

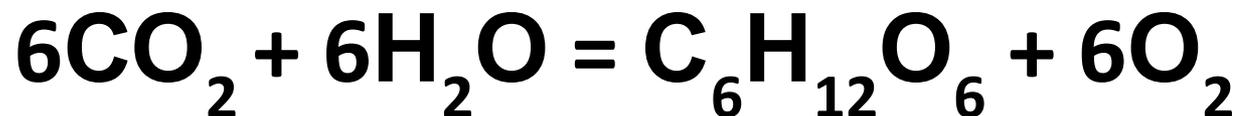
# ФОТОСИНТЕЗ

## План лекции

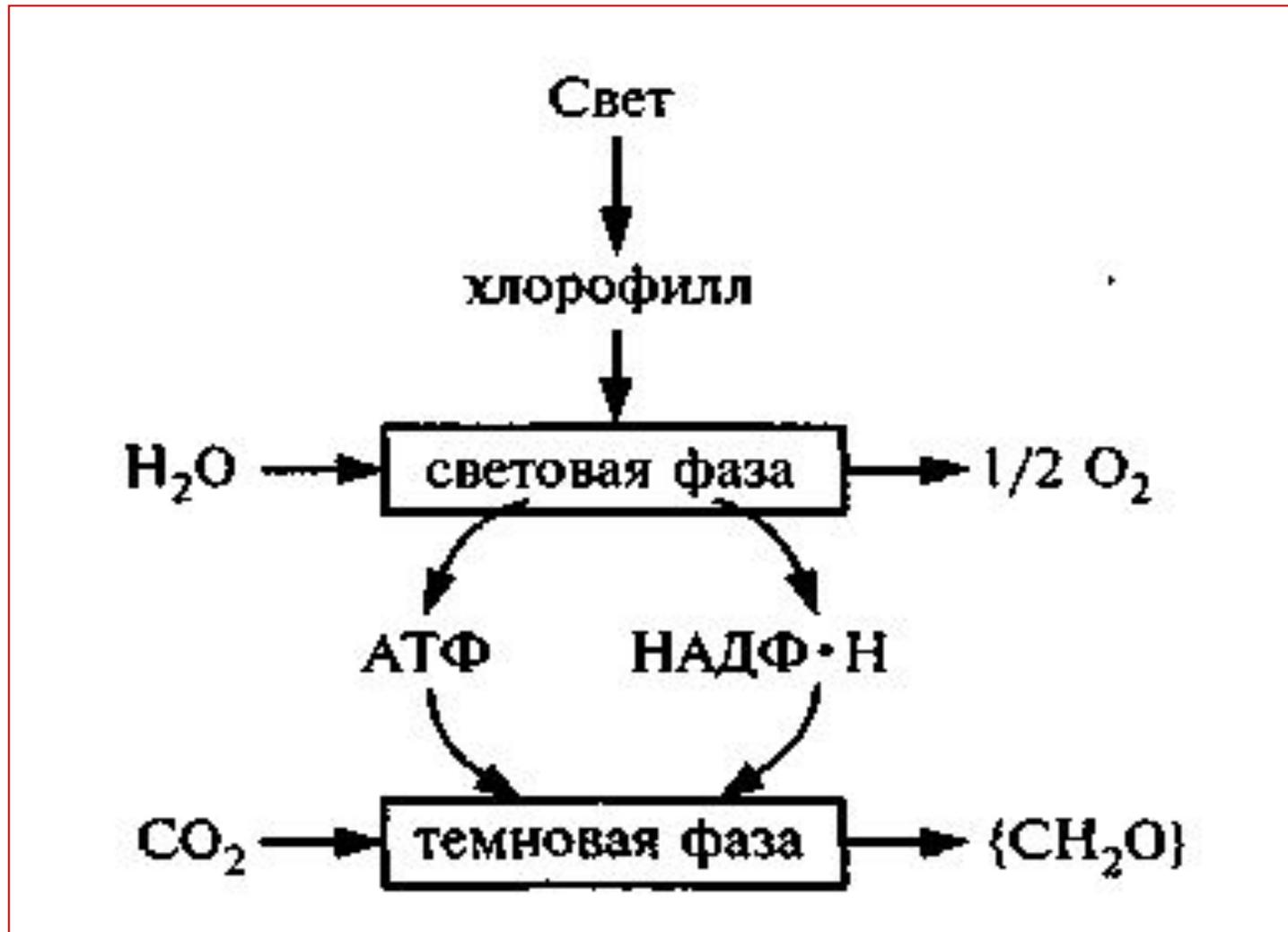
1. Общин представления о фотосинтезе
2. Лист – орган фотосинтеза. Пигменты зеленого листа
3. Световая фаза фотосинтеза
4. Темновая фаза фотосинтеза
5. Факторы, влияющие на фотосинтез
6. Фотосинтез и продуктивность растений

**Фотосинтез** – процесс образования в растениях органических веществ из углекислого газа и воды за счет энергии света.

## **ОБЩЕЕ УРАВНЕНИЕ ФОТОСИНТЕЗА**



# СХЕМА ФОТОСИНТЕЗА



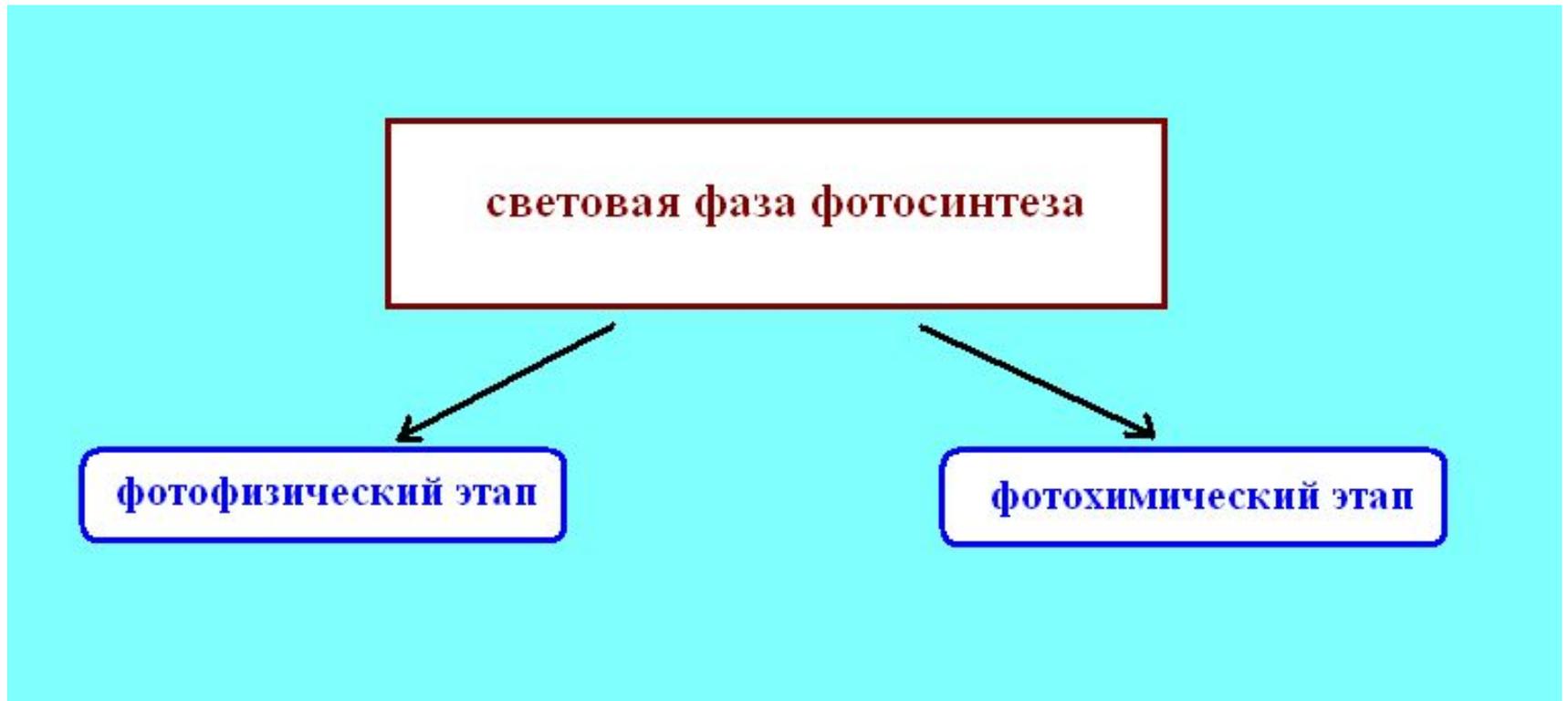
**Световая фаза:** поглощается свет, вода расщепляется на водород и кислород.

Выделяющийся растением кислород – это кислород воды.

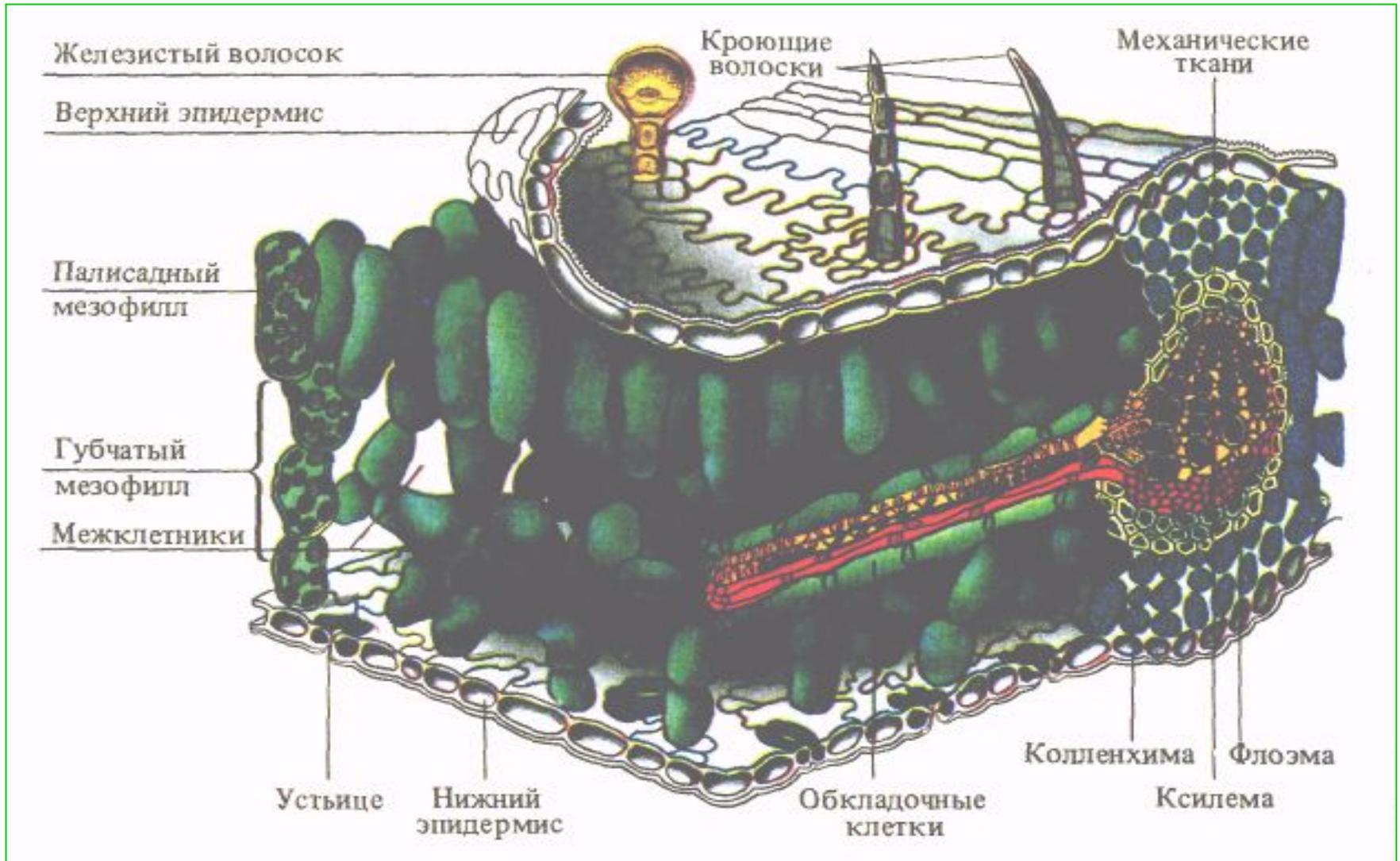
(установлено в 1941 году опытами зарубежных ученых Рубена и Камена, а также ученых СССР Виноградова и Тэйс).

**Темновая фаза:** углекислота восстанавливается до углеводов.

# Этапы световой фазы фотосинтеза



# СЕЧЕНИЕ ЛИСТА



# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ЛИСТА

**Приходящая энергия = 100%**

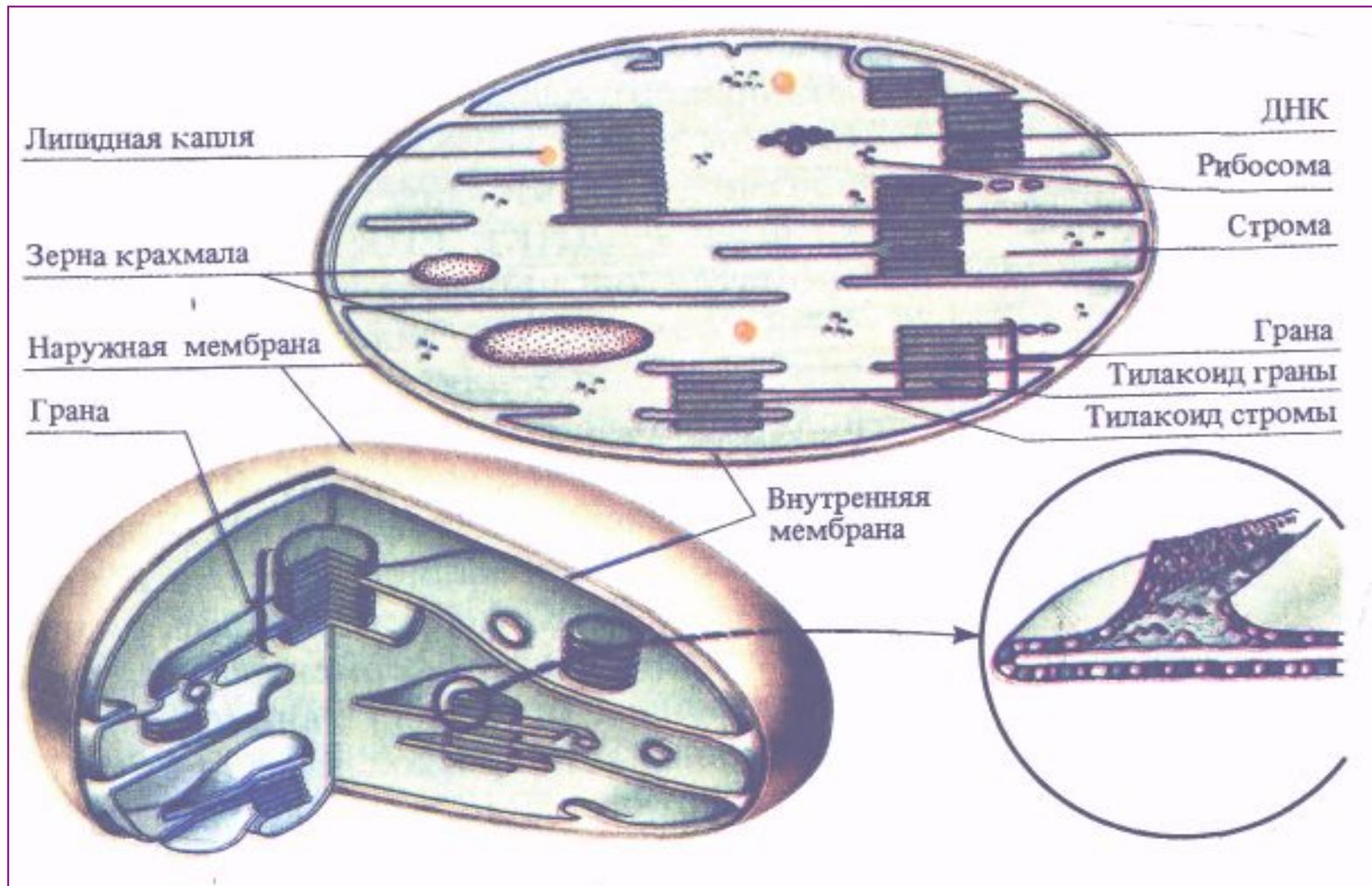
**Расход:**

- отражается – **10%**;
- проходит через лист - **10%**;
- теплообразование – **35%**;
- испарение воды – **43%**;
- на фотосинтез **1-2%**

Листом поглощается около **80-85%** ФАР и **25%** инфракрасной радиации, что составляет около **55 %** от общей радиации, попадающей на лист.

**Листовая мозаика** – расположение листьев, обеспечивающее рациональное поглощение световой энергии.

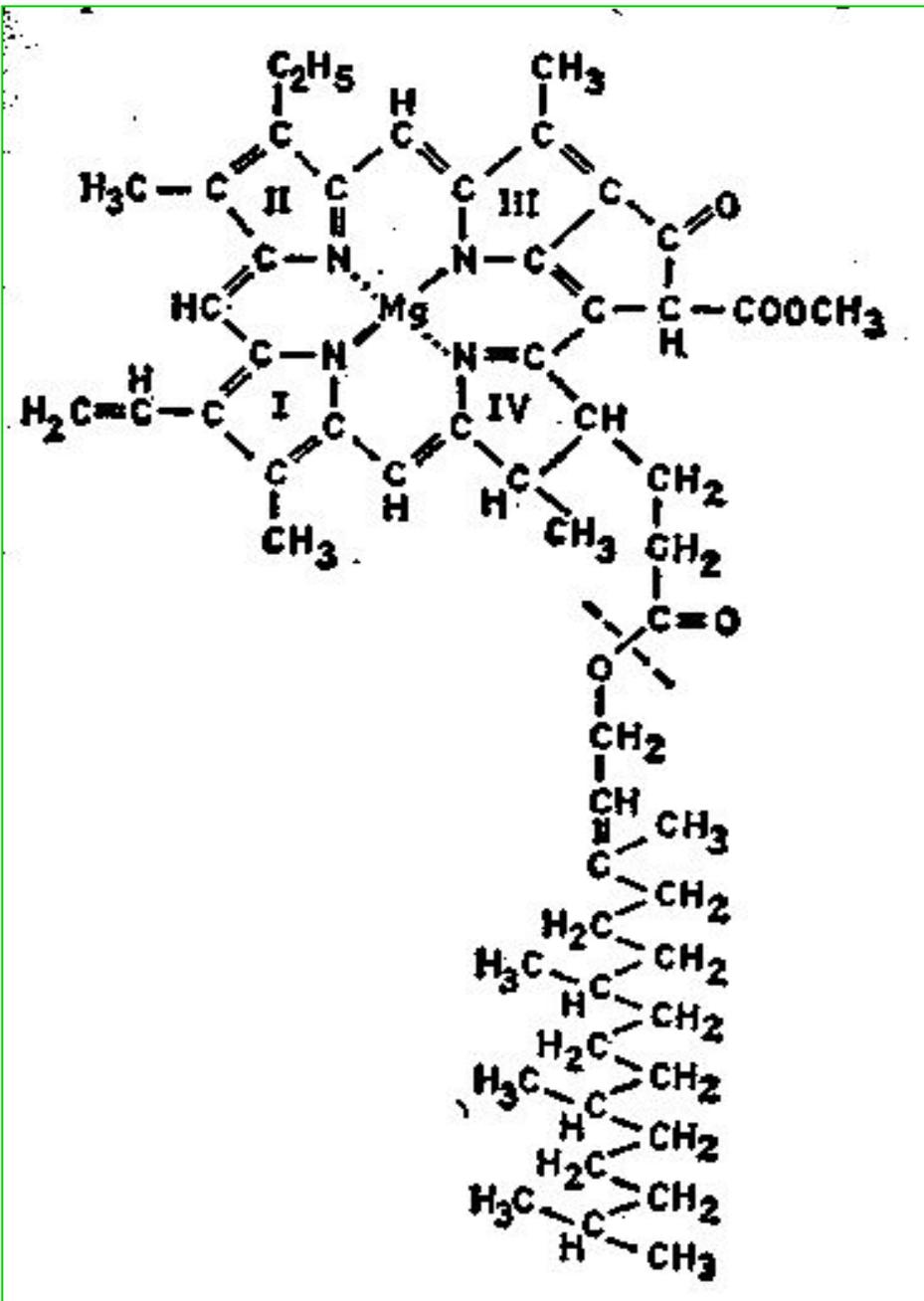
# Субклеточный уровень: фотосинтез идет в хлоропластах



**В хлоропластах свет поглощается пигментами:**

- 1. *зеленые*** – хлорофиллы «а» и «б».
- 2. *желто-оранжевые***, или каротиноиды – каротины и ксантофиллы.

# МОЛЕКУЛА ХЛОРОФИЛЛА



# КАРОТИНОИДЫ

- **КАРОТИНЫ:**

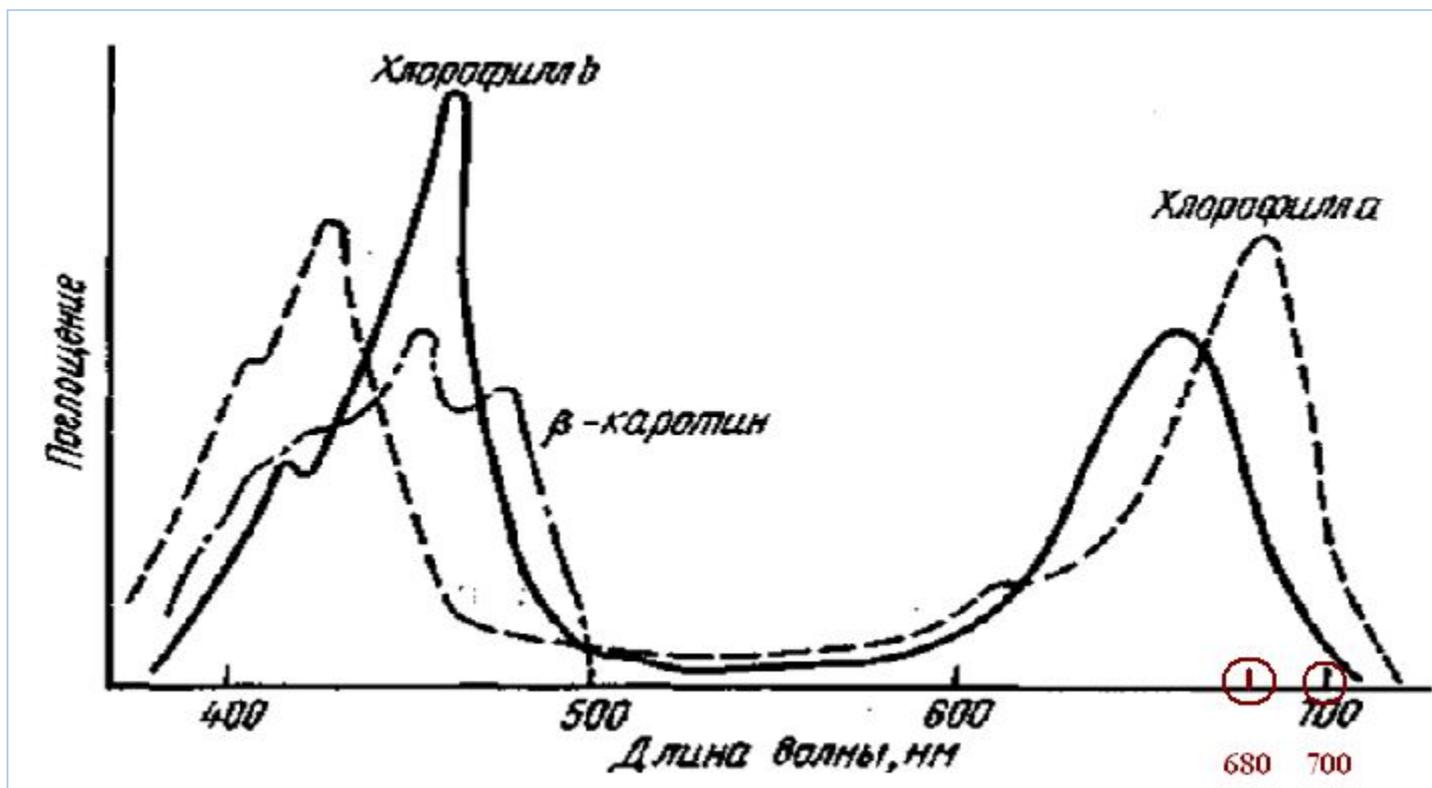


- **КСАНТОФИЛЛЫ:**



# РЕАКЦИОННЫЕ ЦЕНТРЫ (РЦ)

Непосредственно участвуют в фотохимических реакциях около **1%** молекул хлорофилла «а», являющихся **реакционными центрами** и имеющие максимум поглощения в красной части спектра при длинах волн **680** и **700** нм.



## ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ ЕДИНИЦА (ФСЕ)

Другие молекулы хлорофиллов и каротиноидов поглощают кванты и передают их молекулам реакционных центров. Эти молекулы называют **антеннами**, они составляют **светособирающий комплекс (ССК)**.

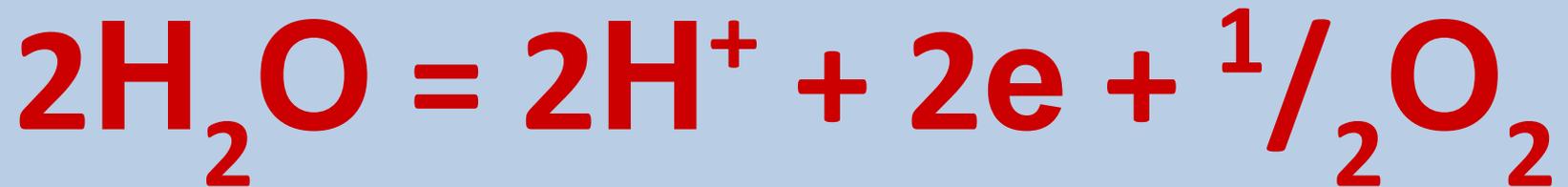
Молекула **РЦ** и обслуживающие их молекулы пигментов светособирающего комплекса составляют **фотосинтетическую единицу (ФСЕ)**.

Поглощенная световая энергия  
используется на осуществление  
*фотохимических реакций* (photos –  
свет).

Совокупность этих реакций есть  
*фотохимический этап* световой фазы  
фотосинтеза.

# ОСНОВНЫЕ ФОТОХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ ФOTOSИНТЕЗА

**Фотодиссация воды:**



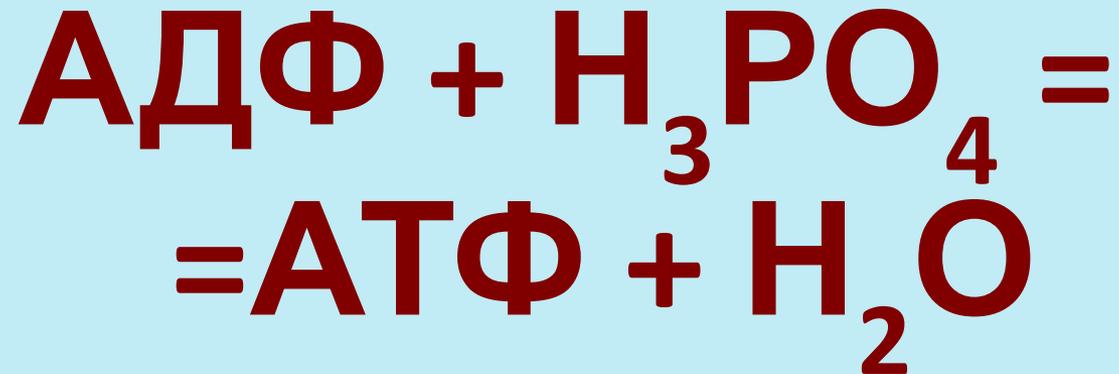
# ОСНОВНЫЕ ФОТОХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ ФОТОСИНТЕЗА

Восстановление НАДФ<sup>+</sup>:



# ОСНОВНЫЕ ФОТОХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ ФОТОСИНТЕЗА

Фосфорилирование АДФ:



# ТЕМНОВАЯ ФАЗА ФОТОСИНТЕЗА

Последовательность реакций  
темновой фазы – *цикл Кальвина-Бенсона* (изучены  
Мельвином Кальвиным в 1946-57 г.г.; в 1961 г. Нобелевская  
премия).

### ЭТАПЫ ЦИКЛА КАЛЬВИНА:

- 1. Карбоксилирование РДФ** (рибулезодифосфат)  
(присоединение  $\text{CO}_2$ ), образуется **ФГК** (фосфоглице-  
риновая кислота)
  - 2. Восстановление** фосфоглицериновой кислоты (**ФГК**)  
до фосфоглицеринового альдегида (**ФГА**);
  - 3. Регенерация** (восстановление, воспроизводство)  
**РДФ** из **ФГА**.
- 2 молекулы  
ФГА → образование **ФДА** (фосфо-  
диоксиацетон), затем **ФДФ** (фруктозодифосфат)  
выводятся из цикла ↓  
синтезируются другие углеводы

# Схема цикла Кальвина

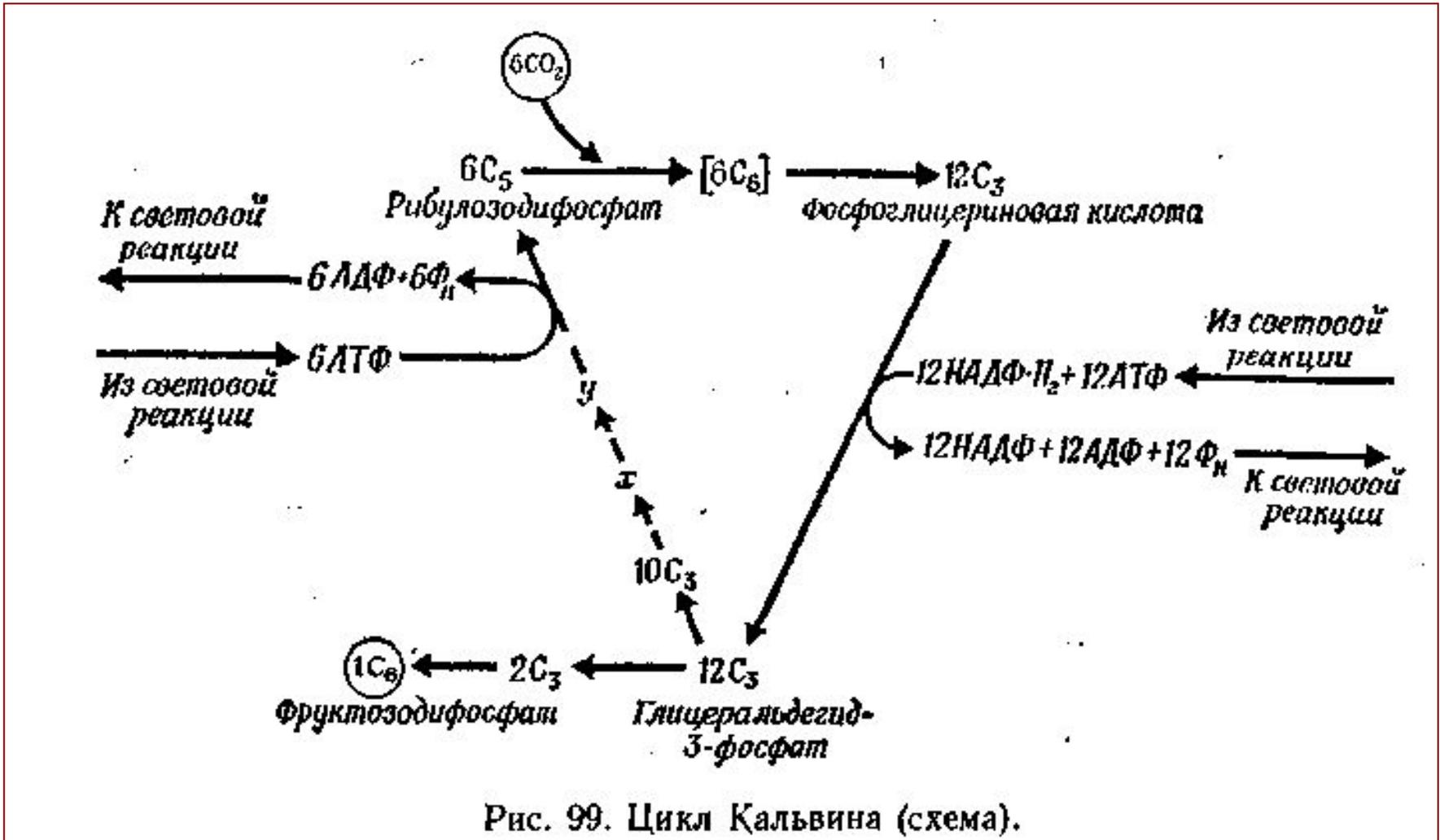


Рис. 99. Цикл Кальвина (схема).

C5, C6, C3 – пяти-, шести-, трехуглеродное соединение.

## КПД световых и темновых реакций

**КПД световых и темновых** реакций – это количество энергии, аккумулированное в продуктах фотосинтеза, выраженное в процентах от общей энергии, использованной на фотосинтез.

### Расчет КПД:

На восстановление 1 моля  $\text{CO}_2$  до  $1/6$  моля  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  необходимо затратить 3 моля АТФ. Для получения 3-х молей АТФ используется 10 молей квантов световой энергии. Энергия 10 молей квантаў красного света равна 1680 кДж,  $1/6$  моля глюкозы содержит 478 кДж.

Отсюда КПД световых и темновых реакций фотосинтеза составляет 25 %.

$$\text{КПД} = (E_{\text{ПРОД}}/E_{\text{ИСП}})100 = (478/1680)*100 = 25\%.$$

Продукты фотосинтеза – называются *ассимилятами*.

Образуются в хлоропластах. Первые ассимилянты - **ФГА и ФДА** (фосфодиоксиацетон), которые транспортируются в цитоплазматический матрикс.

Процесс транспорта идет медленнее, чем синтез, поэтому из части ФГА и ФДА синтезируется **фруктозодифосфат (ФДФ)** и **крахмал**.

Ночью крахмал превращается в ФГА и ФДА и выводится из хлоропластов в цитоплазматический матрикс.

## Этапы пути ассимилятов в растении:

**1. Внутриклеточный.** Ассимиляты (ФГА, ФДА) выходят из хлоропластов в цитоплазматический матрикс.

**2. Межклеточный** – по клеткам мезофилла листа к жилкам, где переносятся во флоэму, а также в потребляющих тканях от флоэмы к каждой клетке-потребителю.

*В листьях каждая тоненькая жилка обслуживает несколько клеток.*

*Общая длина жилок на  $1\text{ см}^2$  листа может быть около 1 м.*

Ассимиляты транспортируются по симпласту и апопласту с затратой энергии. Основная транспортная форма – сахароза.

• **Па флоэме** от клеток листа до клеток органов-потребителей (*флоэмный транспорт*). Длина этапа – от нескольких **см** до десятков **м**.

# **ВЛИЯНИЕ НА ФОТОСИНТЕЗ ФАКТОРОВ СРЕДЫ**

**Факторы среды (экологические факторы),  
влияющие на фотосинтез:**

свет, тепло, углекислый газ, кислород, вода,  
минеральные вещества почвы, ветер, яды, болезни,  
радиоактивность.

***Непосредственное*** влияние – свет, тепло и др.

***Косвенное*** влияние – ветер...

## Спектральный состав света и фотосинтез

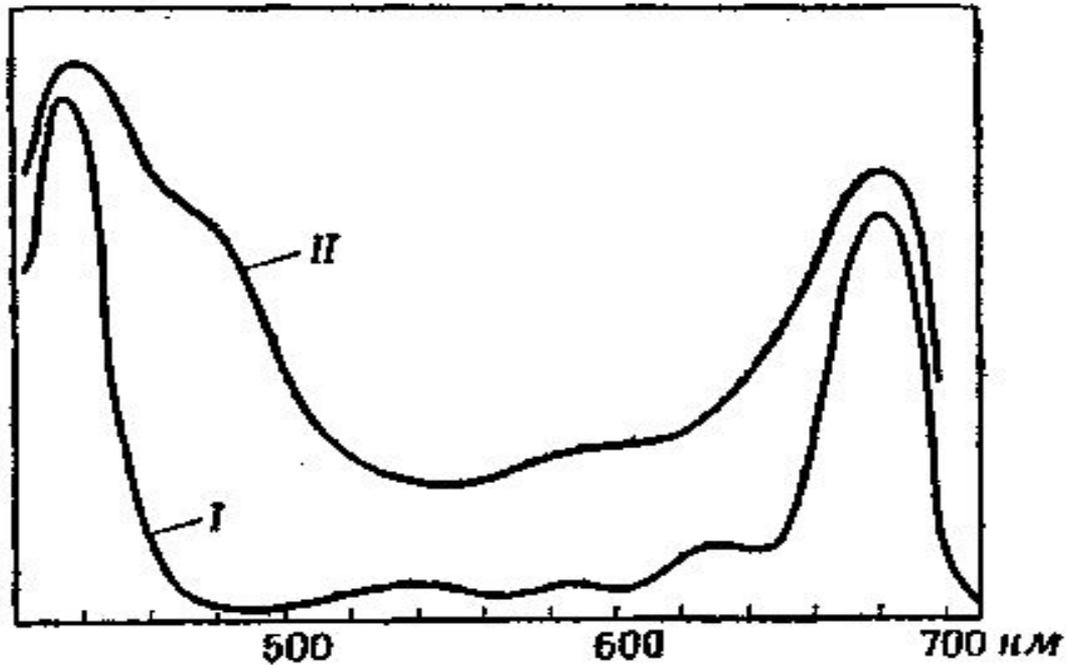
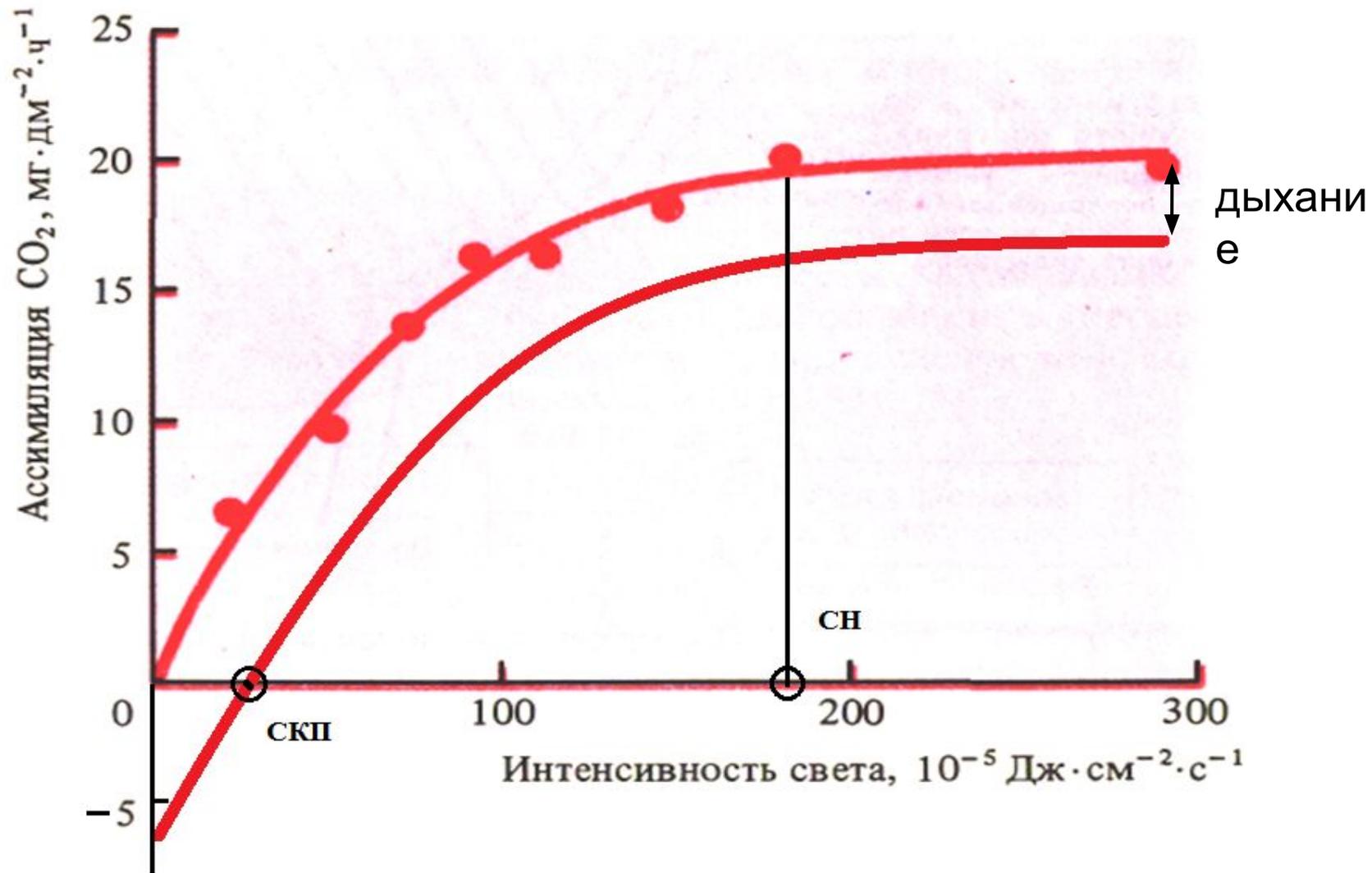


Рис. 75. Сравнение спектра поглощения хлорофилла *a* (I) со спектром действия фотосинтеза (II).

Фотосинтез идет в тех лучах спектра, которые поглощаются пигментами – в **сине-фиолетовых** и **красных**.

# ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ОСВЕЩЕННОСТИ



**Световое насыщение (СН)** - освещенность, при которой фотосинтез достигает максимального значения.

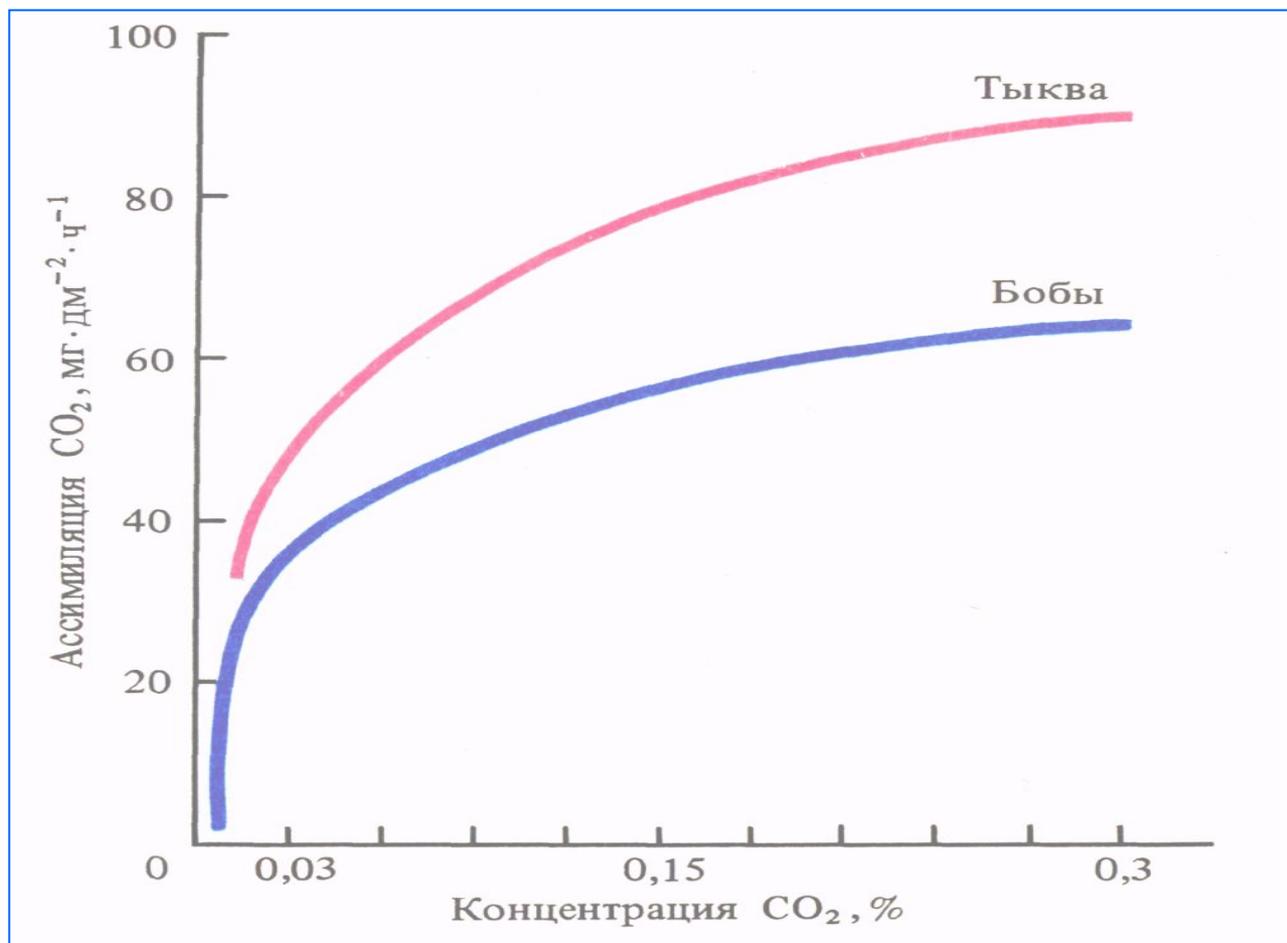
Работа систем трансформации энергии при **СН**.  
Ограничивающие факторы (тепло,  $\text{CO}_2$ ).  
Вред избытка световой энергии: нагрев, повреждения структур, фотоокисление.

Оптimalен рассеянный свет в котором ФАР (эффективная энергия) составляет **50-60%**, в прямом свете его только **30-40 %**.

**СВЕТОВОЙ КОМПЕНСАЦИОННЫЙ ПУНКТ**  
**(СКП)** – освещенность, при которой чистый фотосинтез равен нулю;

По Визнеру при освещенности меньше  $1/70$  от полного солнечного света в лесу наблюдается “**мертвая лесная тень**”.

# Зависимость от $\text{CO}_2$

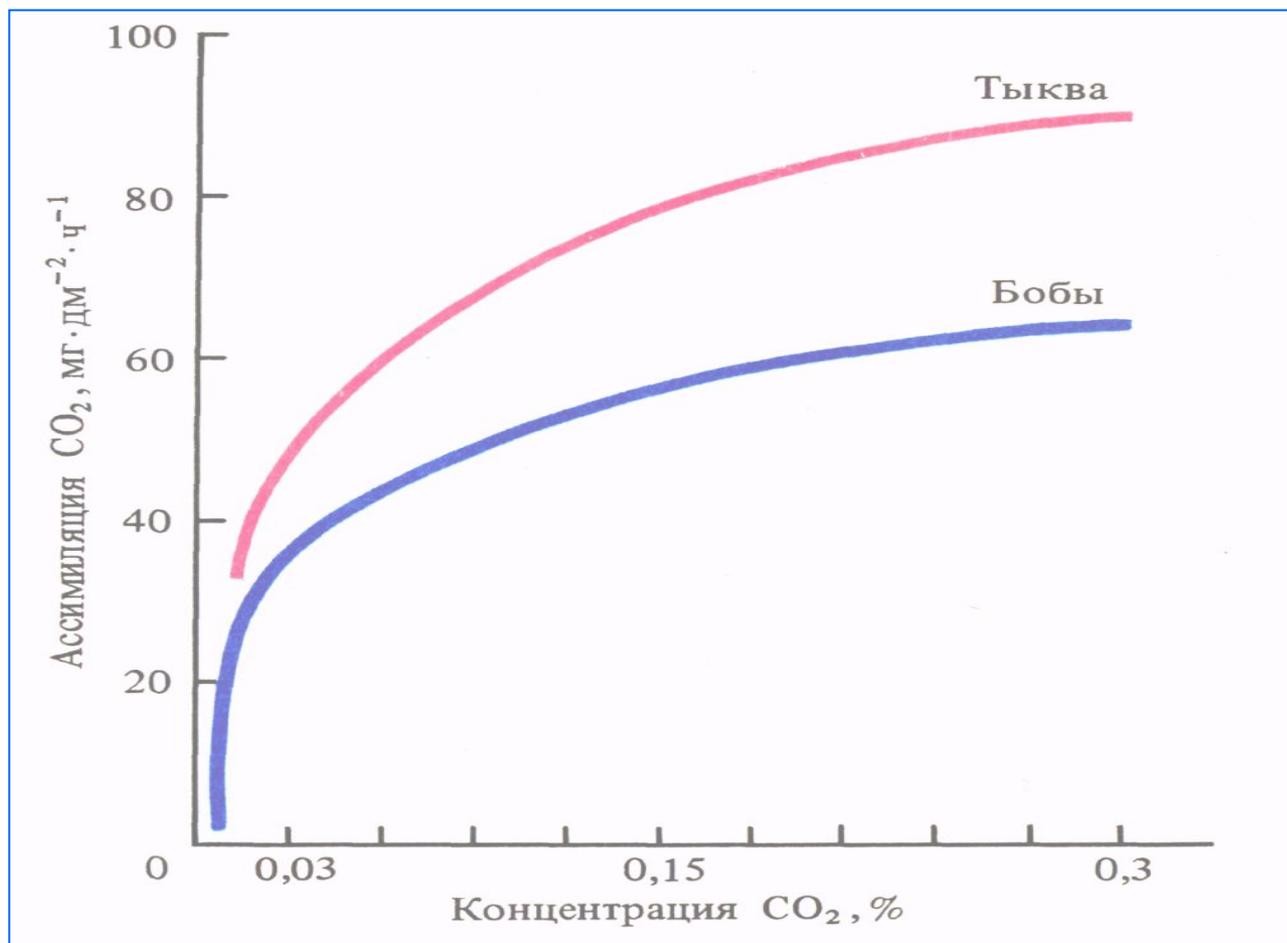


Содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере **0,03%**;

Максимальный фотосинтез в обычных условиях – при

30 **0,3%**  $\text{CO}_2$ , при максимальной освещенности – **1,5-2%**.

# Зависимость от $\text{CO}_2$



Содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере **0,03%**;

Максимальный фотосинтез в обычных условиях – при

31 **0,3%**  $\text{CO}_2$ , при максимальной освещенности – **1,5-2%**.

## Внутренние факторы определяются:

- а) видовой и сортовой принадлежностью растений.
- в) возрастом растений.

### Влияют на фотосинтез:

- Устьичное сопротивление  $\text{CO}_2$ ;
- Морфология и анатомия листа;
- Скорость оттока ассимилятов;
- Содержание хлорофилла;
- Механизм фотосинтеза ( $\text{C}_3$ ,  $\text{C}_4$ , САМ).

# УРАВНЕНИЕ БАЛАНСА ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ РАСТЕНИЙ ФИТОЦЕНОЗА

$$\Phi + M = Y_{\text{б}} + D + O$$

- Φ** – масса органического вещества, полученного растениями фитоценоза в процессе фотосинтеза за определенный период (продукция фотосинтеза);
- M** – масса поглощенных корнями минеральных элементов;
- D** – масса органического вещества, расходуемого при дыхании;
- A** – масса потерь органического вещества с опадом;
- Y<sub>б</sub>** – биомасса растений фитоценоза, или **биологический урожай**.

# БИОЛОГИЧЕСКИЙ УРОЖАЙ

$$y_b = \Phi + M - D - O$$

Хозяйственный урожай

$$y_x = K_x * y_b$$

где  $K_x$  – хозяйственный коэффициент  
(показывает долю хозяйственного урожая в  
биологическом)

## Соотношение Ф и М в приходной части баланса

Продукция фотосинтеза

**Ф = 95%,**

Минеральные элементы

**М = 5%**

Основная роль в формировании урожая принадлежит фотосинтезу.

# Продукция фотосинтеза растений фитоценоза

$$\Phi = K \cdot I_{\phi} \cdot S \cdot t$$

**I<sub>φ</sub>** – интенсивность фотосинтеза г СО<sub>2</sub> за час в расчете на м<sup>2</sup> площади листьев фитоценоза;  
**S** – площадь листьев фитоценоза в м<sup>2</sup>;  
**t** – продолжительность фотосинтеза в час.;  
**K** – коэффициент перехода от массы СО<sub>2</sub> к массе углеводов (равен 0,64).

## **Пути увеличения продукции фотосинтеза и урожая:**

- 1. Повышение интенсивности фотосинтеза растений;**
- 2. Увеличение площади листьев фитоценоза;**
- 3. Увеличение продолжительности фотосинтеза.**