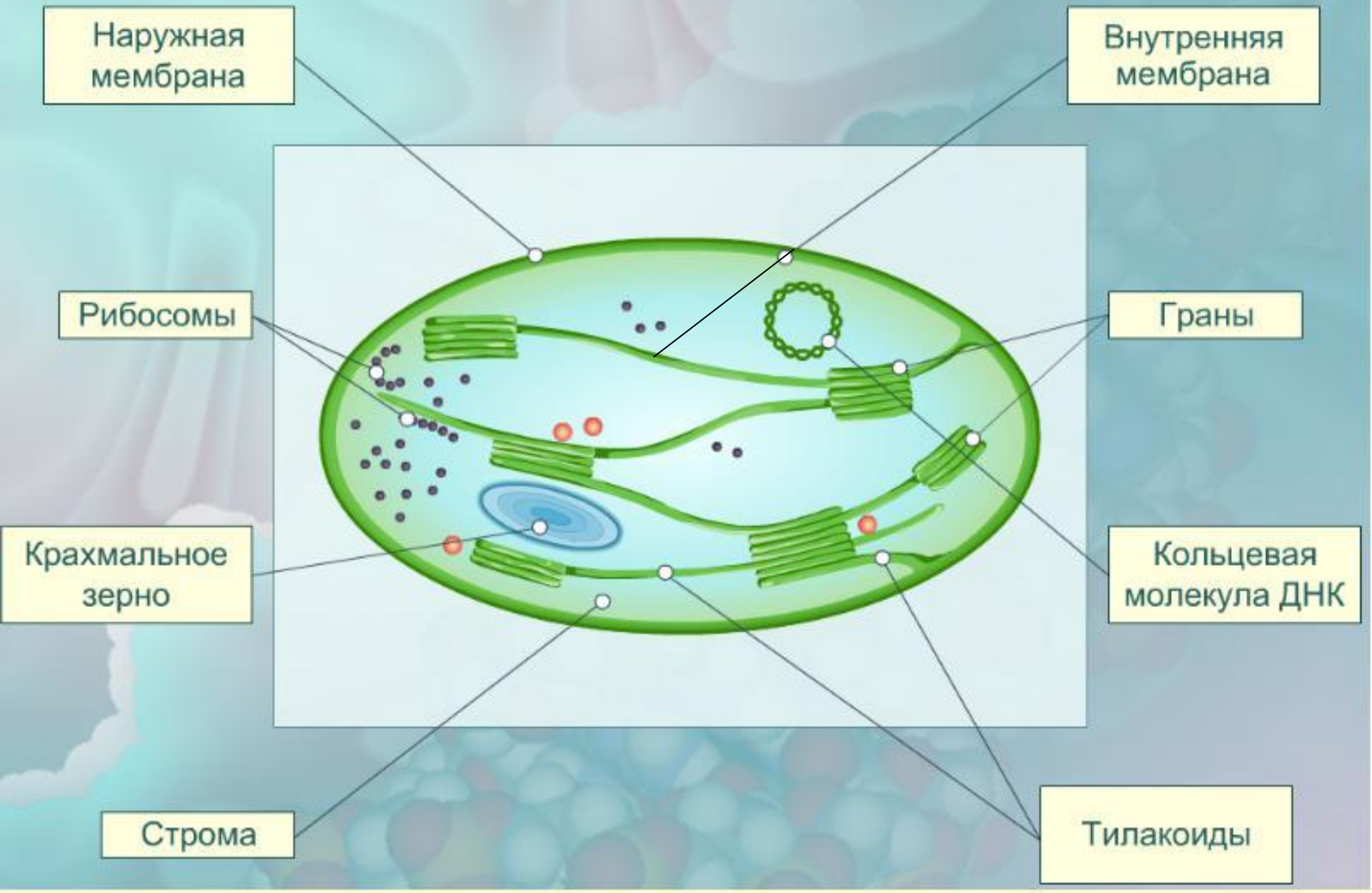
Анаболизм
Автотрофное питание
Фотосинтез

СТРОЕНИЕ ХЛОРОПЛАСТА



Строение хлоропласта

- Хлоропласты содержатся только в эукариотических клетках зеленых растений. В прокариотических клетках фотосинтезирующих бактерий имеются мембранные структуры — разновидности мезосом - *хроматофоры,* которые содержат почти те же элементы фотосинтетического аппарата, что и хлоропласты.

- Хлоропласты имеют дисковидную форму, размеры их не превышают 10 мкм. Число их в клетках разных видов водорослей и высших растений варьирует от 1 до 40.

- Хлоропласты имеют наружную мембрану, а внутренняя мембрана образует уложенные стопками плоские пузырьки — тилакоиды. Такие стопки тилакоидов называют гранами. В мембранах тилакоидов находятся все фотосинтетические структуры, обеспечивающие протекание световых реакций фотосинтеза. Ферменты, восстанавливающие углекислый газ до глюкозы (темновые реакции), находятся в строме.

Тилакоид – структурная и функциональная единица хлоропласта

- На мембранах тилакоидов расположены:

- - ***фотосистемы*** - особые белковые комплексы, в состав которых входят молекулы хлорофилла;

- - ***цитохромы*** – переносчики электронов, образующие электрон-транспортную цепь;

- - ***АТФ-аза*** – фермент, обеспечивающий фосфорилирование АДФ, по сути является протонной помпой.

Фотосистемы

- **Фотосистемы** – это мембранные комплексы белков и *пигментов*, расположенных группами по 250-400 молекул.
- Все молекулы фотосистемы способны поглощать свет, но только *одна* – основная молекула хлорофилла (т.н. *реакционный центр*) - использует поглощенную энергию в фотохимических реакциях. Все остальные молекулы – антенные, это светособирательный комплекс, который, наподобие воронки, переводит всю поглощенную световую энергию на реакционный центр.

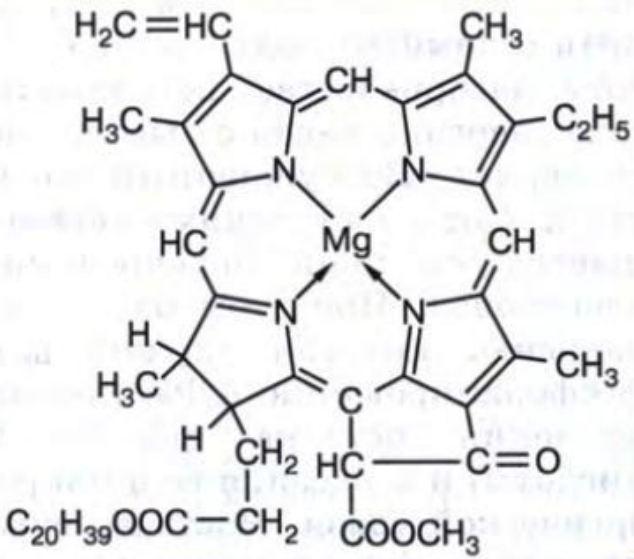
- В тилакоидах имеются **2 фотосистемы** разного строения и состава P_{700} и P_{680} (P – от лат. pigmentum - краска). Они отличаются длиной волны поглощаемого света (700 нм в первой фотосистеме и 680 нм – во второй).

Рис. 175. Антенный комплекс передачи энергии в фотосинтезе

Пигменты

- Первый класс пигментов – хлорофиллы, основной из них – **хлорофилл а**, напоминающий по строению дыхательный пигмент эритроцитов – гем.
- Основу молекулы хлорофилла (и гема) составляет ***Mg-*** (или Fe-) ***порфириновый комплекс.*** Похожее строение имеют и белки-переносчики электронов – ***цитохромы.***
- Содержащийся в составе молекулы хлорофилла многоатомный спирт ***фитол*** придает хлорофиллу гидрофобные свойства, что позволяет ему встраиваться в липидную мембрану тилакоида.

- Другие хлорофиллы (около 10 типов) - **b** (у высших растений и зеленых водорослей), **c** (бурые и диатомовые водоросли), **d** (у красных водорослей) являются вспомогательными.
- У бактерий присутствуют **бактериохлорофиллы**.
- Второй класс пигментов - **каротиноиды** и, третий класс, - **фикобилины.**



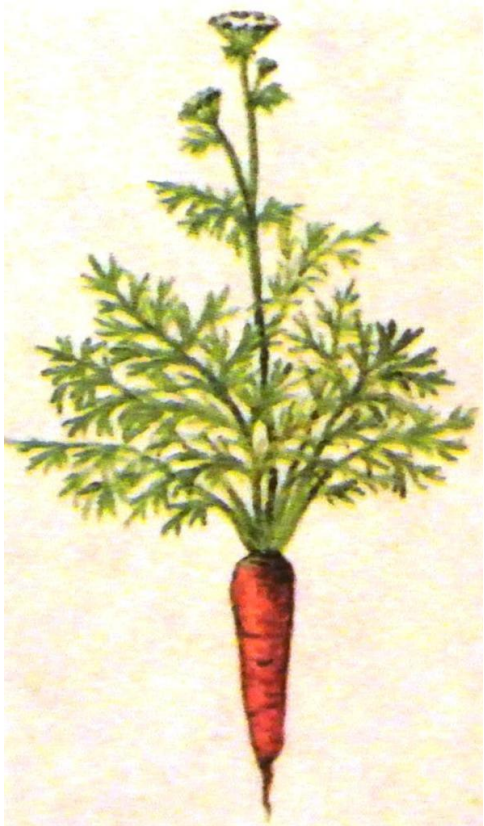
Фитол Хлорофилл *а*

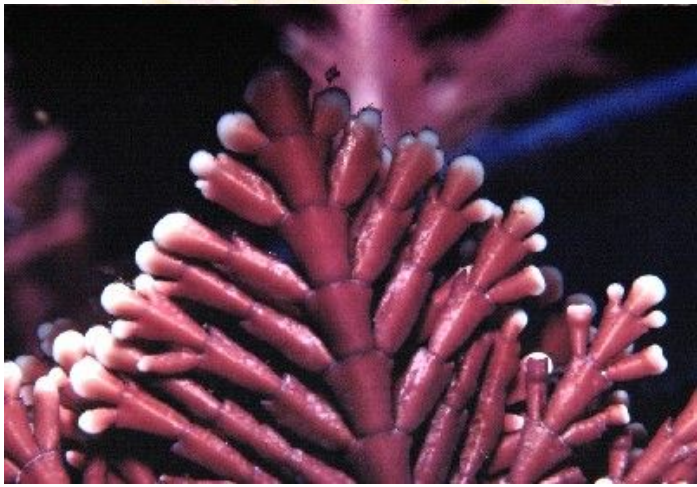
Пигменты

- **Каротиноиды** – каротины и ксантофилы – красные, оранжевые и желтые пигменты, входящие в состав хлоропластов всех растений и в состав хромопластов незеленых частей растения: корнеплодов моркови, редиса, плодов томата и др.

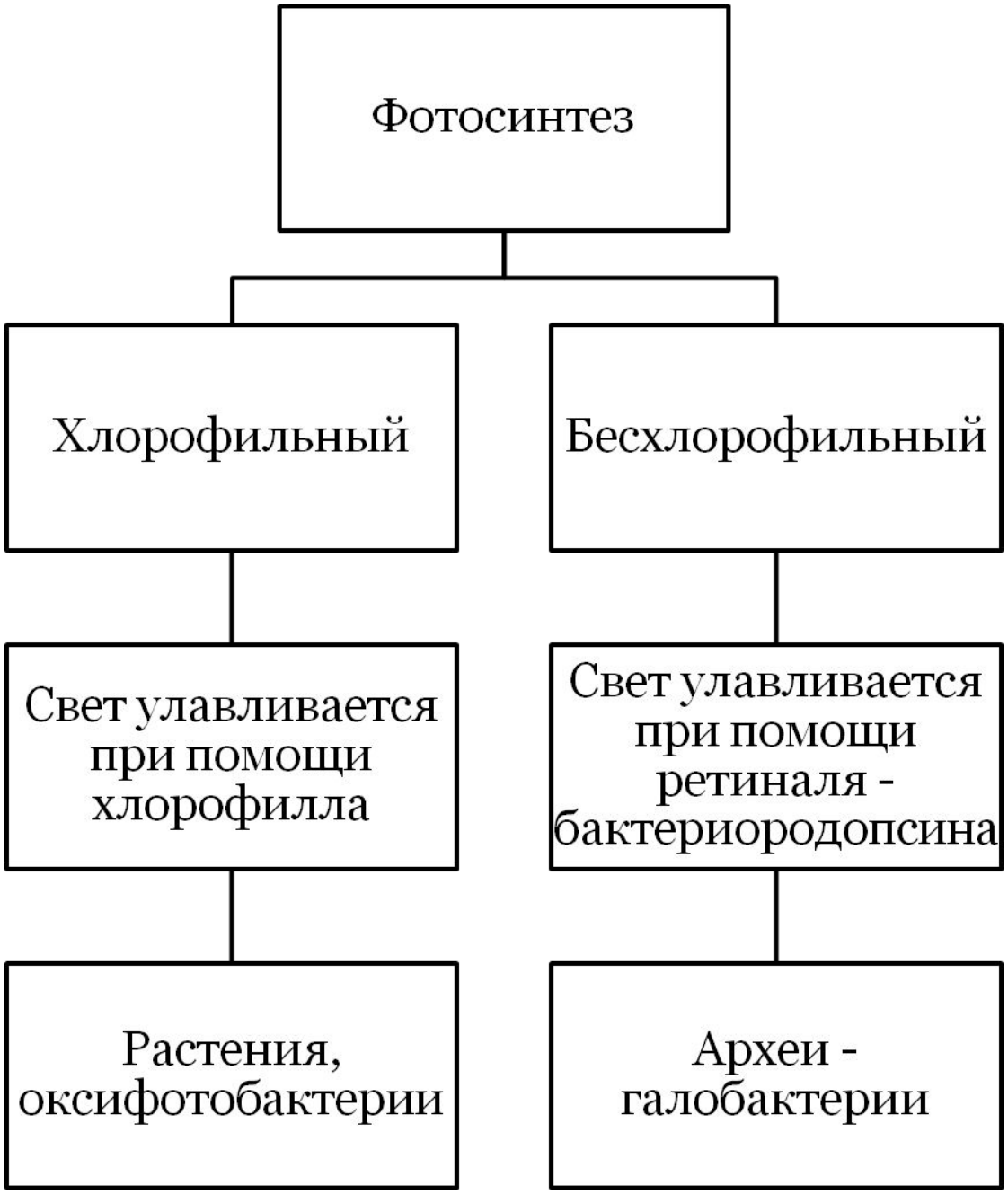
- **Фикобилины** (фикоэритрин - красный и фикоцианин - синий - пигменты цианобактерий и красных водорослей.

- Вспомогательные пигменты улавливают свет в той части спектра, которую хлорофилл а не воспринимает. Это позволяет фотосинтезирующим пигментам использовать бóльшее количество диапазонов и энергии света и, следовательно, максимально обеспечить процесс фотосинтеза.
- Вспомогательные пигменты под действием солнечной энергии испускают электроны и передают их на основной пигмент – хлорофилл а, усиливая его. Только главный пигмент способен испускать электрон, непосредственно участвующий в доставке энергии для фотосинтеза.





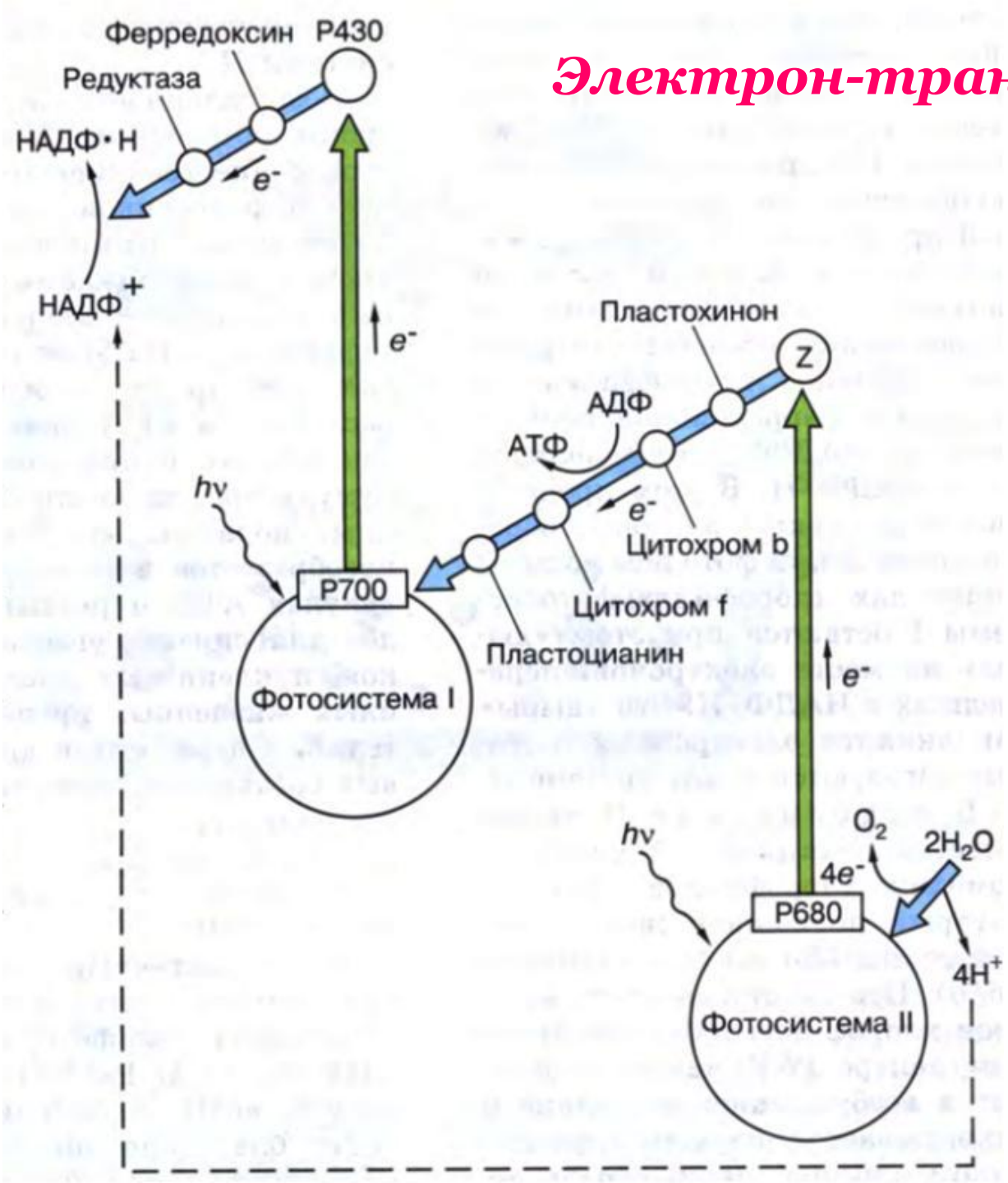
Красная водоросль кораллина


Фотосинтез
Хлорофильный
Бесхлорофильный
Свет улавливается при помощи хлорофилла
Свет улавливается при помощи ретиналя - бактериородопсина
Растения, оксифотобактерии
Археи - галобактерии

Хлорофилл и его электроны

- Хлорофилл обладает особым свойством: при поглощении энергии кванта света его молекула возбуждается, становится донором электронов и окисляется - электроны отрываются и переходят на более высокие энергетические уровни.
- Энергия электронов может сохраняться благодаря их присоединению к слабому акцептору, при этом образуется сильный донор электронов, от которого эти электроны вновь, как по цепочке, передаются от одного вещества другому. Такое перемещение электронов называют *электронным транспортом* или *цепью переносчиков*, а сам путь передачи электронов – ***электрон-транспортной цепью***. Она локализована в тилакоидной мембране.
- Любой этап переноса электрона с переносчика на другой переносчик сопровождается выделением энергии, которая в ряде случаев используется для синтеза АТФ (электроны фотосистемы II). За счет энергии электронов из фотосистемы I происходит соединение H^+ с переносчиком НАДФ$^+$ с образованием НАДФ·2Н. На некоторых участках электрон-транспортной цепи перенос электрона сопровождается переносом протона.

Электрон-транспортная цепь



Фотосинтез

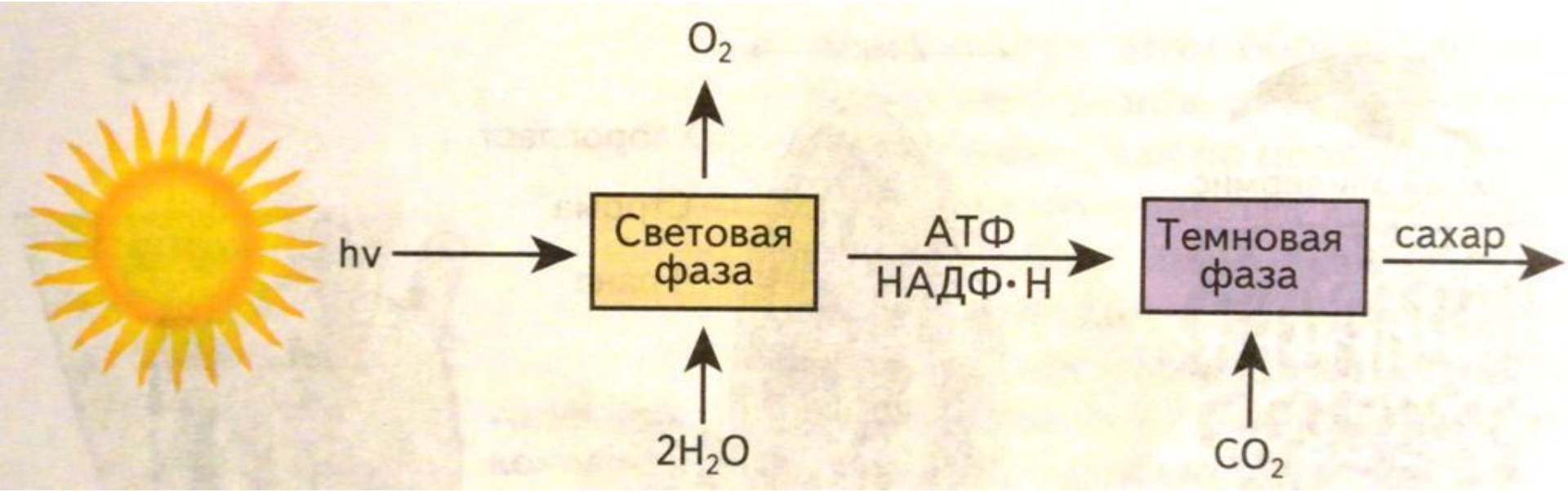
- **Фотосинтез – биосинтез простых углеводов из неорганических веществ в растительной клетке, идущий за счет энергии Солнца.**

- $6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2\uparrow$

- Фотосинтез включает в себя <u>две стадии</u>:

- - световая;
- - темновая.

$$6CO_2 + 6H_2{}^{18}O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\,{}^{18}O_2\uparrow$$



- При анализе общего уравнения фотосинтеза возникает целый ряд вопросов. Как образуется кислород? Какое из двух веществ — вода или углекислый газ — является его поставщиком? Как влияет свет на химические реакции фотосинтеза? Какова его роль в этом процессе? Как происходит связывание углекислого газа?
- Эти вопросы долгое время оставались нерешёнными. В 40-х гг. XX в. с помощью метода меченых атомов удалось установить, что кислород образуется не из углекислого газа, как предполагалось долгое время, а из воды. В молекулу воды был введён радиоактивный изотоп кислорода ^{18}O. Эта вода была использована растением для фотосинтеза. Весь радиоактивный кислород оказался выделенным в свободном виде.

I стадия фотосинтеза – световая

I стадия фотосинтеза – световая

- **1.** Световая фаза фотосинтеза требует обязательного присутствия **света.**
- **2.** Все световые реакции идут на внутренних **мембранах** хлоропласта – тилакоидах.
- **3**. Это подготовительный этап, в котором создаются богатые энергией органические соединения – АТФ и НАДФ·2Н (надэф-аш).
- Никотинамидадениндинуклеотидфосфат – это переносчик электронов и водорода в клетке. Соединение их непрочное, поэтому НАДФ · 2Н легко отдает электроны и водород, являясь сильным восстановителем (НАДФ · 2Н окисляется до $НАДФ^+$).
- Именно восстановительная способность и энергоемкость НАДФ · 2Н позволяет восстановить CO_2 до глюкозы во второй стадии фотосинтеза.

Первая стадия фотосинтеза – световая

- **Фотосистема I.** **Энергия света** поглощается хлорофиллом и приводит его в возбужденное состояние. Эта энергия преобразуется в **энергию электронов**, которые, поглощая квант света, перемещаются на более высокий энергетический уровень и отрываются от молекулы хлорофилла. Электроны, выбитые из фотосистемы 1, переносятся (по цепи переносчиков) в строму хлоропласта, где накапливаются, создавая отрицательно заряженное электрическое поле.
- Хлорофилл в составе фотосистемы I остается без электрона, появляется **«дырка»,** которая заполняется за счет электрона, возбужденного светом в фотосистеме II.

Первая стадия фотосинтеза – световая

- **Фотосистема II.** Хлорофилл этой фотосистемы также поглощает квант света. Возбужденный электрон, как и в первой фотосистеме, поднимается на более высокий энергетический уровень. Стремясь вернуться к устойчивому состоянию, этот электрон, теряет энергию по пути переносчиков и заполняет «дырку» в фотосистеме I. По пути часть его энергии расходуется на образование АТФ.

- **АДФ + Фн + Е → АТФ,** где Е – **энергия электрона**, которая запасается в **АТФ (не менее 50% от энергии кванта света).**

- **«Дырка»,** возникшая в фотосистеме II, в свою очередь, заполняется электронами, образовавшимися в результате **фотолиза воды**.

Первая стадия фотосинтеза – световая

- **Фотолиз воды** также происходит за счет энергии света.

$$2H_2O \rightarrow 4H^+ + 4e^- + O_2\uparrow$$

- **Кислород** является **побочным продуктом** фотосинтеза, в котором сам процесс не нуждается. Он выделяется в окружающую среду или используется клеткой для дыхания.

- **Электроны** перемещаются в молекулу хлорофилла 2-й фотосистемы, где занимают место электронов, выбитых ранее фотонами света.

- **Протоны** водорода, образовавшиеся в результате фотолиза воды, не могут проникнуть через мембрану тилакоида, и накапливаются внутри, образуя положительно заряженное электрическое поле, что приводит к увеличению разности потенциалов по обе стороны мембраны.

Первая стадия фотосинтеза – световая

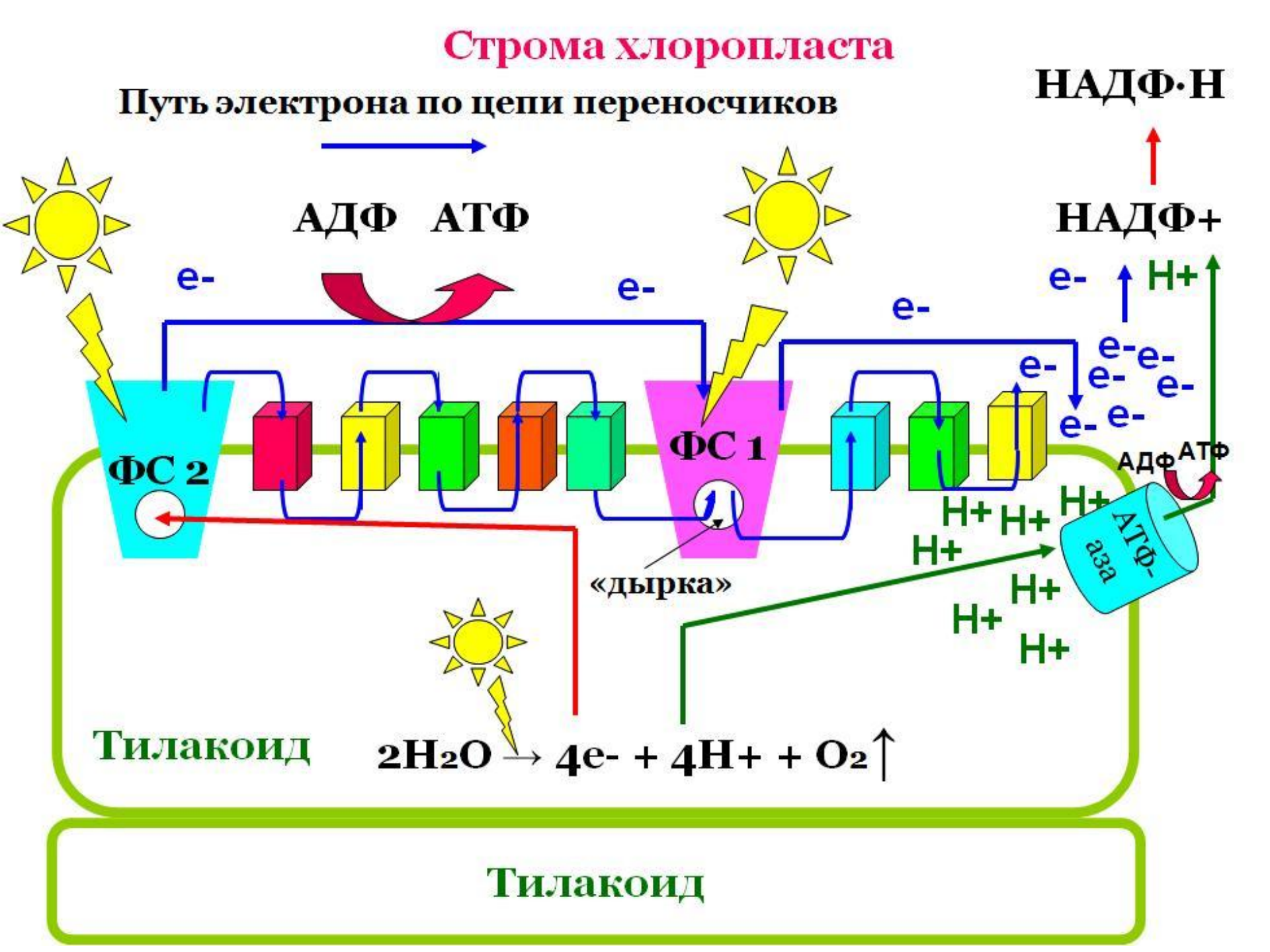
- При достижении между двумя сторонами мембраны **критической разности потенциалов** протоны водорода устремляются по протонному каналу фермента **АТФ-синтетазы** наружу. На выходе из канала создается высокий уровень энергии, которая идет на синтез АТФ.

- Для синтеза одной молекулы АТФ необходимо, чтобы три иона водорода вышли из тилакоида в строму хлоропласта.

- Протоны, вышедшие на поверхность мембраны тилакоида в строму, соединяются с электронами, образуя атомарный водород H^0, который идет на восстановление переносчика электронов и протонов в клетке – молекулы НАДФ$^+$ до НАДФ·2Н; это высокоэнергетическое соединение.

$$2e^- + 2H^+ + НАДФ^+ + E \rightarrow НАДФ{\cdot}2H,$$

- где Е – **энергия электрона**, которая запасается в **НАДФ·2Н.**

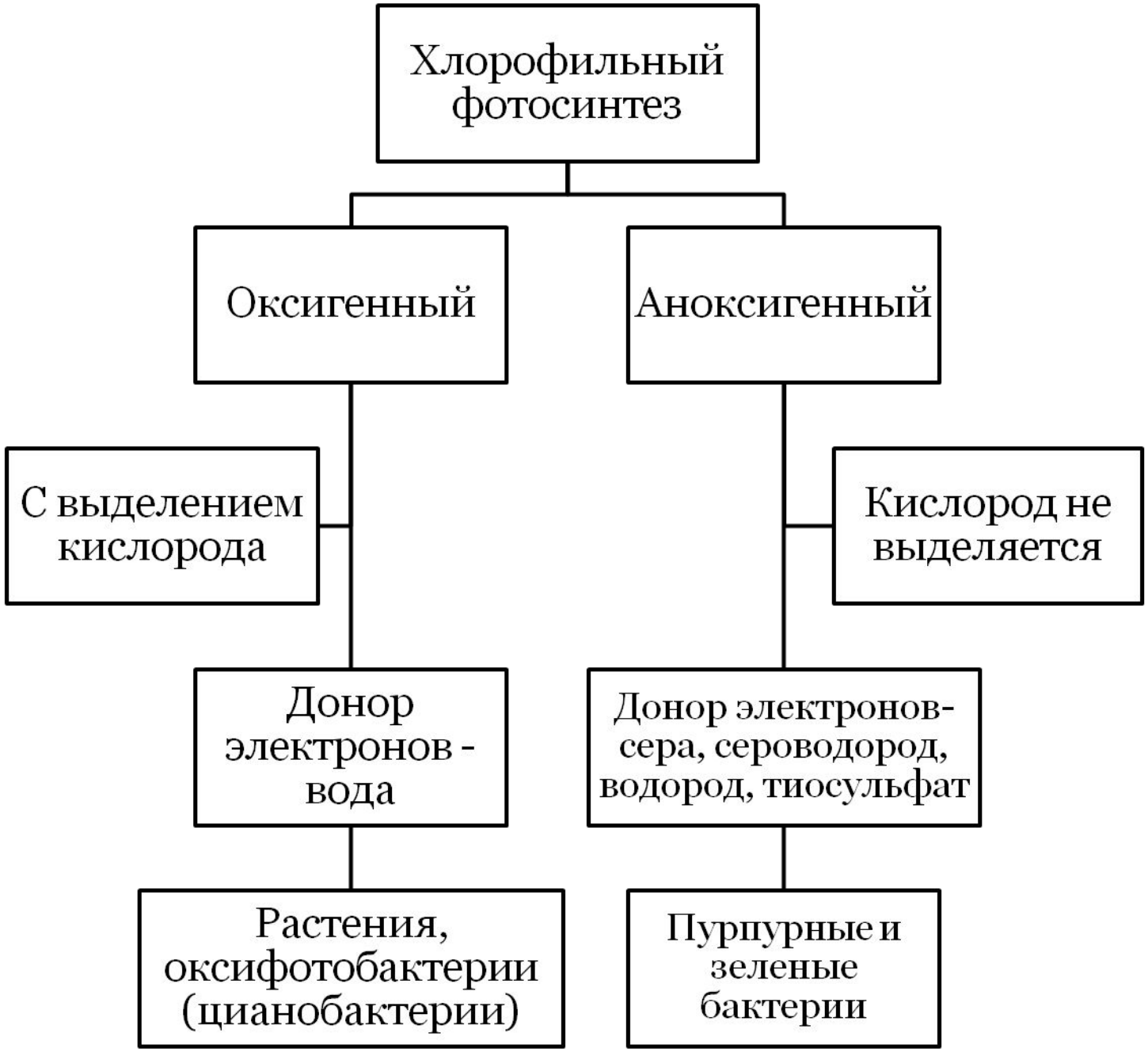

Строма хлоропласта
Путь электрона по цепи переносчиков
НАДФ·Н
АДФ АТФ
НАДФ+
e-
e-
e-
e-
H+
e-
e-
e-
e-
e-
e-
e-
ФС 2
ФС 1
АДФ
АТФ
H+
H+
H+
H+
H+
H+
H+
АТФ-аза
«дырка»
Тилакоид
2H2O → 4e- + 4H+ + O2↑
Тилакоид

Итоги световой стадии фотосинтеза:

- **1.** $АДФ + H_3PO_4 + E_{e^-} \rightarrow АТФ$
- **2.** $e^- + H^+ + НАДФ^+ + E_{e^-} \rightarrow НАДФ{\cdot}H$ **(восстановитель),**
- **3.** $2H_2O \rightarrow 4H^+ + 4e^- + O_2\uparrow$

- Энергия света → энергия электронов → энергия химических связей в молекулах АТФ и НАДФ·Н.
- Синтез АТФ из АДФ за счет энергии света – очень эффективный процесс: за одно и то же время в хлоропластах образуется в 30 раз больше АТФ, чем в митохондриях.

- По современным представлениям сущность фотосинтеза заключается в превращении лучистой энергии солнечного света в химическую энергию в форме АТФ и восстановленного никотинамидадениндинуклеотидфосфата (НАДФН).


Хлорофильный фотосинтез
Оксигенный
Аноксигенный
С выделением кислорода
Кислород не выделяется
Донор электронов - вода
Донор электронов- сера, сероводород, водород, тиосульфат
Растения, оксифотобактерии (цианобактерии)
Пурпурные и зеленые бактерии

- **Домашнее задание § 11**