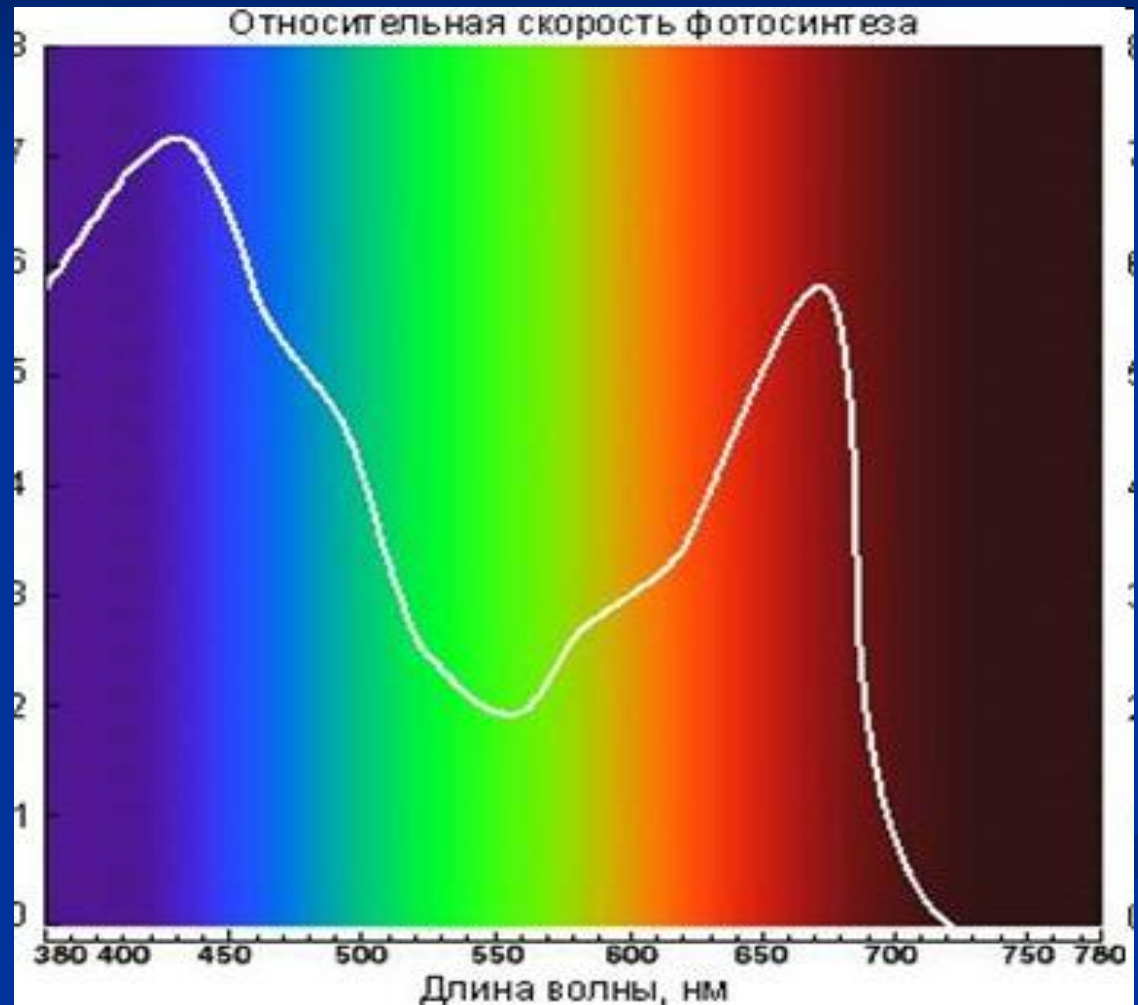
Факторы, влияющие на фотосинтез

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. CO₂.

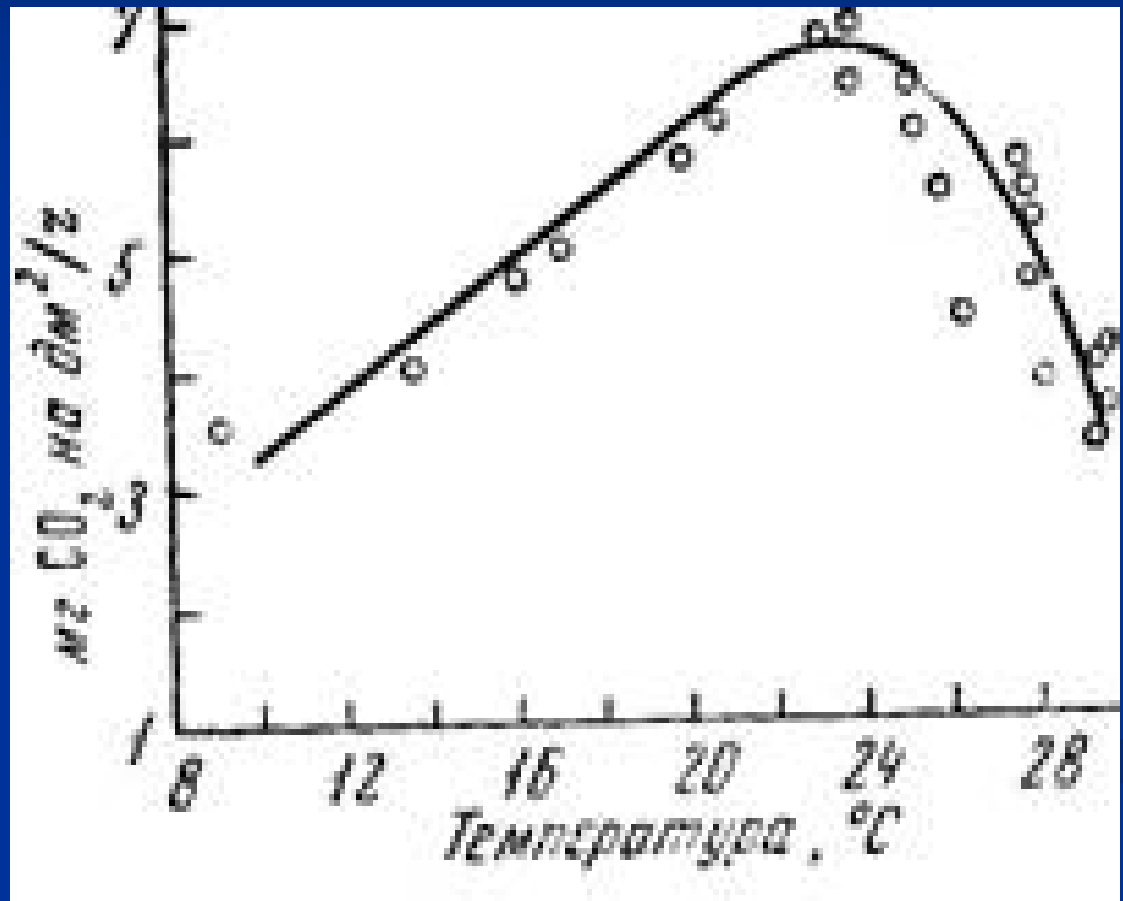
Является основным субстратом фотосинтеза и от его содержания зависит интенсивность этого процесса. В атмосфере содержится 0,03% по объему; увеличение объема углекислого газа от 0,1 до 0,4% увеличивает интенсивность фотосинтеза до определенного предела, а затем сменяется углекислотным насыщением.



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.

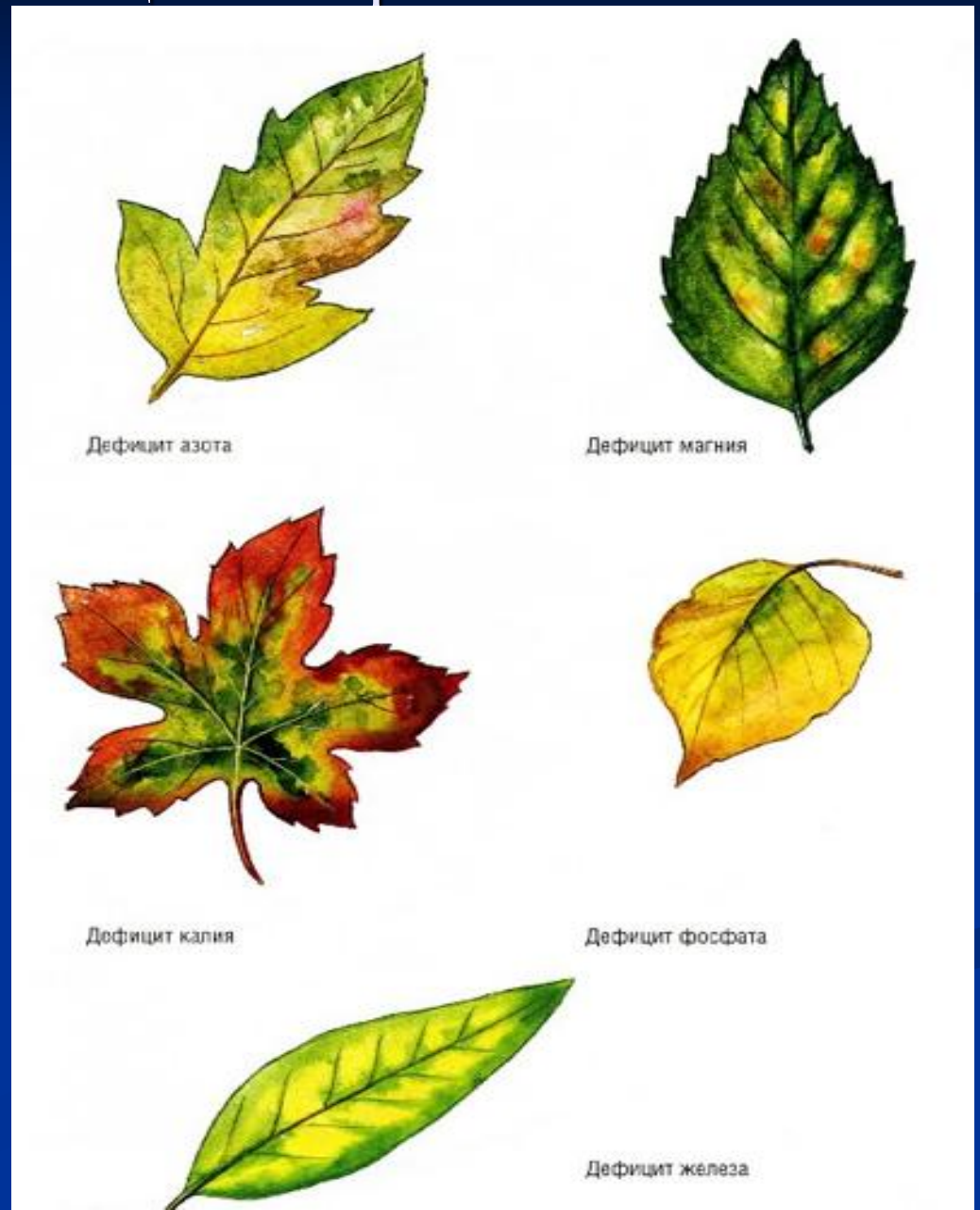
Снижение обезвоженности тканей более чем на 20% приводит к уменьшению интенсивности фотосинтеза и к его дальнейшему прекращению, если потеря воды будет более 50%.



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%



Факторы, влияющие на фотосинтез

8. Загрязняющие вещества и химические препараты.

Вызывают снижение фотосинтеза. Наиболее опасные вещества: NO_2 , 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.

