

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА
ДЕЙСТВИЯ У РАСТЕНИЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУМЕРНОЙ СИСТЕМЫ
ВОЗБУДИМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Сухов В.С.

Неруш В.Н.

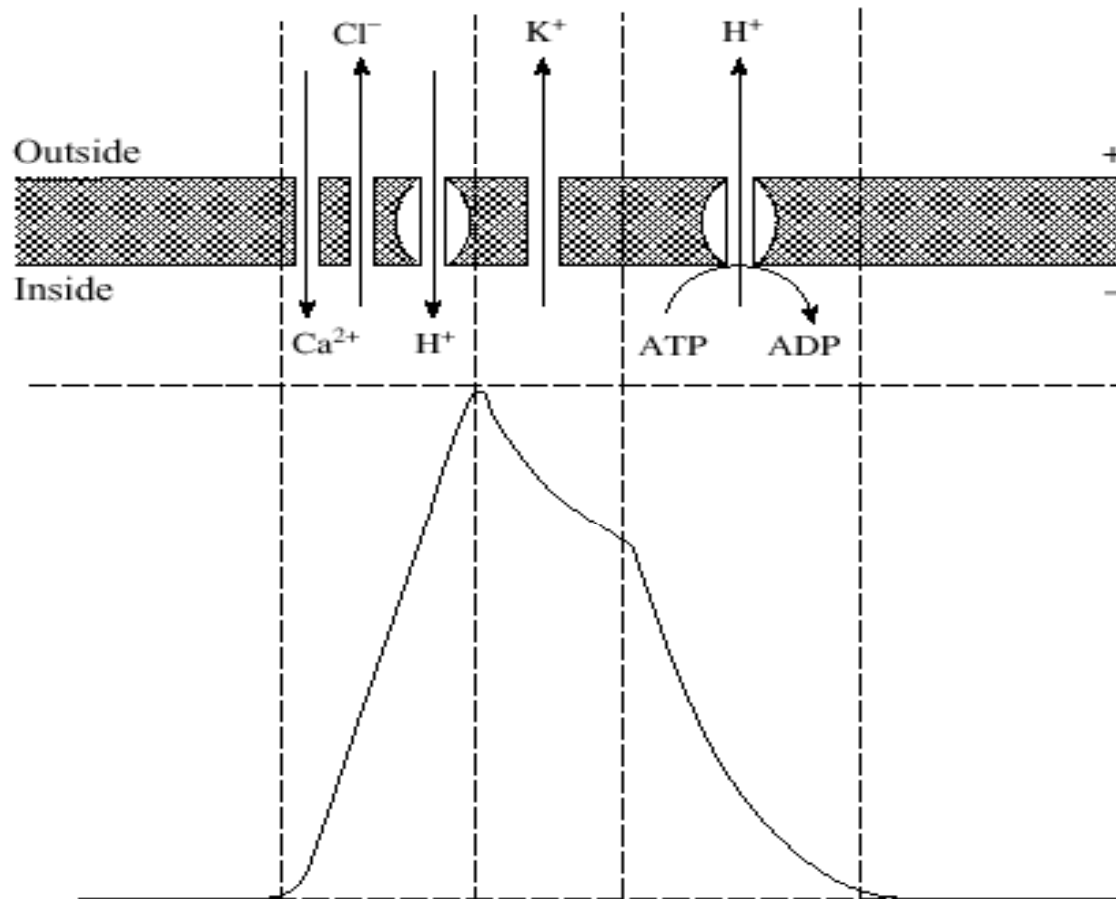
Морозова Е.Н.

Воденеев В.А.

**Нижегородский
государственный университет
им. Н.И. Лобачевского**

кафедра биофизики

Схема механизма генерации потенциала действия у высших растений

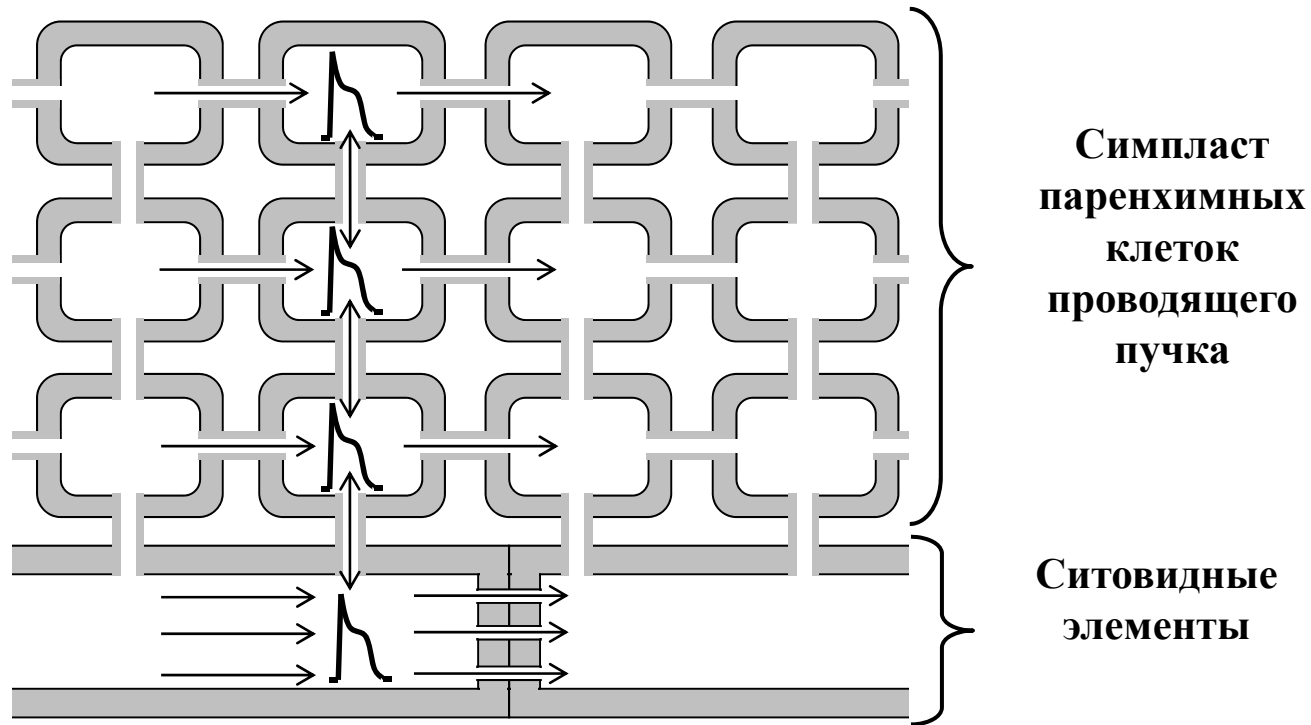


Гипотетические пути распространения ПД у высших растений

**Симпласт паренхимных
клеток проводящих
пучков
(низкая проводимость
между клетками,
высокая возбудимость и
активность Н-АТФазы)**

**Ситовидные элементы
(высокая проводимость
между клетками, низкая
возбудимость и
активность Н-АТФазы)**

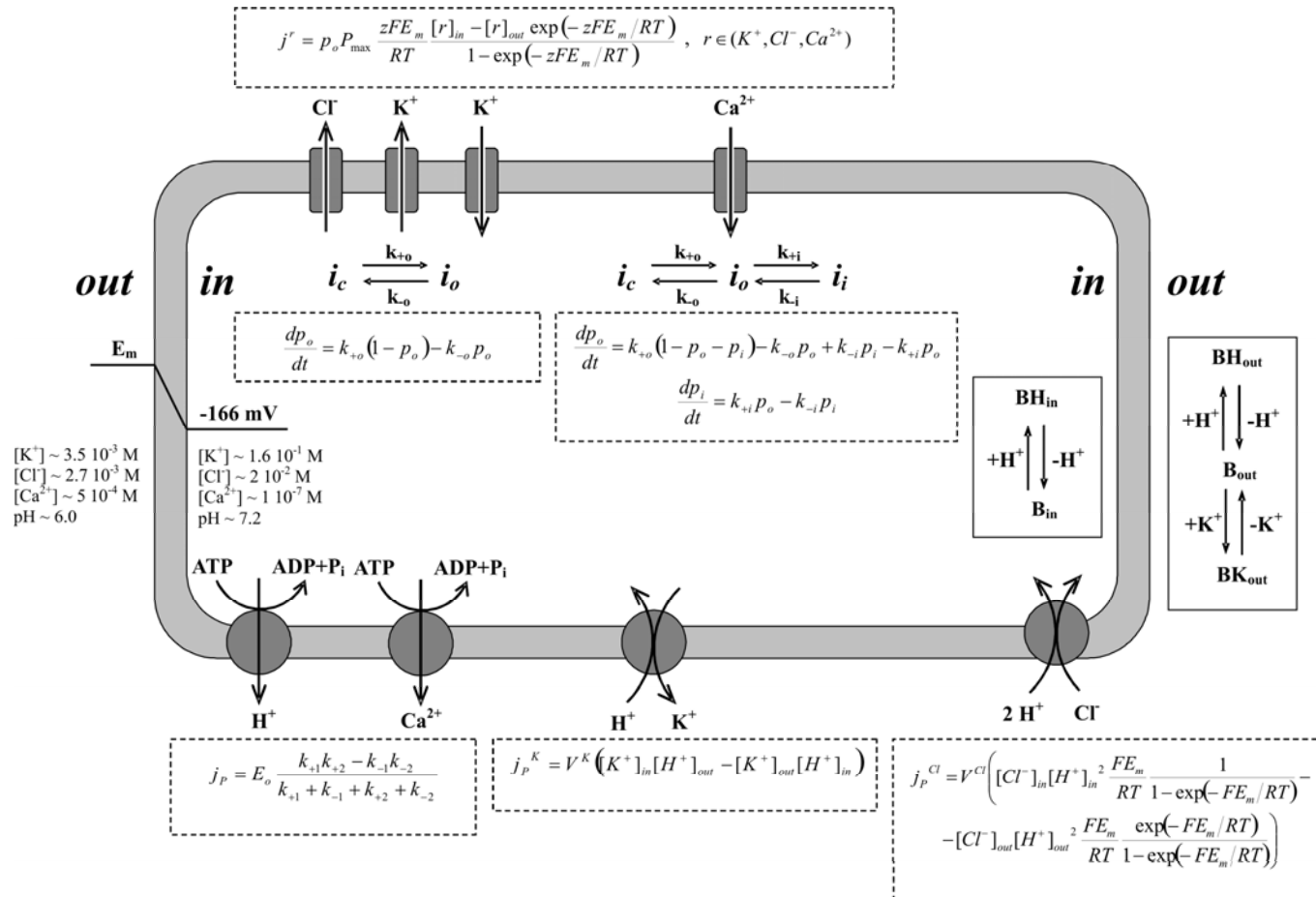
Предполагаемые пути распространения потенциалов действия (ПД) у высших растений



Цель:

Провести теоретический анализ распространения потенциала действия у высших растений с использованием двумерной системы возбудимых элементов

Электрофизиологическая схема растительной клетки и основные уравнения, лежащие в основе модели генерации ПД



Описание мембранного потенциала (E_m), с использованием дифференциального уравнения:

$$\frac{dE_m}{dt} = \frac{1}{C} \cdot \sum Fj_r \quad r \in (K^+, Cl^-, H^+, Ca^{2+})$$

Стационарное описание мембранного потенциала (E_m):

$$E_m = \frac{g_K E_K + g_{Cl} E_{Cl} + g_{Ca} E_{Ca} + g_{PH} E_{PH} + g_{PCa} E_{PCa} + g_{Sy} E_{Sy}}{g_K + g_{Cl} + g_{Ca} + g_{PH} + g_{PCa} + g_{Sy}}$$

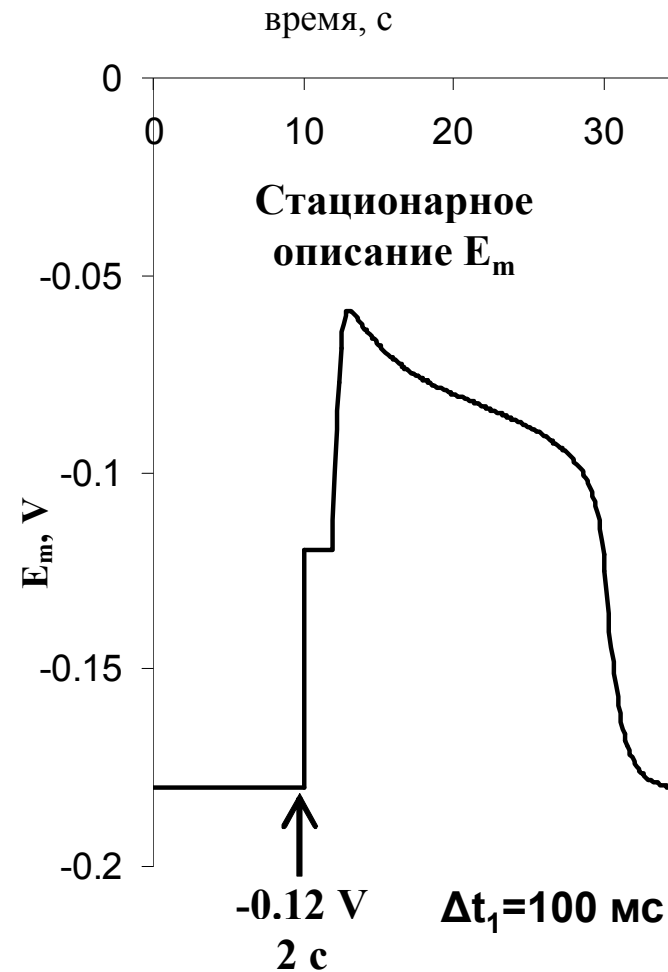
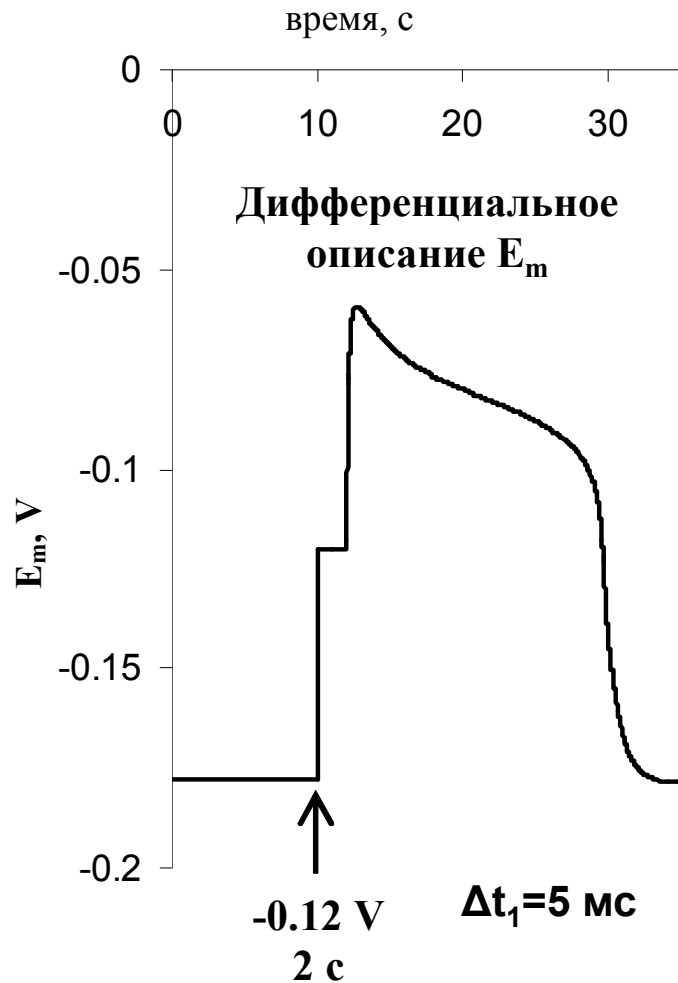
$$E_{PH} = \frac{\Delta G_{ATP}}{F} + E_H$$

$$E_{PCa} = \frac{\Delta G_{ATP}}{F} + E_{Ca} - E_H$$

$$E_{PHCl} = E_{Cl} + 2E_H$$

$$g_k = \frac{Fj_k}{E_m - E_k}$$

Генерация ПД, вызванного электрической стимуляцией



Генерация ПД, вызванного постепенным охлаждением

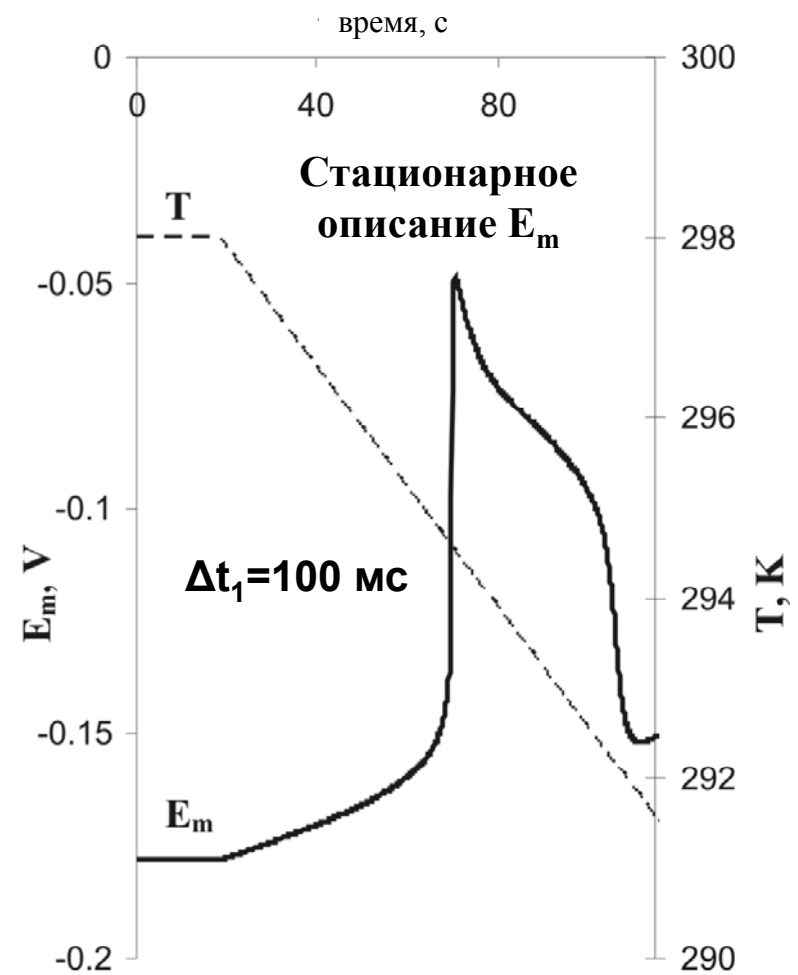
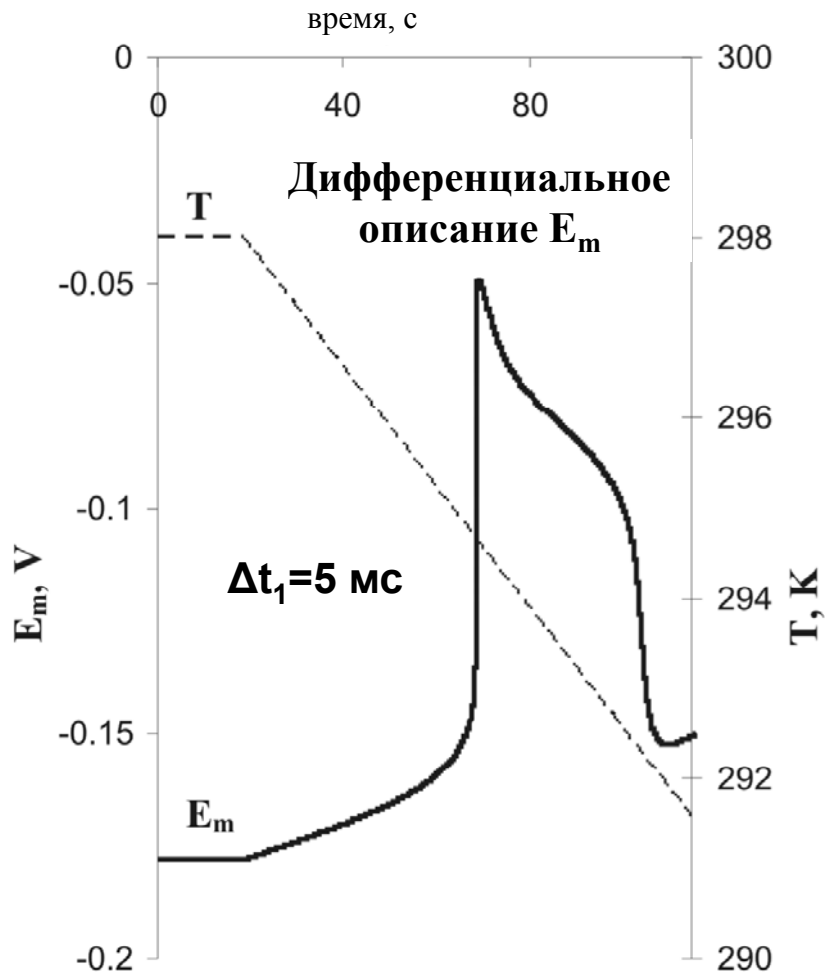


Схема двумерной системы возбудимых элементов (а) и взаимодействий отдельной клетки (б)

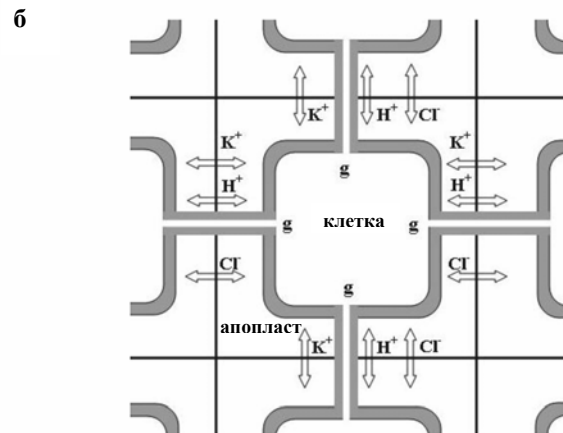
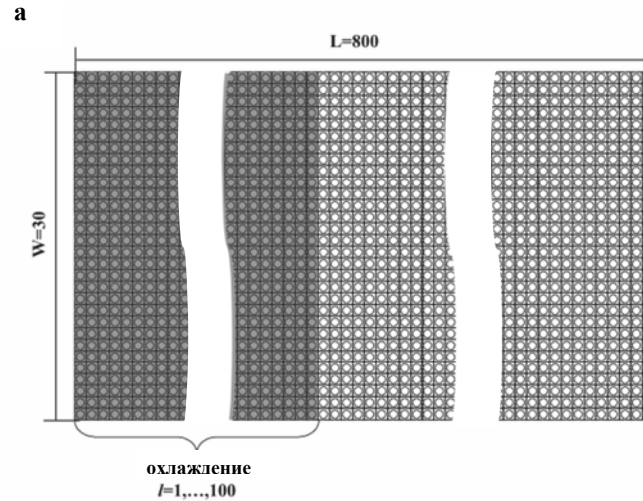
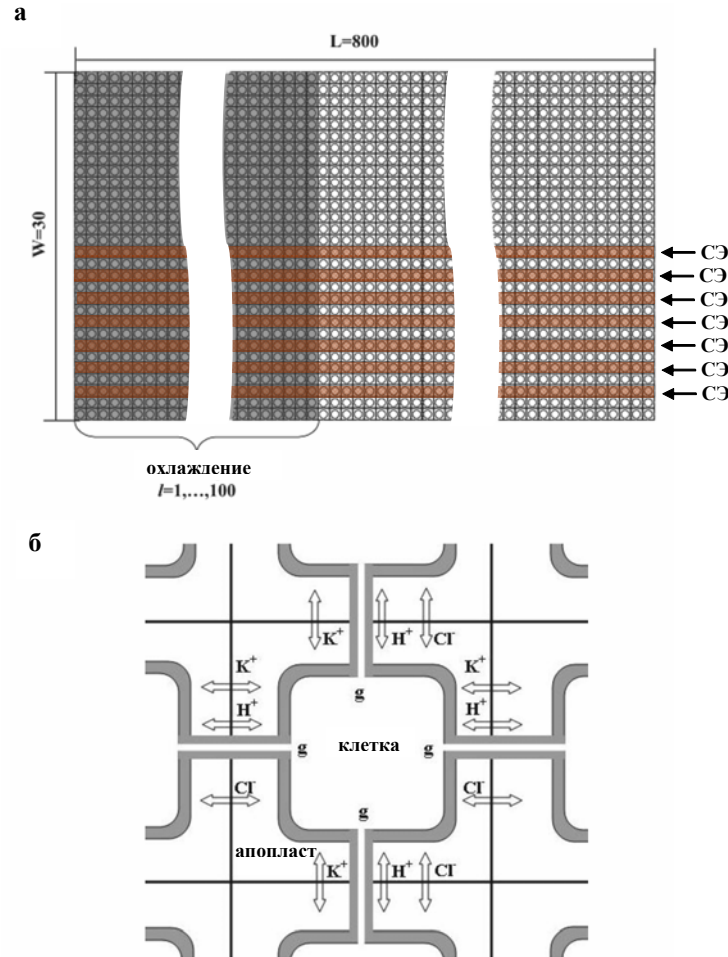


Схема двумерной системы возбудимых элементов (а) и взаимодействий отдельной клетки (б)



Уравнение для мембранного потенциала клетки (l;w):

$$E_m^{lw} = \frac{g_K E_K + g_{Cl} E_{Cl} + g_{Ca} E_{Ca} + g_{PH} E_{PH} + g_{PCa} E_{PCa} + g_{Sy} E_{Sy} + \sum_{k,s} g_{lwks} E_m^{ks}}{g_K + g_{Cl} + g_{Ca} + g_{PH} + g_{PCa} + g_{Sy} + \sum_{k,s} g_{lwks}}$$

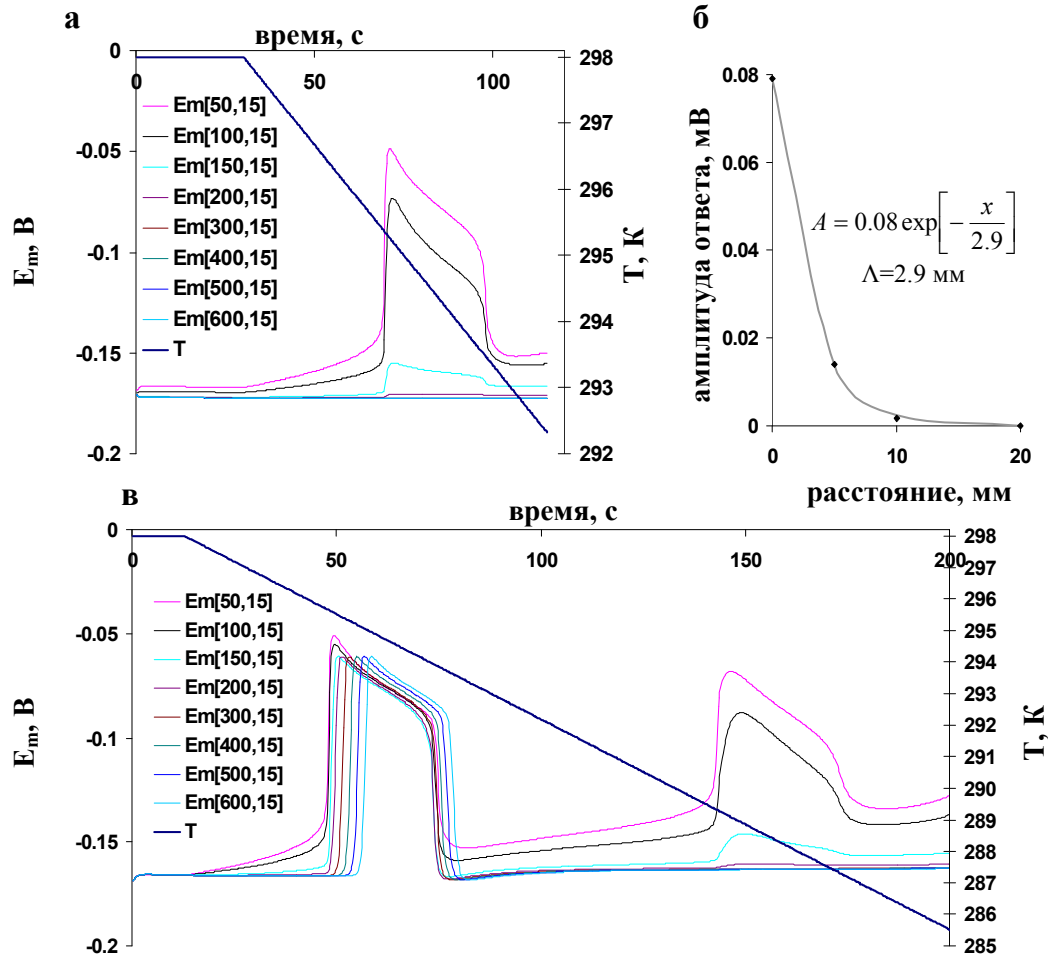
(k;s) соответствует (l-1;w), (l+1;w), (l;w-1) или (l;w+1)

Уравнение описывающее изменение концентрации иона r в апопласте клетки (l;w) вследствие диффузии:

$$\frac{d[r]_{out}^{lw}}{dt} = \frac{D_r}{a^2 (1 + V_{cell}/V_{ap})} \sum_{k,s} ([r]_{in}^{ks} - [r]_{in}^{lw})$$

Пассивное (а) и активное (в) распространение электрического сигнала и зависимость (б) амплитуды электрического ответа от расстояния (х) до стимулированного участка

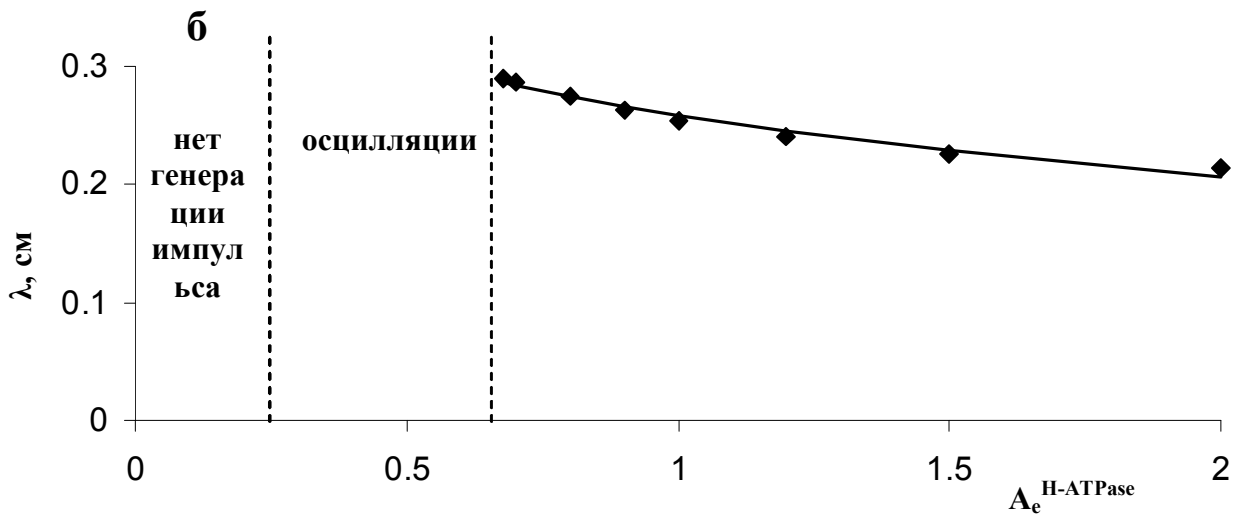
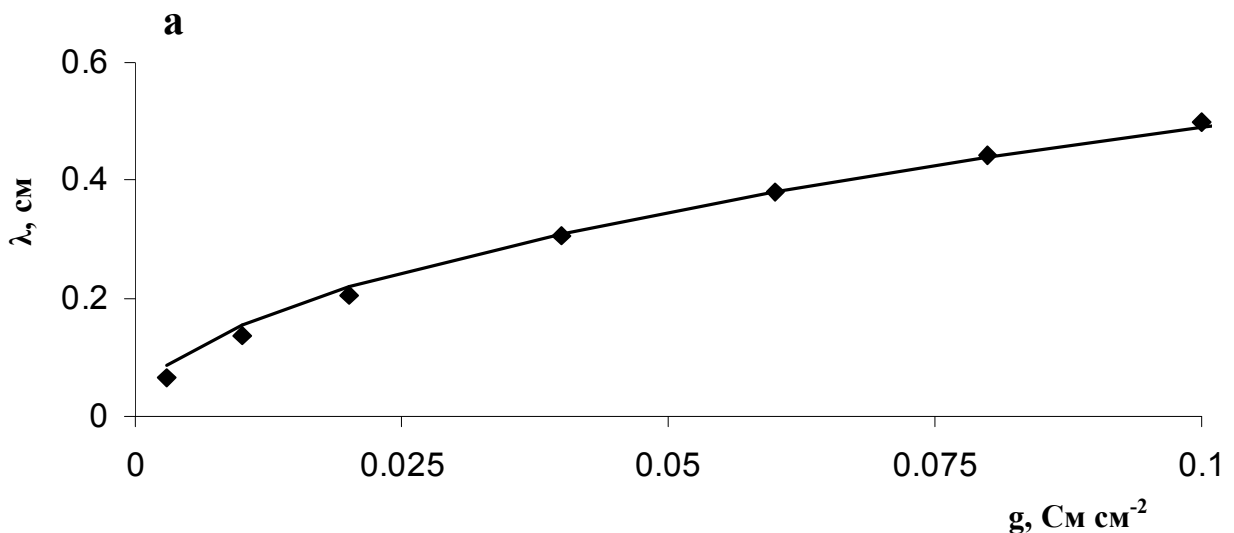
($A_e^{H-ATPase}=0.7$, $g=0.04$ См см⁻²)



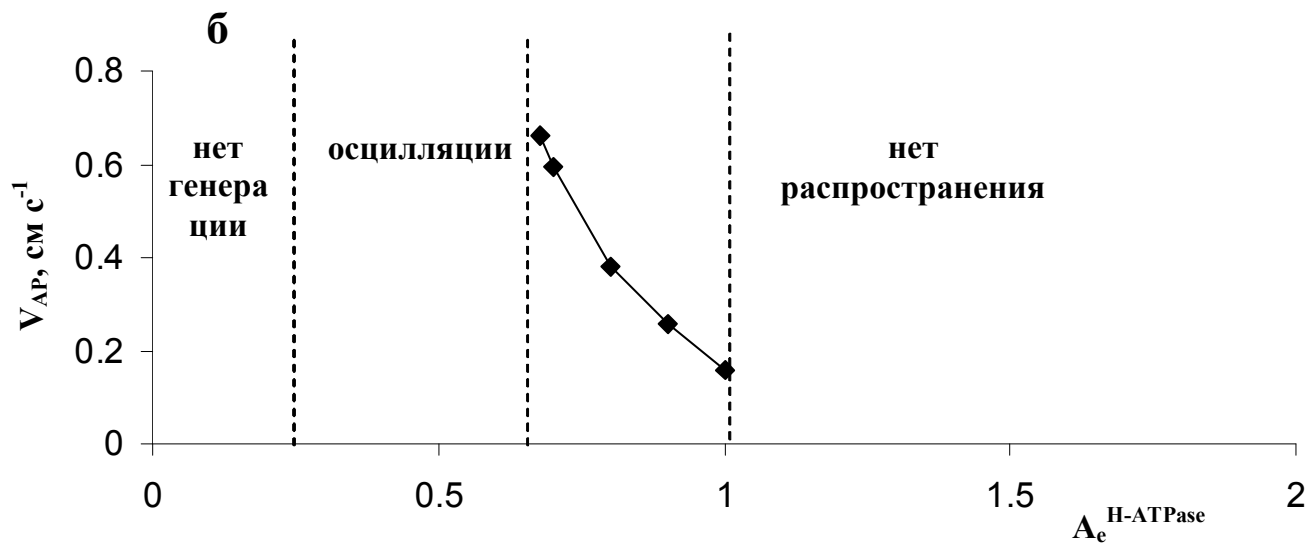
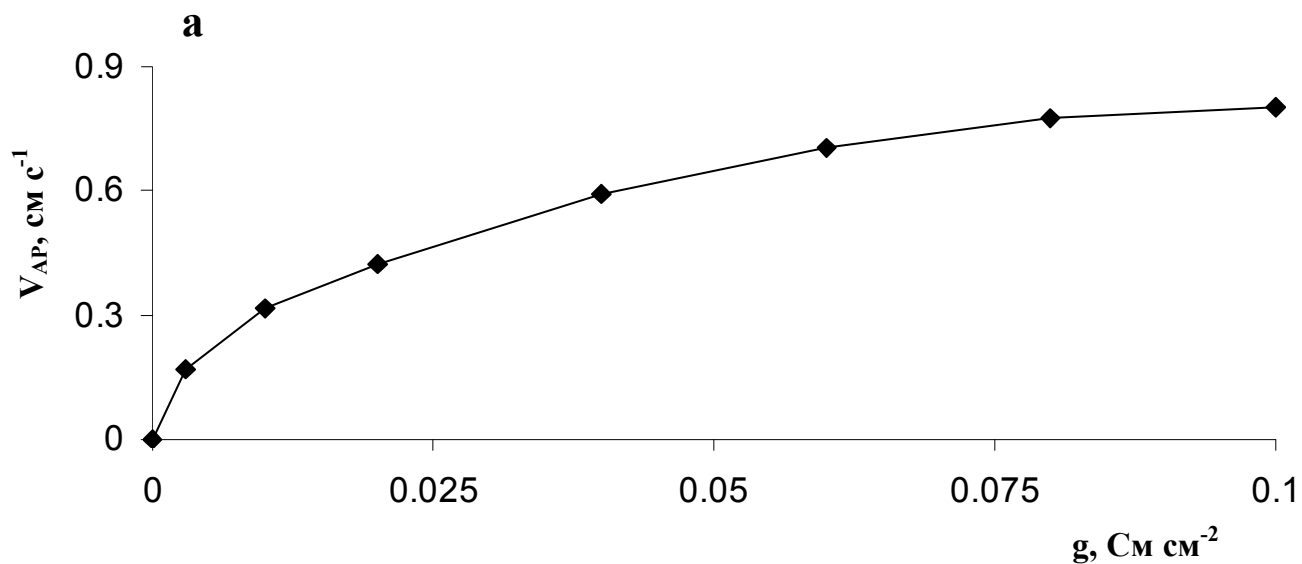
Количественное сравнение показателей имитированных моделью электрических ответов ($A_e^{H-ATPase}=0.7$, $g=0.04$ См см⁻²) с экспериментальными

| Показатель | Модель | Эксперимент | Источник |
|--|----------------------|--|--|
| λ | 2.9 мм | 2.8-5.5 мм | <i>Пятыгин, 2008</i> |
| Скорость распространения ПД | 6 мм с ⁻¹ | ~мм с ⁻¹ - ~см с ⁻¹ (5±2 мм с ⁻¹) | <i>Zavadzki et al. 1991; Fromm et al. 1995; Stancovic et al. 1998; Favre et al. 2001; Felle and Zimermann 2007 и др. (Пятыгин, 2008)</i> |
| Порог в зоне раздражения (постепенное охлаждение) | 36 мВ | 30-70 мВ | <i>Пятыгин, 2008</i> |
| Порог вне зоны раздражения | 20 мВ | 12-30 мВ | <i>Пятыгин, 2008</i> |
| Суммарная амплитуда ответа в зоне раздражения (постепенное охлаждение) | 115 мВ | 100-120 мВ | <i>Опритов и др., 1991, 2002, 2005; Пятыгин и др. 1999a, 1999b</i> |
| Амплитуда ПД вне стимулируемой зоны | 105 мВ | 30-100 мВ и более | <i>Опритов, 1991; Zavadzki et al. 1991; Fromm et al. 1995; Stancovic et al. 1998; Favre et al. 2001; Favre and Degli Agosti 2007</i> |
| Длительность импульса в зоне раздражения (постепенное охлаждение) | 30 с | ~с - ~десятков с | <i>Опритов и др. 1991, 2002; Fromm et al. 1995; Krol et al. 2004; Воденев и др. 2006, 2007; Favre and Degli Agosti 2007</i> |
| Длительность ПД вне стимулируемой зоны | 26 с | | |

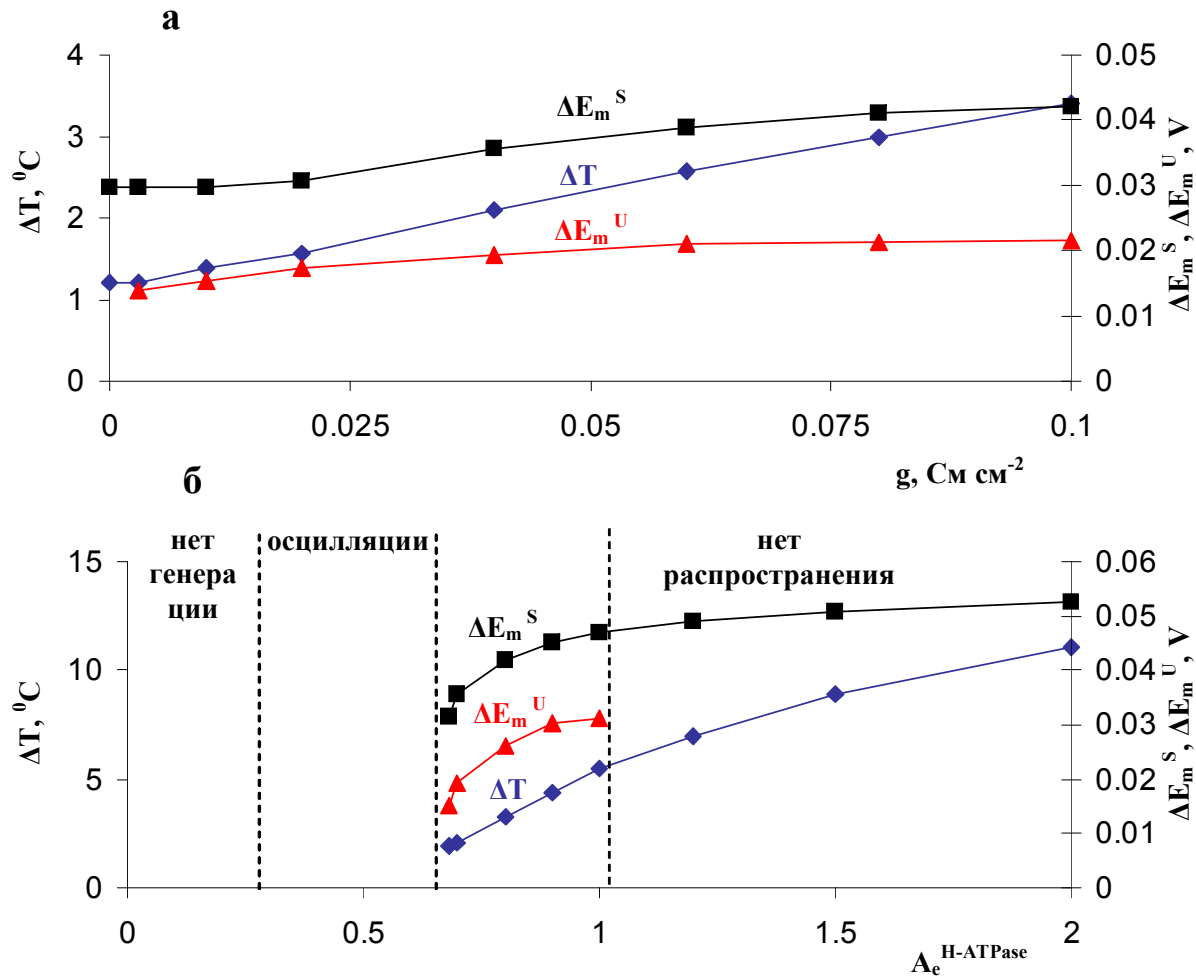
Зависимость кабельной постоянной (λ) от g (а) и $A_e^{\text{H-ATPase}}$ (б) при моделировании пассивного распространения сигнала



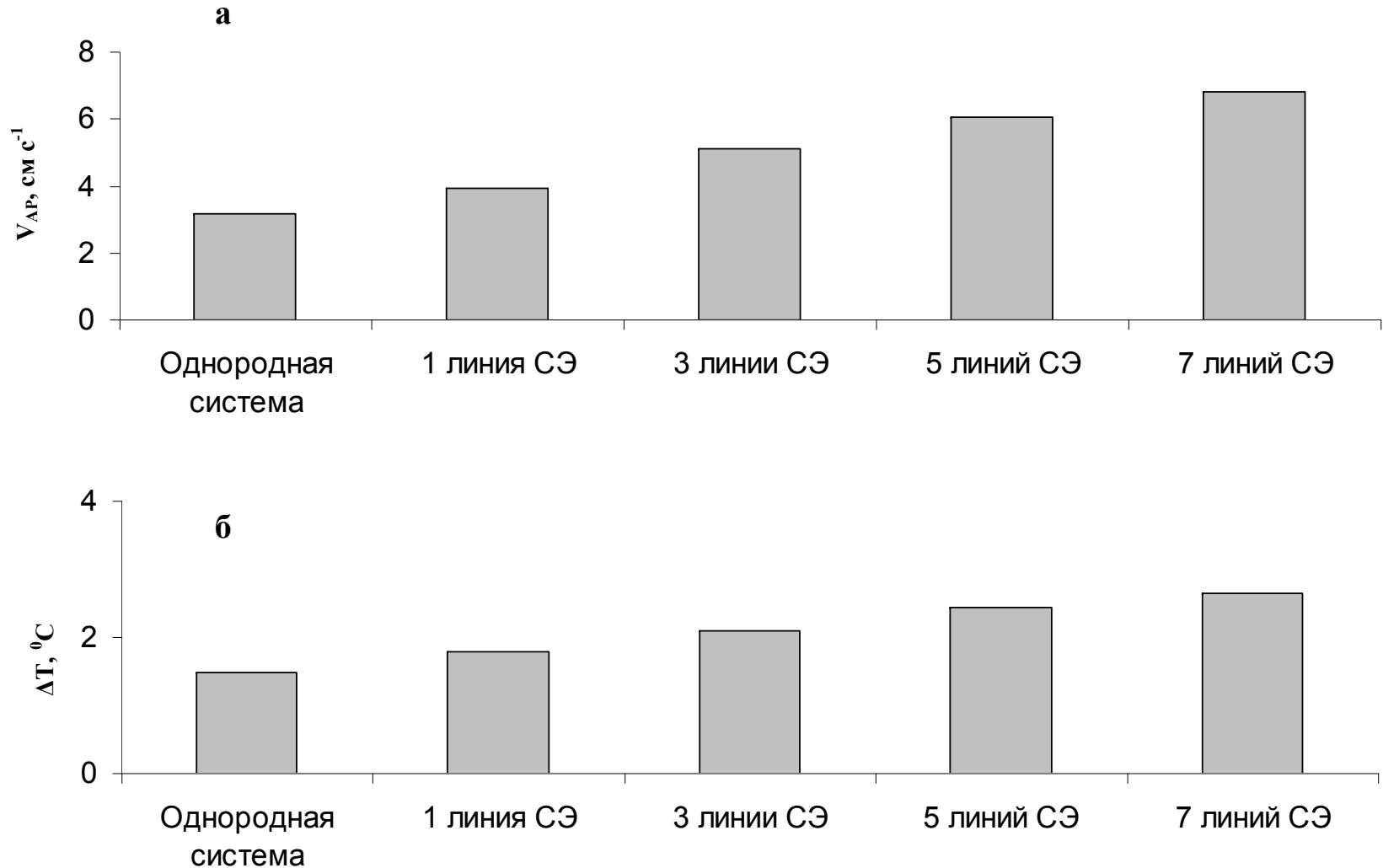
Зависимость скорости распространения (V_{AP}) от g (а) и $A_e^{H-ATPase}$ (б) при моделировании распространения ПД



Зависимость температурного порога (ΔT) и пороговых изменений мембранного потенциала в зоне стимуляции (ΔE_m^S) и вне ее (ΔE_m^U) от g (а) и $A_e^{H-ATPase}$ (б) при моделировании распространения ПД



Зависимость скорости распространения (V_{AP}) (а) и температурного порога (ΔT) (б) от количества линий ситовидных элементов (СЭ) в системе ($g=0.04 \text{ См см}^{-2}$, $g^{SE}=0.2 \text{ См см}^{-2}$)



Выводы:

1. Разработана и верифицирована математическая модель распространения ПД по растению.
2. Показано, что активность H^+ -АТФазы и межклеточная проводимость могут оказывать существенное влияние на пассивное и активное распространение электрических сигналов
3. Показано, что введение в систему линий клеток, имитирующих ситовидные элементы, существенно ускоряет распространение ПД

Благодарю за внимание!

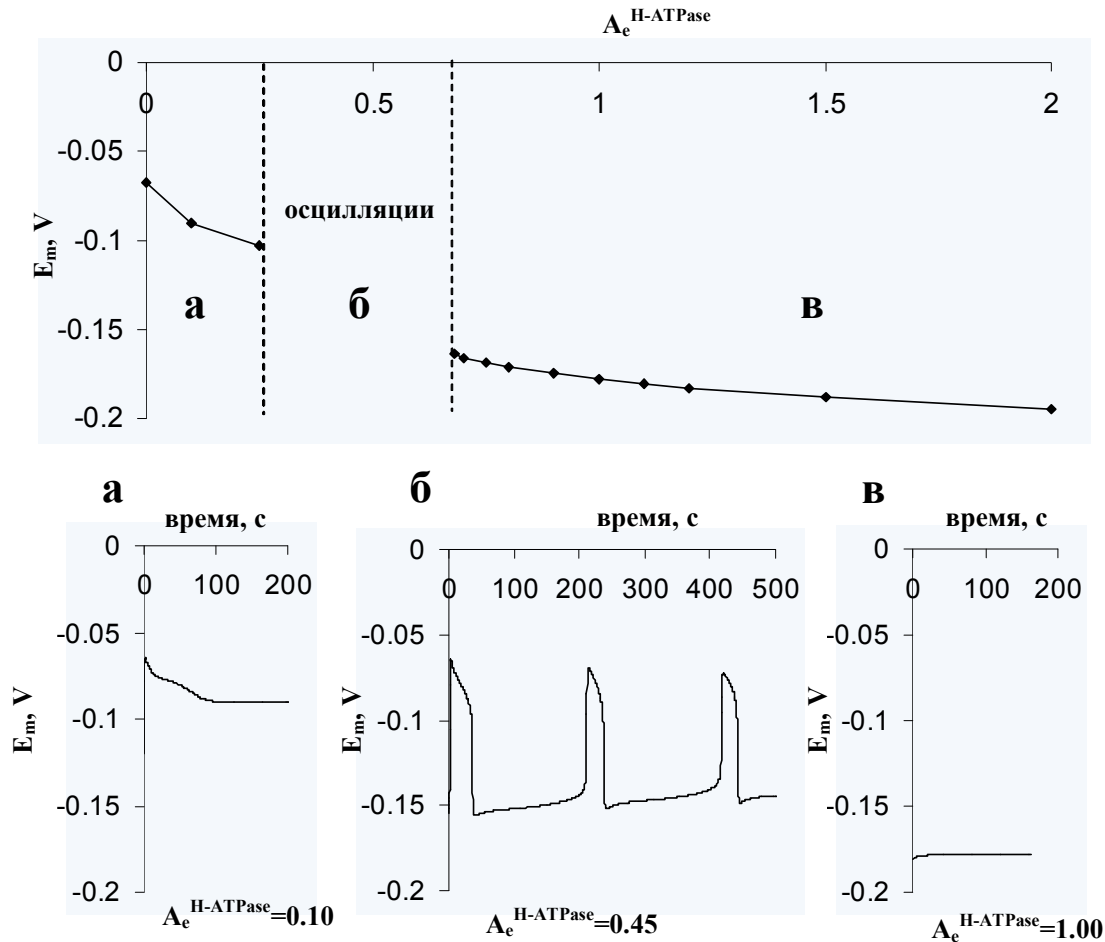
**Значения Δt (метод Эйлера) использованные при
численном решении уравнений модели
распространения ПД**

**$\Delta t_1=100$ мс – при решении уравнений,
описывающих процессы генерации ПД**

**$\Delta t_2=25$ мкс – при описании
электротонического распространения
изменений мембранного потенциала между
клетками**

**$\Delta t_3=10$ мс – при описании диффузии ионов,
между участками апопласта соседних клеток**

Зависимость потенциала покоя от активности H^+ -АТФазы ($A_e^{H-ATPase}$) и динамика E_m в отсутствие раздражения при различных $A_e^{H-ATPase}$



$$\lambda = \sqrt{\frac{g_{in}}{g_m}}$$

При изменении межклеточной проводимости:

$$\lambda \sim \sqrt{g_{in}} \sim \sqrt{g}$$

При изменении активности H^+ -АТФазы:

$$\lambda \sim 1/\sqrt{\sum g_{it} + g_{PH}} \sim 1/\sqrt{const + A_e^{H-ATPase}}$$

Зависимость кабельной постоянной (λ) от g (а) и $A_e^{\text{H-ATPase}}$ (б) при моделировании пассивного распространения сигнала

