

Фотосинтез

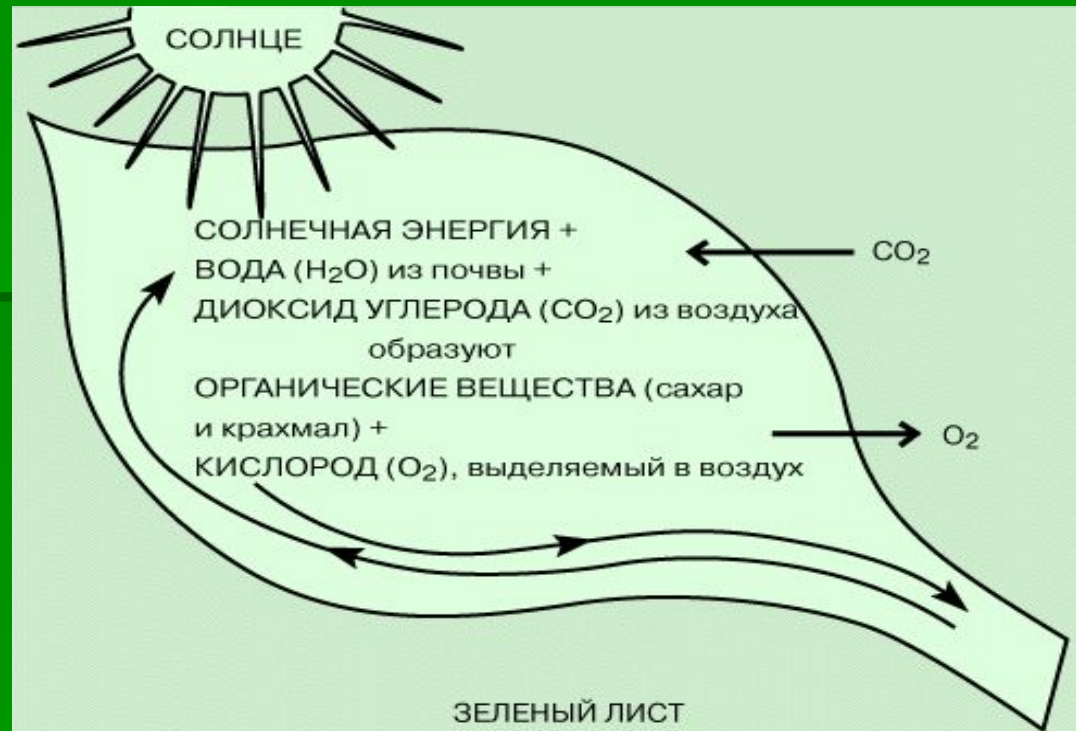


Типы ассимиляции углерода

Тип питания	Источник углерода	Источник водорода	Источник энергии
гетеротрофный	Органическое вещество	Органическое вещество	Органическое вещество
Автотрофный			
1. Фотосинтез	CO_2	H_2O	Энергия квантов света
2.	CO_2	H_2S , H_2	Энергия квантов света
Бактериальный фотосинтез			
3. Хемосинтез	CO_2	H_2O , H_2S , NH_3 , H_2	Энергия химических связей

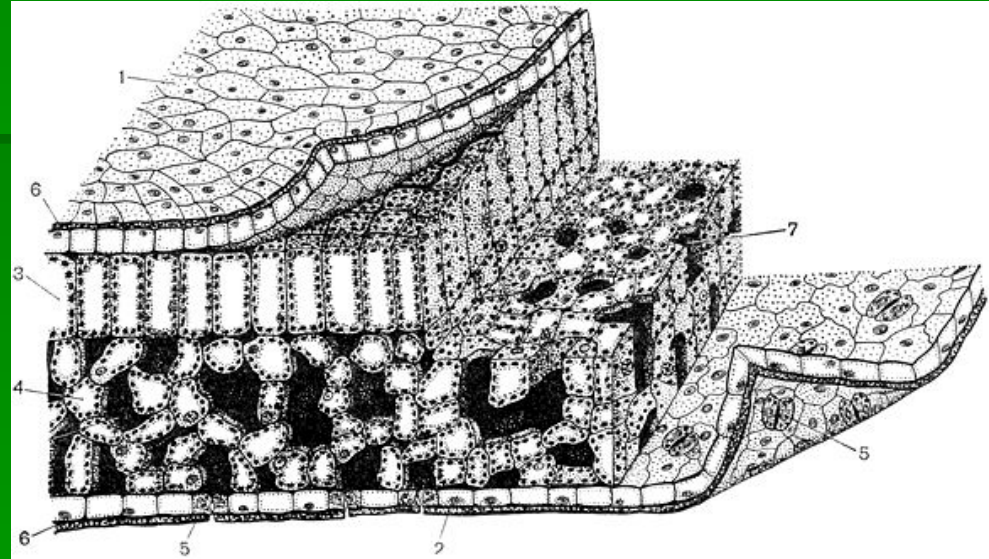
Фотосинтез у растений

- Фотосинтез — процесс образования органического вещества из углекислого газа и воды на свету при участии фотосинтетических пигментов.



Лист как орган фотосинтеза

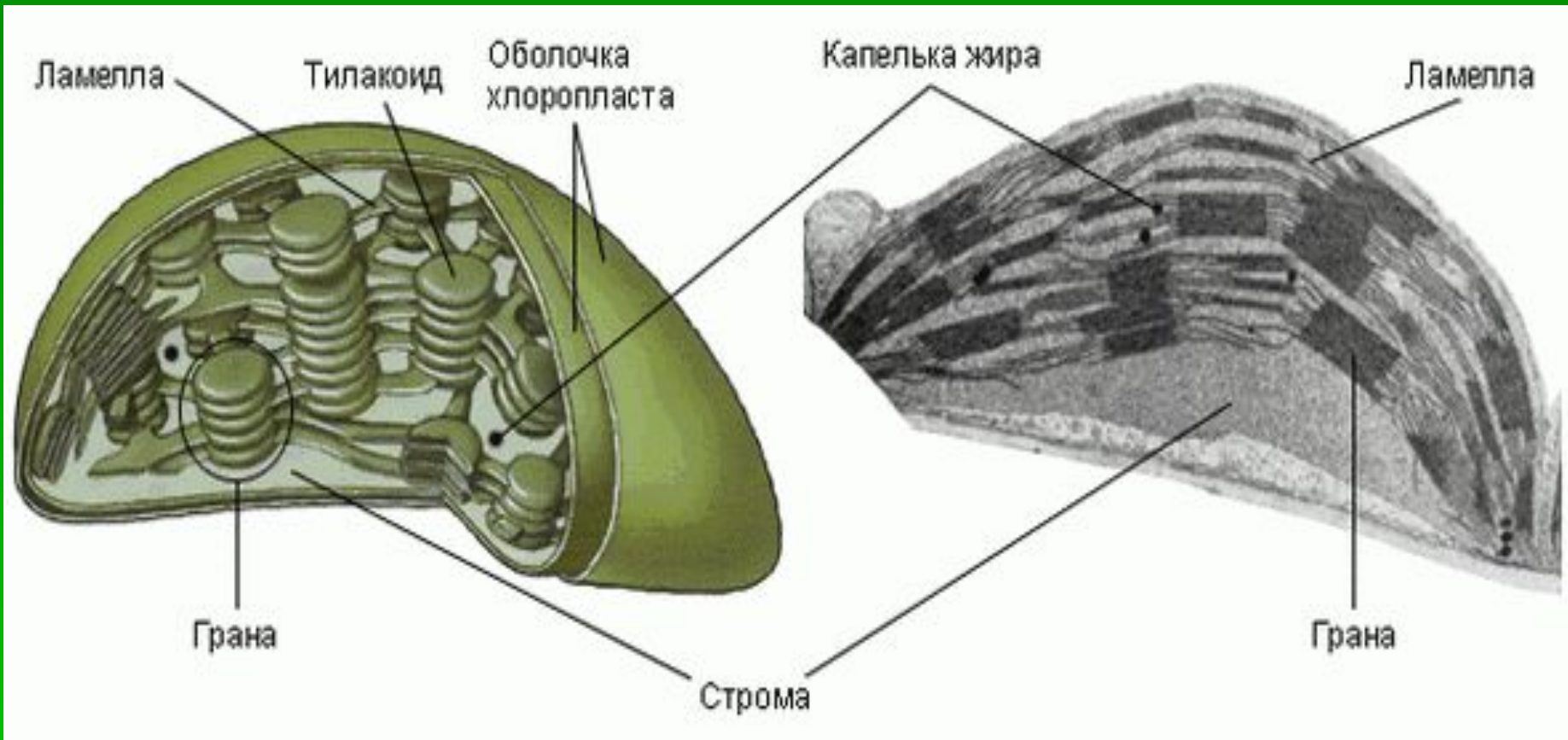
- Углекислый газ, который усваивается в процессе фотосинтеза, поступает в лист через устьица. К верхней стороне листа прилегает палисадная ткань, клетки которой богаты хлоропластами. Чтобы процесс фотосинтеза проходил непрерывно, клетки должны быть достаточно насыщенны водой, устьица регулируют этот процесс.



Строение листа растения.

- 1 — клетки верхнего эпидермиса; 2 — клетки нижнего эпидермиса; 3 — клетки столбчатой паренхимы; 4 — клетки губчатой паренхимы; 5 — замыкающие клетки устьиц, щель между каждой их парой — просвет устьица; 6 — кутикула, покрывающая слой как верхнего, так и нижнего эпидермиса; 7 — межклеточные пространства.

Хлоропласты

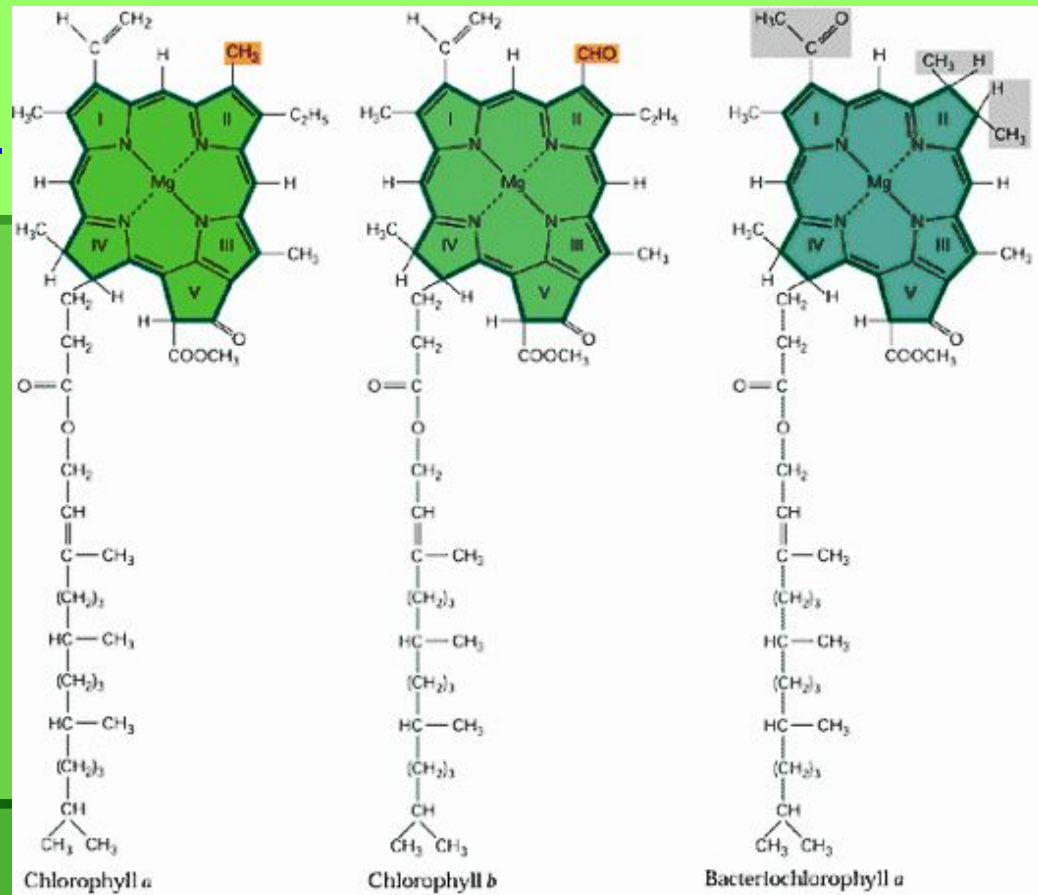


Основные классы фотосинтетических пигментов

- Хлорофиллы
- Каротиноиды
- Фикобилины

Хлорофиллы

Хлорофилл (от греч. chloros - зеленый и phyllon - лист) — зелёный пигмент, обуславливающий окраску растений в зелёный цвет. При его участии осуществляется процесс фотосинтеза. По химическому строению хлорофиллы — магниевые комплексы различных тетрапирролов. Хлорофиллы имеют порфириновое строение и структурно близки гему.



-тетрапирролы, образующие циклическую структуру хлорофилла (магний-порфирины)

Каротиноиды

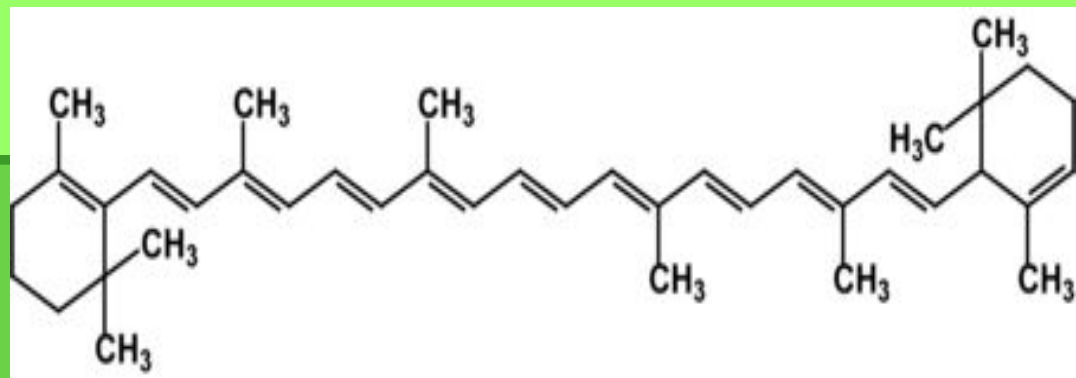
- Каротиноиды - природные органические пигменты фотосинтезируемые бактериями, грибами, водорослями и высшими растениями. Идентифицировано около 600 каротиноидов. Они имеют преимущественно жёлтый, оранжевый или красный цвет, по строению это циклические или ациклические изопреноиды.
- Каротины включают две основных группы структурно близких веществ:
 - каротины
 - ксантофиллы
- и другие растворимые в жирах пигменты.

Каротины

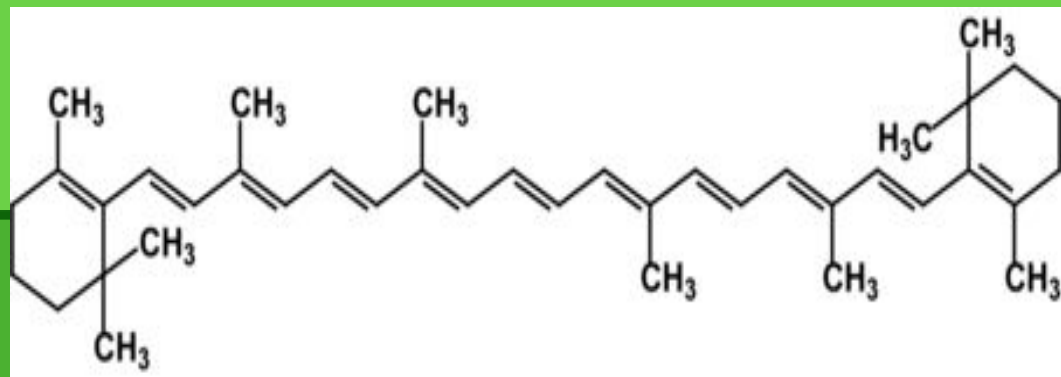
Каротин (от лат. *carota* — морковь) — желто-оранжевый пигмент, непредельный углеводород из группы каротиноидов.

Эмпирическая 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. Зарегистрирован в качестве пищевой добавки E160a.

Различают две формы каротина α -каротин и β -каротин. β -каротин встречается в желтых, оранжевых и зеленых листьях фруктов и овощей. Например в шпинате, салате, томатах, батате и других.

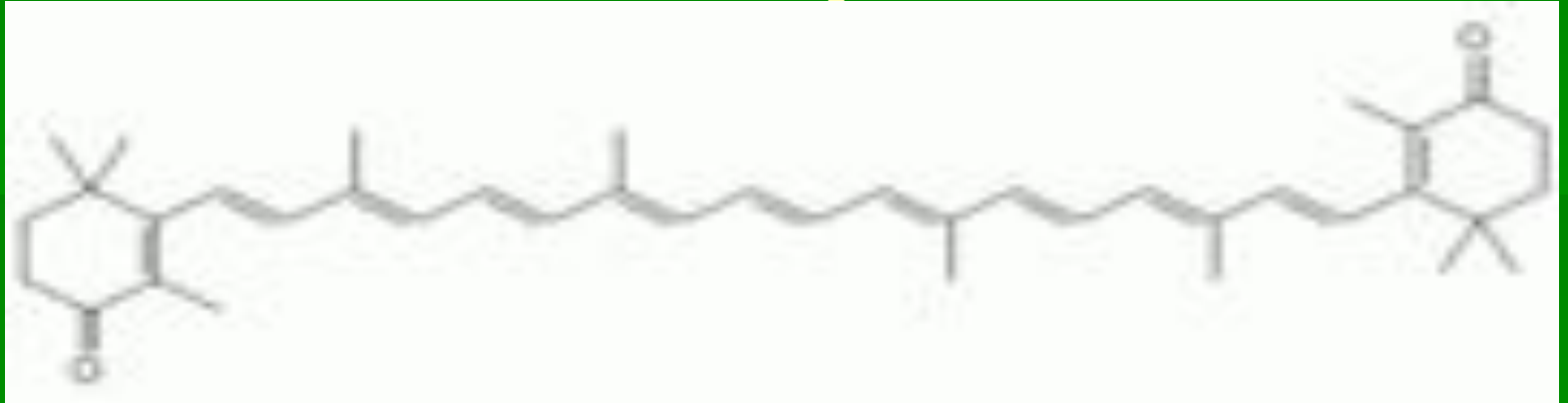


α -каротин



β -каротин

Ксантофилл



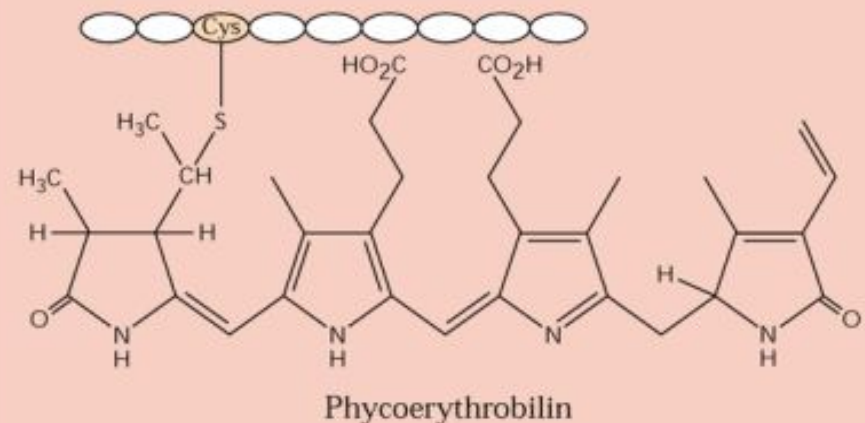
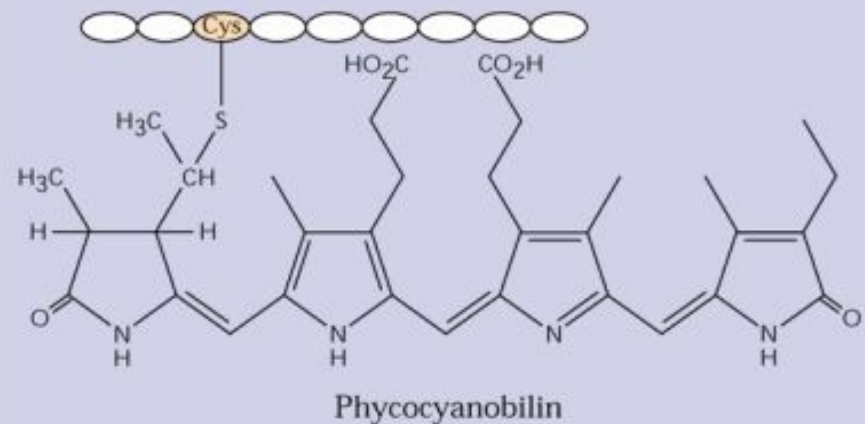
- Ксантофилл — растительный пигмент, кристаллизуется в призматических кристаллах жёлтого цвета, входит в состав хлорофилла; легко уединяется при встряхивании спиртового раствора хлорофилла с бензином, оставаясь в нижнем, спиртовом слое, между тем как зелёный пигмент и жёлтый — каротин — переходят в бензин. В спектре поглощения ксантофилла характерны три полосы поглощения в сине-фиолетовой части.

Фикобилины

Фикобилины (от греч. *phýkos* – водоросль и лат. *bilis* – жёлчь), пигменты красных и синезелёных водорослей (фикоэритрины – красные, фикоцианины – синие); белки из группы хромопротеидов, в состав небелковой части которых входят хромофоры билины – аналоги жёлчных кислот. Маскируют цвет основного пигмента фотосинтеза – хлорофилла. Выделены в кристаллическом виде. Аминокислоты в Ф. составляют 85%, углеводы – 5%, хромофоры – 4–5%. Общее содержание Ф. в водорослях достигает 20% (на сухую массу). Локализованы Ф. в клетке в особых частицах – фикобилисомах.

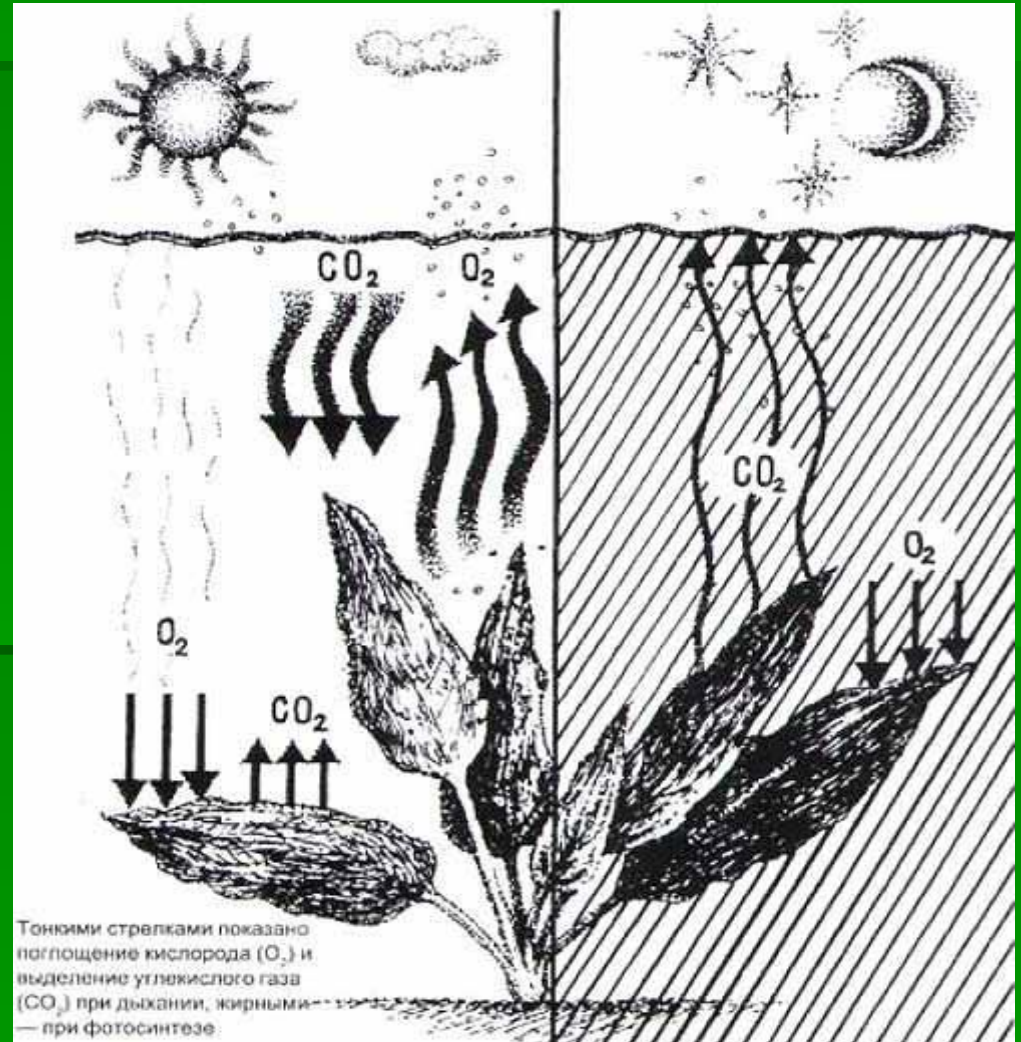
Поглощают кванты света в жёлто-зелёной области спектра. Участвуют в фотосинтезе в качестве сопровождающих пигментов, доставляя поглощённую энергию света к фотохимически активным молекулам хлорофилла. Нередко Ф. называют небелковую (хромофорную) часть этих пигментов.

Открытые тетрапиррольные структуры

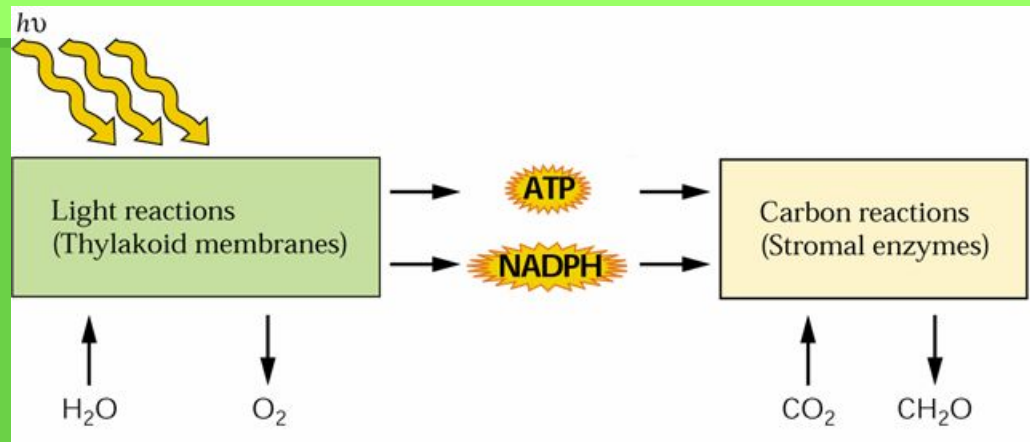


Световые и темновые реакции фотосинтеза

- Фотосинтез протекает в две фазы: световую, идущую только на свету, и темновую, которая идет как в темноте, так и на свету.



Световые и темновые реакции



Световые реакции:

Зависят от света

Не зависят от температуры

Быстрые < 10 (-5) сек

Протекают на мембранах

Темновые реакции:

Не зависят от света

Зависят от температуры

Медленные ~ 10 (-2) сек

Протекают в строме Хл

Световая фаза фотосинтеза.

Фотофизический этап

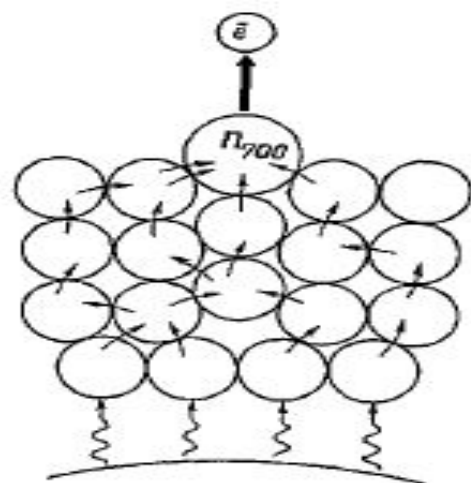
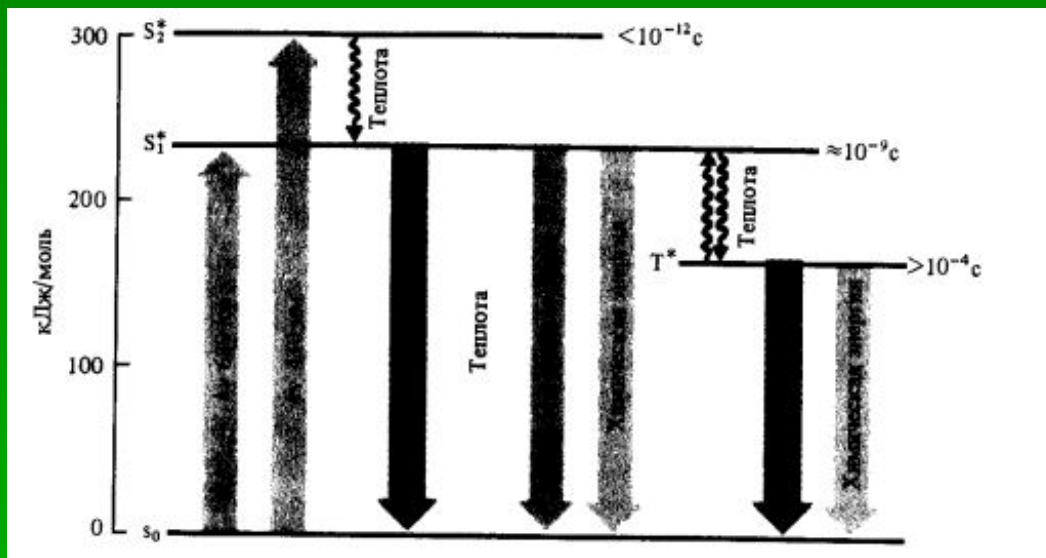


Рис. 45. Схема передвижения квантов света к хлорофиллу-ловушке.

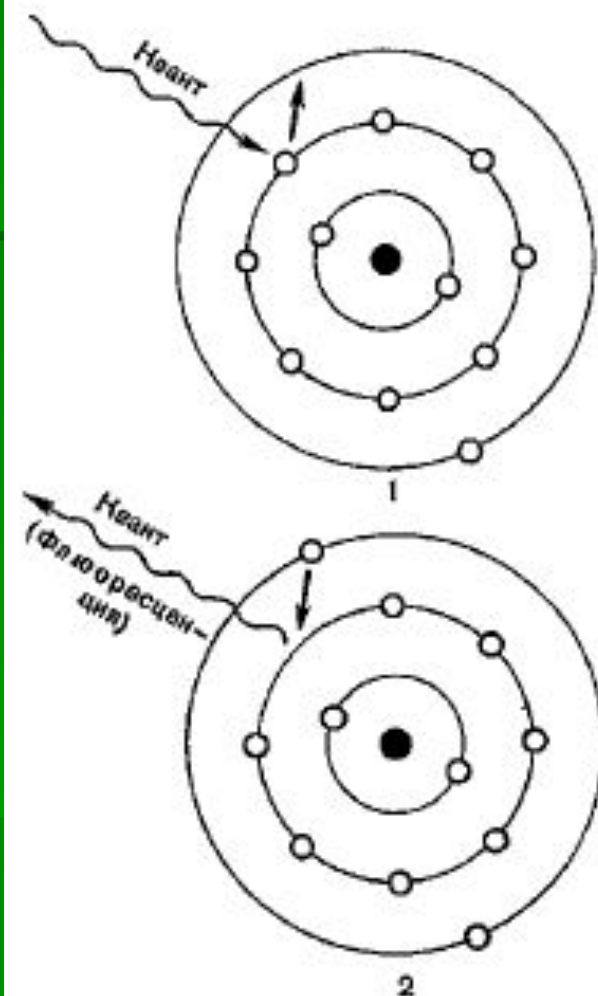


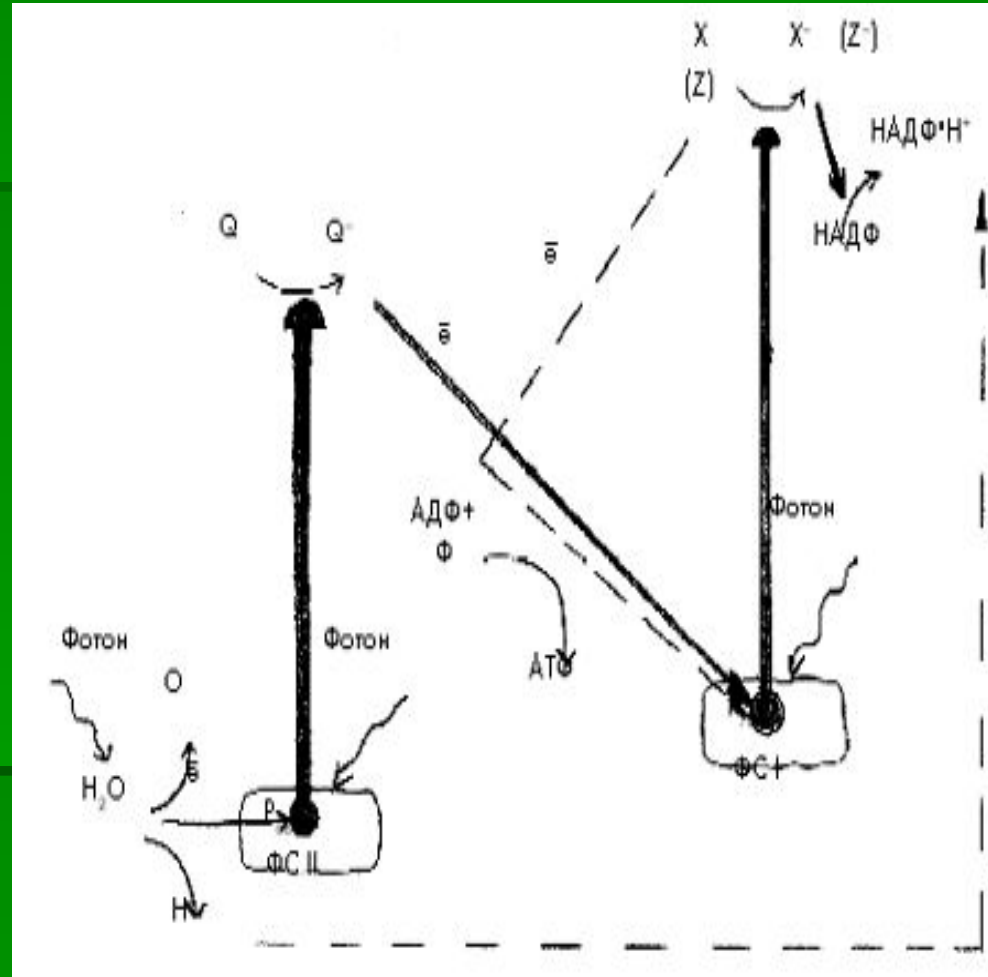
Рис. 43. Изменения, вызываемые в атоме поглощением фотона.

1 — поглощение фотона, возбуждение атома при переходе электрона; 2 — возврат электрона, выделение энергии в виде излучения (по Э. Либберту).

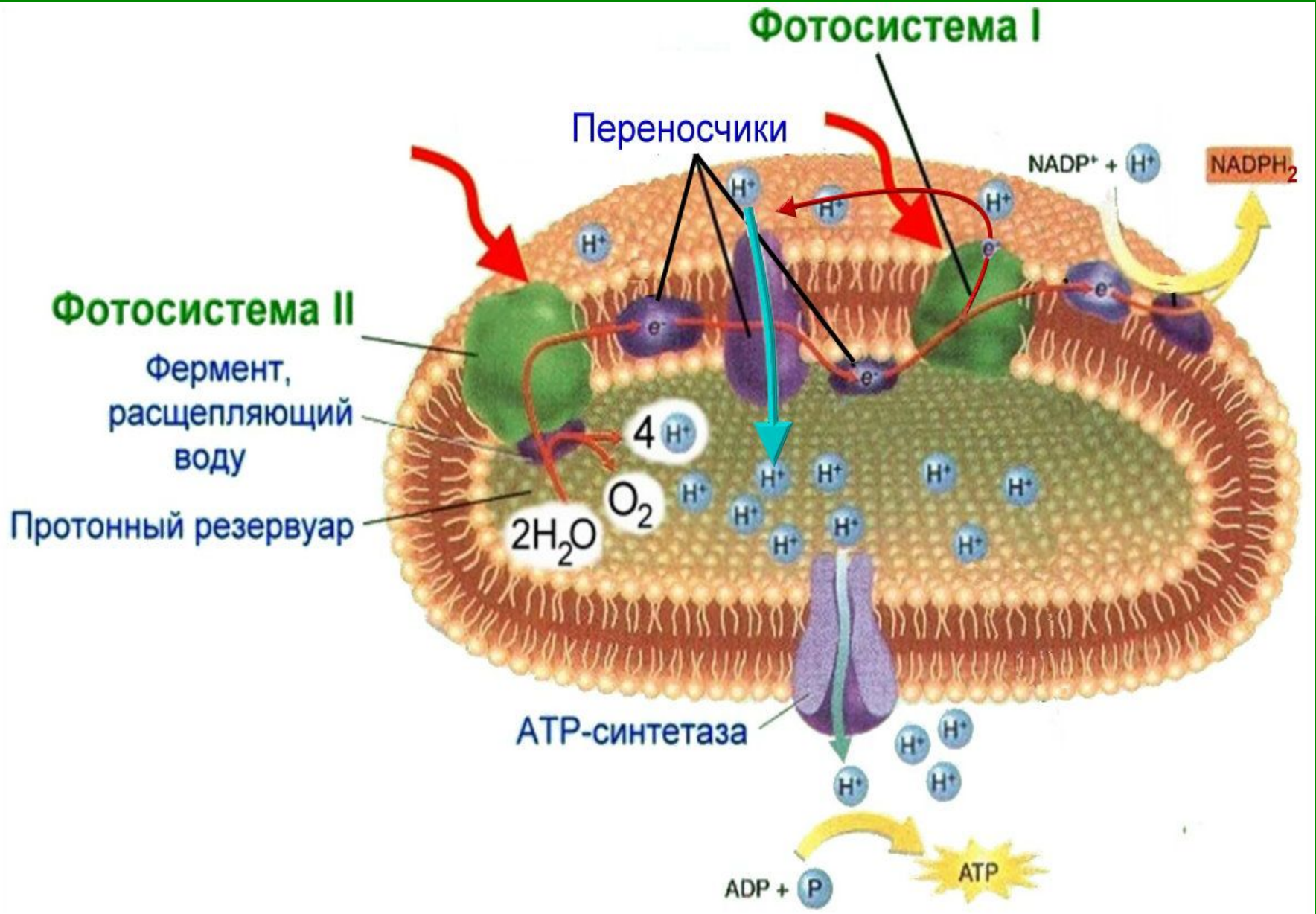
Световая фаза фотосинтеза.

Фотохимический этап

- Световая фаза фотосинтеза осуществляется в хлоропластах, где на мембранах расположены молекулы хлорофилла. Хлорофилл поглощает энергию солнечного света. Эта энергия используется на синтез молекул АТФ из АДФ и фосфорной кислоты и способствует расщеплению молекул воды: $2\text{H}_2\text{O} = 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2$. Образующийся при этом кислород выделяется в окружающую среду. В результате фотолиза образуются:
- Электроны, заполняющие "дырки" в молекулах хлорофилла.
- Протоны H^+ , которые соединяются с веществом НАДФ $^+$ - переносчиком ионов водорода и электронов и восстанавливают его до НАДФ $\cdot\text{H}$.
- Молекулярный кислород, который выделяется в окружающую среду.
- Таким образом, в результате световой фазы фотосинтеза восстанавливается НАДФ $^+$ и образуется НАДФ $\cdot\text{H}$, синтезируется АТФ из АДФ и фосфорной кислоты, выделяется молекулярный кислород. АТФ и НАДФ $\cdot\text{H}$ используются в реакциях темновой фазы фотосинтеза.



Световая фаза фотосинтеза



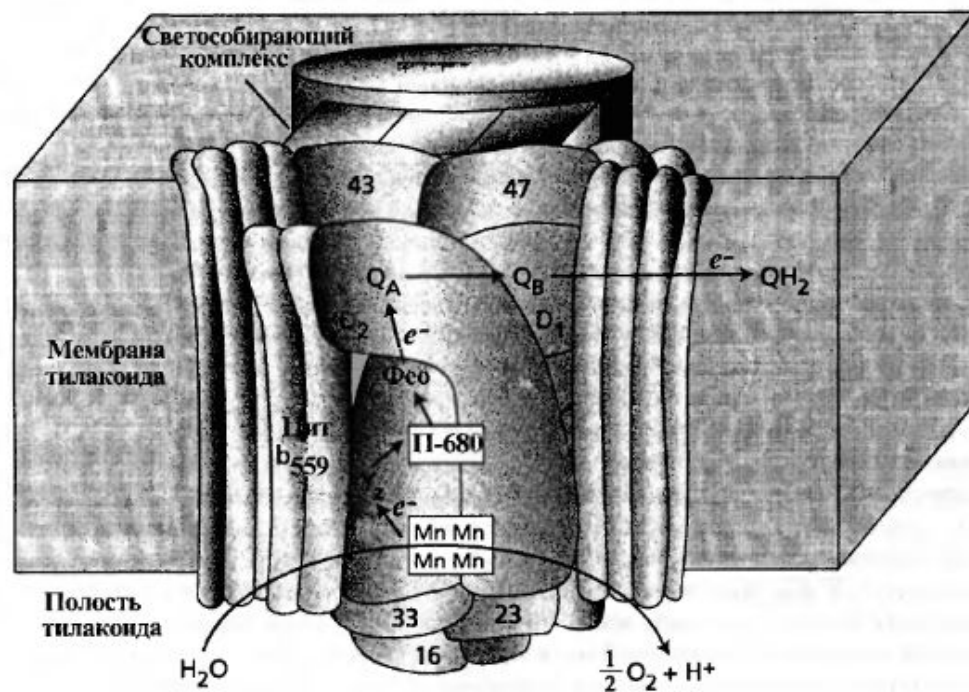


Рис. 2.10. Строение кислородовыделяющего центра фотосистемы II (Hankamer e. a., 1997).

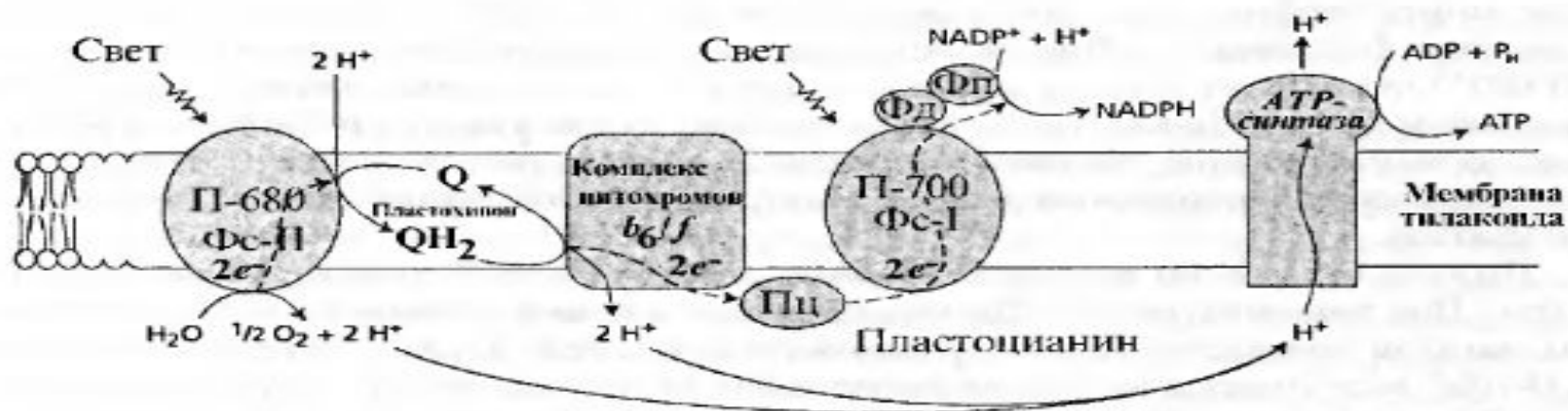


Рис. 2.12. Транспорт электронов и протонов в мембране тилакоидов (Taiz, Zeiger, Blankenship, 1998).

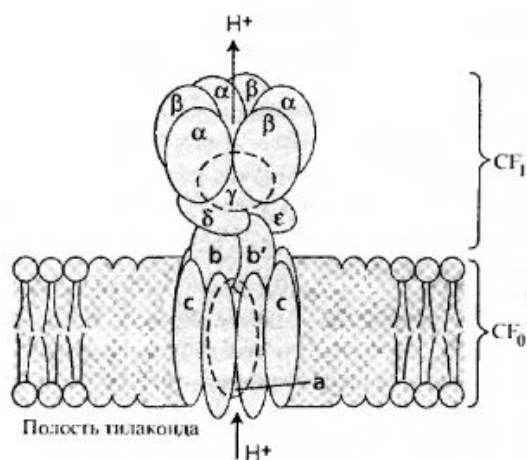
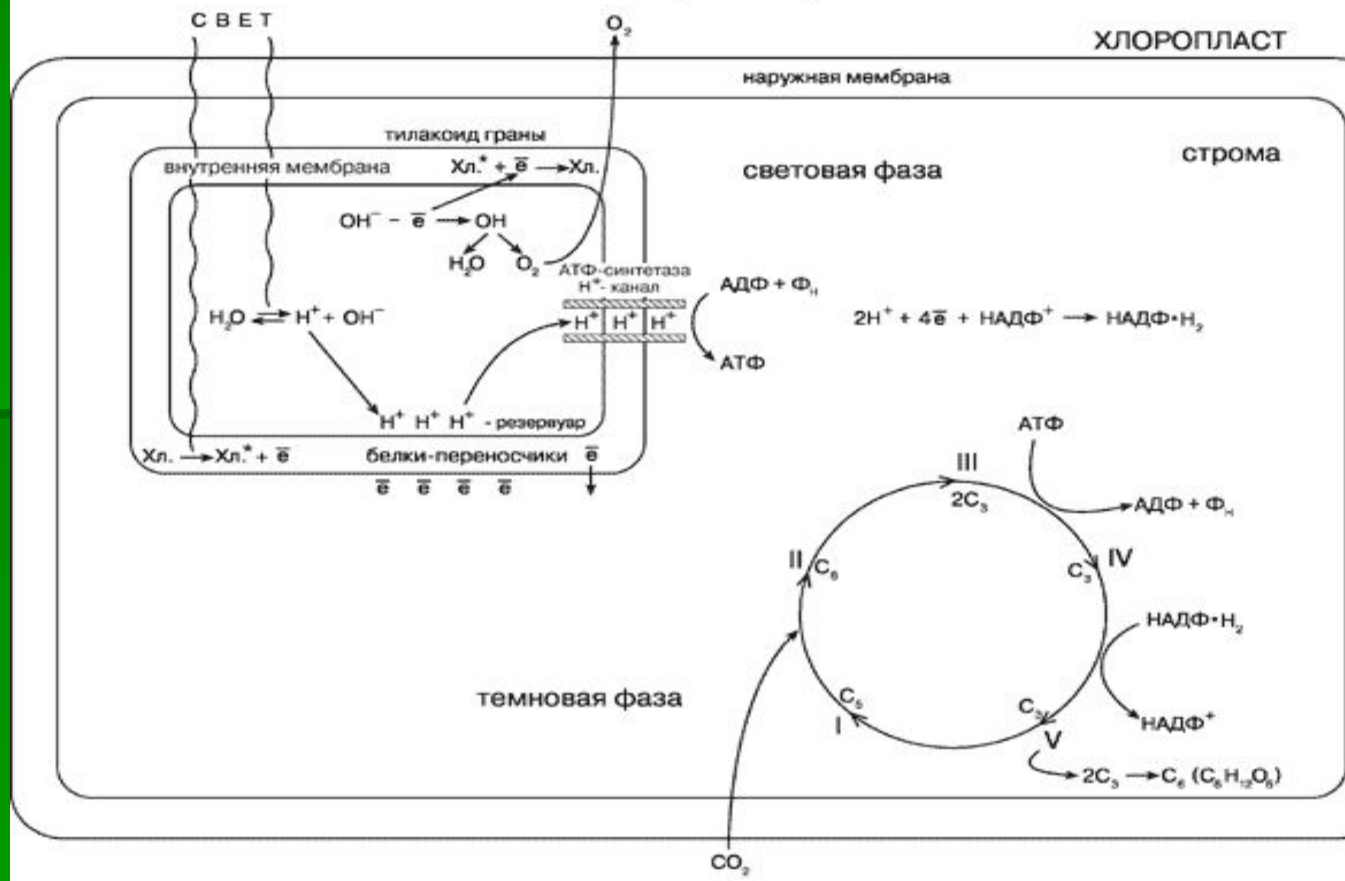


Рис. 2.15. Строение АТФ-синтазы хлоропластов (Boyer, 1997).

Схема. Процесс фотосинтеза.



Темновая фаза фотосинтеза

- В темновую фазу фотосинтеза энергия, накопленная клетками в молекулах АТФ, используется на синтез глюкозы и других органических веществ. Глюкоза образуется при восстановлении углекислого газа - CO_2 ; с участием протонов воды и НАДФ•Н.
- В молекуле углекислого газа содержится один атом углерода, а в молекуле глюкозы их шесть ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$).
- Углекислота, проникающая в лист из воздуха, вначале присоединяется к органическому веществу, состоящему из пяти углеродных атомов. При этом образуется очень непрочное шестиуглеродное соединение, которое быстро расщепляется на две трехуглеродные молекулы. В результате ряда реакций из двух трехуглеродных молекул образуется одна шестиуглеродная молекула глюкозы. Этот процесс включает ряд последовательных ферментативных реакций с использованием энергии, заключенной в АТФ. Молекулы НАДФ•Н; поставляют ионы водорода, необходимые для восстановления углекислого газа.
- Таким образом, в темновой фазе фотосинтеза в результате ряда ферментативных реакций происходит восстановление углекислого газа водородом воды до глюкозы.

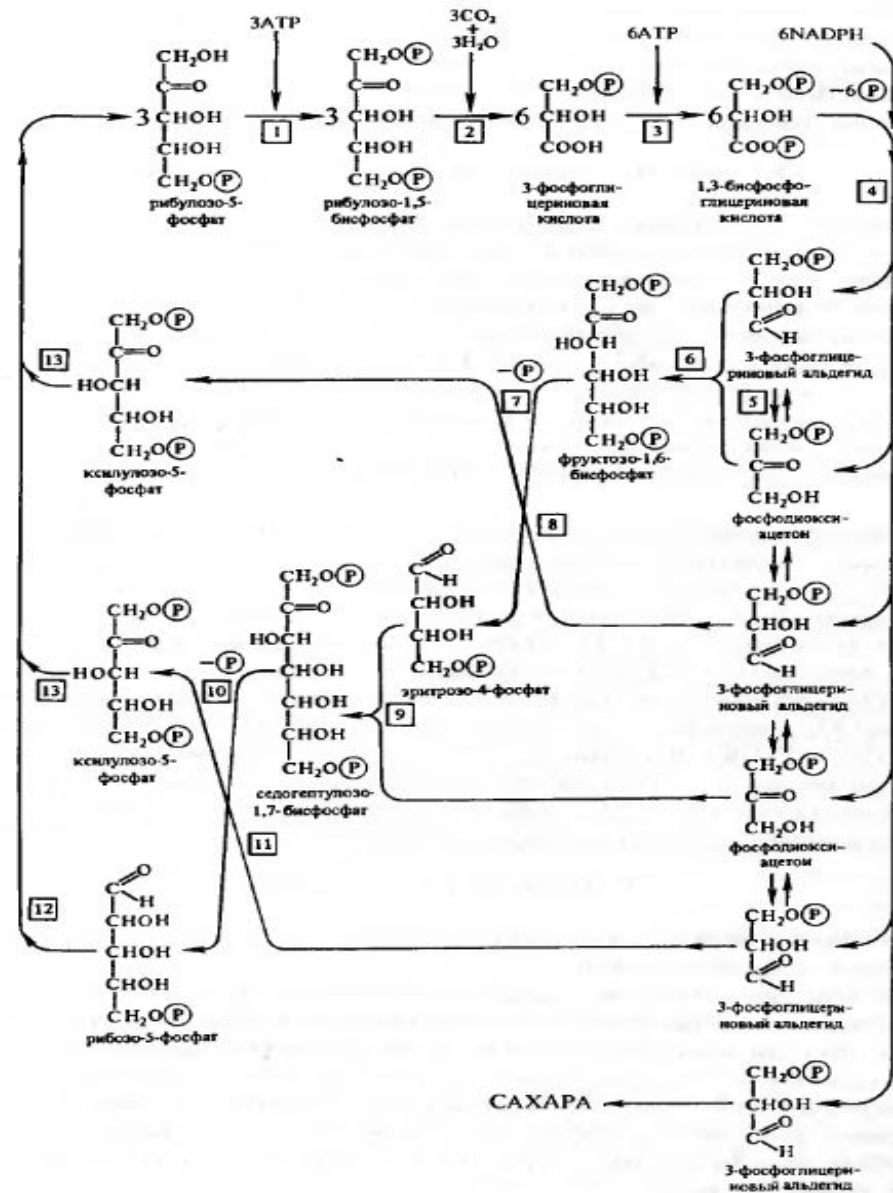
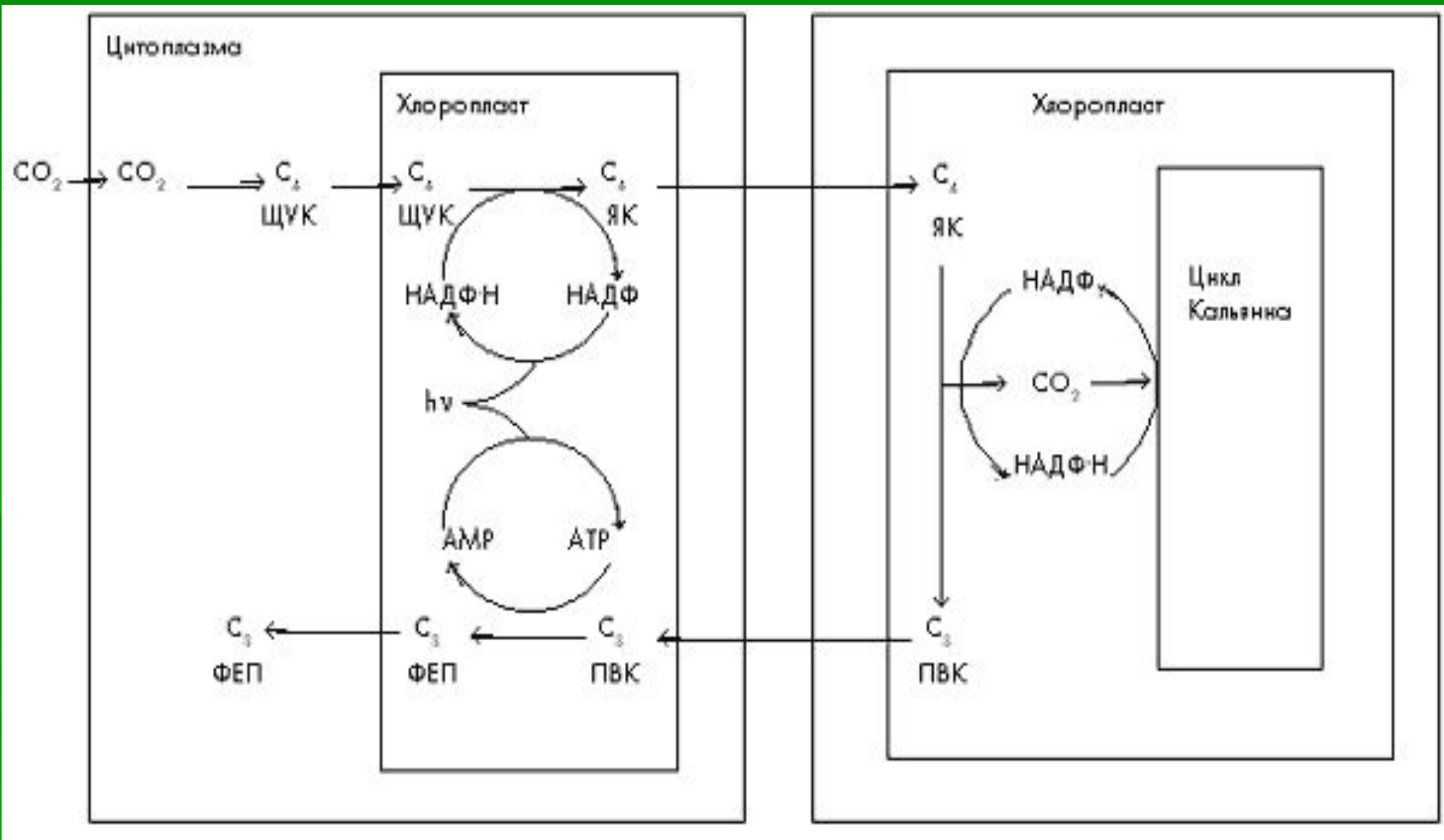


Рис. 2.16. С₃-путь фотосинтеза (цикл Кальвина).
 Ферменты: 1 — *рибулозо-5-фосфаткиназа*; 2 — *рибулозо-1,5-бисфосфаткарбоксилаза/оксигеназа* (РУБИСКО); 3 — *фосфоглицераткиназа*; 4 — *NADP-глицеральдегид-3-фосфатдегидрогеназа*; 5 — *триозофосфатизомераза*; 6 — *альдолаза*; 7 — *фруктозо-1,6-бисфосфатфосфатаза*; 8 — *транскетолаза*; 9 — *альдолаза*; 10 — *седогептулозо-1,7-бисфосфатфосфатаза*; 11 — *транскетолаза*; 12 — *рибозо-5-фосфатизомераза*; 13 — *рибулозо-5-фосфатэпимераза*.

C4- путь фотосинтеза



CAM- путь фотосинтеза

