

A lush green meadow with a pond and trees in the background. The foreground is filled with various wildflowers, including purple and white blossoms. The pond is in the middle ground, and the background is a dense forest of green trees under a cloudy sky.

**РОЛЬ НЕКОТОРЫХ СИГНАЛЬНЫХ СИСТЕМ
В ОНТОГЕНЕЗЕ РАСТЕНИЙ**

Ca

Кальций

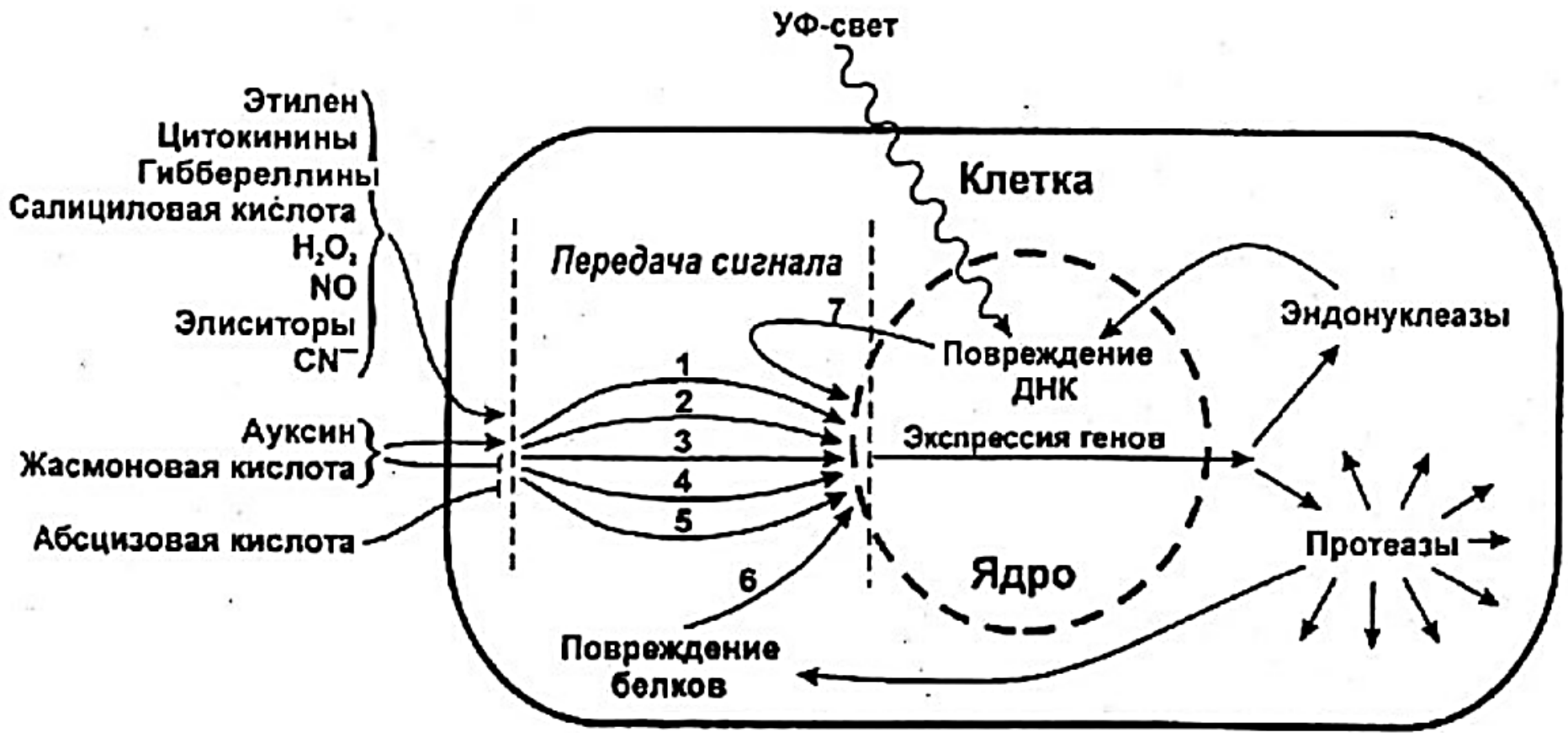
Избыток/Дефицит



- Увядание маленьких листьев
- Возможно замедление роста
- Поглощение калия, железа, магния и марганца блокируется

- Чахлое растение, маленький урожай
- Медленное развитие соцветий
- Желтовато-коричневые нерегулярные пятна на листьях
- Нижние листья искажаются и закручиваются
- Кончики корней могут отмирать



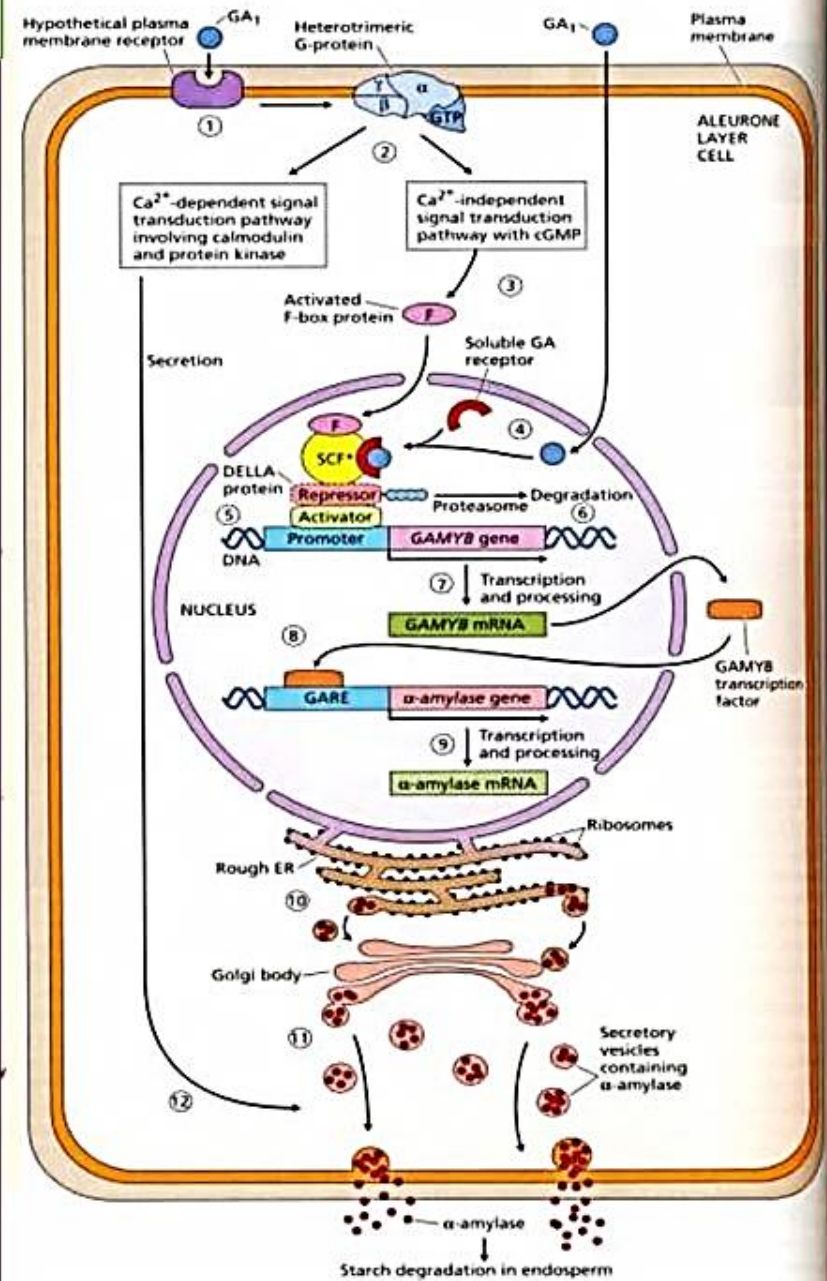


Инициация и реализация сигнала:

1 – кальциевая, 2 – NO-синтазная, 3 – MAP-киназная, 4 – НАДФН-оксидазная, 5 – липоксигеназная, 6 – Hsp-зависимая, 7 – подобная p53-зависимой системы передачи сигнала

Сигнальная система гиббереллинов

- GA1** из эмбриона связывается с гипотетическим мембранным рецептором на поверхности клетки алейронового слоя.
- Комплекс **GA-рецептор** взаимодействует с гетеротримерным **G-белком** и запускает две независимых цепи трансдукции сигнала - Ca^{2+} -независимую и Ca^{2+} -зависимую.
- Ca^{2+} -независимый путь, вовлекающий **cGMP** и ряд других компонентов, завершается активацией **F-белка** - компонента **SCF**-убиквитин-лигазного комплекса.
- GA1** может также войти в клетку непосредственно и связаться с альтернативным рецепторным белком, который расположен преимущественно в ядре.
- Активизированный **F-белок** связывается **DELLA**-доменом белка репрессора, который блокирует транскрипцию **GAMYB** генов или других активаторов транскрипции.
- Репрессор убиквитинируется через **SCF**-убиквитин-лигазный комплекс и разрушается в протеасоме.
- Дегградация репрессора приводит к транскрипции **GAMYB** и других генов раннего ответа.
- Вновь синтезируемый **GAMYB** белок перемещается в ядро и связывается с промоторами генов α -амилазы и других гидролитических ферментов, запуская их транскрипцию (9).
- Амилаза и другие гидролазы синтезируются на шероховатом ER, затем перемещаются в АГ (11).
- Для активации секреторного пути транспорта этих белков необходима стимуляция гиббереллином кальцевой сигнальной системы - Ca^{2+} -зависимый путь



Сигнальные системы АБК («короткий сигналинг»), связанные с закрытием устьищ

1. АБК связывается с ее рецепторами.
2. Связывание АБК вызывает формирование активных форм кислорода (ROS), которые активизируют Ca^{2+} каналы на плазмалемме. Фосфатидная кислота (PA), образующаяся за счет работы фосфолипазы D (PLD) увеличивает образование ROS.
3. Открываются Ca^{2+} каналы плазмалеммы.
4. АБК стимулирует продукцию NO, который повышает уровень циклической АДФ-рибозы (cADPR).
5. АБК увеличивает уровень IP_3 через систему трансдукции сигналов, включающую сфингозин-1-фосфат (S1P), G-белки и фосфолипазы C и D (PLC и PLD).
6. Повышение cADPR и IP_3 активизирует дополнительные каналы кальция на тонопласте.
7. Повышение внутриклеточного кальция блокирует K^+ -in каналы на плазмалемме.
8. Повышение внутриклеточного кальция вызывает открытие хлоридных (анионных) каналов на плазмалемме, вызывая ее деполяризацию.
9. Ингибируется H-ATФ-за плазмалеммы.
10. Деполяризация мембраны активирует K^+ out каналы плазмалеммы.

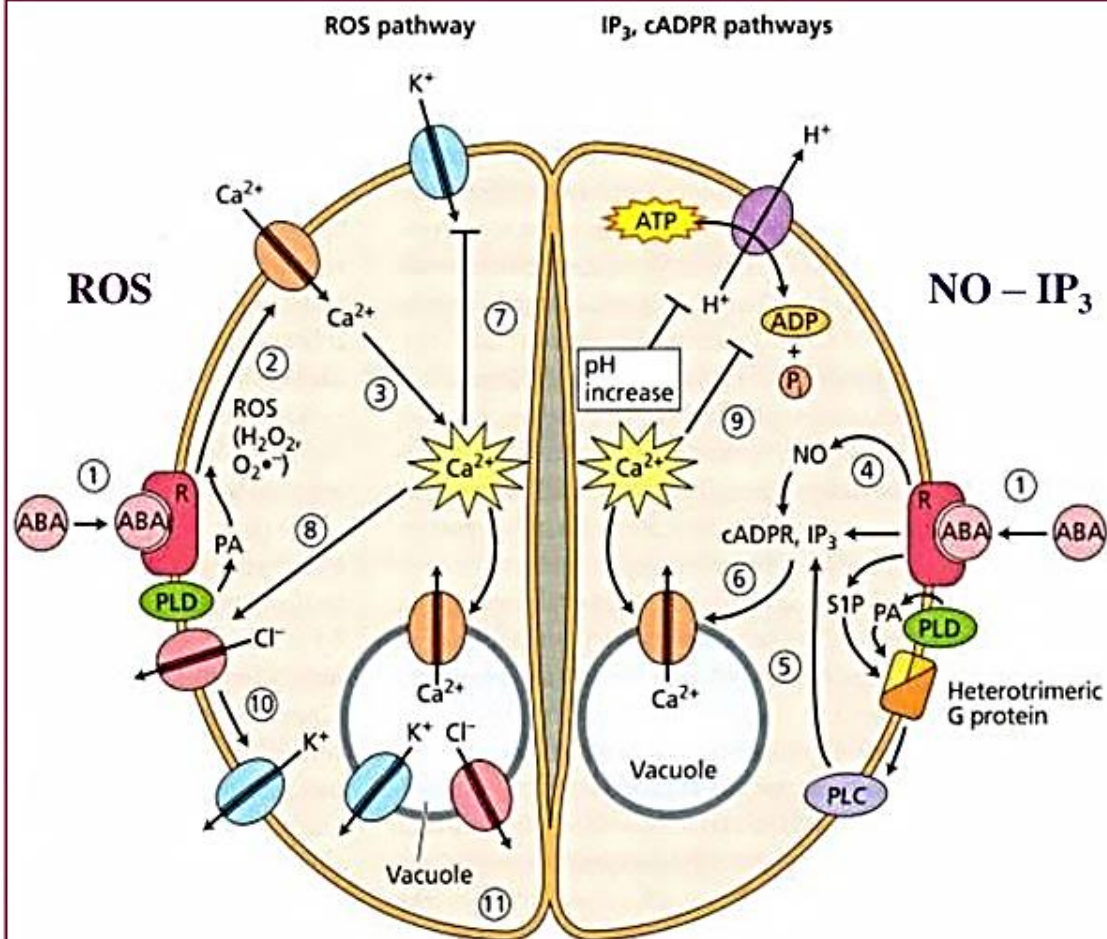
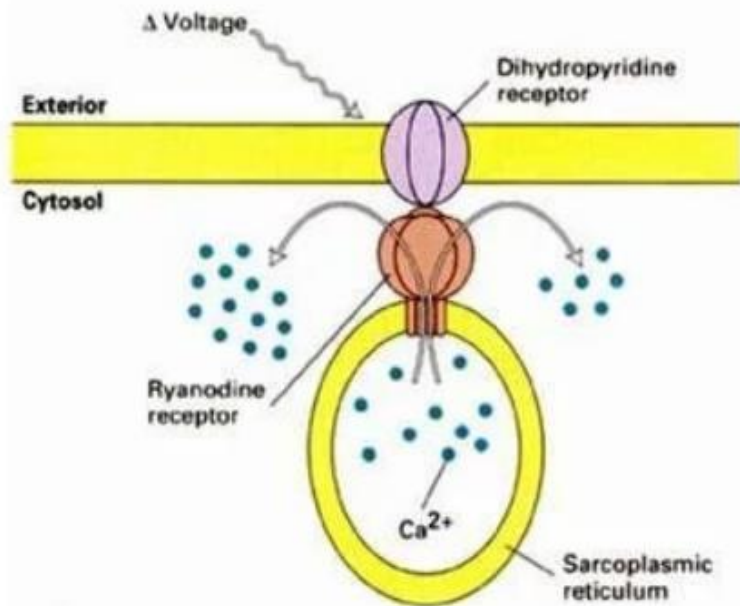
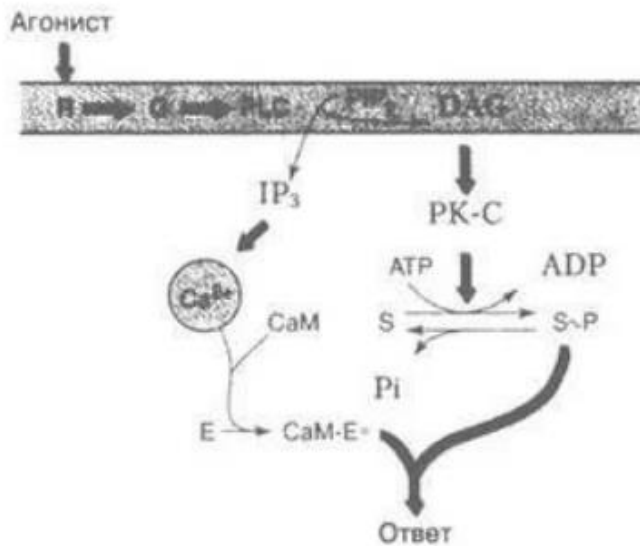


FIGURE 23.14 Simplified model for ABA signaling in stomatal guard cells. The net effect is the loss of potassium and its anion (Cl^- or malate $^{2-}$) from the cell. cADPR, cyclic ADP-ribose; IP_3 = inositol 1,4,5-trisphosphate; NO = nitric oxide; PA = phosphatidic acid; PLC = phospholipase C; PLD = phospholipase D; R, receptor; ROS, reactive oxygen species; S1P = sphingosine-1-phosphate.

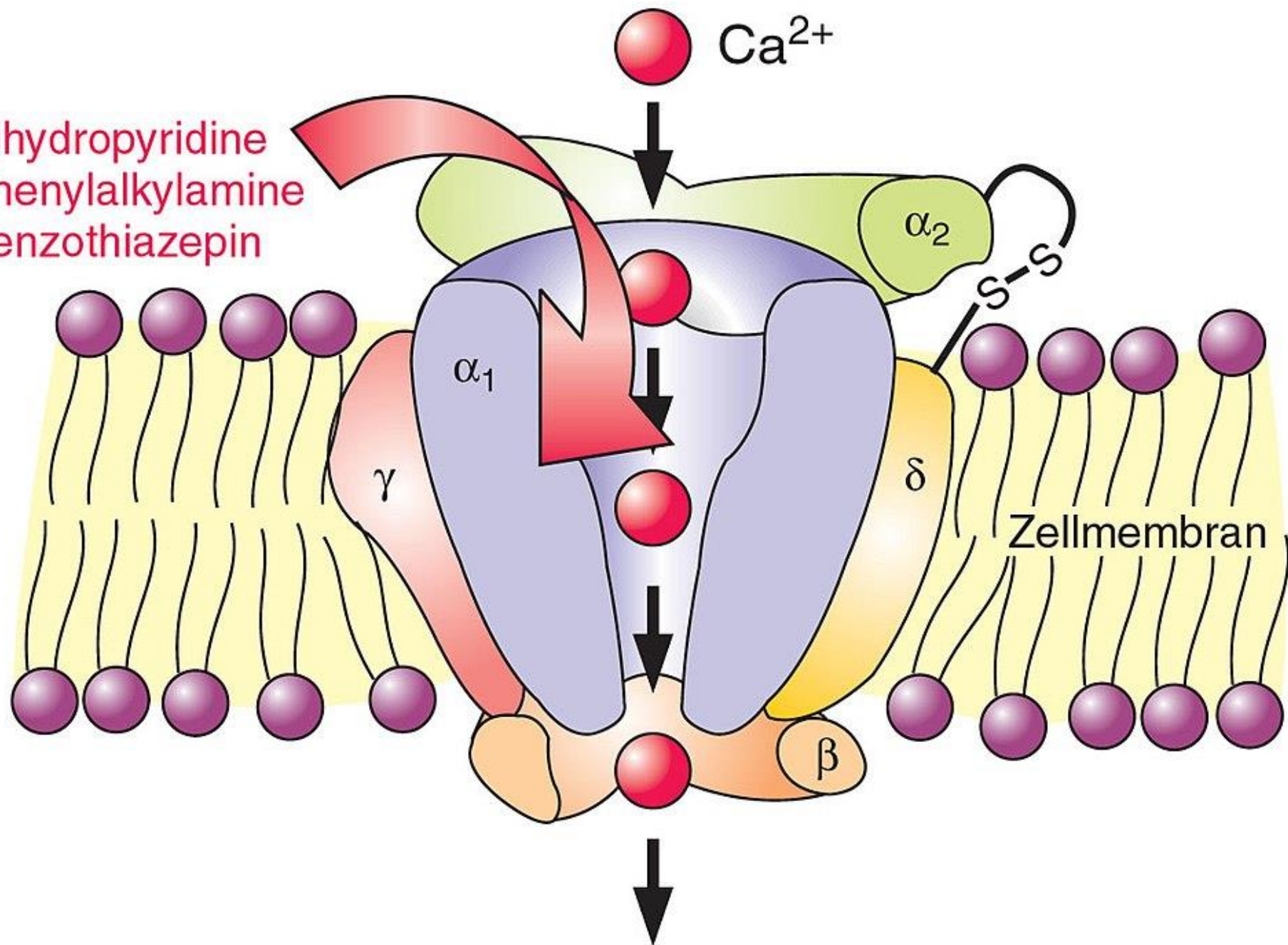
Кальций



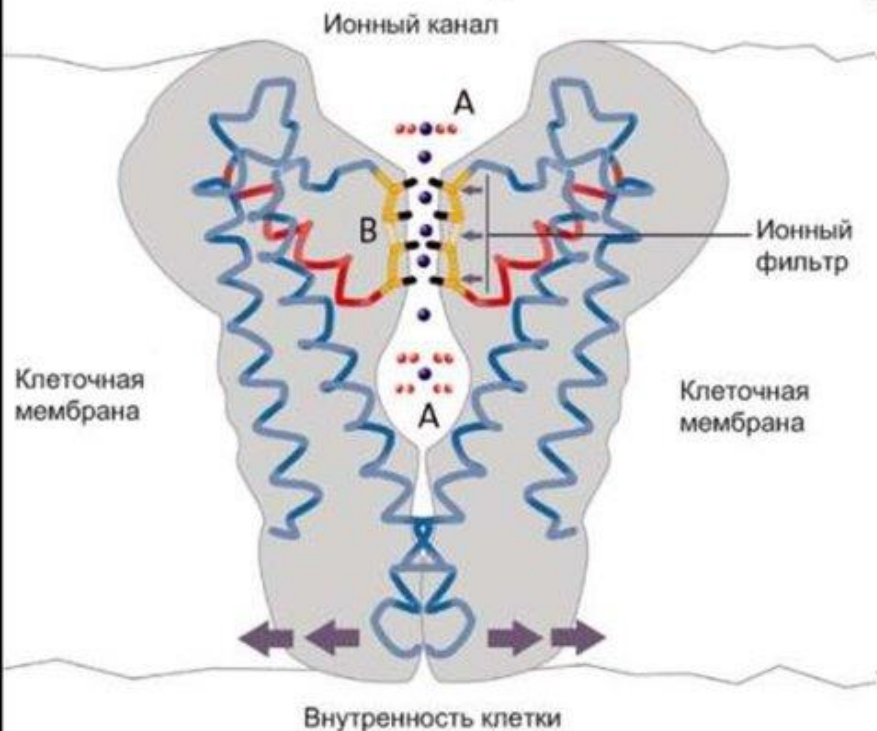
- **Кальций** - один вторичных мессенджеров, участвующих в передаче сигнала в клетку.
- Роль Ca^{2+} заключается в связывании со специфическими участками в молекулах киназ или с особыми кальций-связывающими белками (с кальмодулином), которые служат активаторами некоторых киназ.



Dihydropyridine
Phenylalkylamine
Benzothiazepin



ПОТЕНЦИАЛ-ЗАВИСИМЫЕ КАНАЛЫ

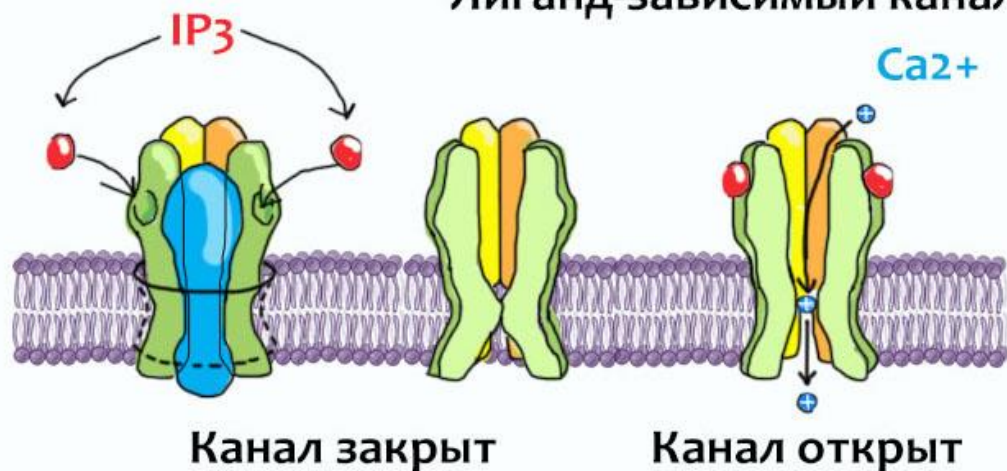


- Состояние потенциал-зависимых каналов зависит от мембранного потенциала. Большинство их активируется при деполяризации, однако некоторые активируются при гиперполяризации.
- Как правило, потенциал-зависимые каналы пропускают какой-либо один ион (Na^+ , K^+ или Ca^{2+}). Редкое исключение представляют неселективные каналы из семейства цАМФ (цГМФ)-зависимых катионных каналов.

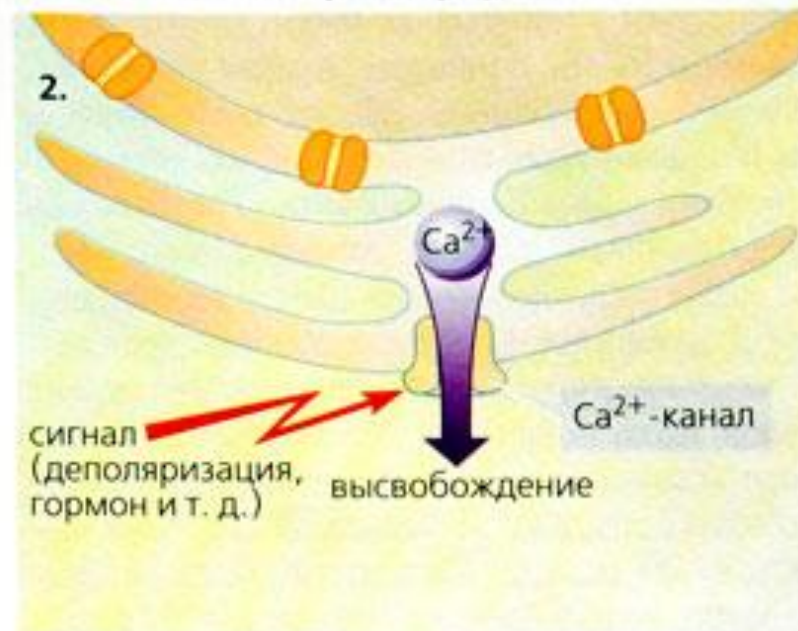
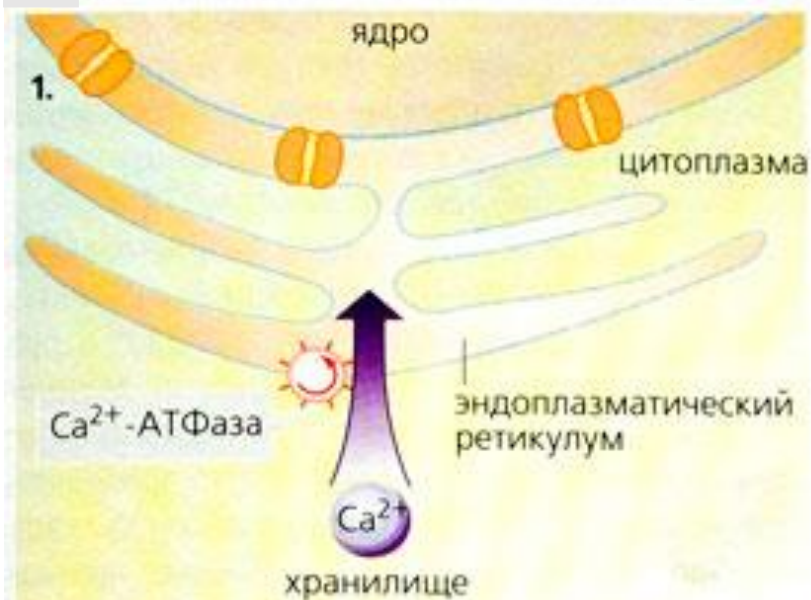
Состояние некоторых ионных каналов зависит (кроме потенциала) от связывания с различными внутриклеточными лигандами – АТФ, Ca^{2+} , комплексом Ca^{2+} /калмодулин, цАМФ (цГМФ) и G- белками.

Каналы, пропускающие ионы Na^+ и Ca^{2+} внутрь клетки по концентрационным градиентам, обеспечивают деполяризацию мембраны, приводящую к генерации потенциала действия. Каналы, пропускающие ионы K^+ из клетки по концентрационному градиенту, обеспечивают реполяризацию мембраны и возвращение потенциала клетки к уровню потенциала покоя.

Лиганд-зависимый канал



Транспорт Ca²⁺ через мембрану эндоплазматического ретикулума

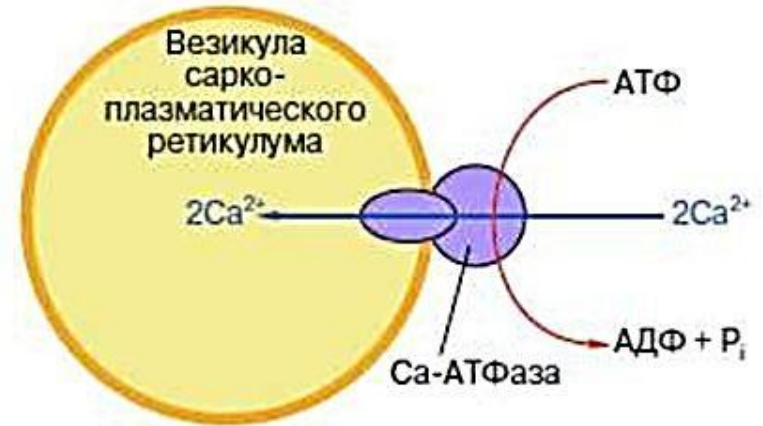
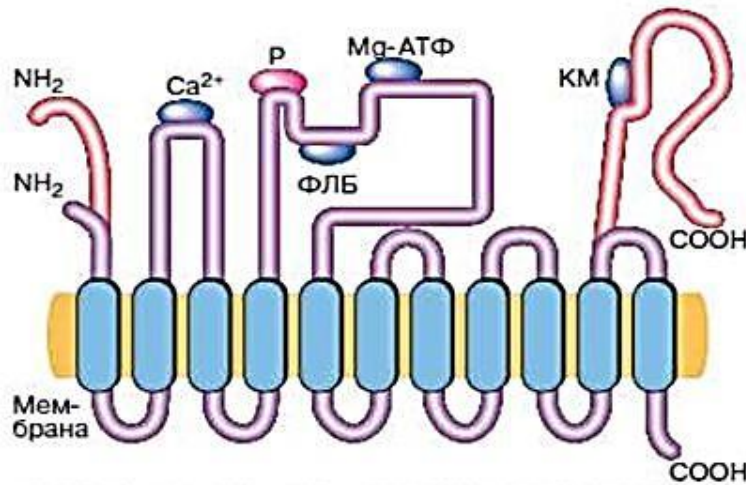


(10⁻⁵) → 10⁻⁸ моль/л

концентрация Ca²⁺
в цитоплазме

10⁻⁵ ← (10⁻⁸) моль/л

Ca²⁺-АТФАЗА



1) связывание двух ионов кальция на поверхности АТФазы, обращенной в цитоплазму (или *наружу* в изолированных пузырьках СР);

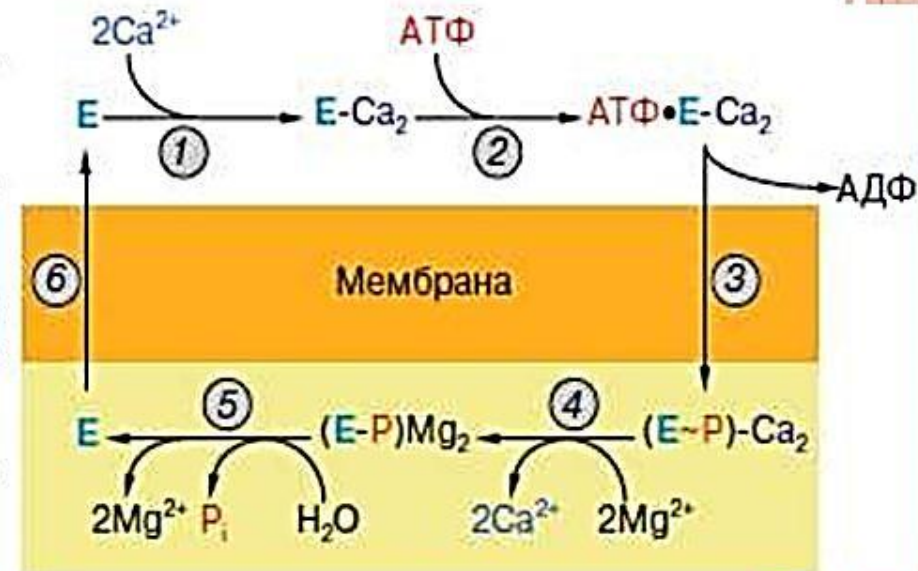
2) связывание на той же поверхности молекулы АТФ;

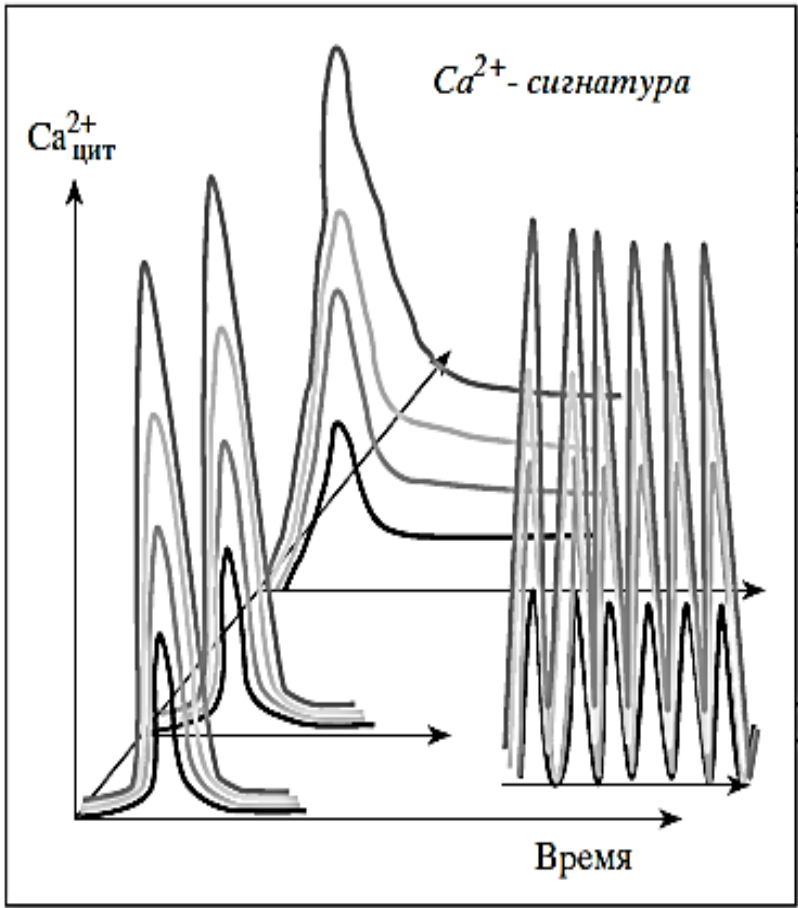
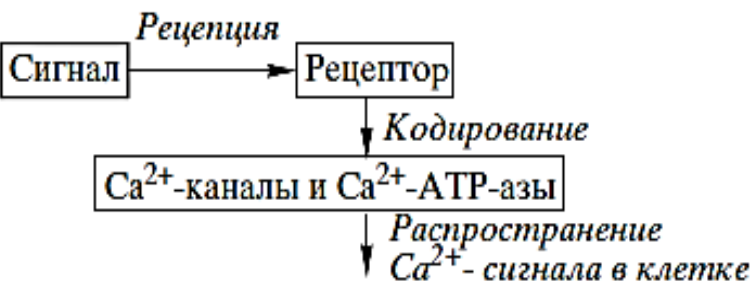
3) фосфорилирование белка (образование фосфофермента) и высвобождение АДФ;

4) высвобождение ионов кальция с поверхности АТФазы, обращенной *внутри* пузырьков СР; связывания магния;

5) гидролиз фосфатной связи и отщепление ионов магния;

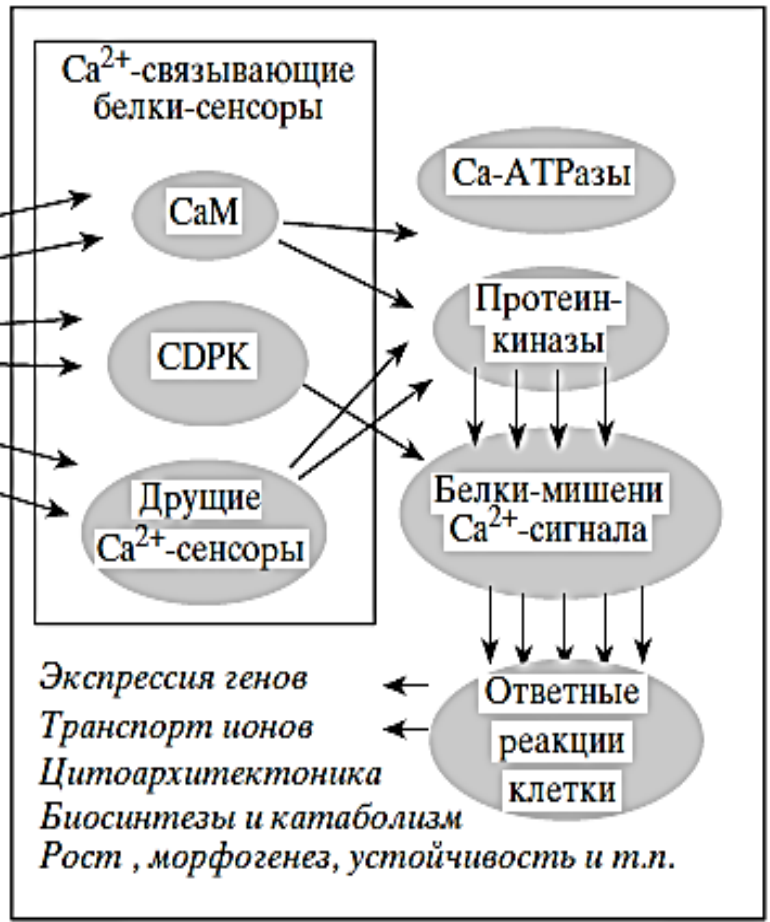
6) переход молекулы фермента в исходное состояние (центры связывания кальция оказываются опять на поверхности пузырьков СР).



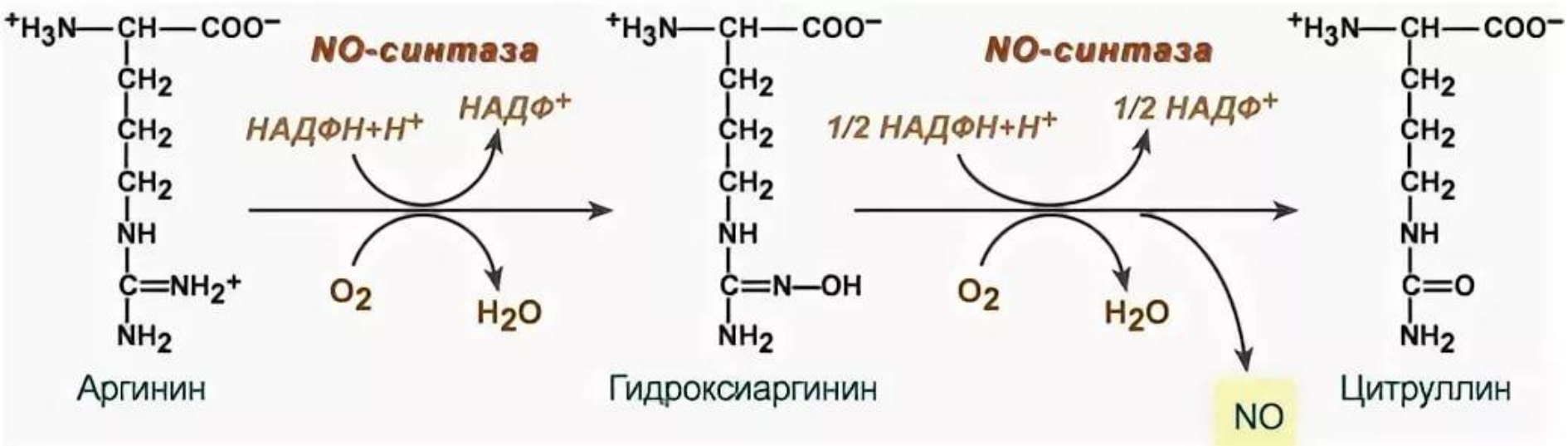


Декодирование Ca²⁺-сигнала

Передача Ca²⁺-сигнала на белки-мишени

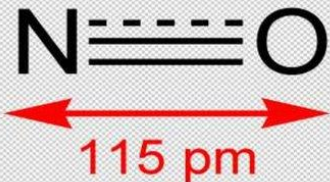
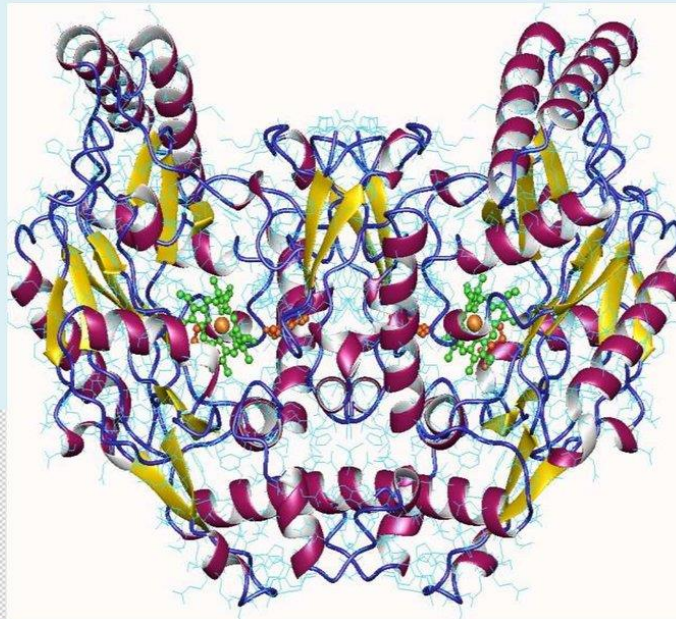


Взаимодействие Ca²⁺-сигнала с другими сигнальными системами



СИНТАЗЫ ОКСИДА АЗОТА

NO-синтазы — группа ферментов, катализирующих образование оксида азота и цитруллина из аргинина, кислорода и NADPH.



Д. Оксид азота (NO) как сигнальное вещество

мессенджер,
например ацетилхолин

рецептор

клеточная
мембрана

Ca²⁺-канал

откры-
вается

Ca²⁺ кальмодулин

комплекс
Ca²⁺-
кальмодулин

NO-синтаза

аргинин

O₂, НАДФН
цитруллин

NO

диффузия

вне-
клеточная
среда

клетка 1
(например, эндотелиальная клетка)

клетка 2
(например, миоцит сосуда)

вазодилатация

[Ca²⁺] ↓

протеин-
киназа G

активация

ГТФ

активирует

цитозольная
гуанилат-
циклаза

цГМФ

G_q

PLC-β

ФБФ

ДАГ

ИТФ

запасы
Ca²⁺

G_o

откры-
вается

Ca²⁺ кальмодулин

комплекс
Ca²⁺-
кальмодулин

NO-синтаза

аргинин

O₂, НАДФН
цитруллин

NO

диффузия

вне-
клеточная
среда

клетка 1
(например, эндотелиальная клетка)

клетка 2
(например, миоцит сосуда)

вазодилатация

[Ca²⁺] ↓

протеин-
киназа G

активация

ГТФ

активирует

цитозольная
гуанилат-
циклаза

цГМФ

G_q

PLC-β

ФБФ

ДАГ

ИТФ

запасы
Ca²⁺

G_o

откры-
вается

Ca²⁺ кальмодулин

комплекс
Ca²⁺-
кальмодулин

NO-синтаза

аргинин

O₂, НАДФН
цитруллин

NO

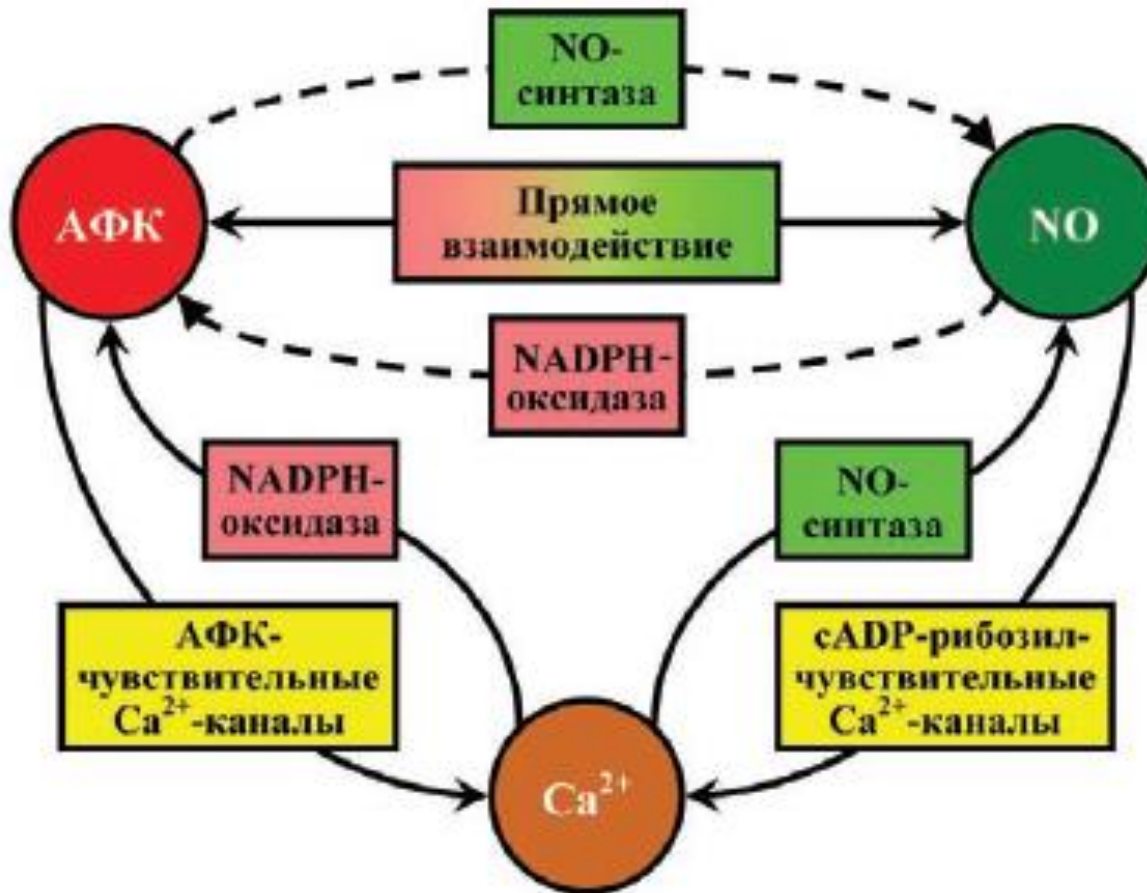
диффузия

вне-
клеточная
среда

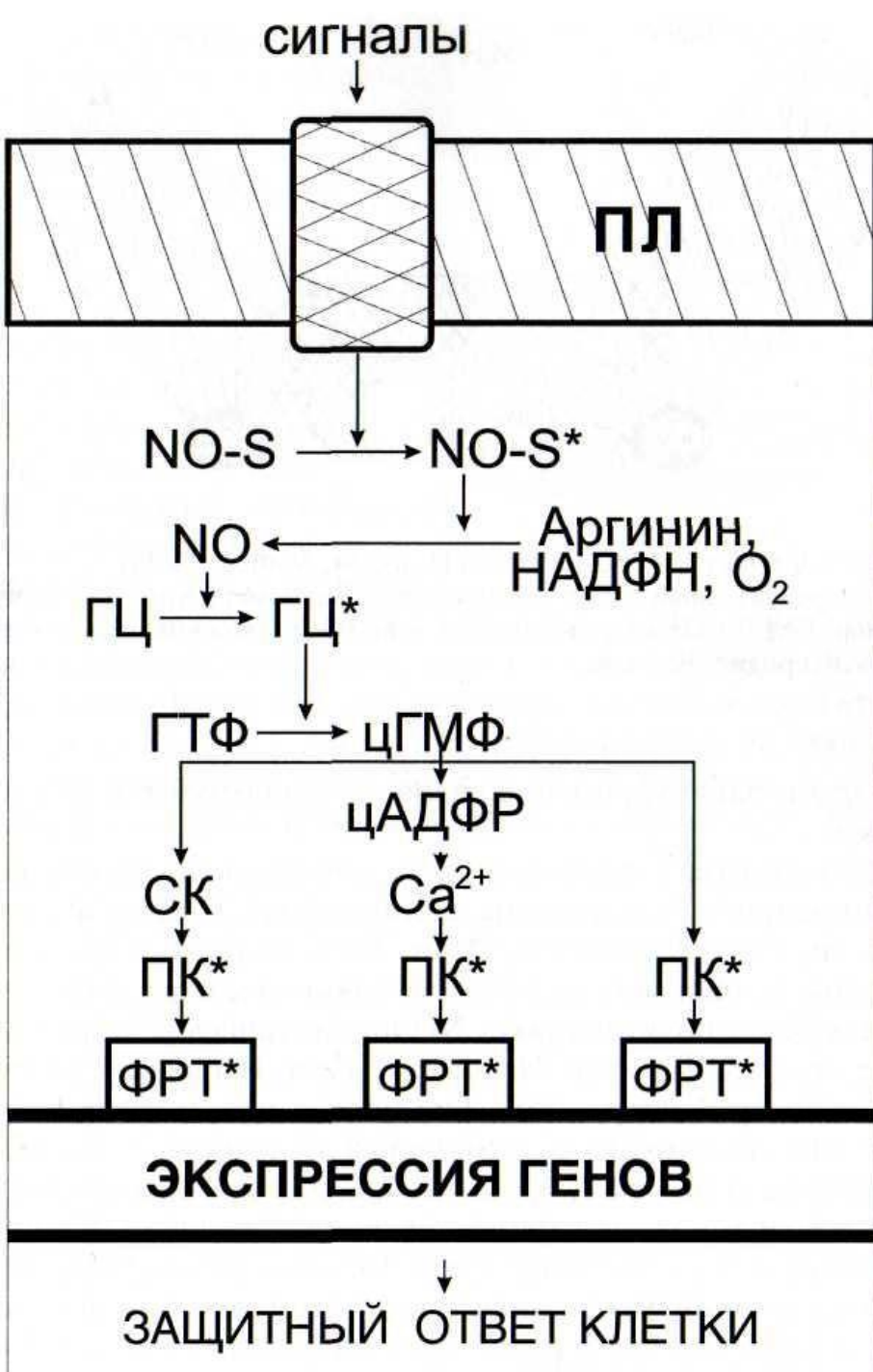
клетка 1
(например, эндотелиальная клетка)

клетка 2
(например, миоцит сосуда)

Связь между АФК, NO и Ca^{2+} как сигнальными посредниками



АФК могут вызывать усиление поступления Ca^{2+} в цитозоль за счет влияния на редоксчувствительные Ca^{2+} -каналы. Ca^{2+} способствует активации NADPH-оксидазы. АФК могут активировать NO-синтазу и усиливать генерацию NO. Между АФК и NO возможно прямое взаимодействие с нейтрализацией эффектов. NO может способствовать поступлению Ca^{2+} в цитозоль через внутриклеточные сADP-рибозилчувствительные Ca^{2+} -каналы. Ca^{2+} является активатором NO-синтазы.



Активные формы кислорода (АФК)

- Это продукты неполного восстановления кислорода, содержащие неспаренные электроны. АФК являются свободными радикалами.
- Свободные радикалы – агрессивные молекулы, способные атаковать другие молекулы с целью забрать недостающий электрон.

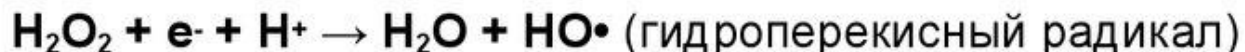
К активным формам кислорода относят:

- 1) $\text{OH}\cdot$ - гидроксильный радикал;
- 2) O_2^- - супероксидный анион;
- 3) H_2O_2 - пероксид водорода.

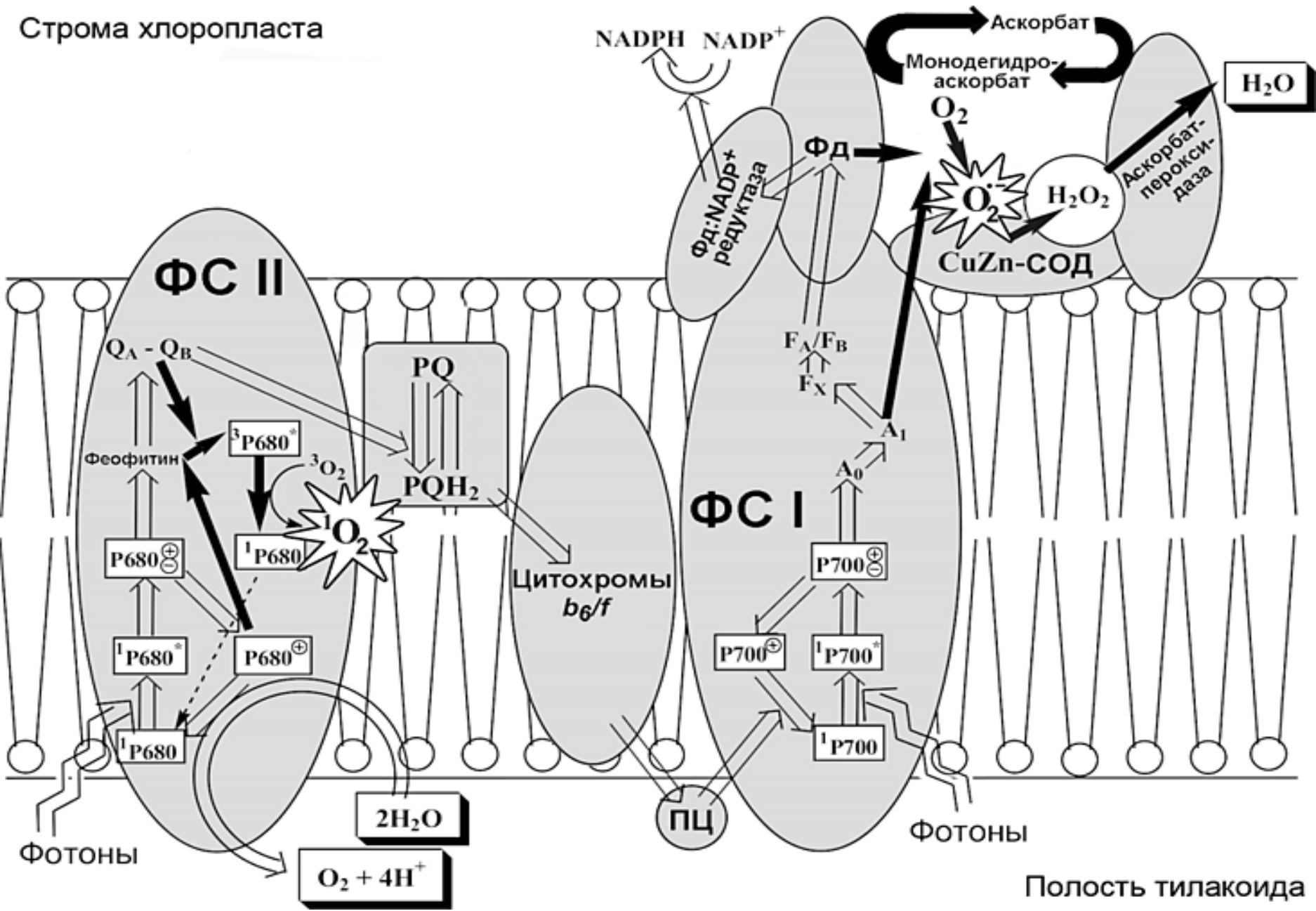
- Полное восстановление кислорода до воды требует 4-х электронов и катализируется цитохромоксидазой.



- Но присоединение электронов происходит поэтапно и при этом образуются АФК.

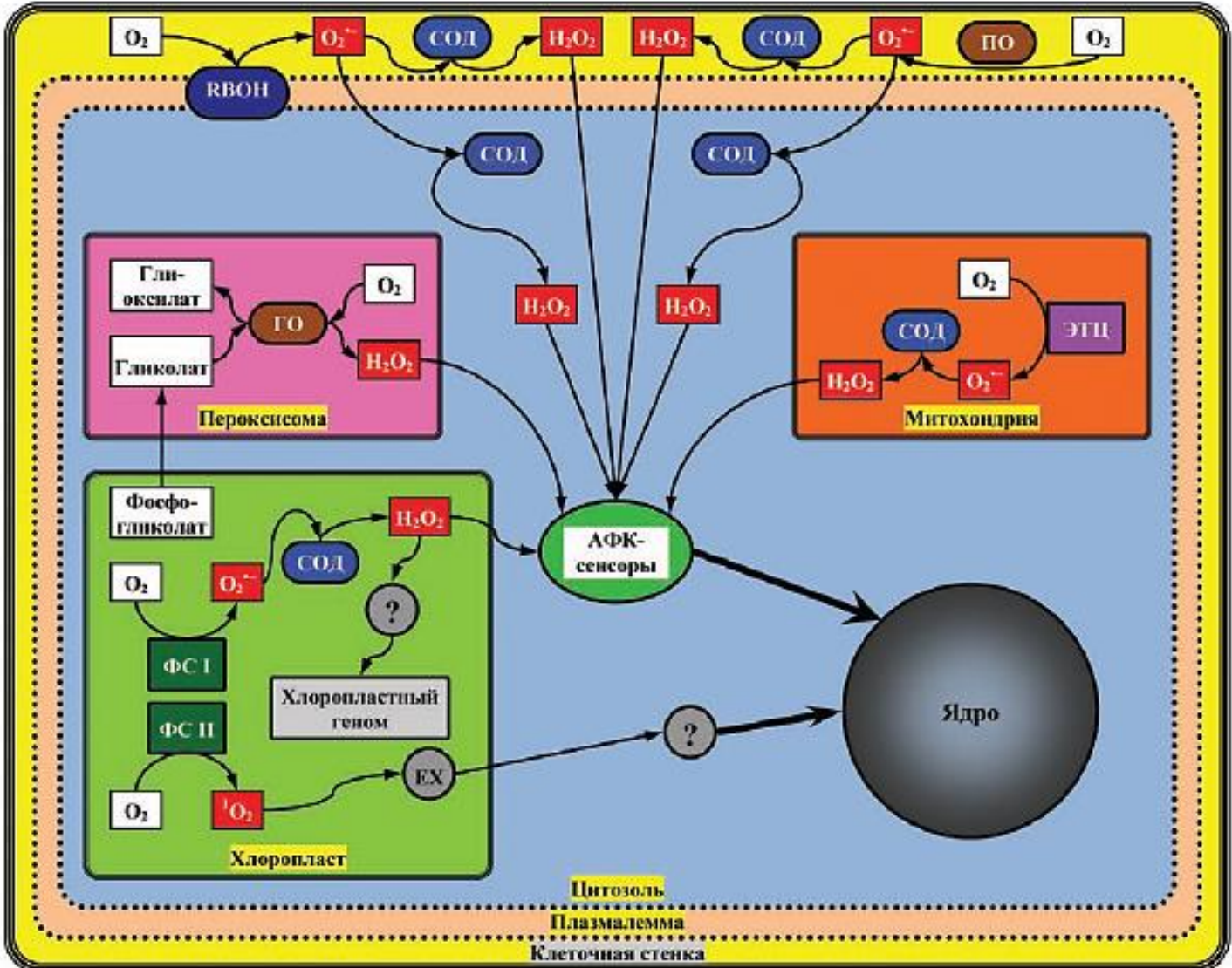


Строма хлоропласта



Полость тилакоида

Общая схема образования АФК и трансдукции редокс-сигналов в растительных клетках

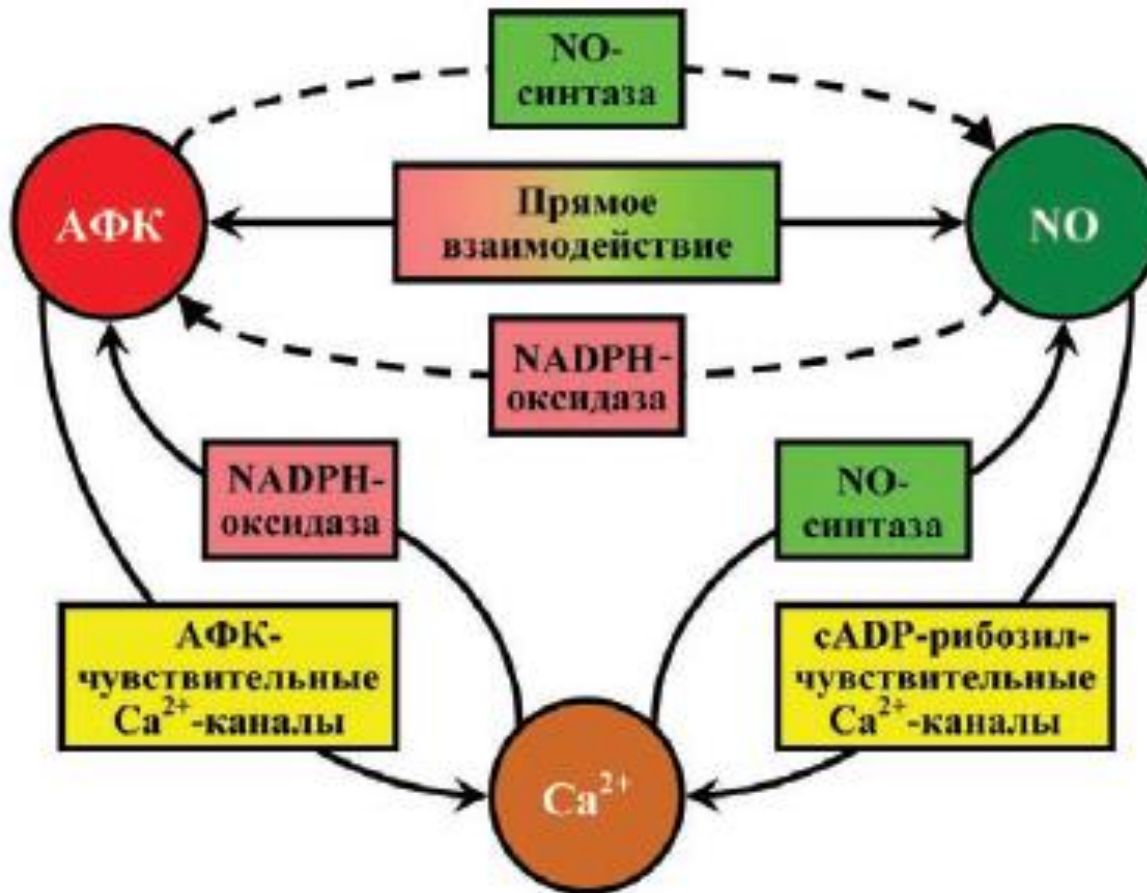


EX – протеин EXECUTER; RВОН – каталитическая субъединица NADPH-оксидазы; ПО – пероксидаза; СОД – различные формы супероксиддисмутазы; ГО – гликолатоксидаза; ФС – фотосистемы; ЭТЦ – электронтранспортная цепь

Участие активных форм кислорода в реализации клеточных ответов на внешний фактор



Связь между АФК, NO и Ca^{2+} как сигнальными посредниками



АФК могут вызывать усиление поступления Ca^{2+} в цитозоль за счет влияния на редоксчувствительные Ca^{2+} -каналы. Ca^{2+} способствует активации NADPH-оксидазы. АФК могут активировать NO-синтазу и усиливать генерацию NO. Между АФК и NO возможно прямое взаимодействие с нейтрализацией эффектов. NO может способствовать поступлению Ca^{2+} в цитозоль через внутриклеточные сADP-рибозилчувствительные Ca^{2+} -каналы. Ca^{2+} является активатором NO-синтазы.