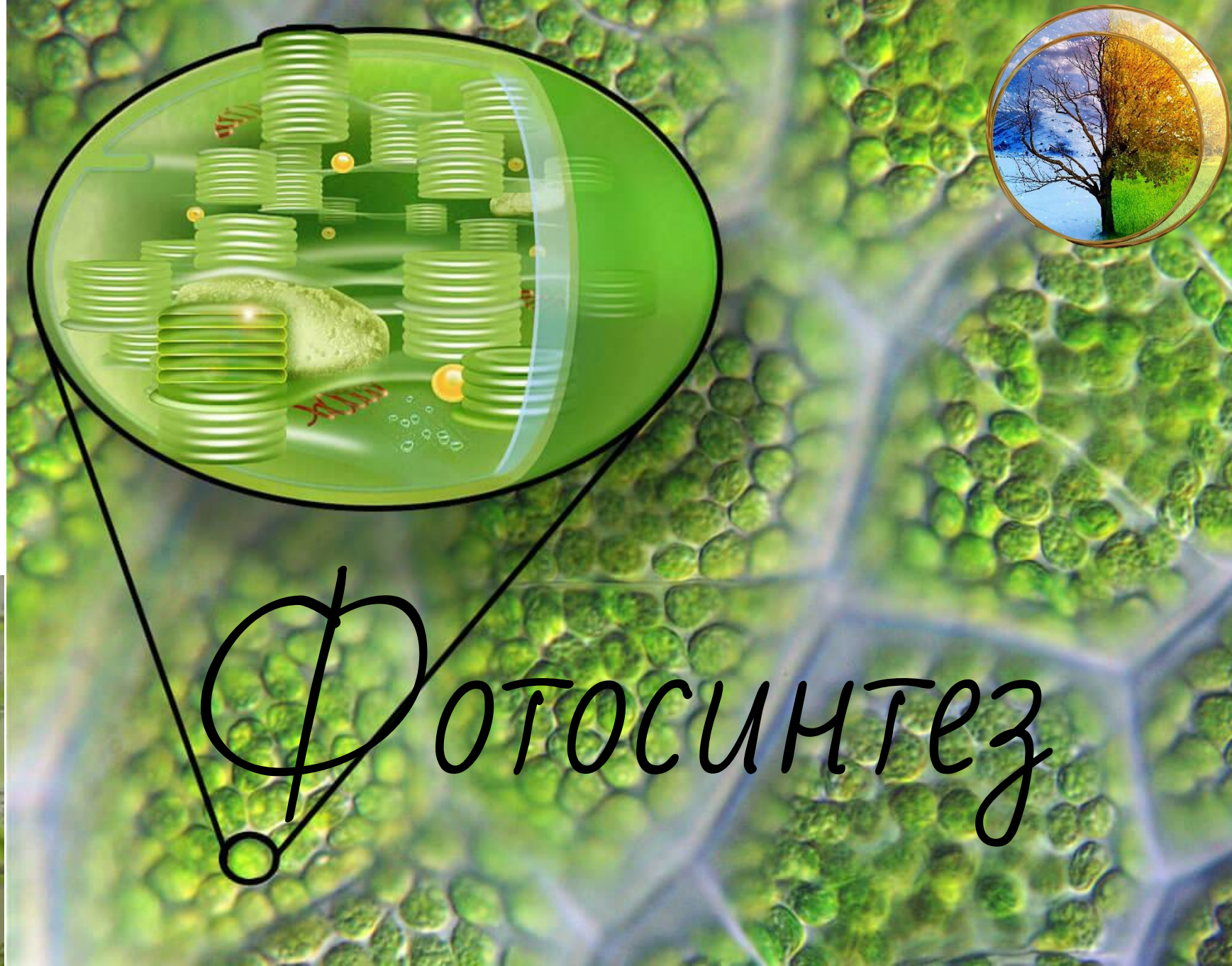
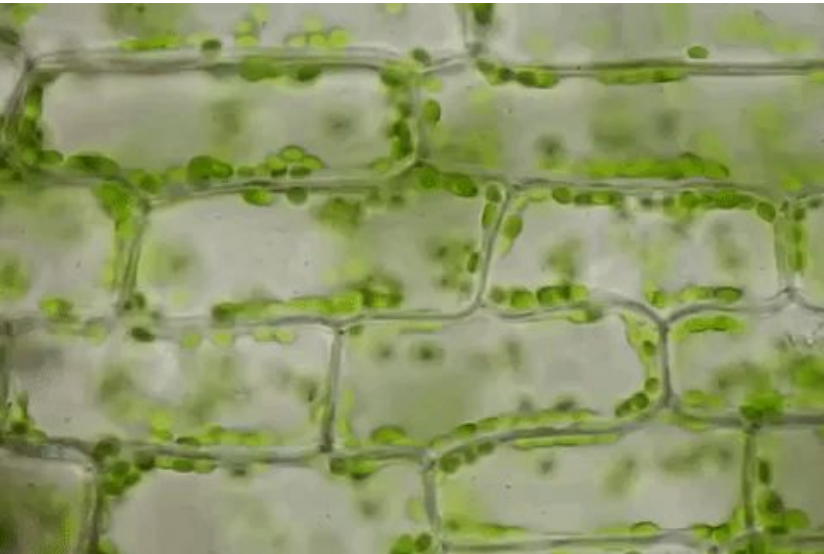
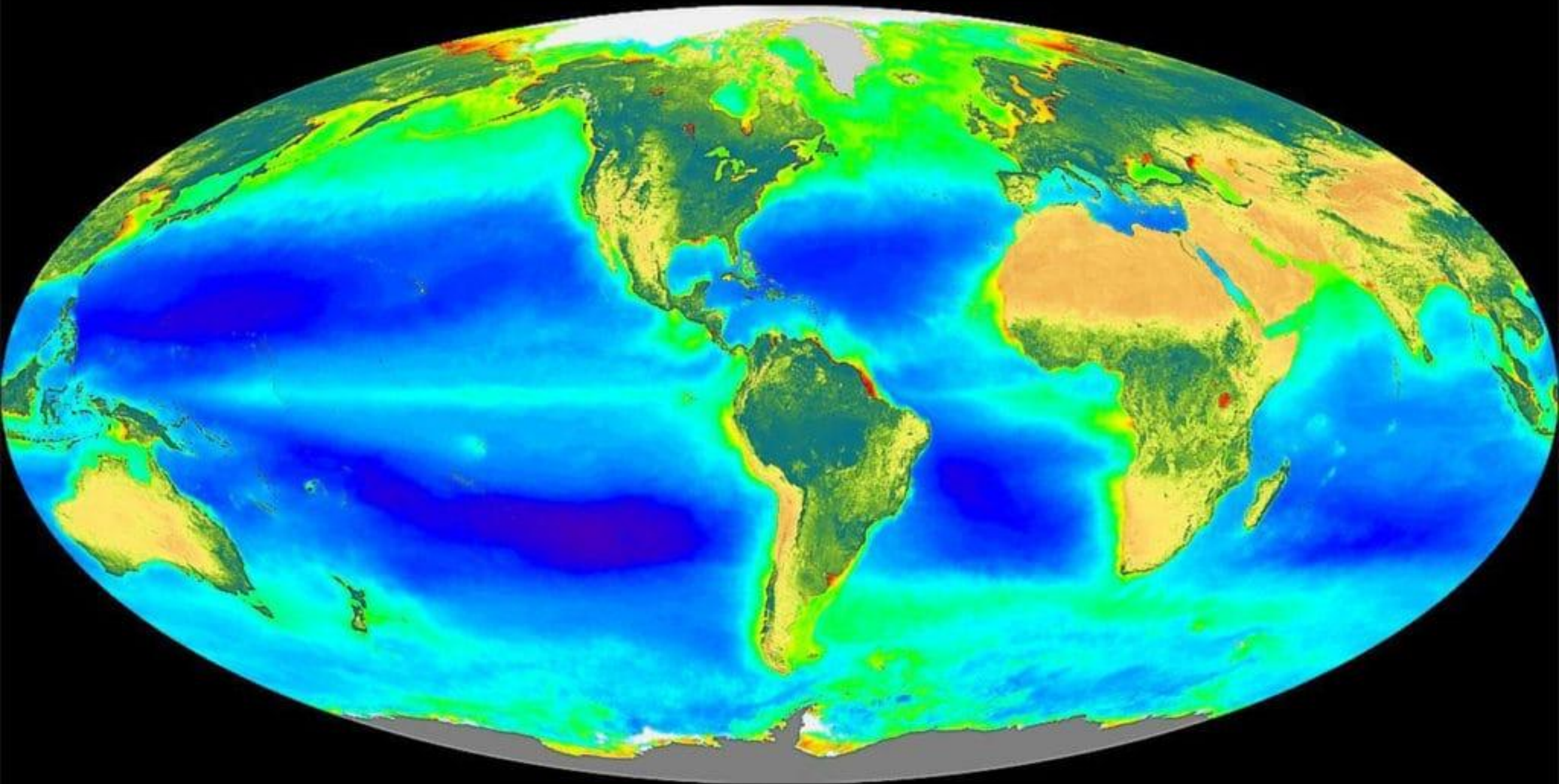


CHLOROPLAST





История открытия фотосинтеза

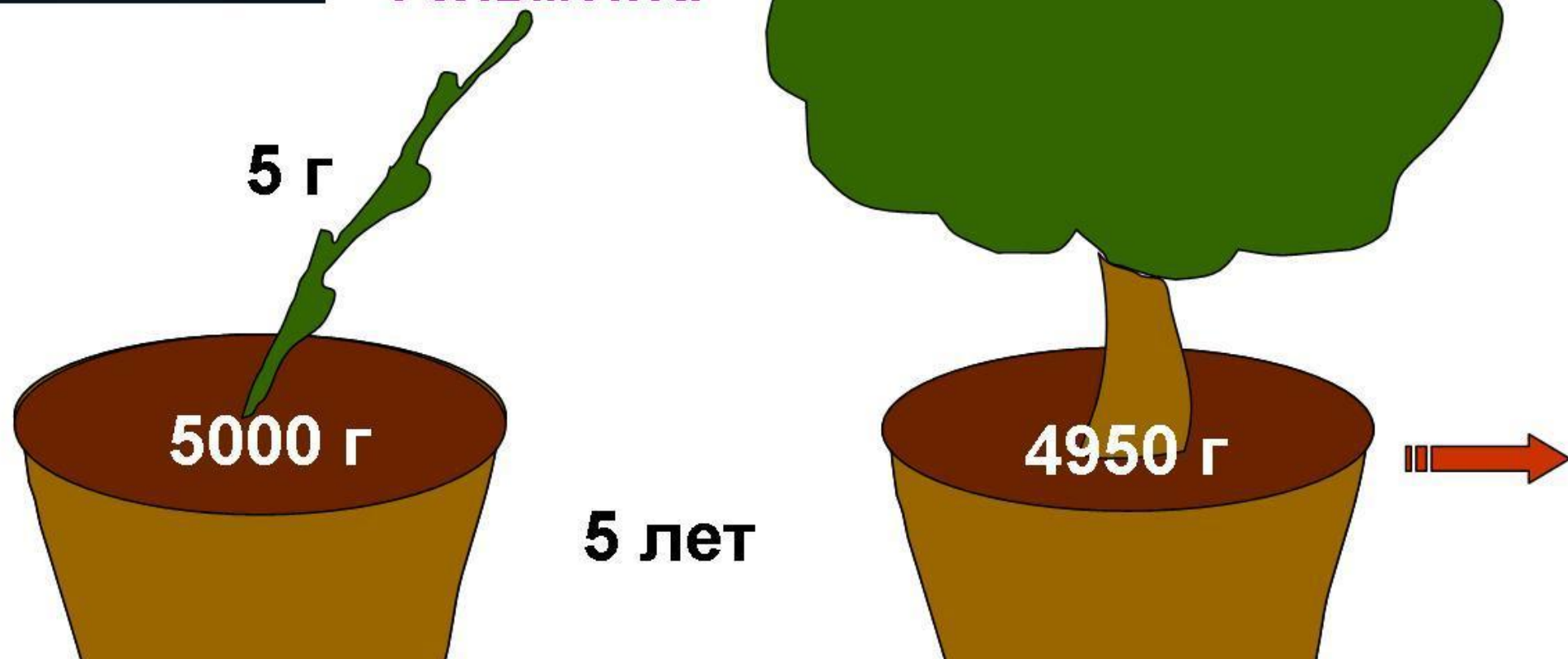
Дата	Ученый	Вклад в науку
1600г	Бельгийский естествоиспытатель Ян Ван – Гельмонт	Поставил первый физиологический эксперимент, связанный с изучением питания растений
1771г	Английский химик Джозеф Пристли	Ученый пришел к выводу, что зеленые растения способны осуществлять реакции противоположные дыхательным процессам, способны выделять кислород.
1779г	Голландский врач Ян Ингенхауз	В ходе эксперимента обнаружил, что растения способны выделять кислород лишь в присутствии солнечного света, и что только их зеленые части способны обеспечивать выделение кислорода





Сначала люди думали, что растение
все свое питание берет из почвы

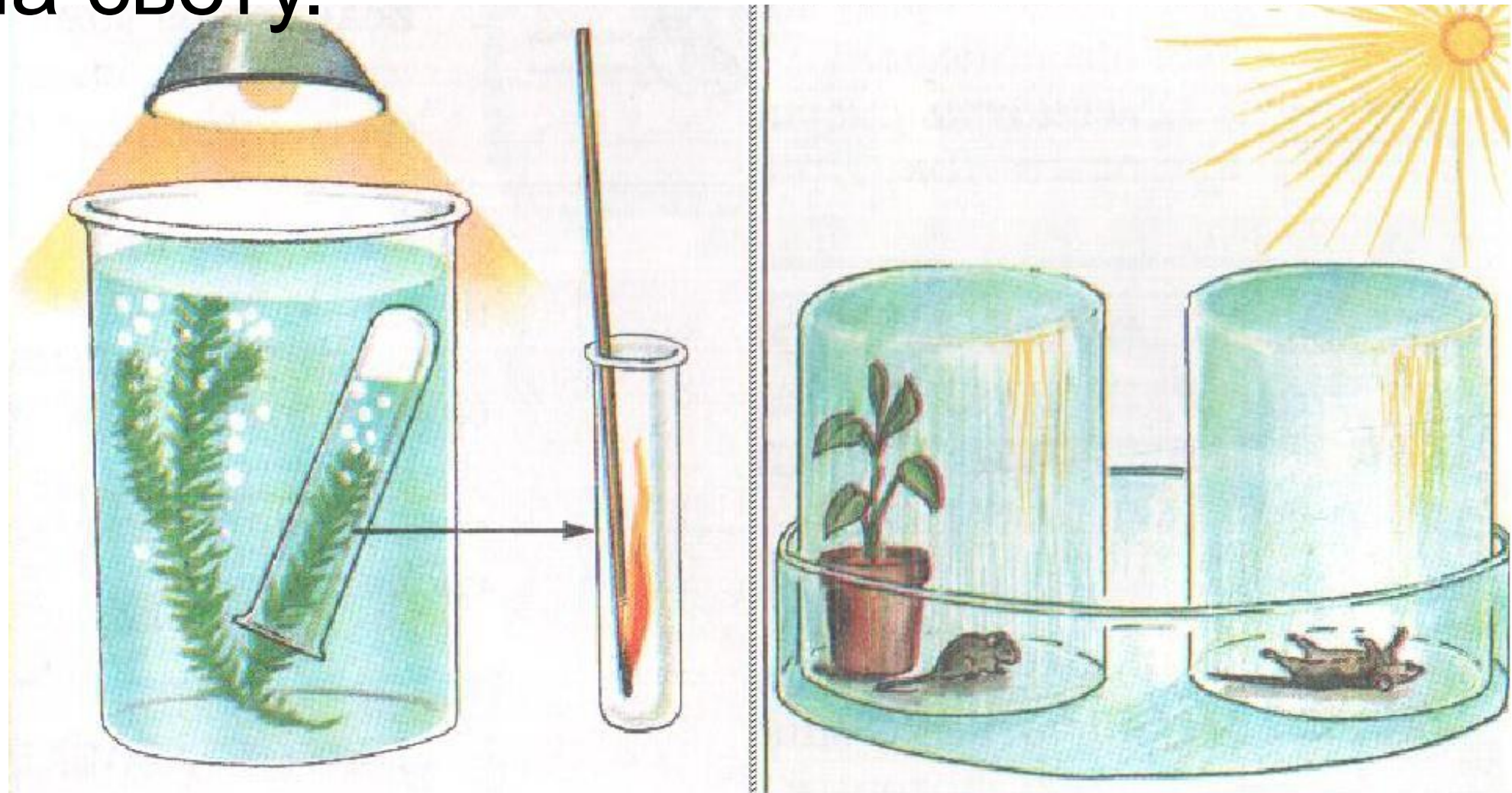
Опыт Яна
Баптиста ван
Гельмонта



Опыт Пристли: растения выделяют кислород, необходимый для дыхания и горения



Опыт Ингенхауза. Кислород – это газ, который выделяется растениями ТОЛЬКО на свету.

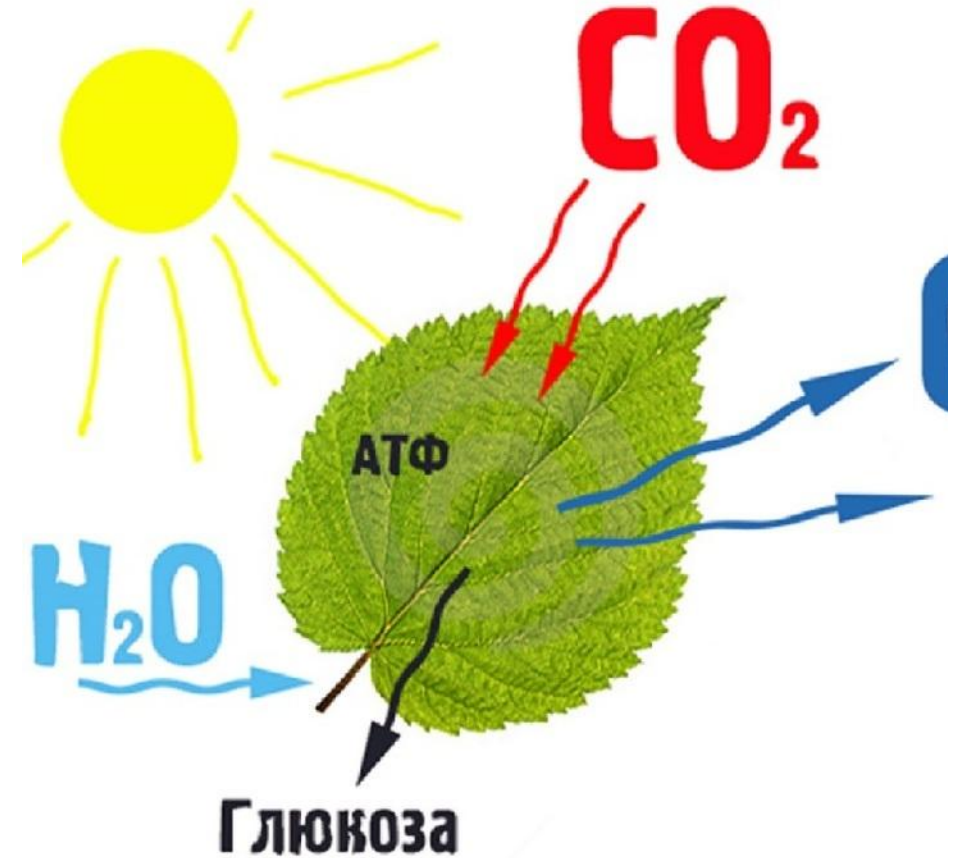




Фотосинтез = воздушное питание



1. Фотосинтез – это разновидность автотрофного типа питания.
2. В процессе фотосинтеза происходит образование ковалентных связей за счет энергии света.
3. Протекает в хлоропластах.
4. Свет улавливает пигмент хлорофилл.
5. Высшие растение, водоросли и цианеи фиксируют углекислый газ. При этом водоросли (фитопланктон) вырабатывают 80% кислорода.
6. У пурпурных бактерий вместо кислорода выделяется сера.
7. Фотосинтез состоит из двух этапов: световая и темновая фазы.



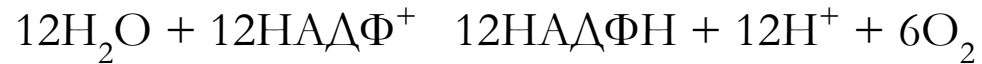
Фазы фотосинтеза



- Световая Фаза

1. Фотолиз воды $2\text{H}_2\text{O} = 4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 4\text{e}$,
2. Выделение кислорода O_2
3. образование НАДФН (восстановительного эквивалента),
4. Синтез АТФ на мембране,

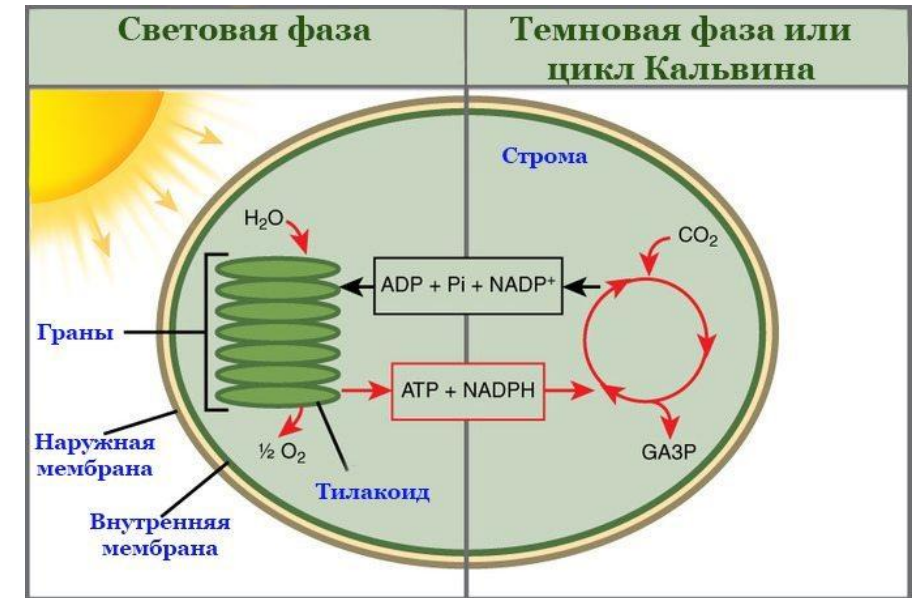
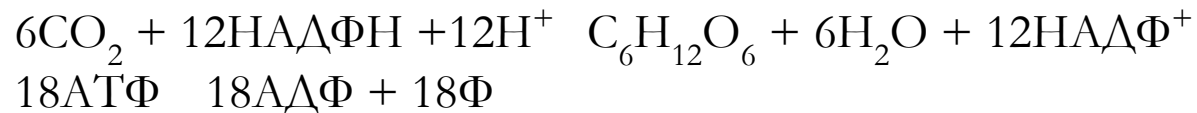
Уравнение световой фазы:



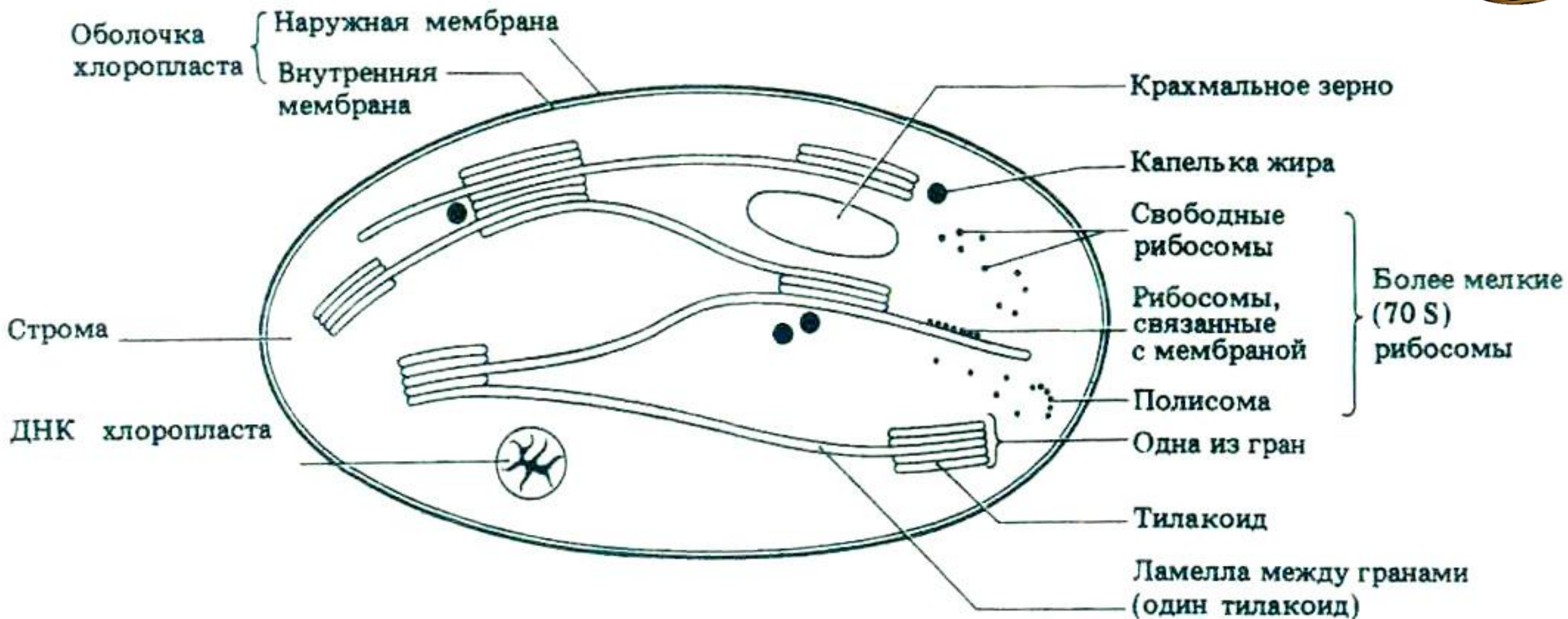
- Темновая Фаза

1. Поглощение углекислого газа
2. Синтез глюкозы

Уравнение темновой фазы:



Строение хлоропласта





Хлоропласты ограничены двумя мембранами — наружной и внутренней. По форме хлоропласты — это овальные линзовидные тельца размером (5—10) x (2—4) мкм. В одной клетке листа может находиться 15—20 и более хлоропластов, а у некоторых водорослей — лишь 1-2 гигантских хлоропласта (хроматофора) различной формы.

Последовательность процессов световой фазы

Световая фаза может происходить только при наличие света. Первая стадия фотосинтеза проходит на мембране тилакоидов. В ней расположены фотосистемы, которые улавливают световую волну и переводят в энергию электрона.

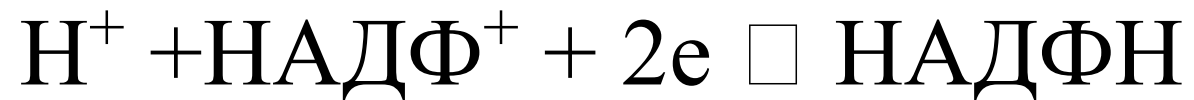
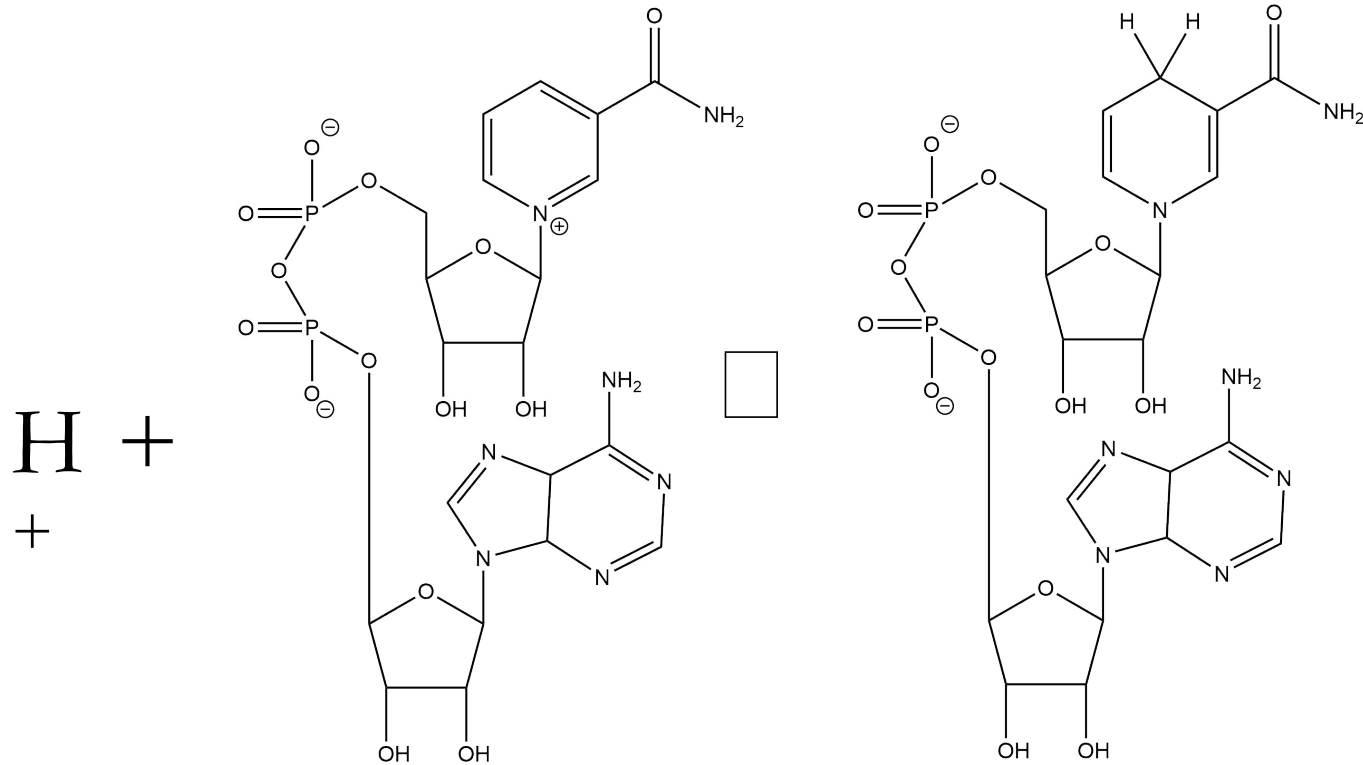
1. На фотосистеме II происходит фотолиз воды: $2\text{H}_2\text{O} = 4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$, в результате чего высвобождаются свободные электроны. Фотолиз происходит в люмене тилакоидов. Фотолиз происходит на марганцевом комплексе происходит под действием света;
2. Электроны попадают на фотосистему II. Молекула хлорофилла улавливает квант света и передает его энергию на электрон. Энергетический уровень электрона повышается. С фотосистемы два возбужденный электрон переносится на белки переносчики цитохромы.
3. Свободная энергия электрона затрачивается цитохромами на перенос одного протона из стромы хлоропласта в люмен. Такой направленный перенос формирует разницу концентраций протонов по двум сторонам мембраны – градиент.

Синтез веществ

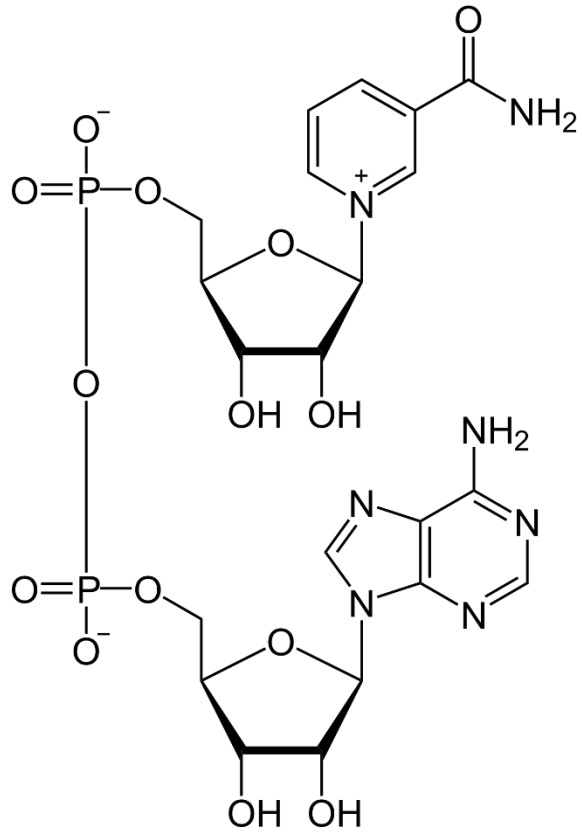


- С цепи цитохромов электрон попадает на фотосистему I, где снова получает дополнительную энергию световой волны.
- С фотосистемы I электрон переносится на внешнюю сторону мембраны тилакоида и восстанавливает НАД^+ до НАДФН (восстановительный компонент).
- Нарастающая разница концентраций протонов снимается благодаря их возвращению обратно в строму через специальный канальный белок – АТФ-синтазу. При этом в результате прохождения 3 протонов образуется одна молекула АТФ из АДФ и Ф.
- АТФ и НАДФН используются в темновой фазе фотосинтеза.

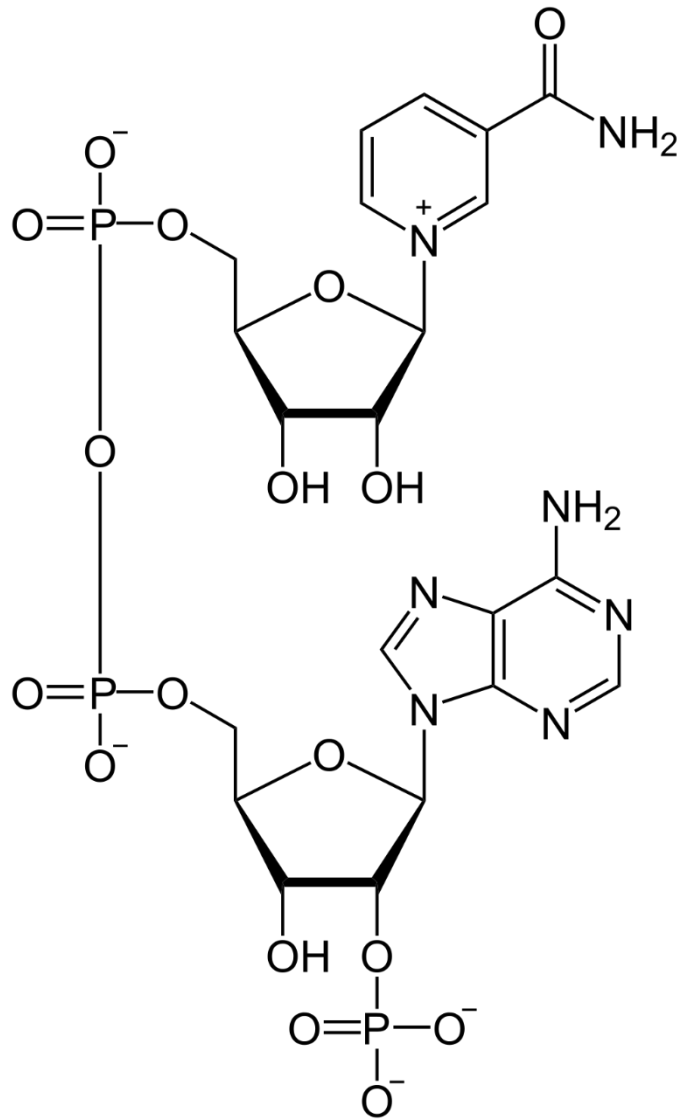
Реакция восстановления НАД⁺ до НАДН



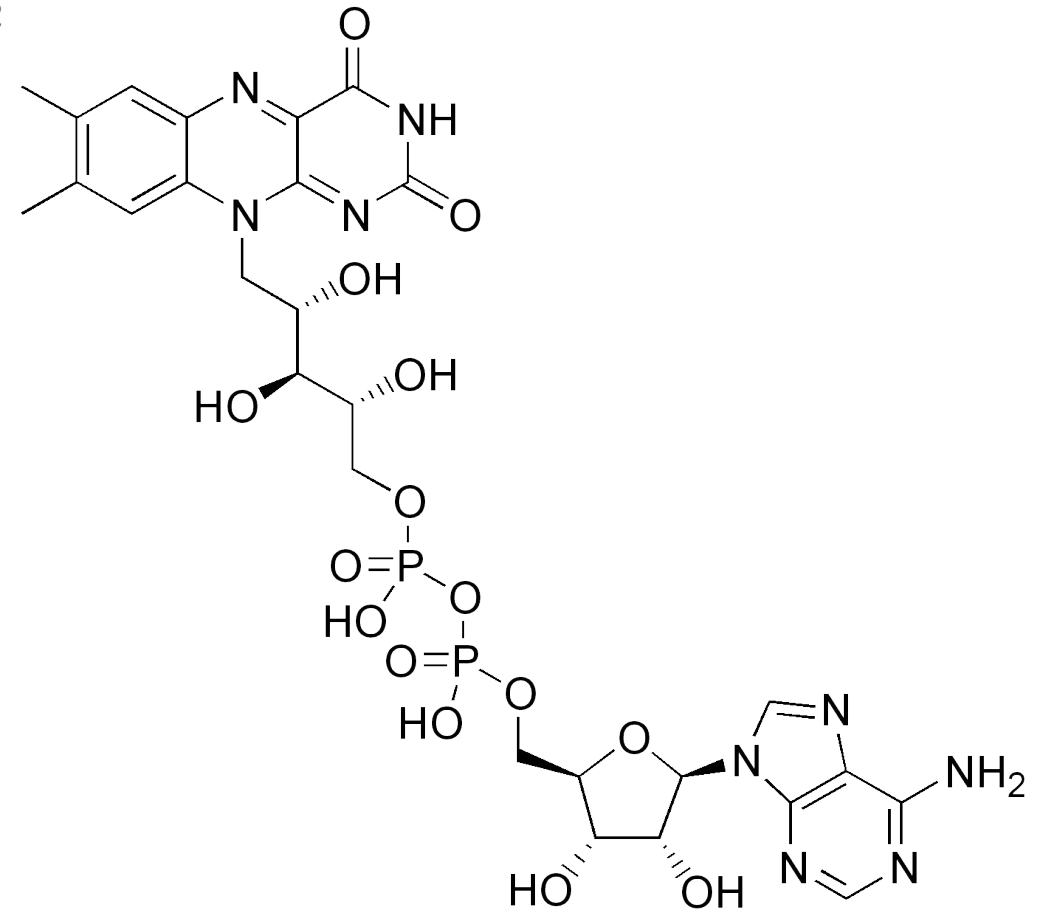
НАДН



НАДФ⁺



ФАДН2

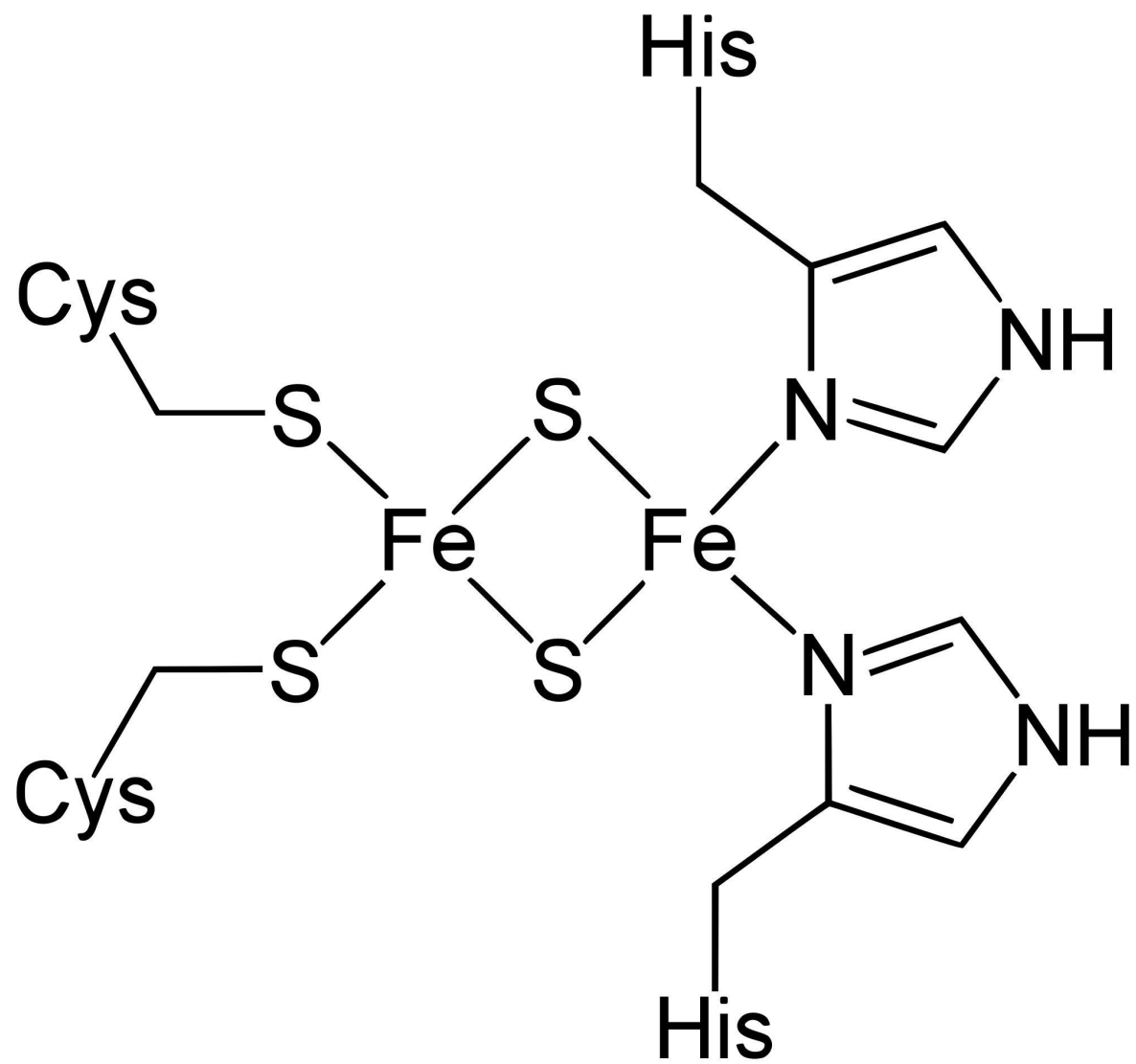


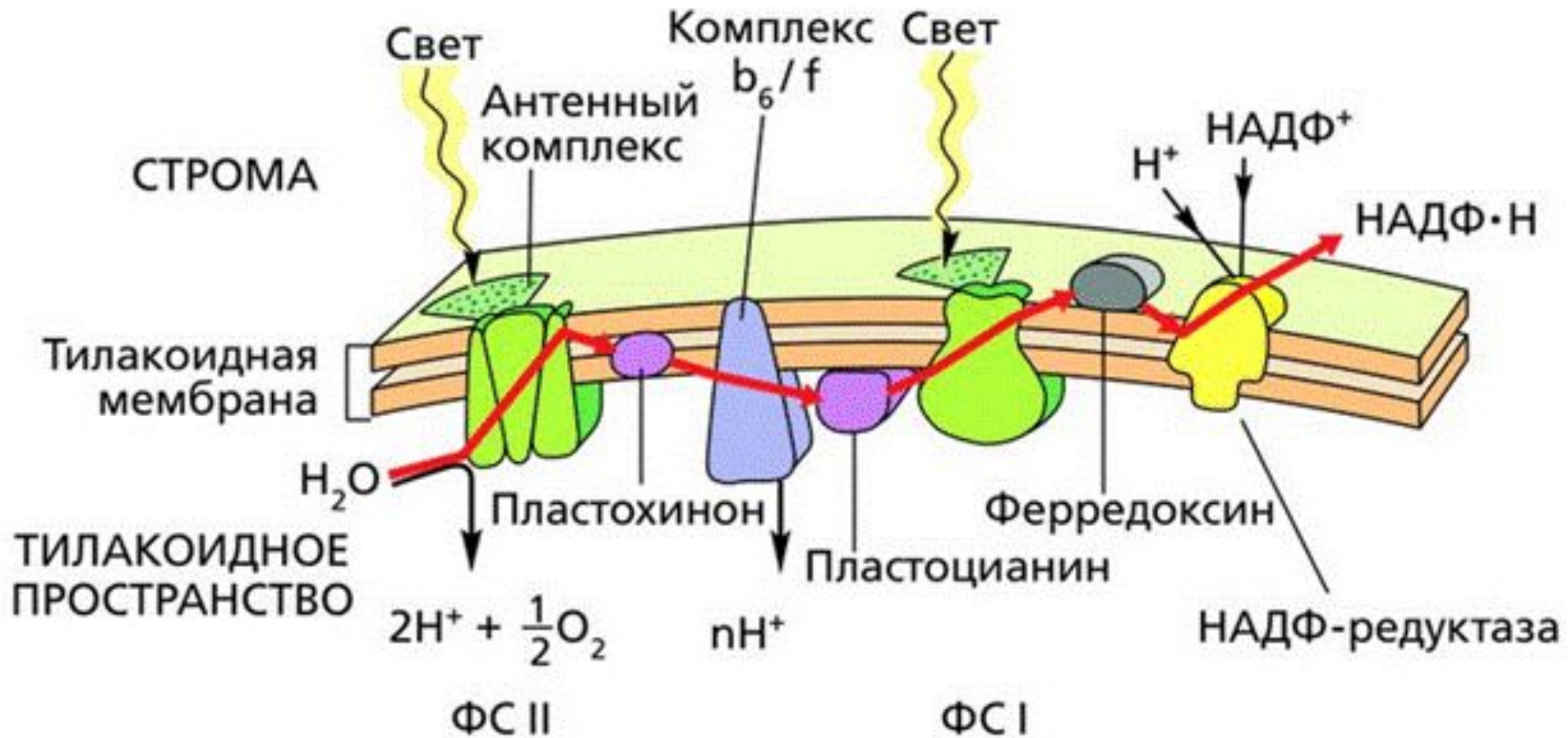
ГЕМ (порфириновое кольцо)



- Внутри каждой фотосистемы располагается гем и ионом магния внутри. Гем улавливает световую волну и ее энергию передает на электрон.
- В зависимости от собственной структуры и дополнительных пигментов длина волны может быть различна.
- Высшие растения и зеленые водоросли чувствительны к волне 680 и 700нм (красная область) благодаря ФI и ФII соответственно. Бурые водоросли улавливают желто-зеленые волны (ХЛС).
- Красные водоросли – синие волны (ХЛD).









Организация фотосинтетического аппарата у цианобактерий

феоф – феофитин;

FeS – железо-

серосодержащий белок;

Фд – ферредоксин;

Фвд – флаводоксин;

Фп – флавопротеин;

ПХ – пластохинон;

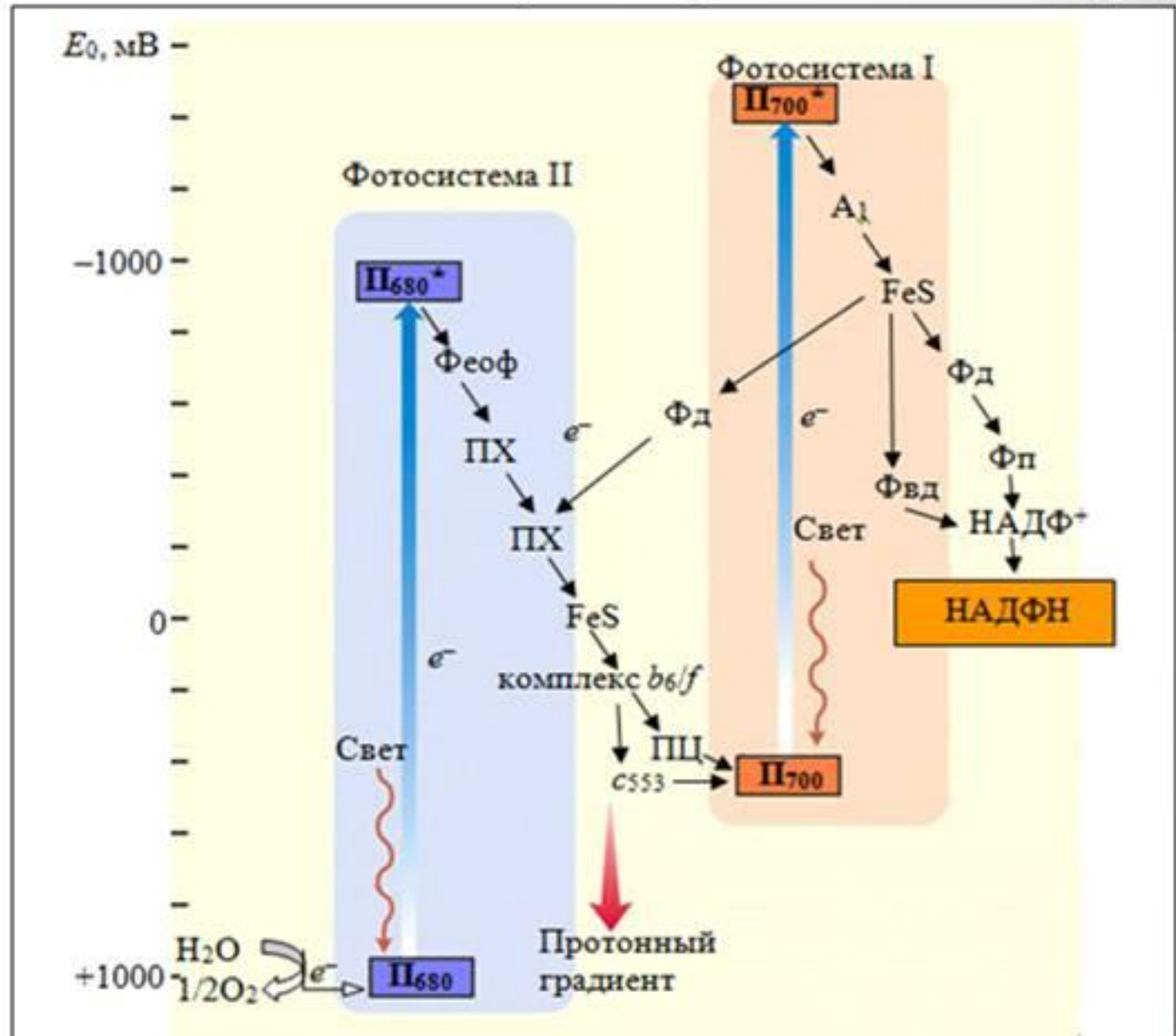
ПЦ – пластоцианин;

c_{553} , b_6 , f – цитохромы;

P_{700}^* – хл a_1 реакционного центра;

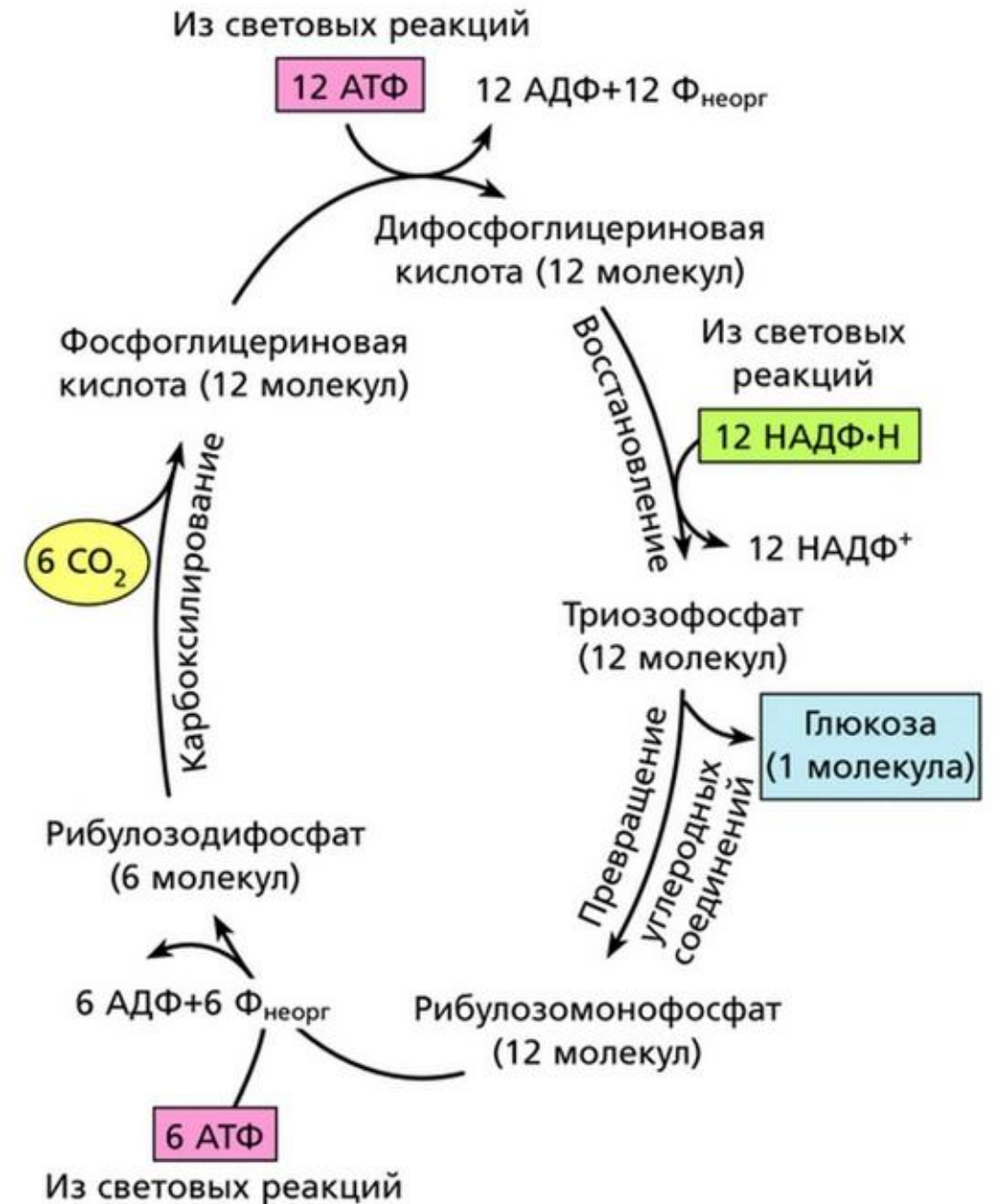
P_{680}^* – хл a_2 реакционного центра;

A_1 – первичный акцептор электрона.

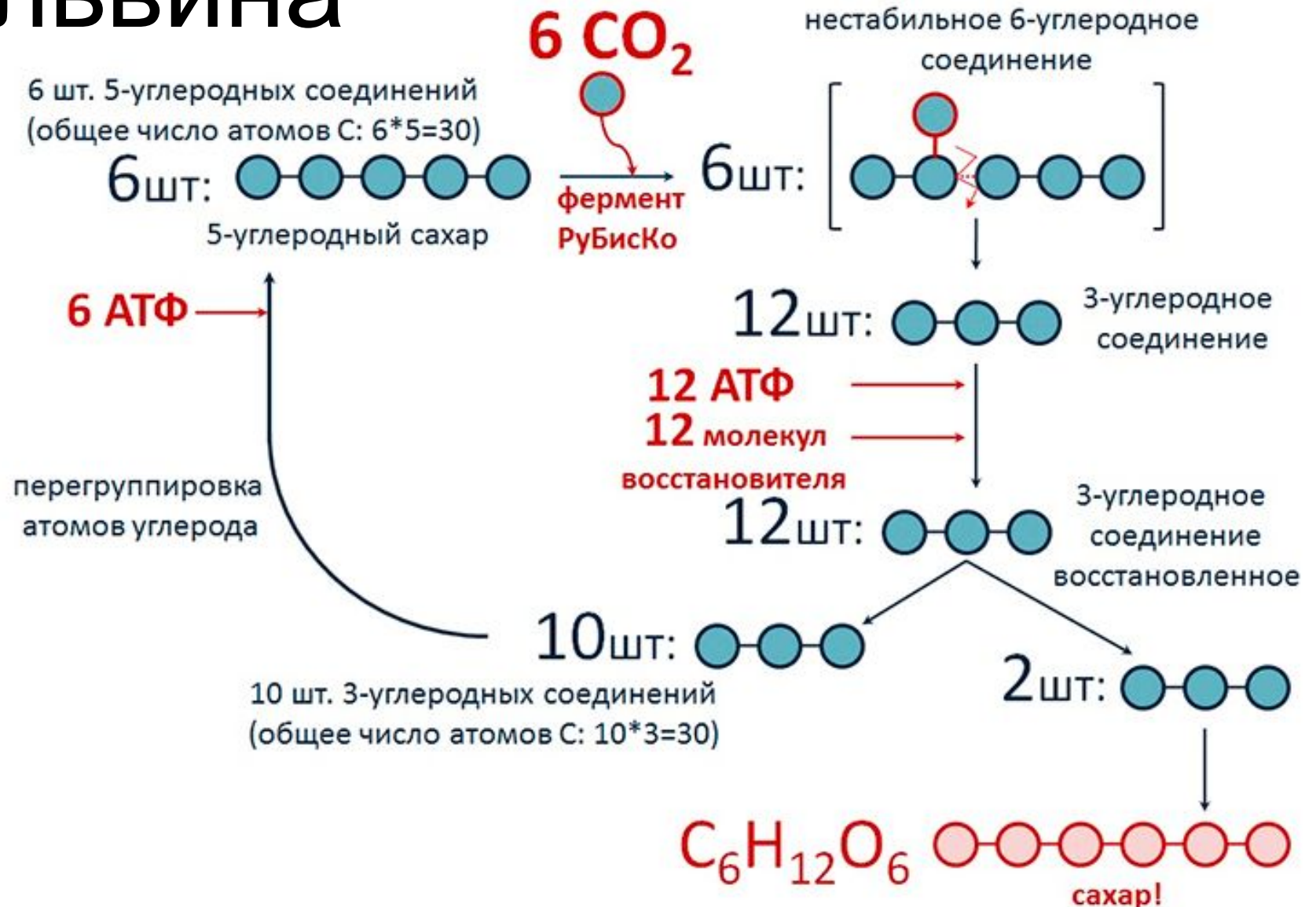


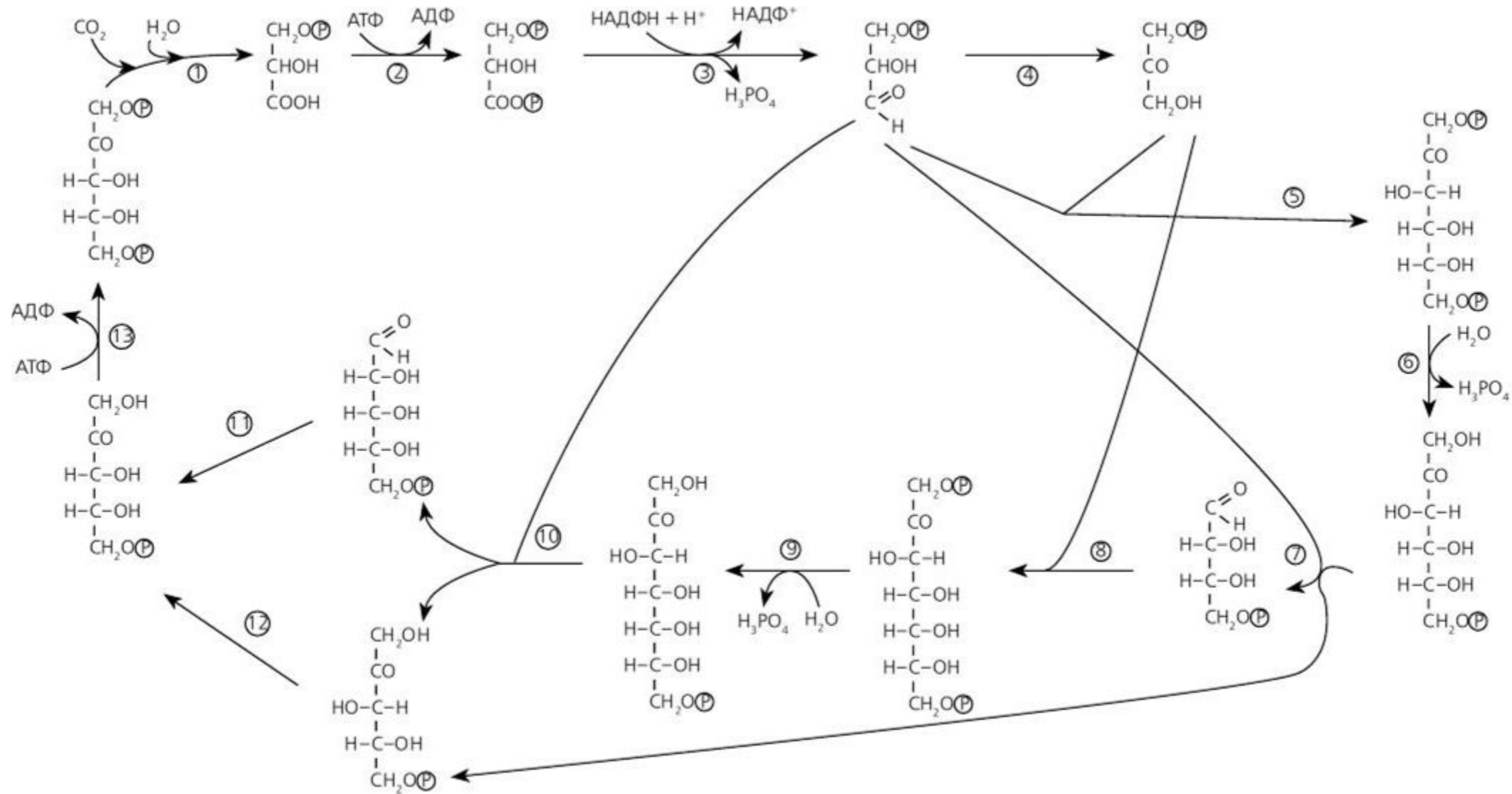
Цикл Кальвина

- Происходит во время темновой фазы.
- Идет с затратой энергии АТФ;
- На восстановление глюкозы затрачивается восстановительные эквиваленты НАДФН;
- В цикле Кальвина фиксируется углекислый газ;
- Это цикл должен быть более производительным, чем цикл Кребса.
- Восполнение электронов на фотосистеме 1 происходит из самой цепочки (конкретно с пластохинона).

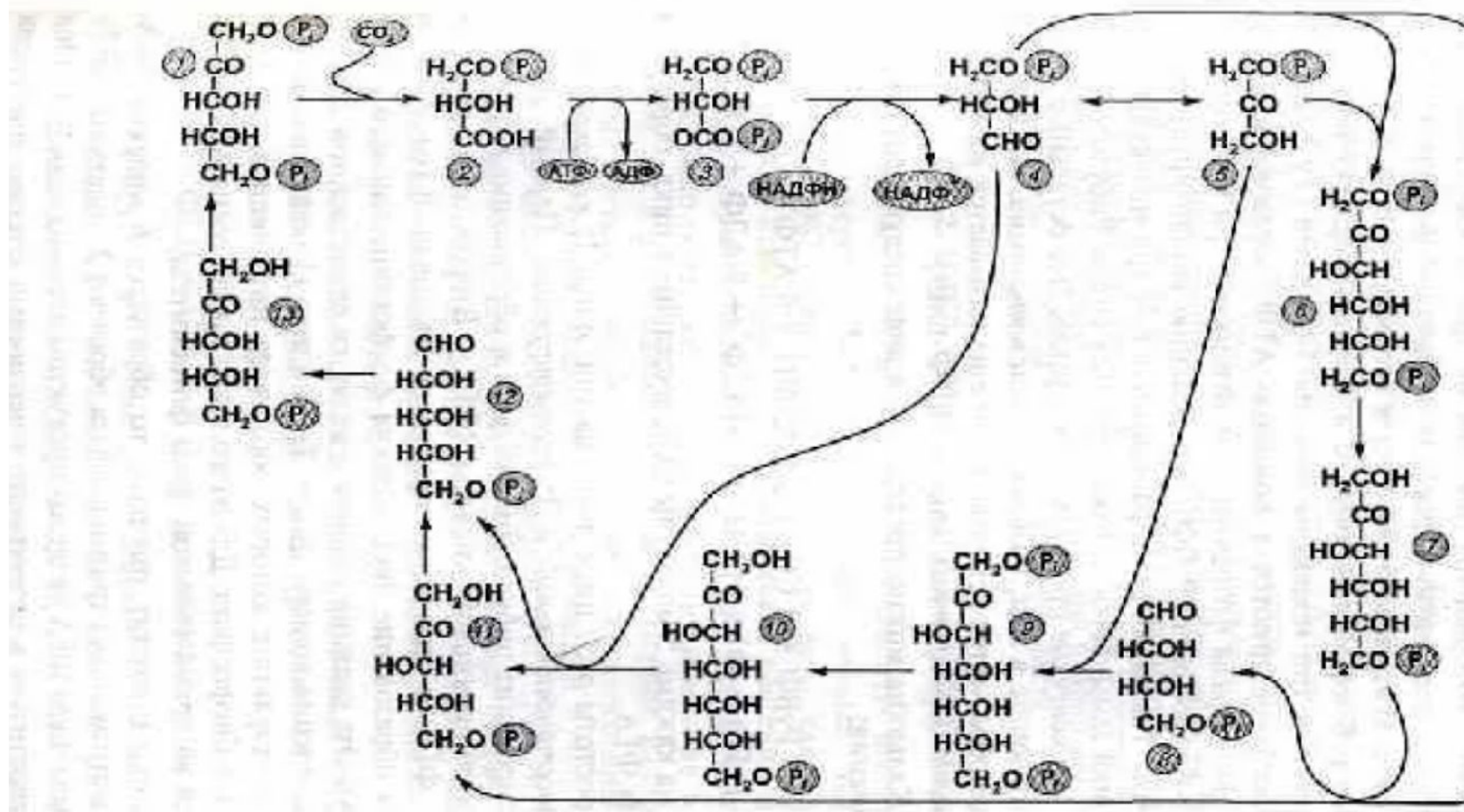


Цикл Кальвина





Цикл Кальвина



1 — рибулозо-1,5-дифосфат; 2 — фосфоглицериновая кислота; 3 — дифосфоглицериновая кислота; 4 — фосфоглицериновый альдегид; фодиоксиацетон; 5 — фруктозо-1,6-дифосфат; 6 — фруктозо-6-фосфат; 7 — эритрозо-4-фосфат; 8 — седогептулозо-1,7-дифосфат; 9 — дозо-7-фосфат; 10 — ксилулозо-5-фосфат; 11 — рибозо-5-фосфат; 12 — рибулозо-5-фосфат

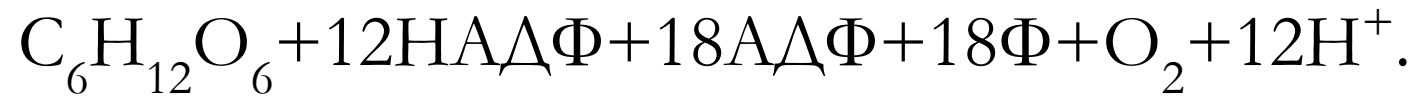
Цикл Кальвина

- За счёт энергии АТФ, полученной в световой фазе, в строме активируются молекулы рибулозофосфата. Он превращается в высокореакционное соединение рибулозодифосфат (РДФ), имеющее 5 атомов углерода.
- Образуются две молекулы фосфоглицериновой кислоты (ФГК), имеющей три углеродных атома. На следующем этапе ФГК реагирует с АТФ и образует дифосфоглицериновую кислоту. ДФГК взаимодействует с НАДФН₂ и восстанавливается до фосфоглицеринового альдегида (ФГА).
- Все реакции происходят под действием специфических ферментов.
- На следующем этапе путём конденсации ФГА и фосфодиоксиацетона образуется фруктозодифосфат, который содержит 6 атомов углерода и является исходным материалом для образования сахарозы и полисахаридов.
- Фруктозодифосфат может взаимодействовать с ФГА и другими продуктами темновой фазы, давая начало цепям 4-, 5-, 6-, 7-углеродных сахаров. Одним из устойчивых продуктов фотосинтеза является рибулозофосфат, который снова включается в цикл реакций, взаимодействуя с АТФ. Чтобы получить молекулу глюкозы, необходимо прохождение 6 циклов реакций темновой фазы.
- Углеводы (в том числе и глюкоза) являются основным продуктом фотосинтеза, но также из промежуточных продуктов цикла Кальвина образуются аминокислоты, жирные кислоты, гликолипиды.



Уравнение Фотосинтеза

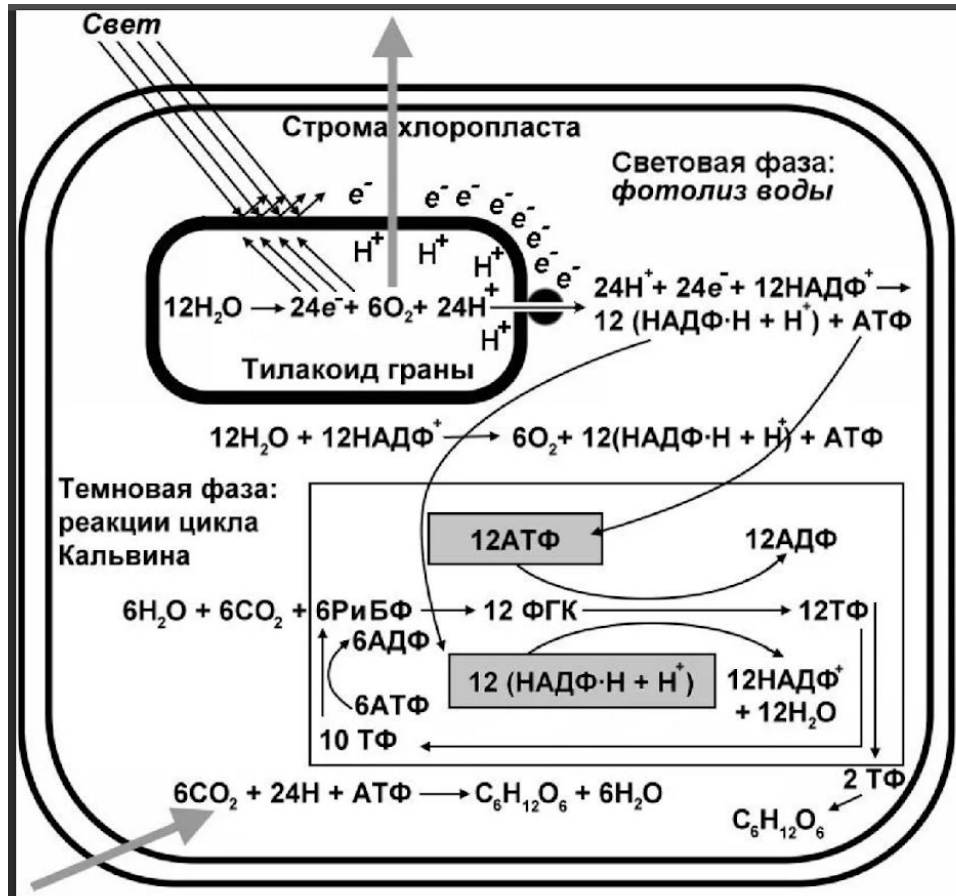
Образование молекулы глюкозы происходит в хлоропластах



Полимеризация глюкозы может происходить, как в самих хлоропластах (тогда крахмал запасается в специальных гранулах или пиреноиде), так и в шЭПР.

Растворение глюкозы и извлечение энергии для нужд клетки происходит в митохондриях.

Уравнение фотосинтеза Примеры C₃-растений



- Деревья (и почти все двудольные);
- Пшеница
- Рожь
- Овес
- Рис

<https://studfiles.net/preview/4333436/page:3/>



Виды фотосинтеза

- C_3 - фотосинтез (Цикл Кальвина);

Фиксация углекислого газа от 1 до 50 мг на 1 дм^3

- C_4 - фотосинтез (цикл Хетча—Слэка);

- **Метаболизм органических кислот, по типу толстянковых (МОКТ) (САМ-фотосинтез, переводится как Crassulaceae acid metabolism).**

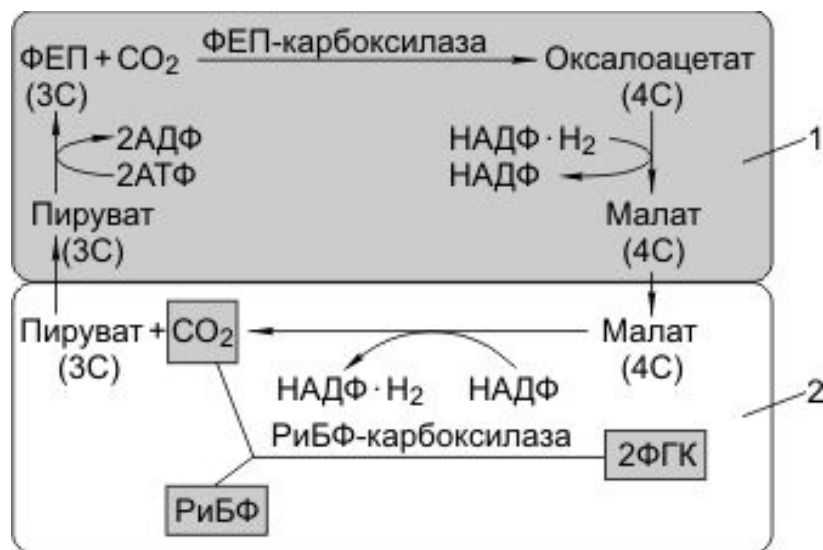
- В ночное время в цитоплазме происходит восстановительное карбоксилирование ФЕП с образованием малата, как у C_4 -растений. Малат накапливается и хранится в вакуоли.

C_4 - фотосинтез (цикл Хетча—Слэ



- На свету ФЕП соединяется с CO_2 и образуется ЦУК, который восстанавливается в малат или аспартат.
- Затем полученное вещество из мезофила поступает в клетки обкладки проводящего пучка, где в результате декарбоксилирования высвобождается CO_2 , поступающий в цикл Кальвина.
- Пониженный расход воды, благодаря сопротивляемости устьиц.
- Фиксация углекислого газа от 40 до 80 мг на 1 дм^3

Цикл ФЕП в тканях C_3 -растений



1 - фотосинтезирующая паренхима

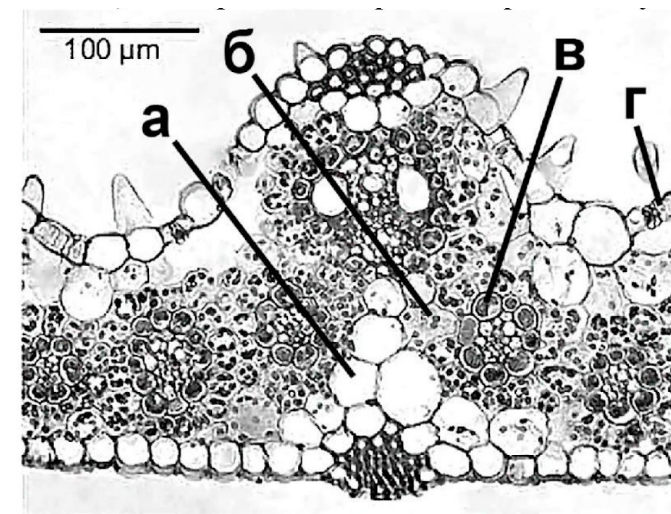
2 - клетки обкладки проводящего пучка.

ФЕП – фосфоенолпируват

ЩУК – щвелевоуксусная кислота (оксалоацетат).

Малат – яблочная кислота

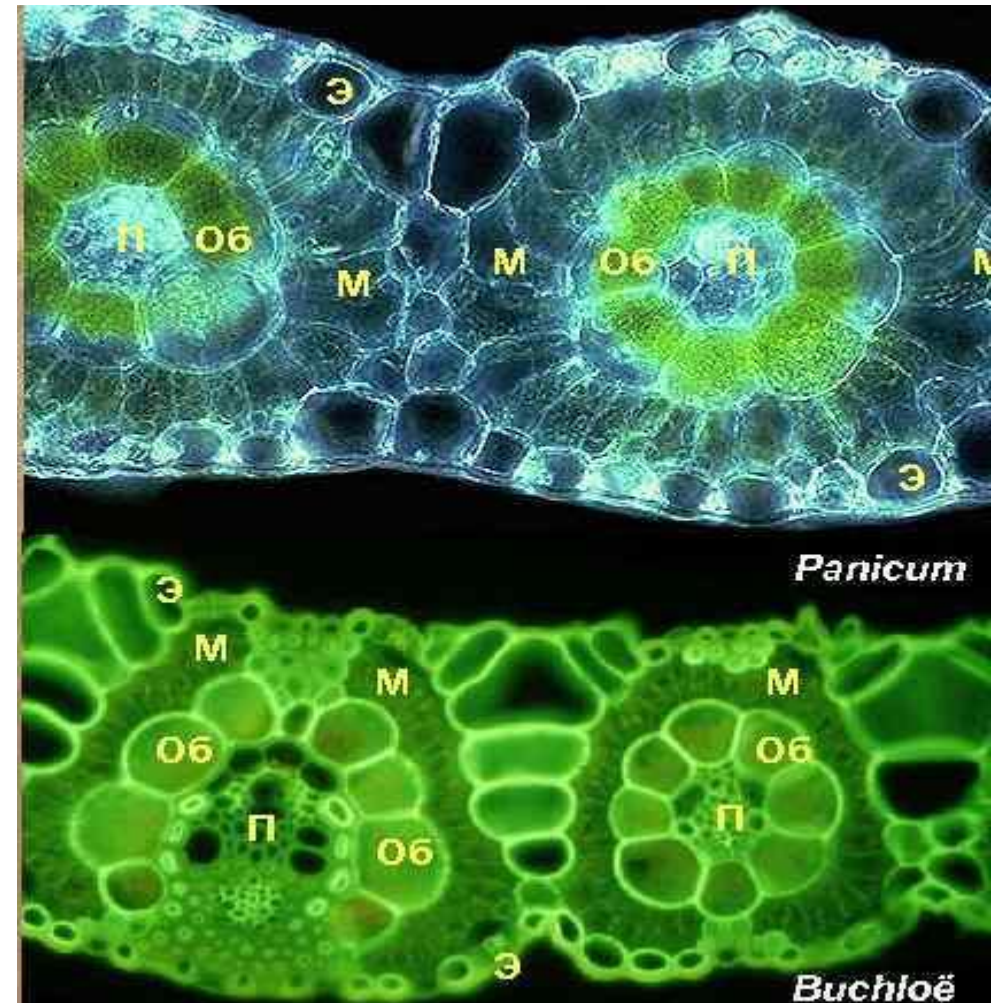
Пируват – пировиноградная кислота



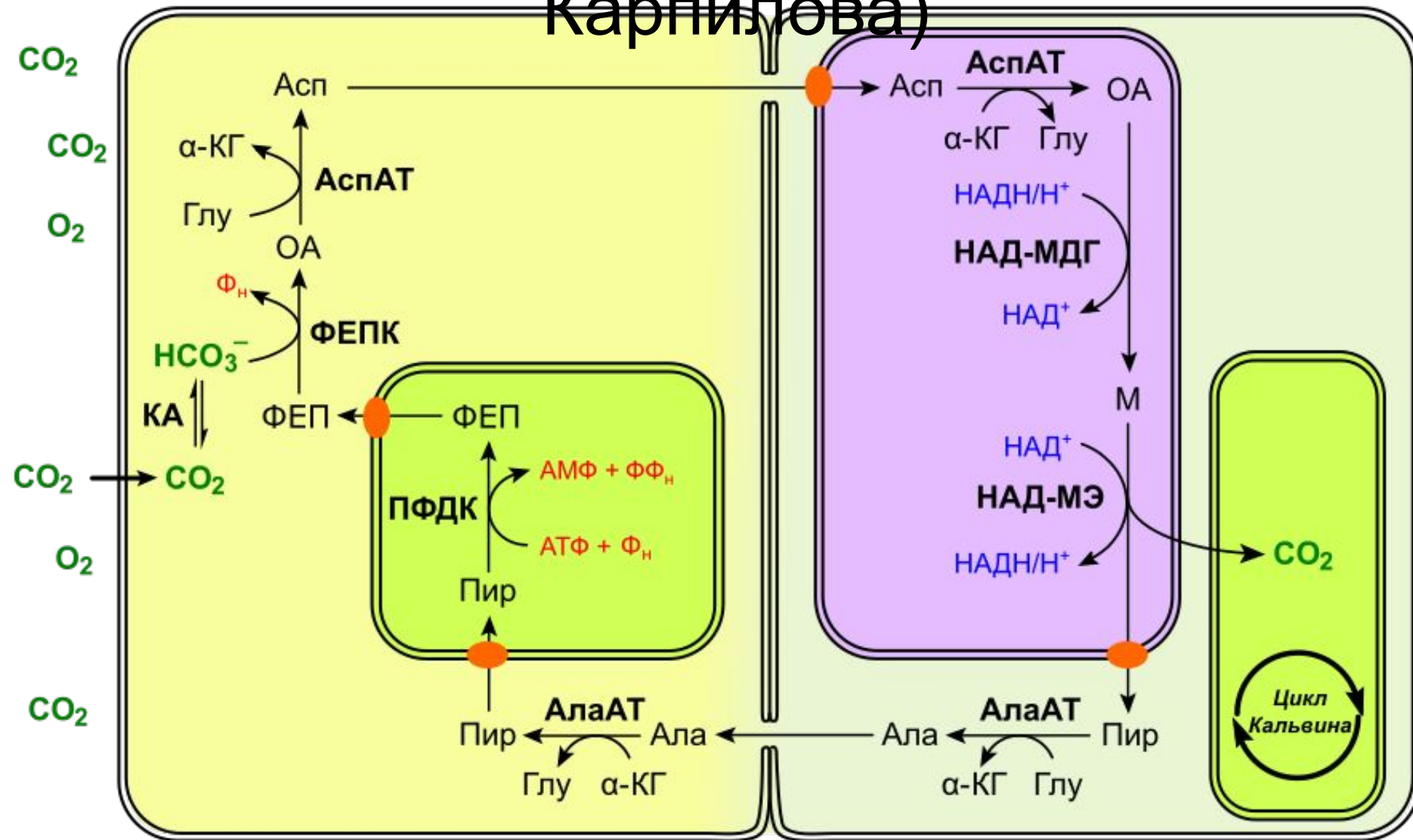
1. Происходит в фотосинтезирующих клетках паренхимы листа (б). Фермент карбоксилаза может фиксировать (ковалентно связывать с органическим веществом) углекислый газ в виде кислотной группы –COOH. Количество углеродов в молекуле ФЕП увеличивается и теперь это молекула называется ЩУК. Она восстанавливается до яблочной кислоты (малата).
2. Яблочная кислота переносится в клетки обкладки проводящего пучка, где отдает углекислый газ и превращается в пируват. Углекислый газ используется ферментом риболозобисфосфат (РиБФ) карбоксилазой (рубиско) первой реакции цикла Кальвина.

C-4 фотосинтез происходит у

- Кукурузы
- Сорго
- Сахарный тростник
- просо



Путь ФЕП (фосфоенолпироват) Хетча—Слэка—Карпилова)



Сравнение C_3 и C_4 растений

C_3 -растения

C_4 -растения

Фиксация углерода	двуокиси	Происходит только один раз	Происходит дважды: сначала в клетках мезофилла, а затем в клетках обкладки проводящих пучков
Акцептор углерода	двуокиси	Рибулозобисфосфат (РиБФ) – C_5 -соединение	Клетки мезофилла ФЕП – C_3 -соединение
Фермент, фиксирующий CO_2		РиБФ-карбоксилаза, которая недостаточно эффективна	Клетки обкладки проводящих пучков Рибулозобисфосфат (РиБФ) РиБФ-карбоксилаза, которая работает достаточно эффективно, так как концентрация CO_2 очень высока
Первый продукт фотосинтеза		C_3 -кислота (фосфоглицериновая)	C_4 -кислота (например, щавелевоуксусная)
Анатомические особенности листа		Хлоропласты только одного типа	«Кранц-анатомия»: клетки двух типов, каждый с характерными для него хлоропластами
Фотодыхание		Имеется; поэтому кислород действует как ингибитор фотосинтеза	Подавлено из-за высокой концентрации CO_2 ; поэтому атмосферный кислород не ингибирует фотосинтез
Продуктивность		Фотосинтез менее продуктивен, чем у C_4 -растений. Урожайность обычно гораздо ниже	Фотосинтез более продуктивен, чем у C_3 -растений. Урожайность обычно намного выше

C4 растения

- Кукуруза, сорго, тростник, просо, гвоздичные, маревые, амарантовые.



САМ-фотосинтез ночью

- Описан у толстянковых (Crassulaceae). Встречается у растений засушливых мест.
- **Процесс начинается ночью**, когда устьицы открыты, CO_2 из атмосферы входит в клетку, где связывается с ФЕП, с помощью **ФЕП-карбоксилазы**. Днем устьицы закрыты.
- ФЕП - фосфоенолпировиноградная кислота.
- Сначала образуется щавелевоуксусная кислота (ЩУК).
- ЩУК восстанавливается до яблочной кислоты (малат), которая накапливается в вакуолях клеток мезофила.
- Фермент: **малатдегидрогеназы (малик-фермент)**

САМ-фотосинтез Днем

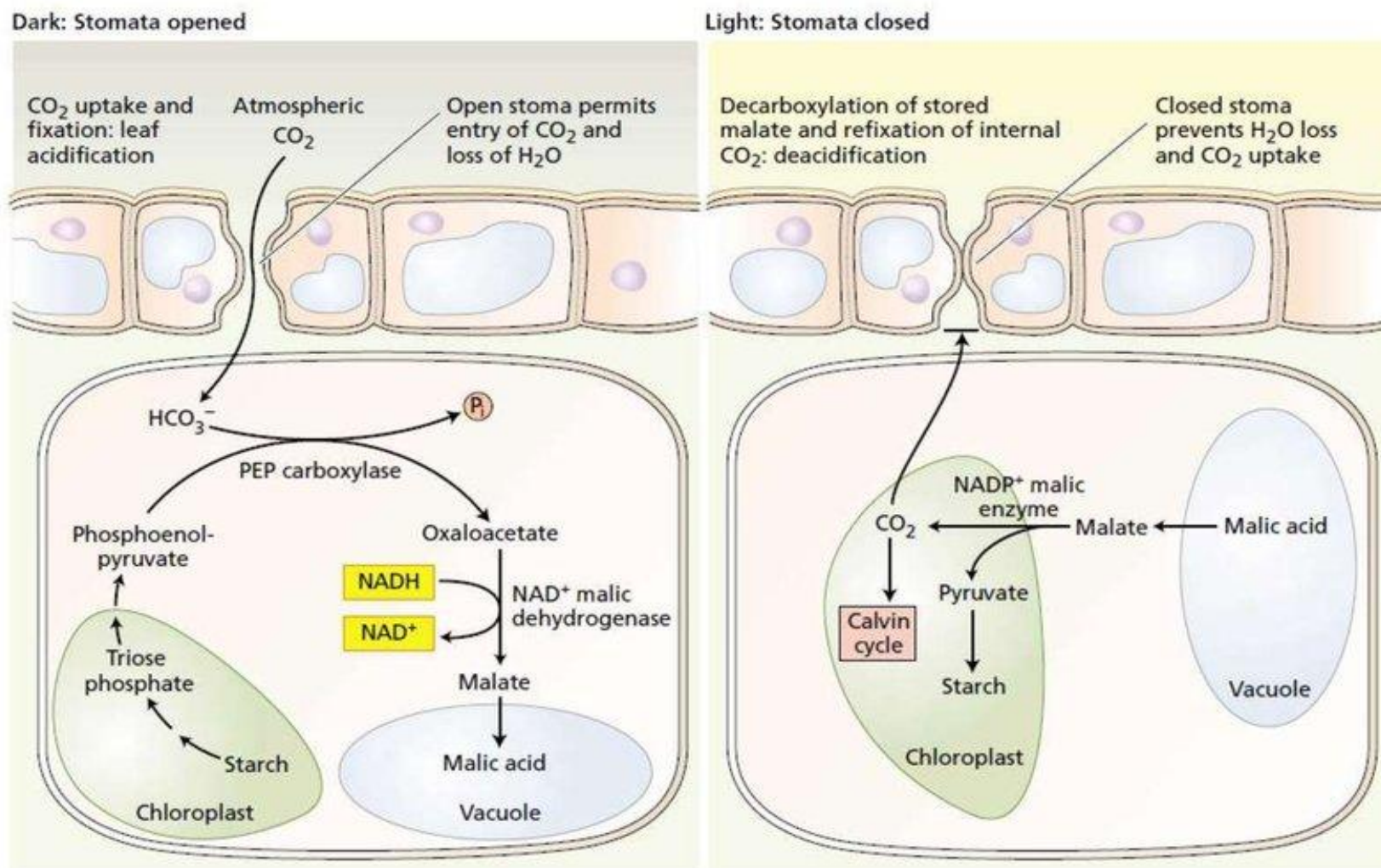


- Яблочная кислота транспортируется из вакуолей в цитоплазму, где происходит декарбоксилирование ЩУК с образованием CO_2 и пировиноградной кислоты.
- CO_2 переходит в хлоропласты и с помощью РБФ-карбоксилазы/оксигеназы (рубиско) вступает в цикл Кальвина.
- Экономия воды в замен продуктивности, так как приходится дополнительно тратить энергию.

САМ-фотосинтез

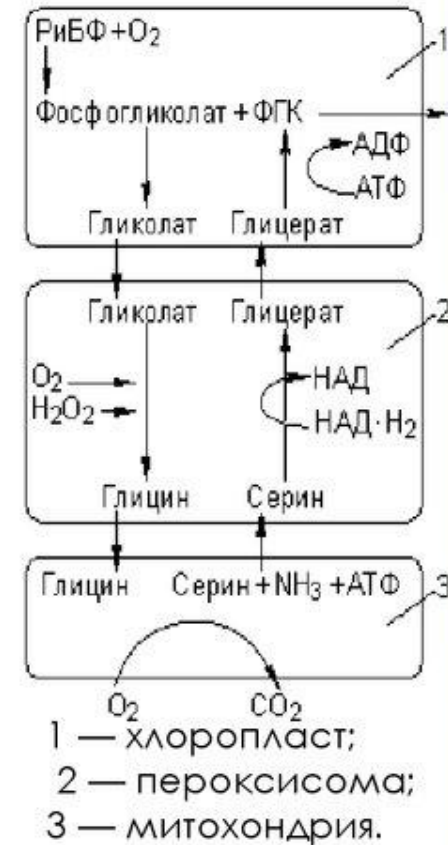
- *Нужен для экономии воды за счет ограничения транспирации в светлое время суток через устьицы.*
- *САМ-фотосинтез происходит в следующих растениях : ананас, толстянка, хойя, каланхое, сансевьера, вельвичия.*
- Это тип фотосинтеза встречается также у водных растений, обитающих в местах пересыхания водоемов и в приливно-отливной зоне.

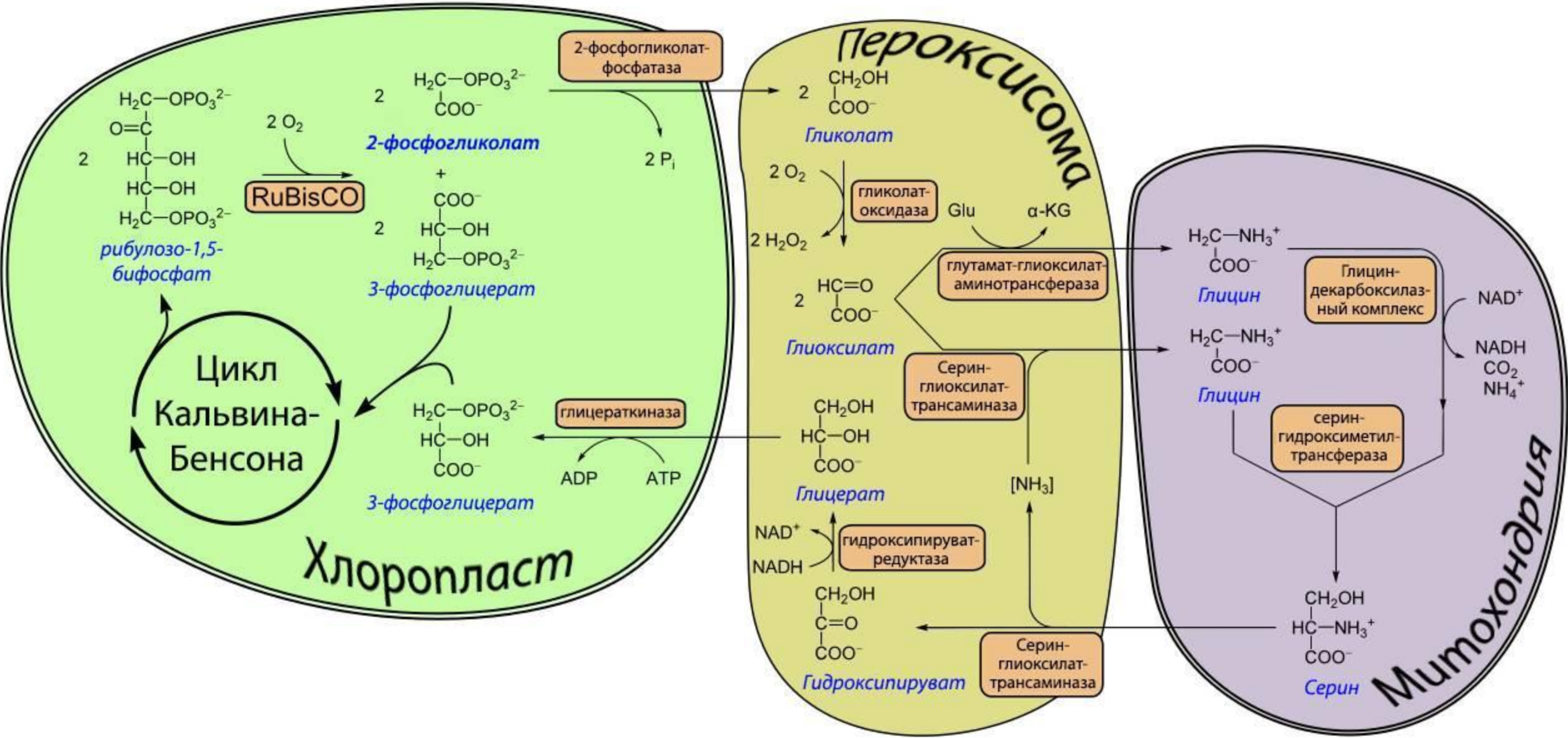
CAM-пусть ФС



ФОТОДЫХАНИЕ

- Это светозависимое поглощение кислорода и выделение углекислого газа. Еще в начале прошлого века было установлено, что кислород подавляет фотосинтез. Как оказалось, для РИБФ-карбоксилазы субстратом может быть не только углекислый газ, но и кислород:
- $O_2 + \text{РИБФ} \rightarrow \text{фосфогликолат (2C)} + \text{ФГК (3C)}$.
- Фермент при этом называется РИБФ-оксигеназой. Кислород является конкурентным ингибитором фиксации углекислого газа. Фосфатная группа отщепляется, и фосфогликолат становится гликолатом, который растение должно утилизировать. Он поступает в пероксисомы, где окисляется до глицина. Глицин поступает в митохондрии, где окисляется до серина, при этом происходит потеря уже фиксированного углерода в виде CO_2 . В итоге две молекулы гликолата ($2C + 2C$) превращаются в одну ФГК ($3C$) и CO_2 . Фотодыхание приводит к понижению урожайности C_3 -растений на 30–40% (C_3 -растения — растения, для которых характерен C_3 -фотосинтез).





ССЫЛКИ

- <https://ru.wikipedia.org/wiki/C3-%D1%84%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%81%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%B7>
- <https://ru.wikipedia.org/wiki/C4-%D1%84%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%81%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%B7>
- <https://studfiles.net/preview/5782659/page:13/>
- <https://biocpm.ru/fotosintez-svetovaya-faza> - ОТЛИЧНЫЙ учебник

