

Модели адаптации процессов фотосинтеза к действию стресса

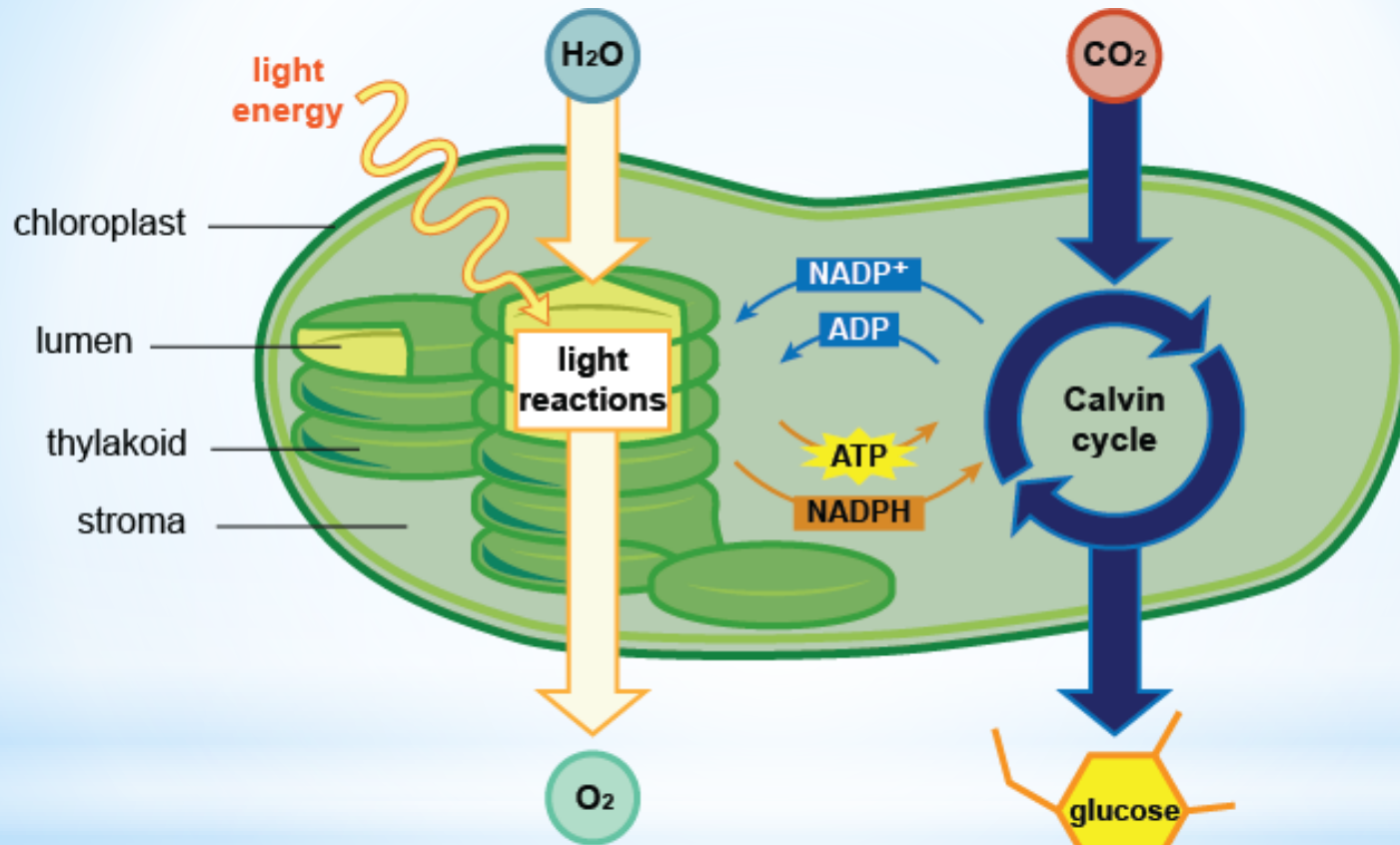
Т. Плюснина, С. Хрущев, Г. Ризниченко

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Биологический факультет, кафедра биофизики

Фотосинтез как сложная иерархическая система

Электрон-транспортные процессы

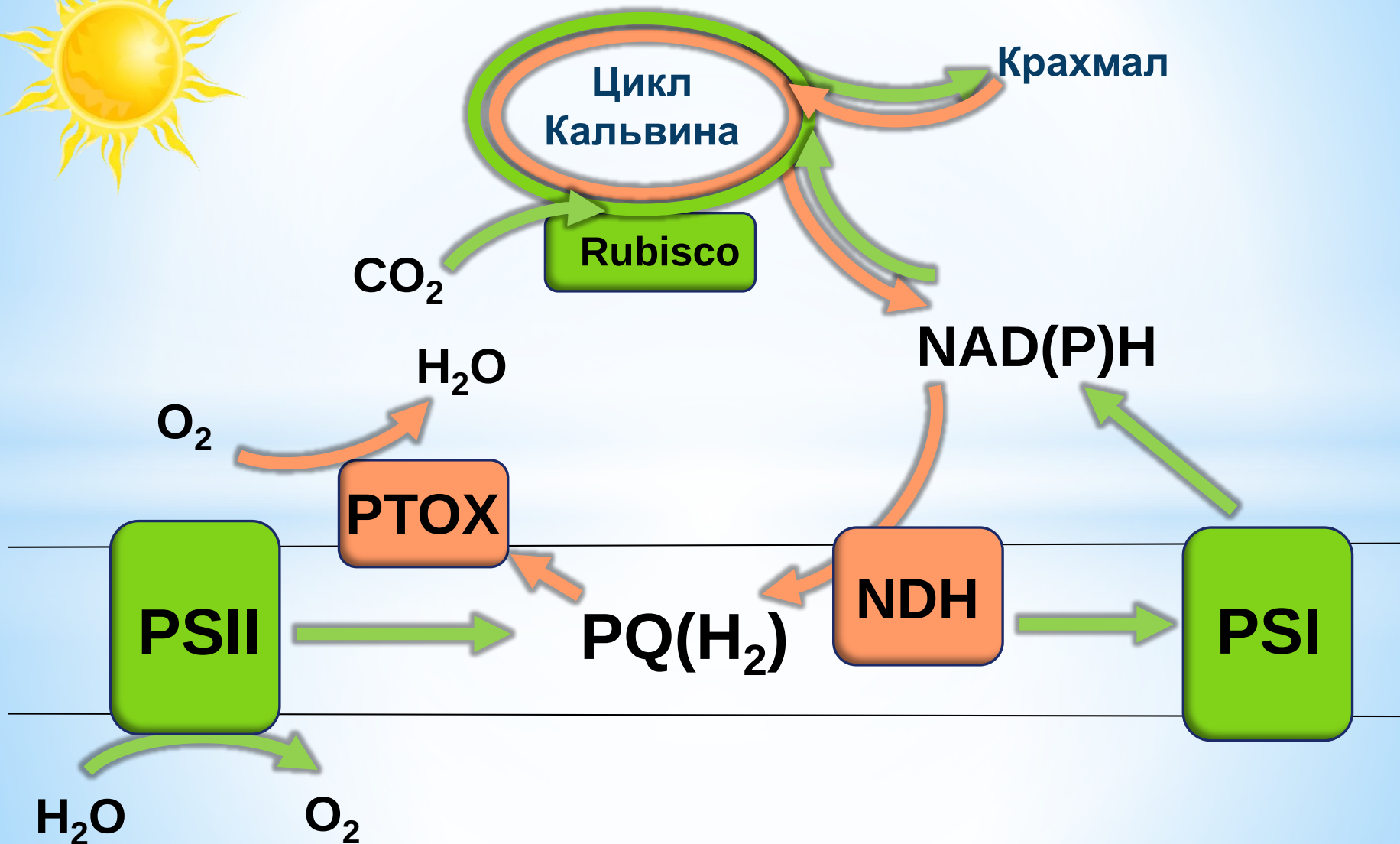
Метаболические реакции



- разделение зарядов - 10^{-12} с
- перенос электрона внутри белковых комплексов - 10^{-10} - 10^{-1} с

- фиксация углерода в цикле Кальвина, превращение метаболитов - 10 - 10^3 с

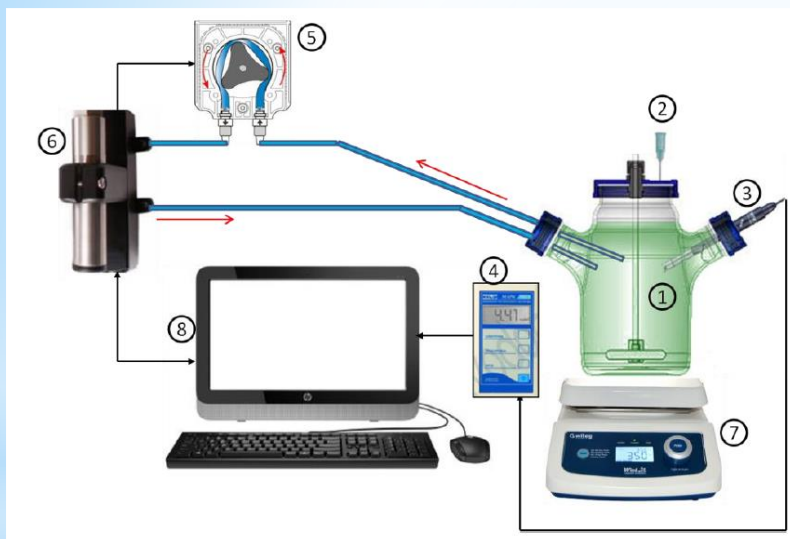
Упрощенная схема организации электрон-транспортных путей фотосинтеза и хлородыхания



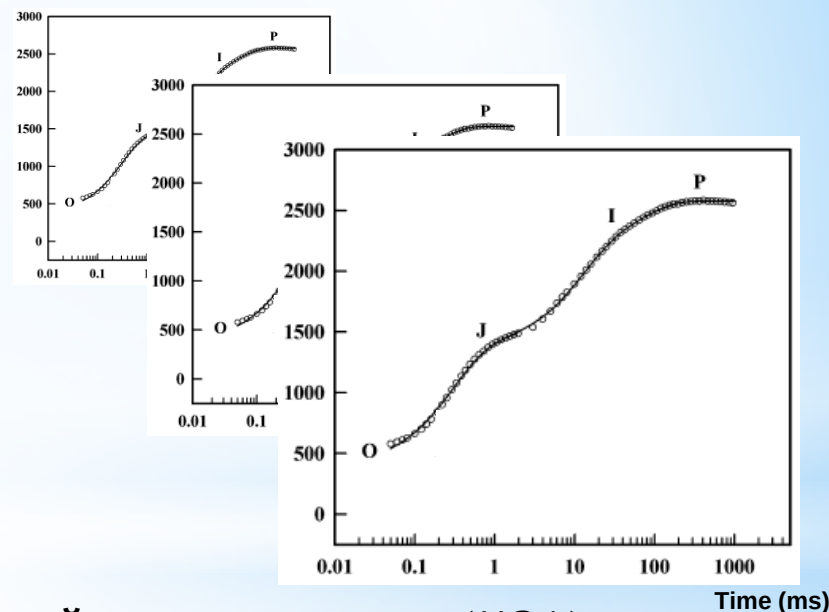
PSII - фотосистема II, PSI - фотосистема I, PTOX - терминальная оксидаза, NDH - NADH-дегидрогеназа, PQ(H₂) - пул пластохинонов

Анализ данных, полученных на растущей культуре по кривым индукции флуоресценции

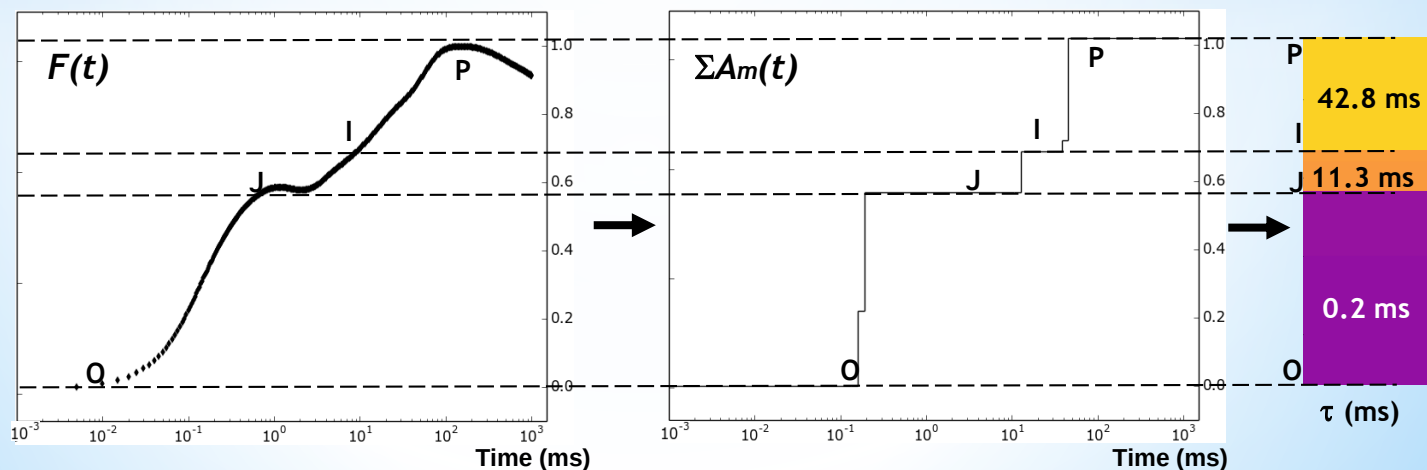
фотобиореактор



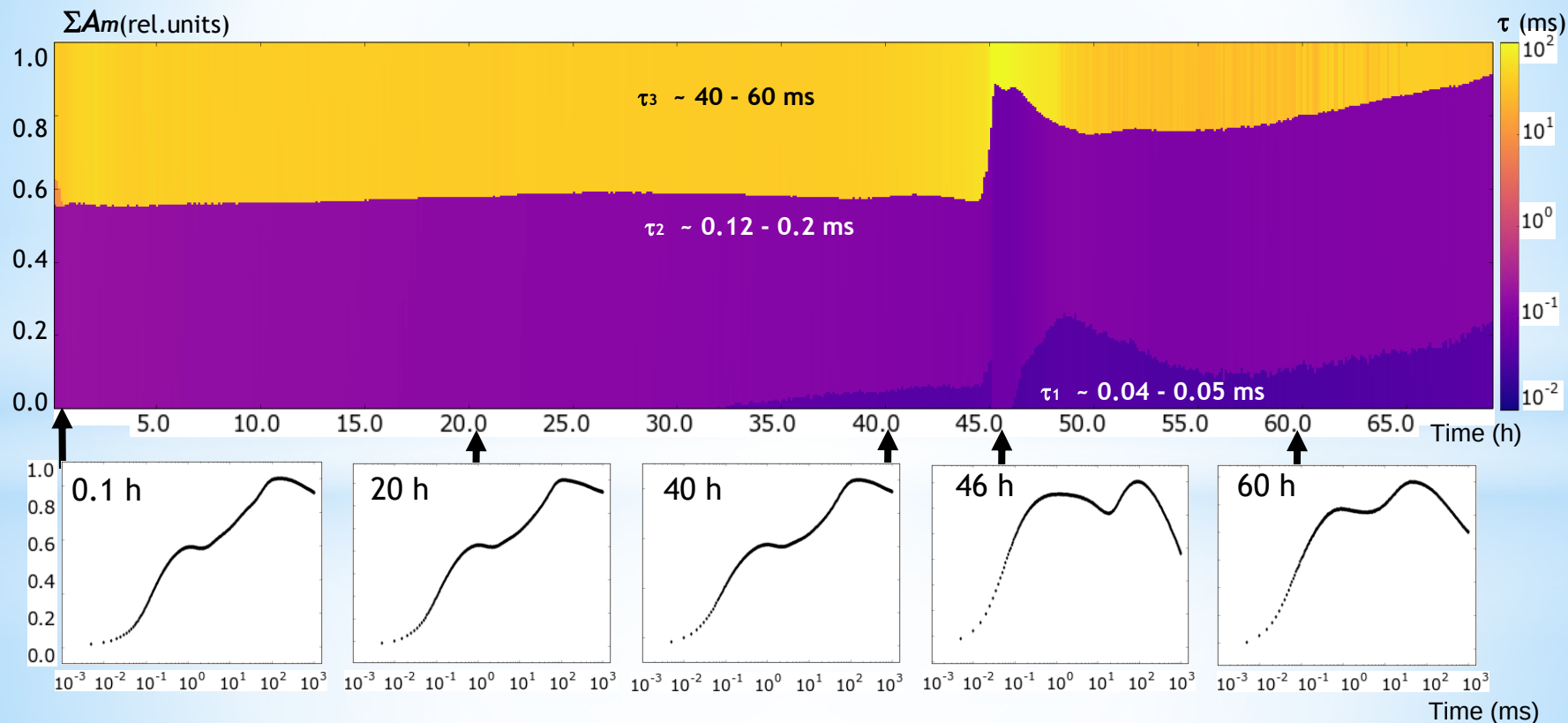
индукционные кривые



Метод мультиэкспоненциальной аппроксимации (МЭА)

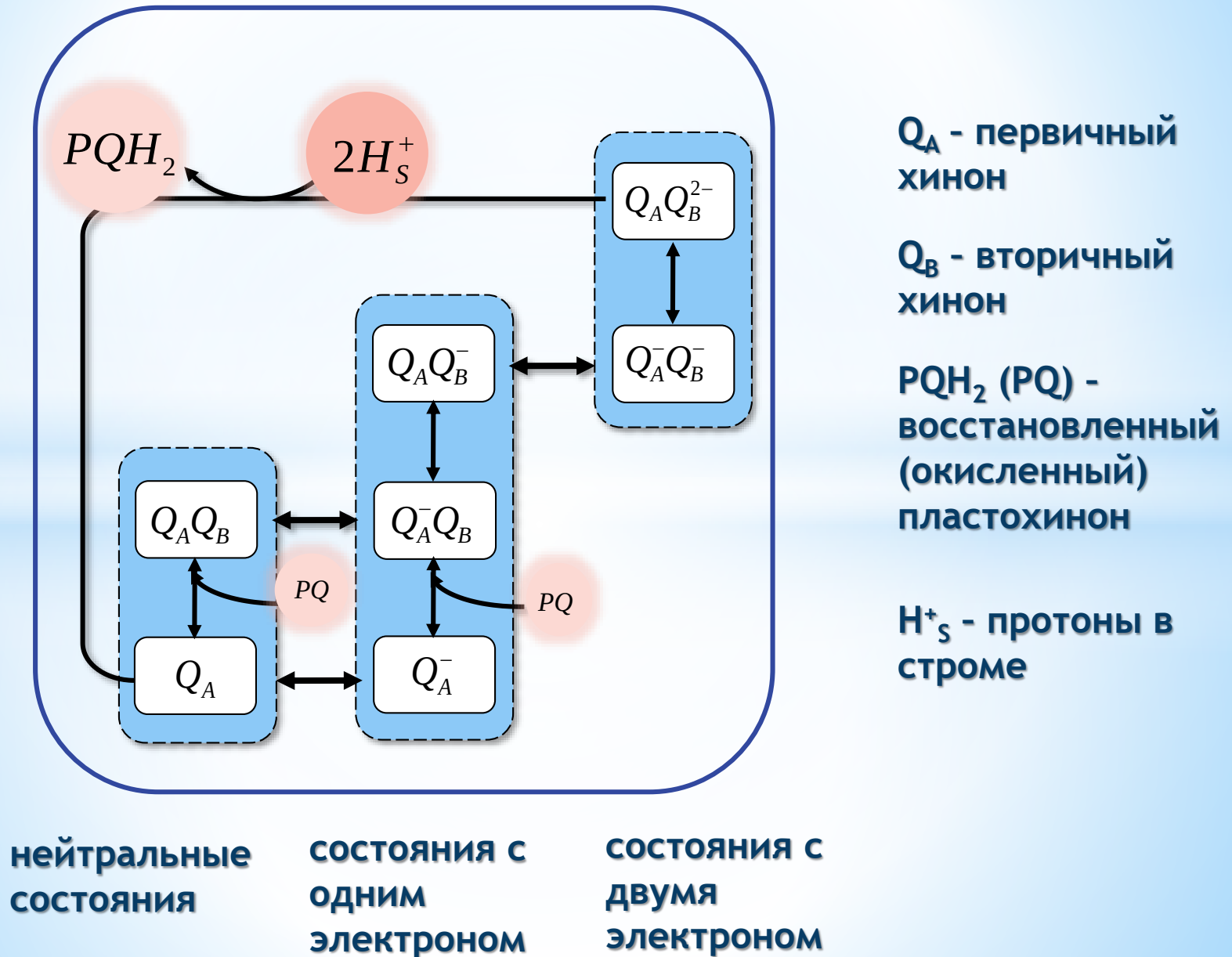


Анализ индукционных кривых растущей водоросли *Chlamidomonas* методом МЭА



Появление дополнительной фазы (К-фазы) с характерным временем $\tau = 40\text{-}50 \text{ мкс}$ - начало инактивации кислород-выделяющего комплекса

Моделирование переноса электронов в фотосистеме II в процессе серного голодания в клетках *Chlamydomonas*



Иерархия времен

PS II переходы

~100-1000 мс

Изменение $[H^+]$
вблизи
тилакоидной
мембраны

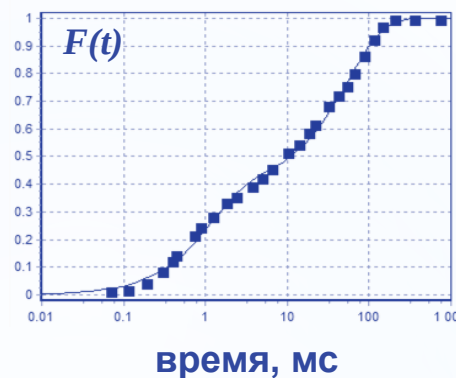
~10-50 секунд

Изменение PQ/PQH_2
и активности PS II в
процессе
голодания

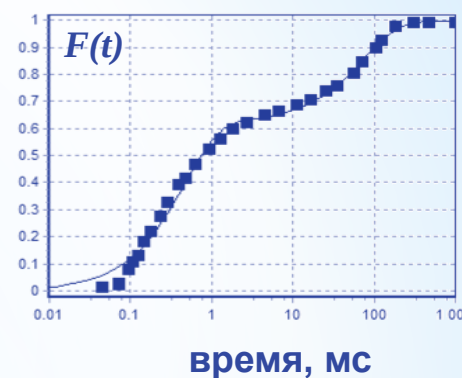
~40 часов

Экспериментальные данные

Контроль

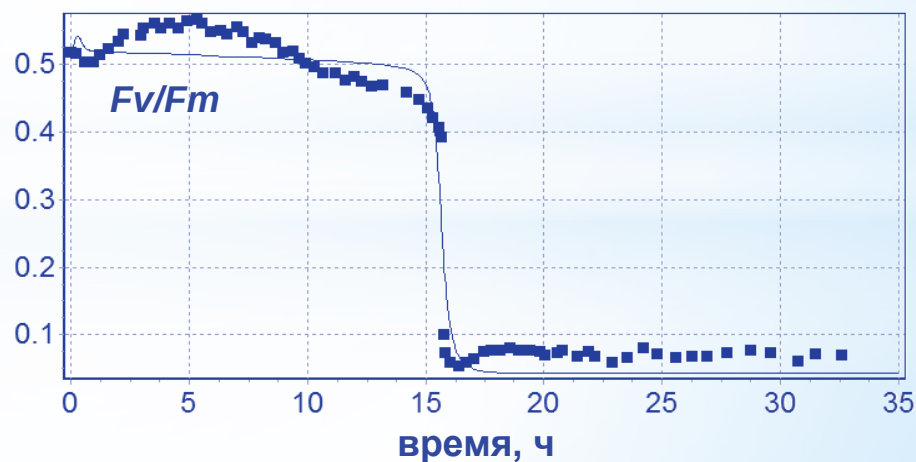


Голодание



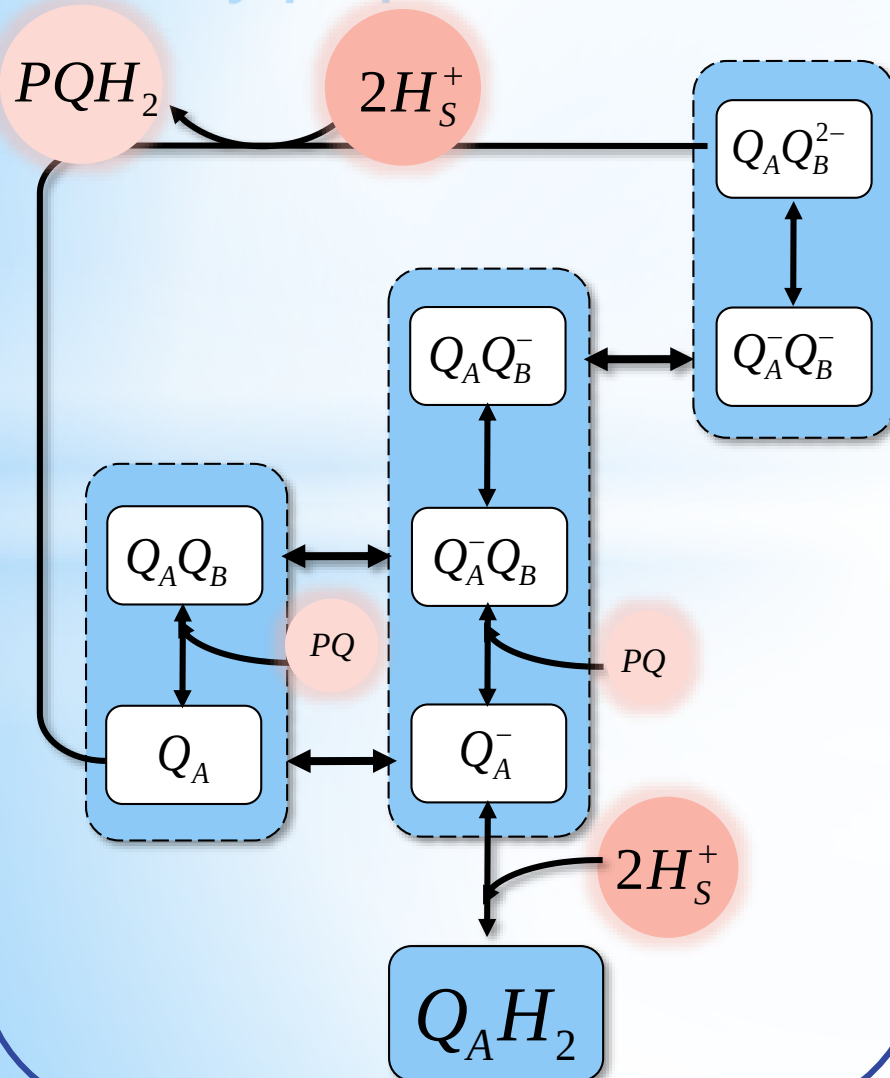
Антал и др. (2003)

Уменьшение активности PSII

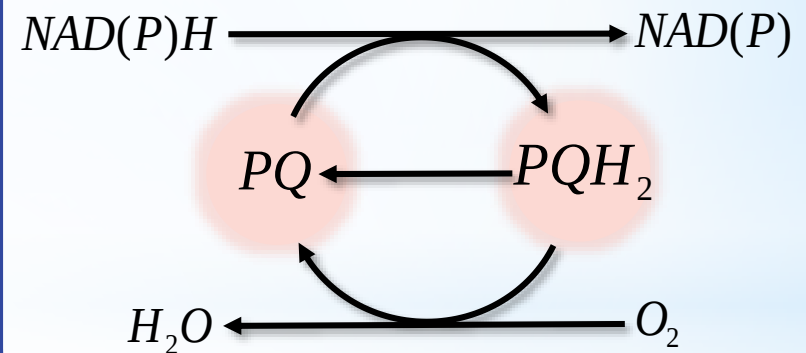


Моделирование переноса электронов в фотосистеме II в процессе серного голодания в клетках *Chlamydomonas*

Перенос электронов внутри фотосистемы II



Перенос электронов в цепи хлородыхания



Гипотеза:
серное голодание
сопровождается образованием



Моделирование переноса электронов в фотосистеме II в процессе серного голодания в клетках *Chlamydomonas*

$$\dot{PQH}_2 = k_{ndh} \cdot NAD(P)H \cdot PQ - k_{PTOX} \cdot O_2 \cdot PQH_2 + q_9 [H_s^+]^2 y - k_{PS} \cdot PQH_2$$

~40 часов

$$\dot{H}_s^+ = V_{st} - k_{st} \cdot H_s^+ - q_9 [H_s^+]^2 y - q_8 [H_s^+]^2$$

~10-50 секунд

$$\dot{w} = -q_1 w + q_{-1} x + q_9 [H_s^+]^2 y$$

$$\dot{x} = q_1 w - (q_{-1} + q_8 [H_s^+]^2 + q_3) x + q_{-8} v + q_{-3} y$$

$$\dot{y} = q_3 x - (q_{-3} + q_9 [H_s^+]^2) y$$

~100-1000 мс

Законы сохранения

$$PQ + PQH_2 = PQ_t$$

$$w + x + y + v = w_0$$

➤ На каком иерархическом уровне реализуется триггерный механизм?

Изменение концентрации протонов в строме

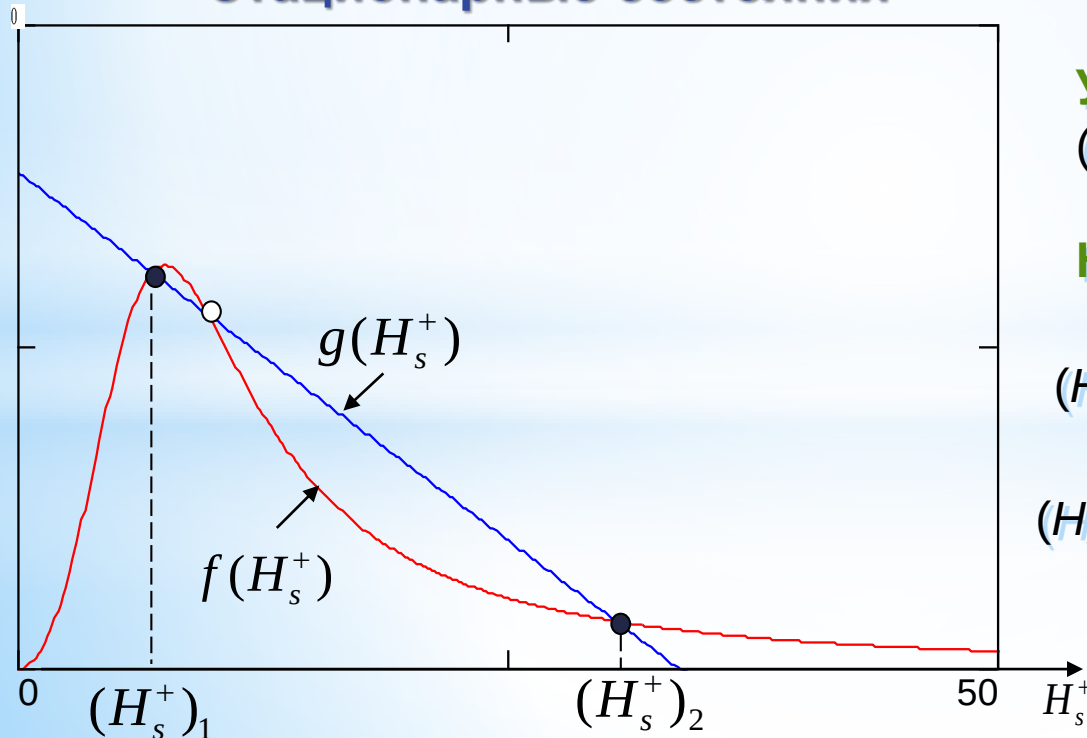
$$\frac{dH_s^+}{dt} = g(H_s^+) - f(H_s^+)$$

$$g(H_s^+) = V_{st} - k_{st} \cdot H_s^+ \quad \text{Отток и приток протонов к тилакоидной мембране}$$

$$f(H_s^+) = \frac{q_1 q_3 q_9 [H_s^+]^2 w_0}{q_1 q_9 K_8 [H_s^+]^4 + (q_1 q_{-3} K_8 + q_9 q_3 + q_9 q_{-1} + q_9 q_1) [H_s^+]^2 + (q_3 q_1 + q_{-3} q_{-1} + q_{-3} q_1)}$$

Перекачивание протонов из стромы в люмен

Стационарные состояния



Устойчивые состояния PSII:

$(H_s^+)_1$ и $(H_s^+)_2$ ●

Неустойчивое состояние ○

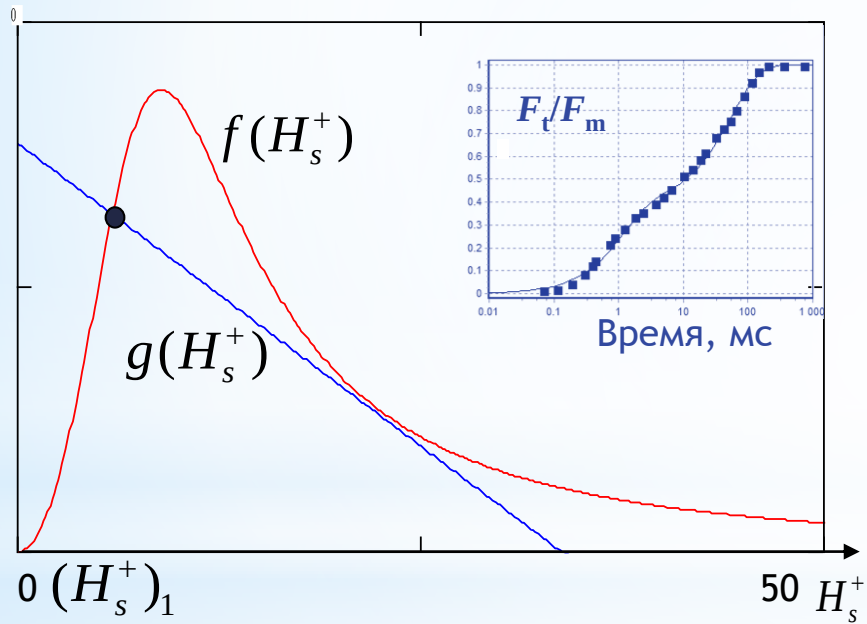
$(H_s^+)_1$ - активное состояние PS II

$(H_s^+)_2$ - неактивное состояние PS II

Регуляция переходов между стационарными состояниями

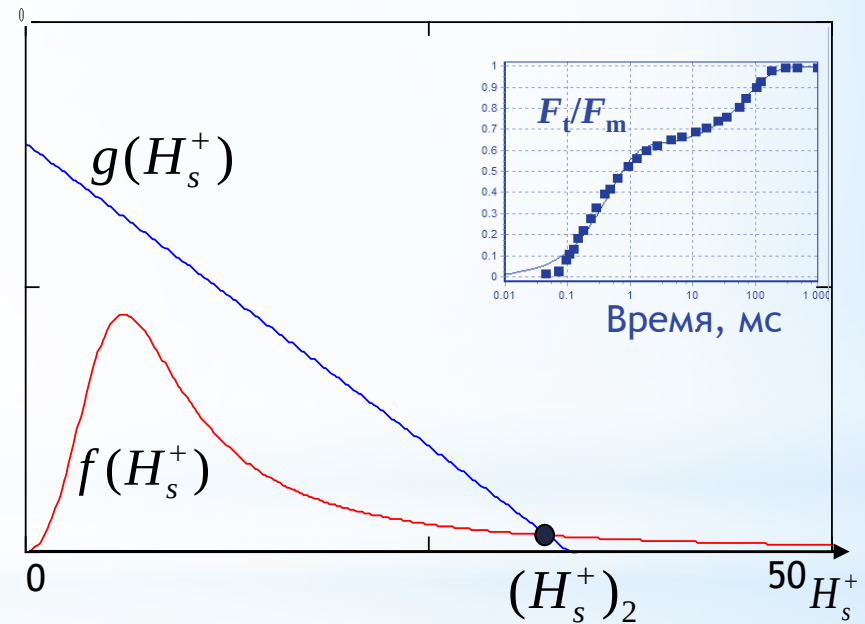
$$\frac{dH_s^+}{dt} = g(H_s^+) - f(H_s^+)$$

параметры модели соответствуют оптимальным условиям роста

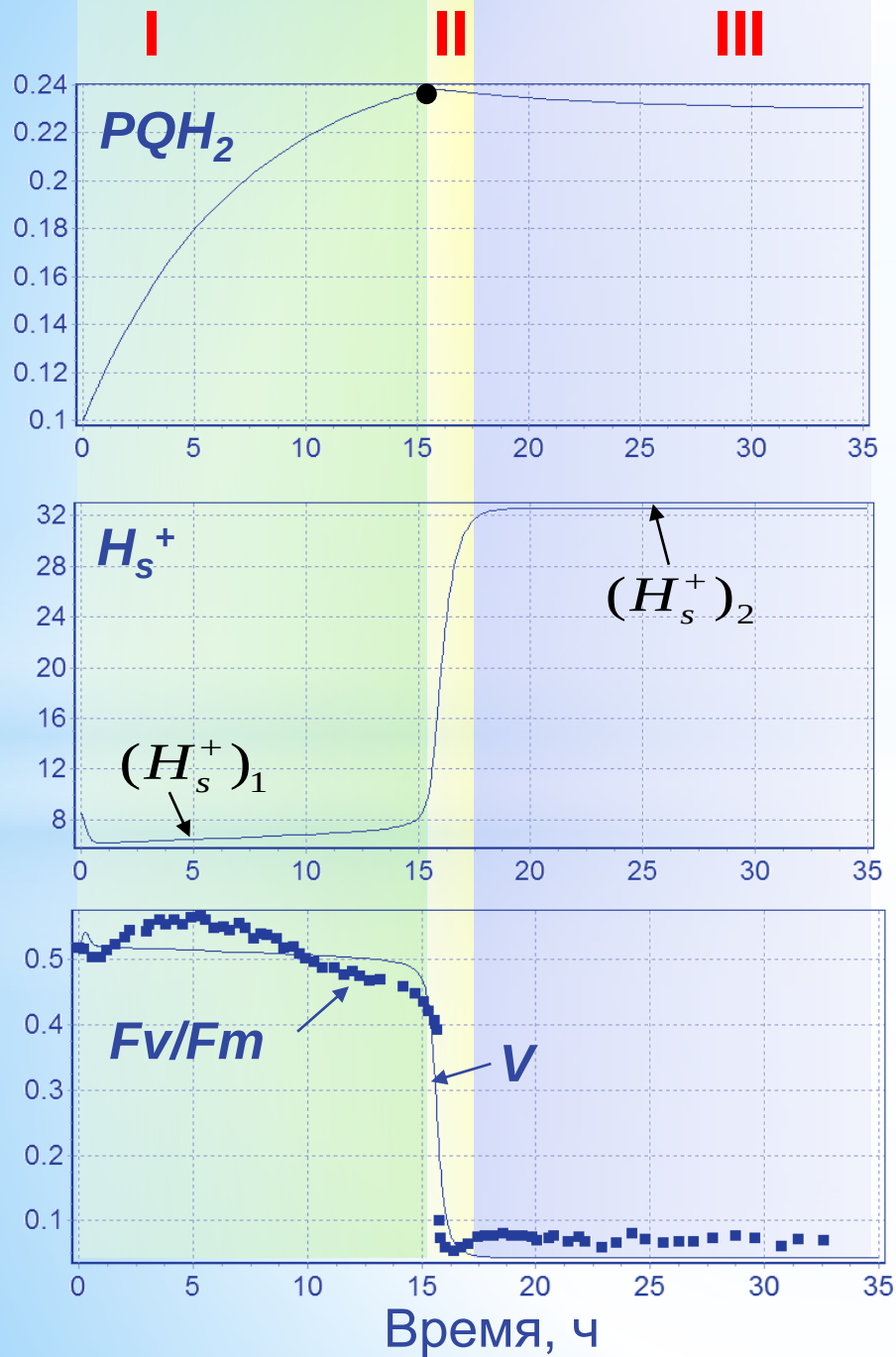


$(H_s^+)_1$ соответствует активной работе PS II

параметры модели соответствуют условиям серного голодания



$(H_s^+)_2$ соответствует работе PS II в неактивном состоянии



Кинетика переключения:

I – накопление PQH_2 до критической точки, система находится вблизи состояния (1), соответствующего низкой концентрации протонов и активной PSII

II – переключение в состояние (2)

III – система находится вблизи состояния (2), соответствующего высокой концентрации протонов и неактивной PSII

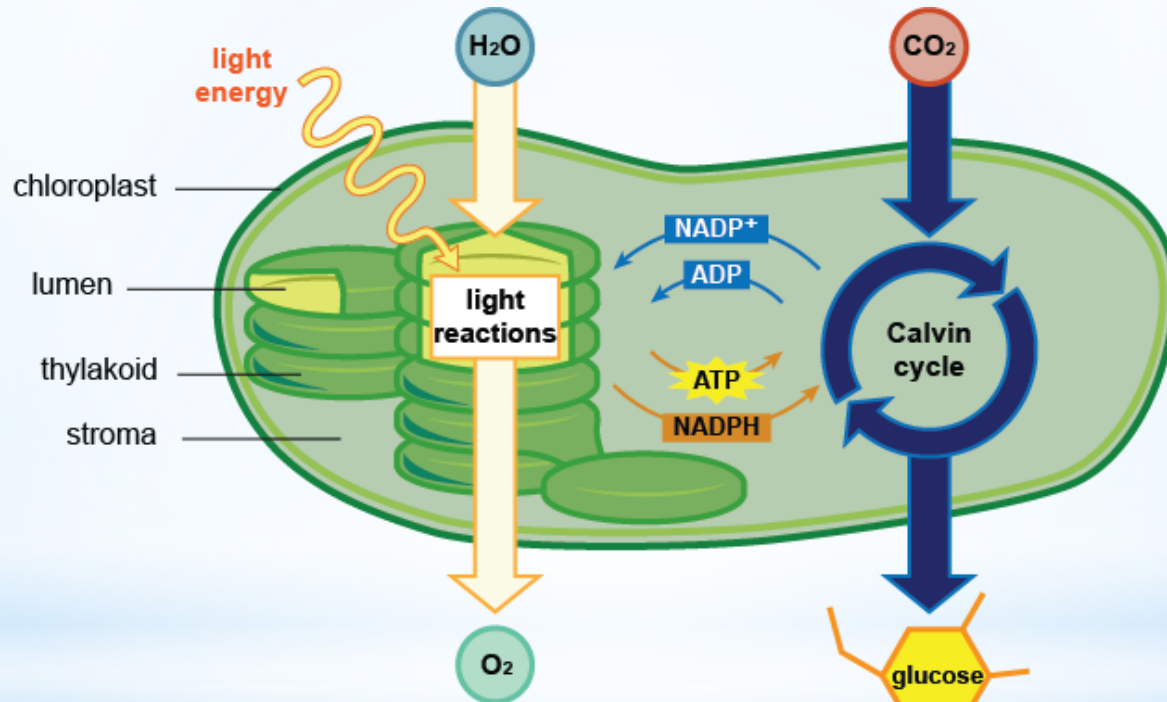
Точки – экспериментальные данные
Линии – модельные кривые

Что происходит на уровне метаболизма клетки?

Как связать разные уровни?

Электрон-транспортные процессы

Метаболические реакции



Кинетические модели

Нелинейные дифференциальные уравнения

Стехиометрические (потокосные) модели

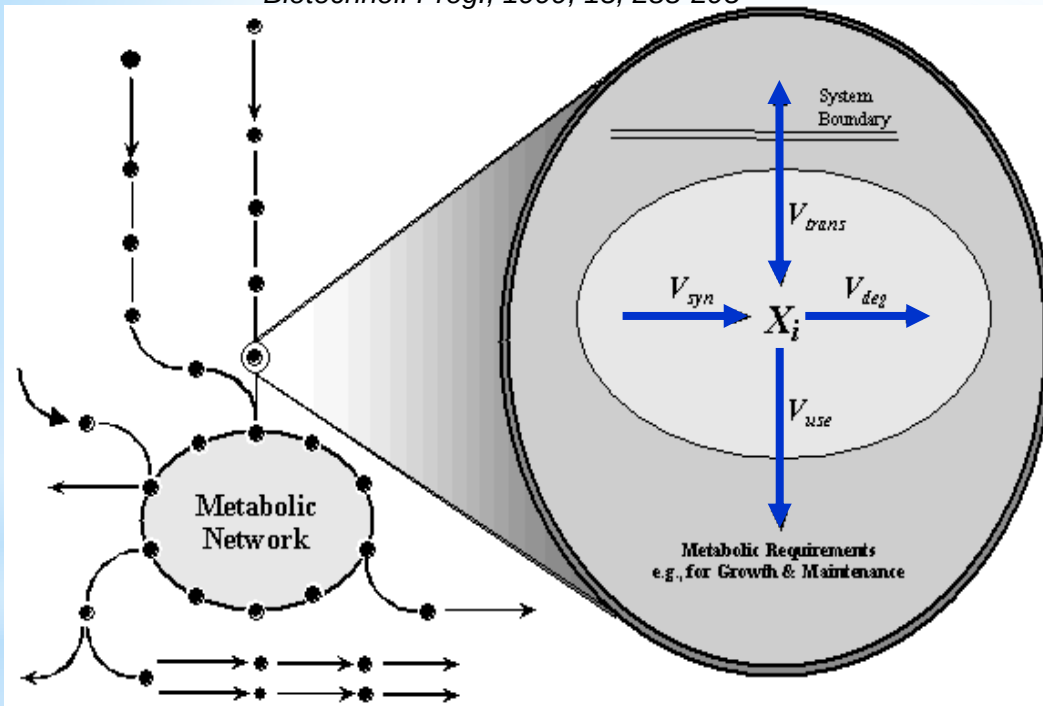
Линейные алгебраические уравнения

Построение стационарной (поточковой) модели

Метаболический поток – нормированная стационарная скорость реакции

Biotechnol. Prog., 1999, 15, 288-295

1.



2. Соотношения баланса:

$$\frac{dX_i}{dt} = V_{syn} + V_{trans} - V_{deg} - V_{use}$$

Система ОДУ
Переменные модели-
концентрации метаболитов

3. Стационарное состояние:

$$V_{syn} + V_{trans} - V_{deg} - V_{use} = 0$$

Система алгебраических уравнений
Переменные модели - стационарные скорости

Как правило, число переменных больше, чем число уравнений

4.

Постановка задачи оптимизации, выбор целевой функции и ограничений на потоки

Модель центрального метаболизма *Chlamydomonas*

Образование и
распад крахмала

Митохондриальное
дыхание

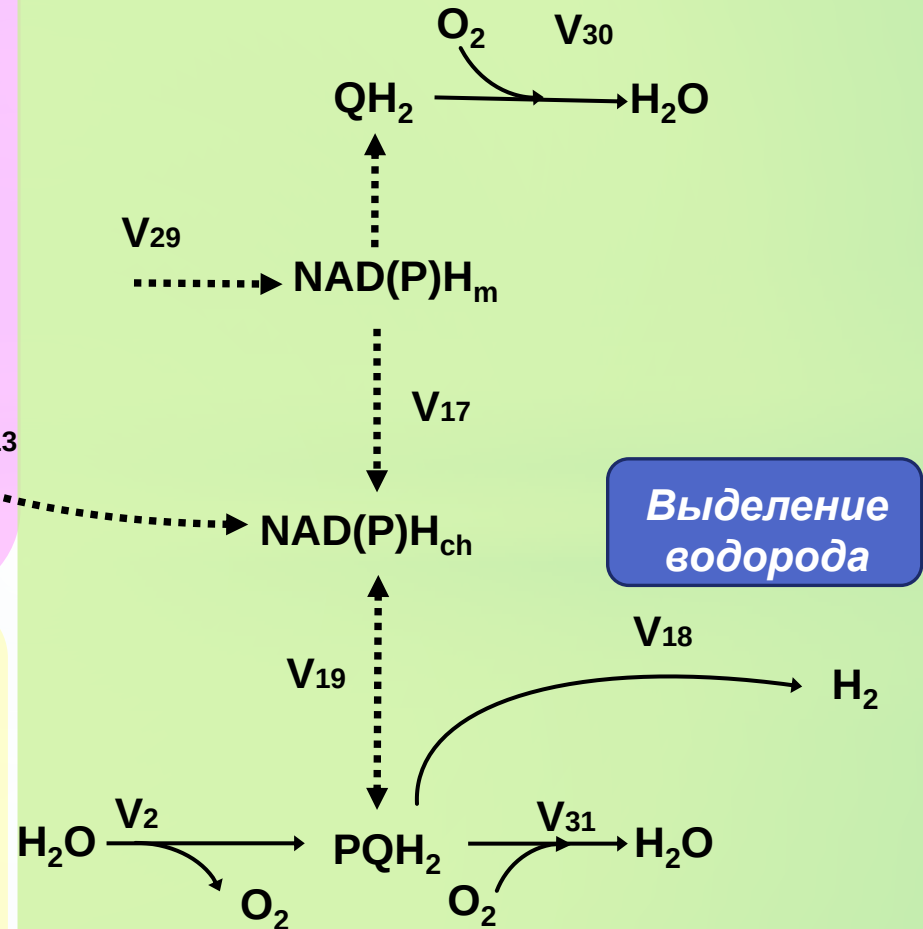
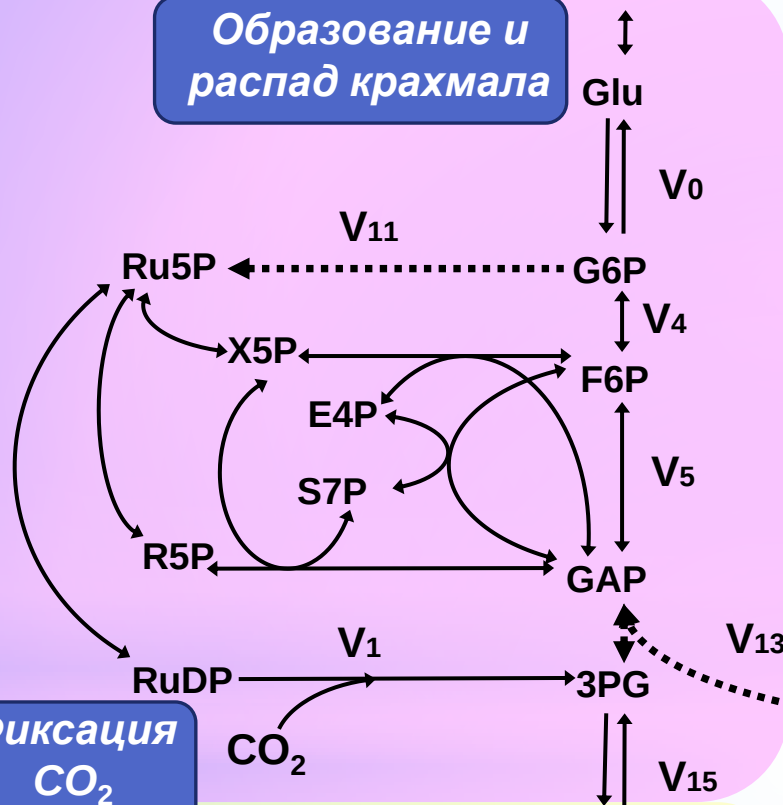
Выделение
водорода

Фиксация
 CO_2

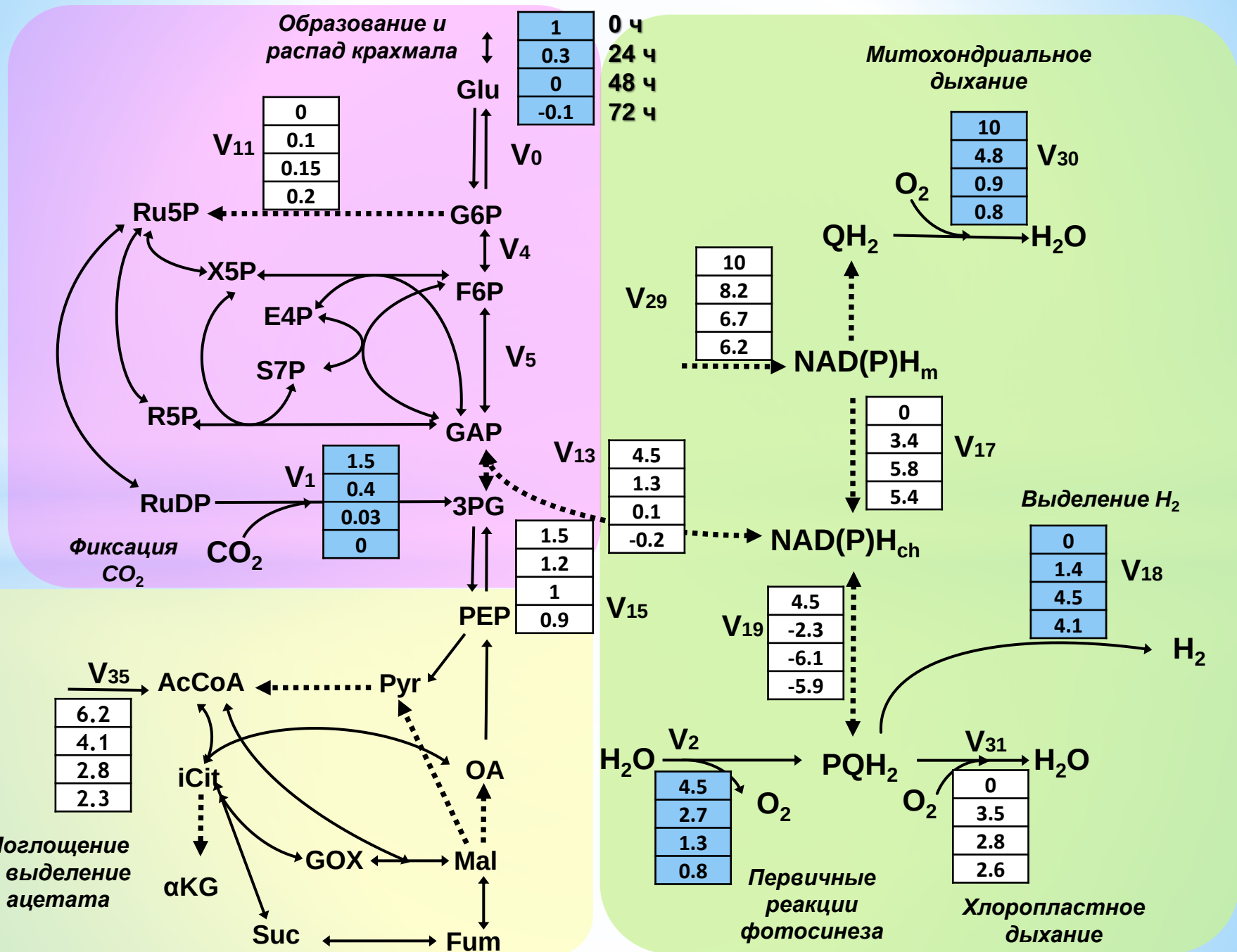
Поглощение
ацетата

Первичные
реакции
фотосинеза

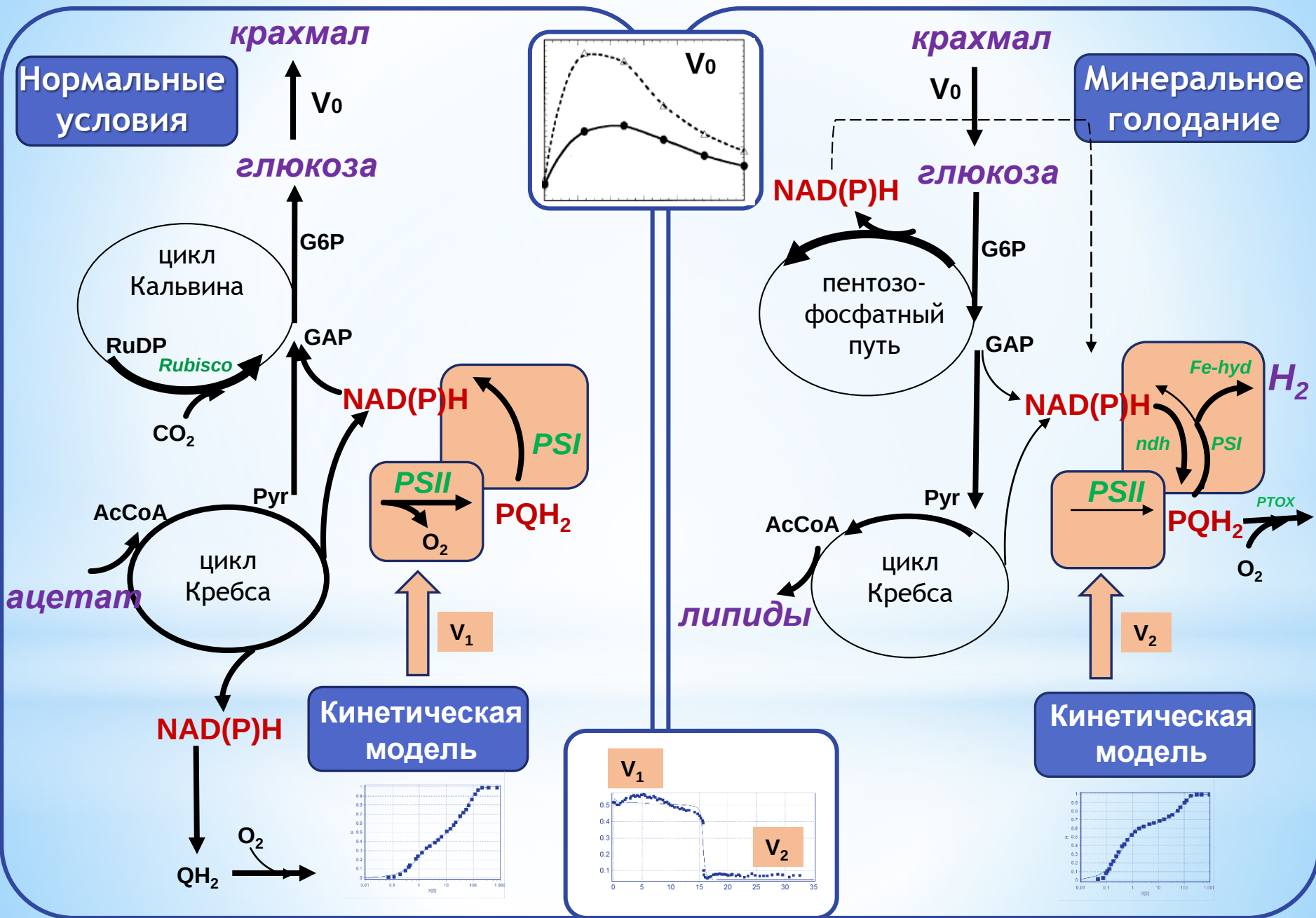
Хлоропластное
дыхание



Распределение потоков при серном голодании



Объединение потоковой и кинетической моделей



Регуляция процессов в условиях голодания

