

# Редуцированная математически модель нейрон- астроцитарной сети для программной реализации на нейропроцессоре



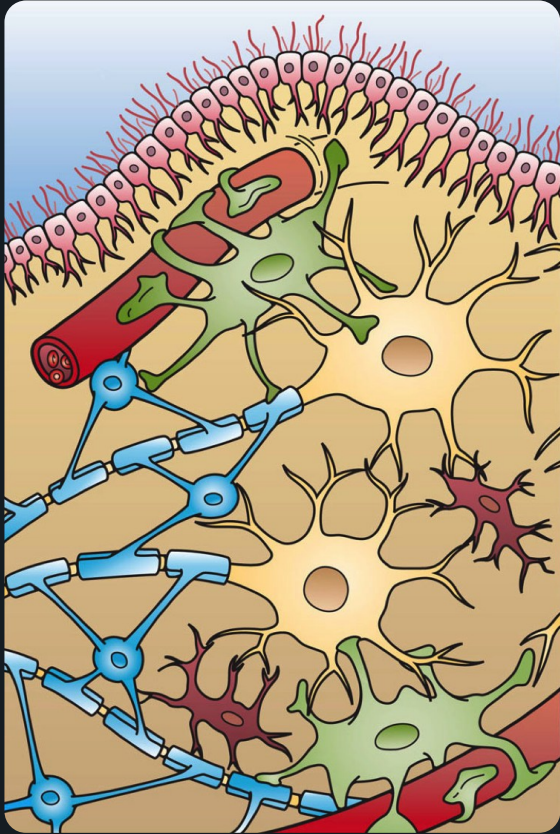
Юлия Цыбина

Н.с. ННГУ им. Н.И. Лобачевского,  
Университет Неймарк

2025

Нижний Новгород

# Глиальные клетки



## Астроциты

- Формируют гематоэнцефалический барьер (ГЭБ), регулируют уровень ионов и нейромедиаторов, обеспечивают структурную опору

## Олигодендроциты

Миелинизируют аксоны в ЦНС для быстрой передачи сигналов

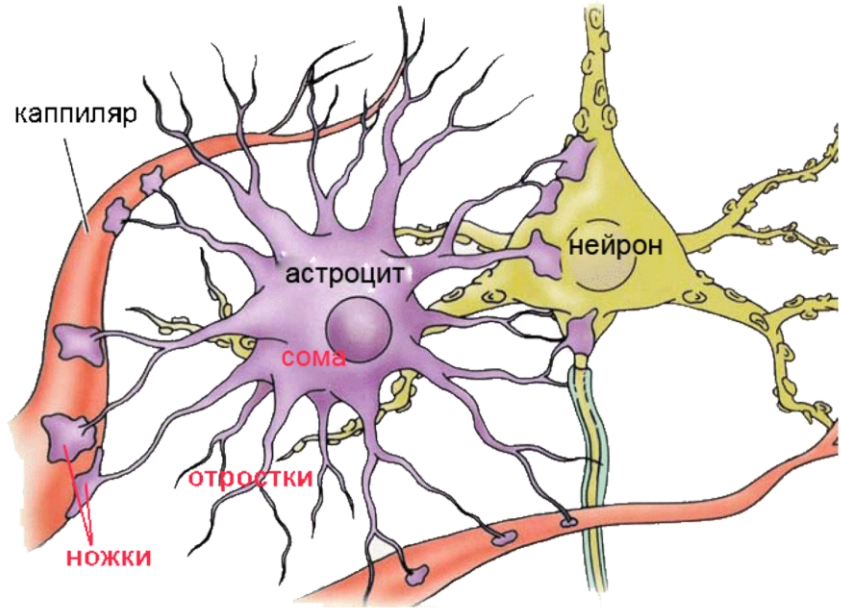
## Микроглия

Обеспечивают иммунную защиту; фагоцитоз остатков клеток и патогенов

## Эпендимные клетки

Производят и циркулируют цереброспинальную жидкость (ЦСЖ)

# Астроциты



## Ключевые функции:

### Гомеостатическая

- Поддерживает ионный и химический баланс.
- Регуляция уровня  $K^+$  и нейромедиаторов.

### Метаболическая

- Синтезирует и расщепляет вещества.
- Обеспечение нейронов энергетическими субстратами.

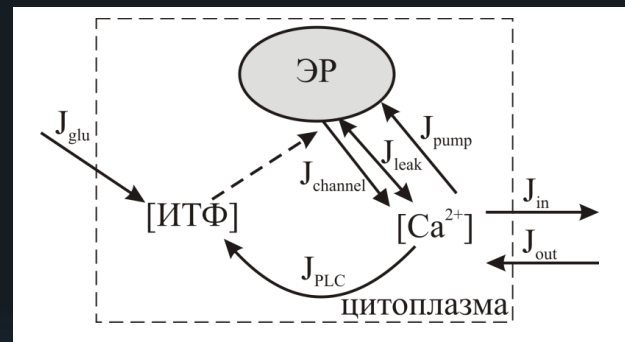
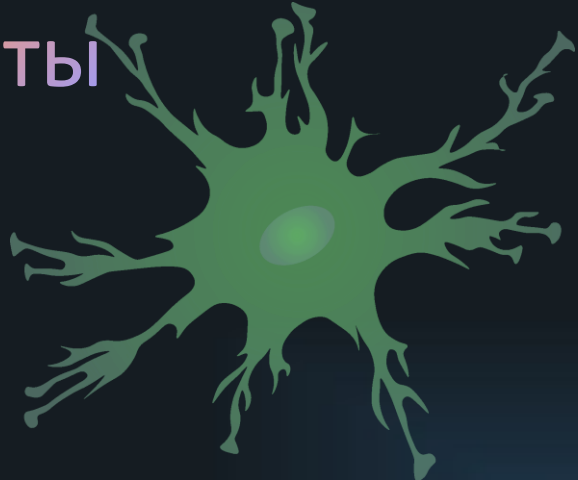
### Сигнальная

- Регулирует синаптическую передачу.
- Высвобождение глутаминергических транзмиттеров.

### Трофическая

- Обеспечивает рост и развитие.
- Выработка нейротрофических факторов.

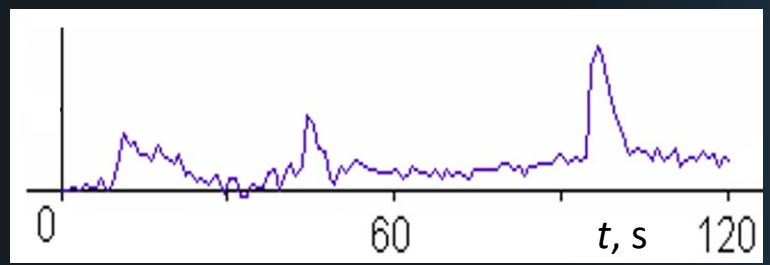
# Астроциты



Модель динамики внутриклеточной концентрации  $Ca^{2+}$  в астроците:

(Ullah et al., 2006)

Кальциевая ( $Ca^{2+}$ ) активность в астроците:

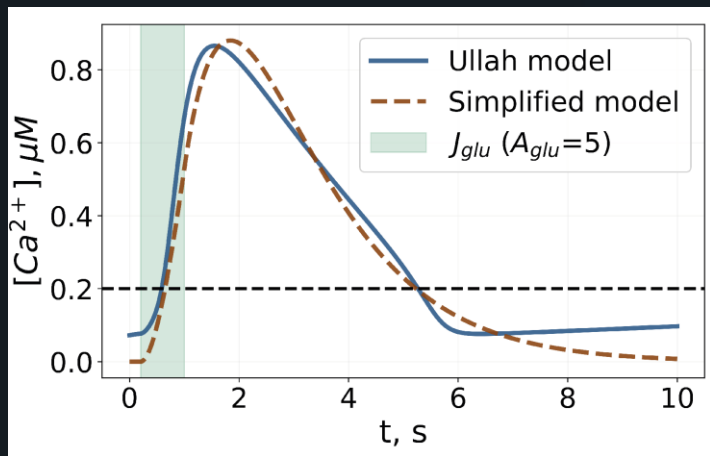


Экспериментальные данные  
(к.ф.-м.н. А.С. Пимашкина)

$$\begin{cases} \frac{d[IP_3]^{(m,n)}}{dt} = \frac{[IP_3^*] - [IP_3]^{(m,n)}}{\tau_{IP_3}} + J_{PLC\delta}^{(m,n)} + J_{glu}^{(m,n)} + diff_{IP_3}^{(m,n)} \\ \frac{d[Ca^{2+}]^{(m,n)}}{dt} = J_{ER}^{(m,n)} - J_{pump}^{(m,n)} + J_{leak}^{(m,n)} + J_{in}^{(m,n)} - J_{out}^{(m,n)} + diff_{Ca}^{(m,n)} \\ \frac{dh^{(m,n)}}{dt} = a_2(d_2 \frac{[IP_3]^{(m,n)}}{[IP_3]^{(m,n)} + d_3} (1 - h^{(m,n)}) - [Ca^{2+}]^{(m,n)} h^{(m,n)}) \end{cases}$$

# Астроциты

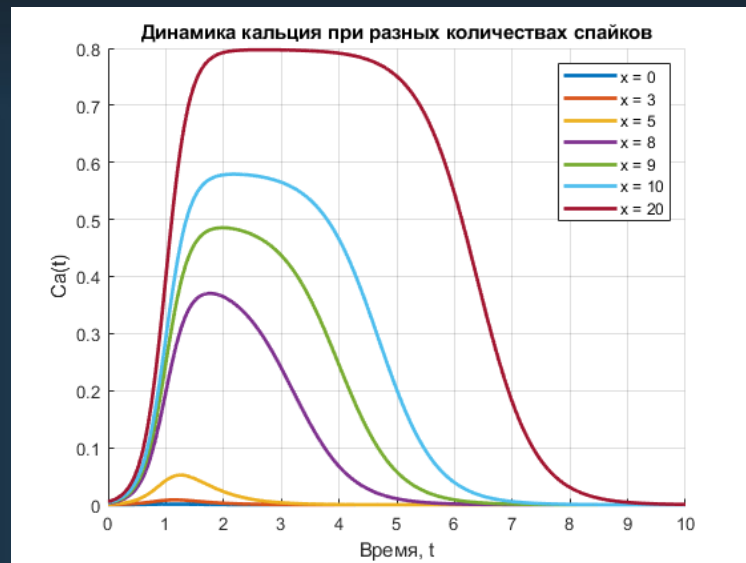
Упрощенная модель №1:  
$$\frac{d^2Ca}{dt^2} = (A J_{glu}(t) - 2\tau \frac{dCa}{dt} - Ca) / \tau^2$$



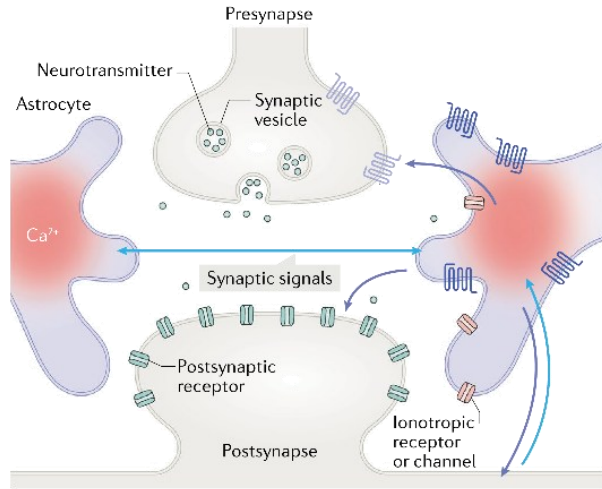
Упрощенная модель №2:

$$Ca(x, t) = A * R * (1 - F),$$

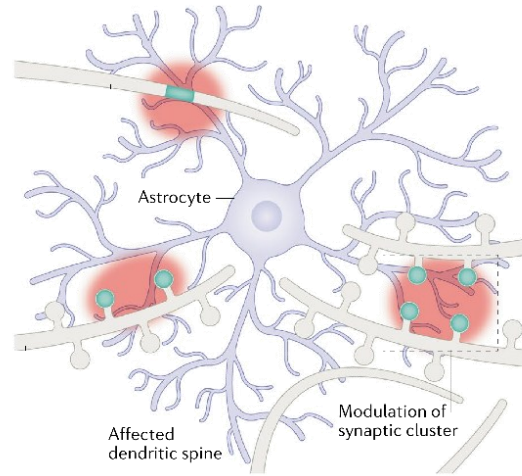
$$\text{где } A = \frac{A_{max}}{1 + e^{-k_3(x-x_1)}}, R = \frac{1}{1 + e^{-k_1(t-t_1)}}, F = \frac{1}{1 + e^{-k_2(t-t_2)}}$$



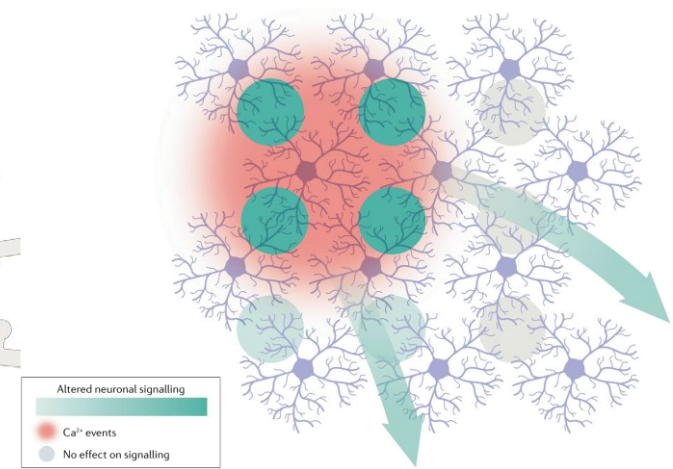
# Астроцитарная регуляция



**На уровне отдельного синапса**

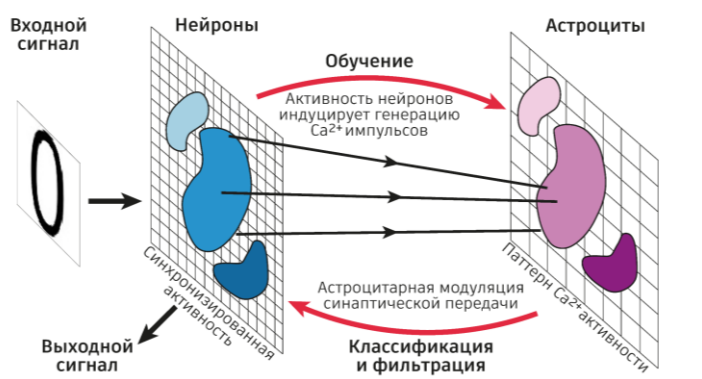


**На уровне нескольких синапсов**



**На сетевом уровне**

# Нейрон-Астроцитарная сеть #1



Динамика внеклеточной концентрации нейромедиатора глутамата (Gordleeva et al., 2012):

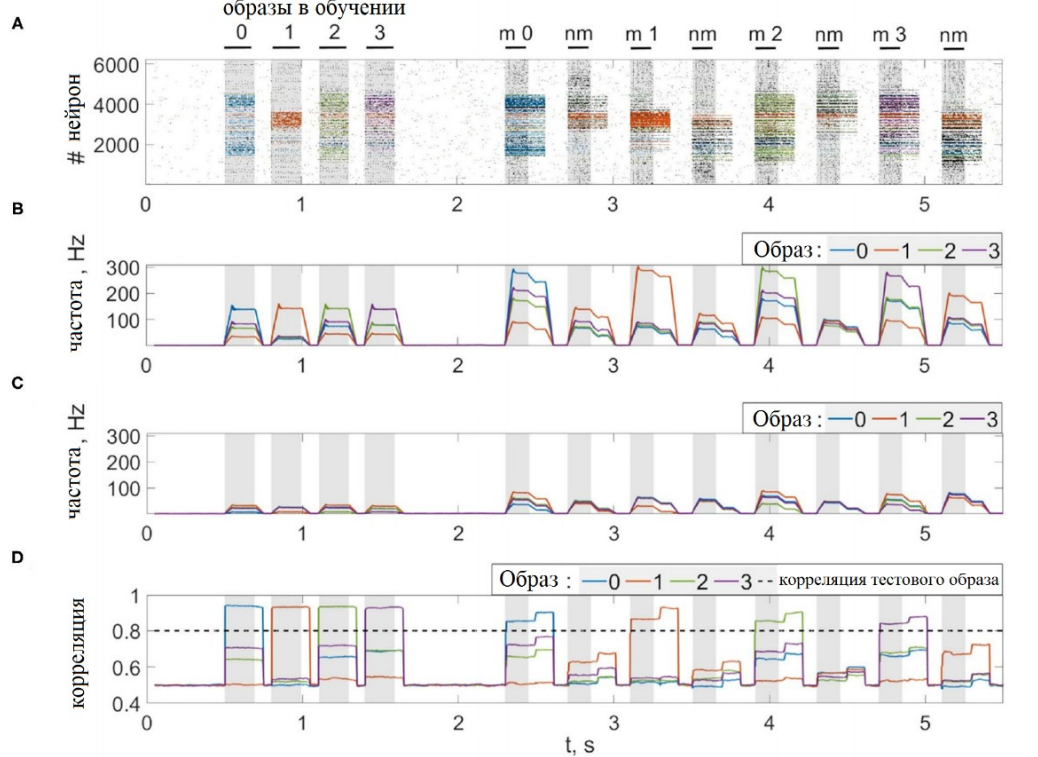
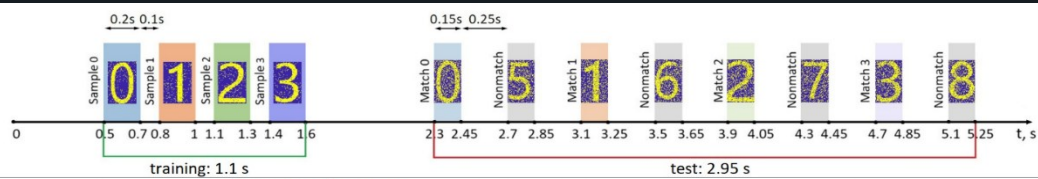
$$\frac{d[G]^{(i,j)}}{dt} = -\alpha_{glu}[G]^{(i,j)} + k_{glu}\Theta(V^{(i,j)} - 30 \text{ мВ})$$

Производство ИТФ PLCβ:

$$J_{glu} = \begin{cases} A_{glu}, & \text{если } t_0 < t \leq t_0 + t_{glu}, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Астроцитарная модуляция синаптической передачи:

$$v_{Ca} = v_{Ca}^* \Theta([Ca^{2+}] - [Ca]_{thr}) \Theta(F - F_{astro})$$



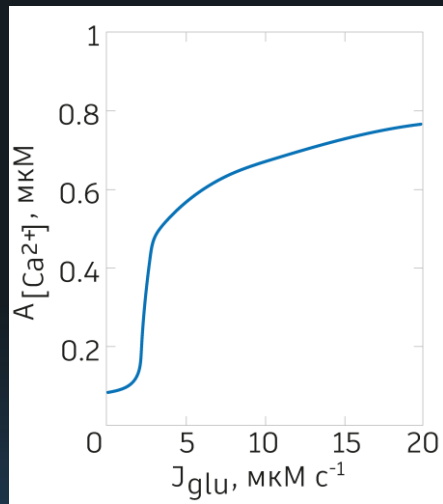
# Нейрон-Астроцитарная сеть #2

- Градуальная** зависимость амплитуды кальциевого импульса от интенсивности входного сигнала:

$$J_{glu}^{(m,n)} = \begin{cases} [G_{sum}]^{(m,n)}, & \text{если } [G_{sum}]^{(m,n)} > [G]_{thr1}, \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

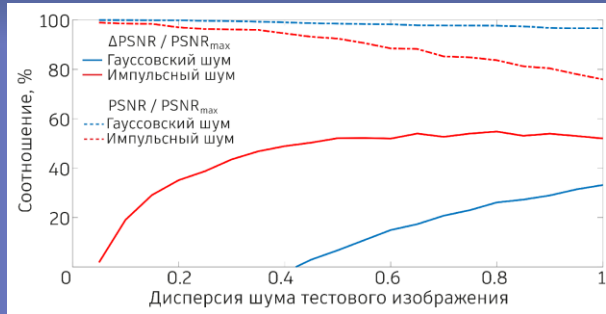
- Градуальная** астроцитарная модуляция синаптической передачи:

$$v_{Ca}^{(i,j)} = v_{Ca}^* \frac{[Ca^{2+}]^{(m,n)} - [Ca^{2+}]_{thr}}{[Ca^{2+}]_{max}} \Theta([Ca^{2+}]^{(m,n)} - [Ca^{2+}]_{thr}) \Theta([G_{sum}]^{(m,n)} - [G]_{thr2}),$$

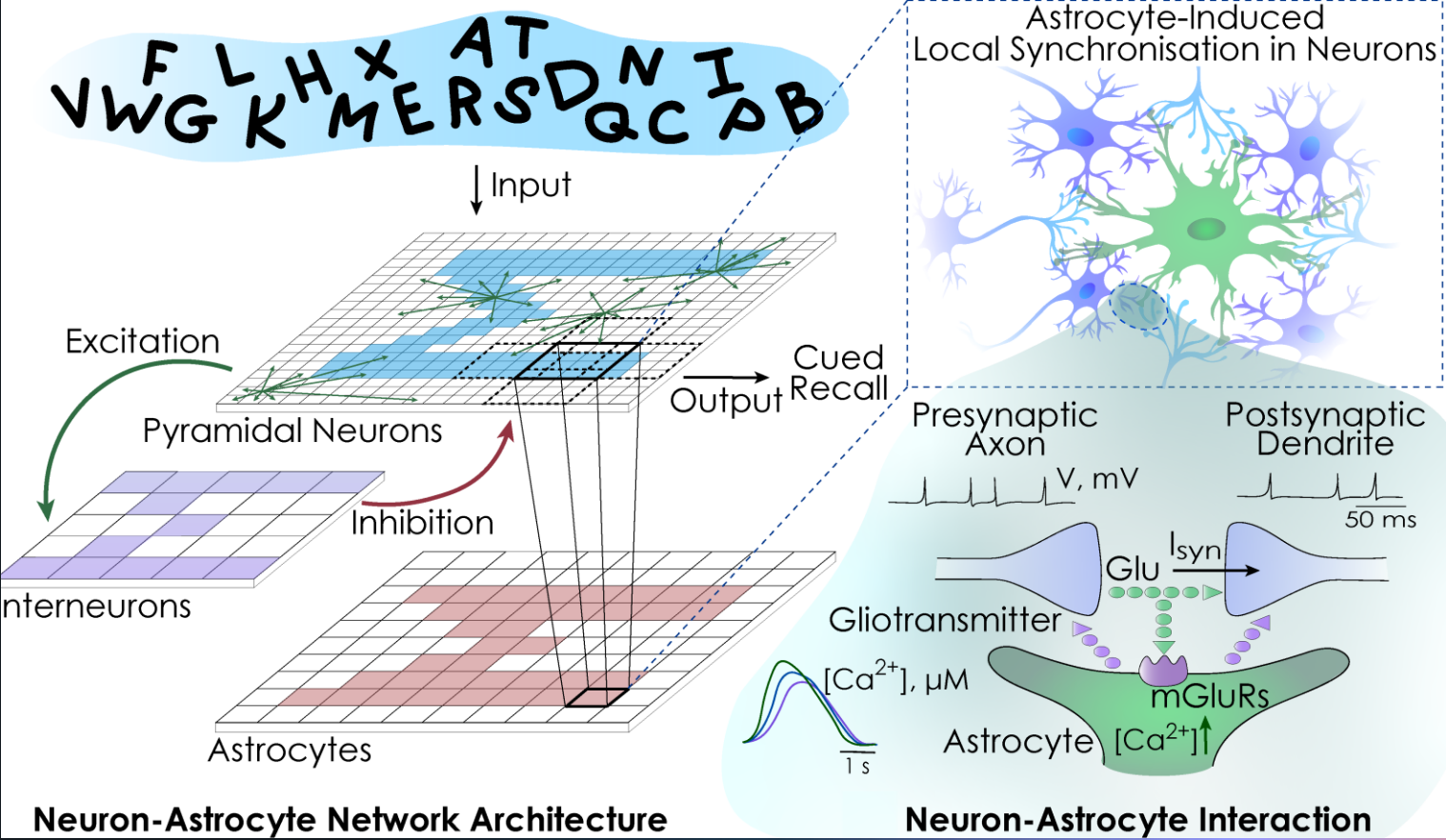


Обучение

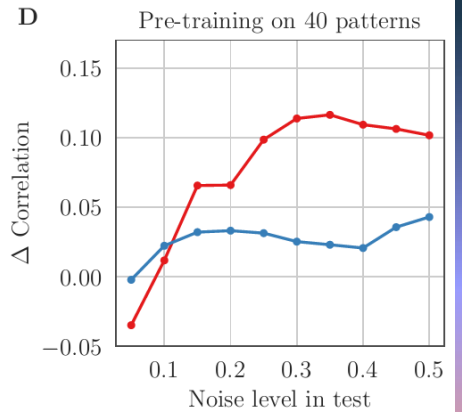
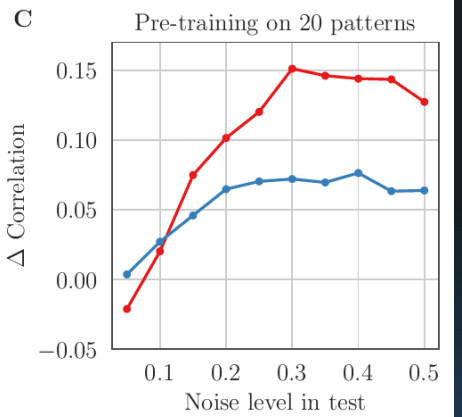
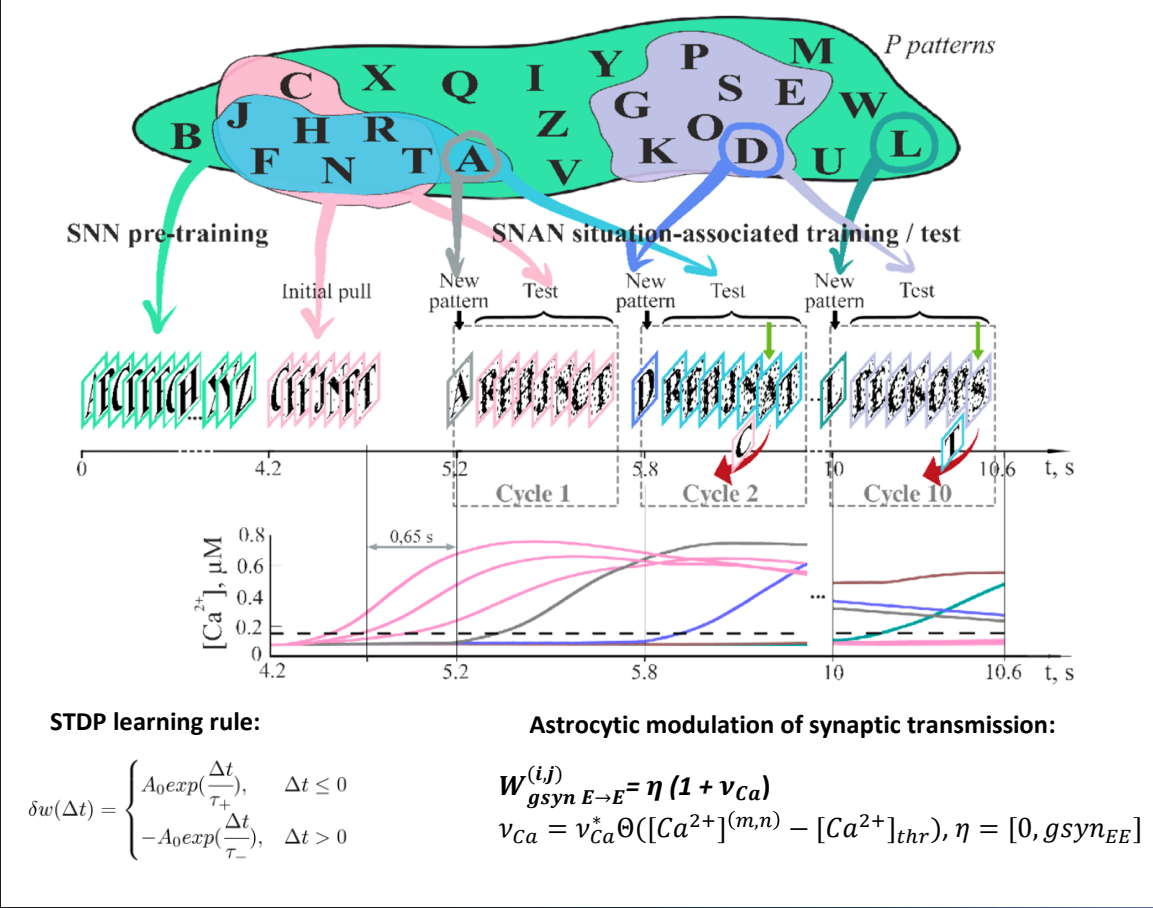
Тест



# Нейрон-Астроцитарная сеть #3

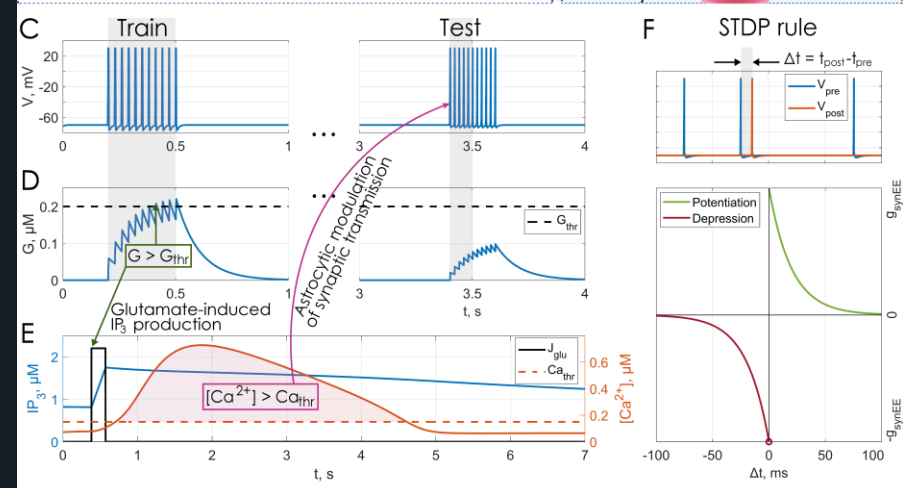
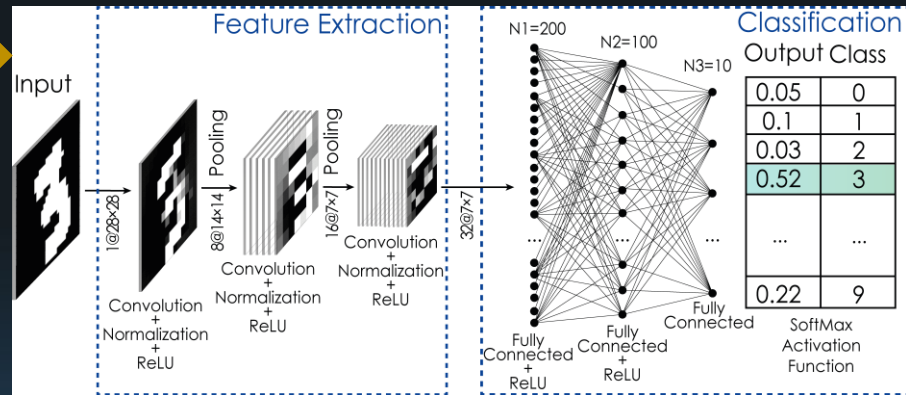
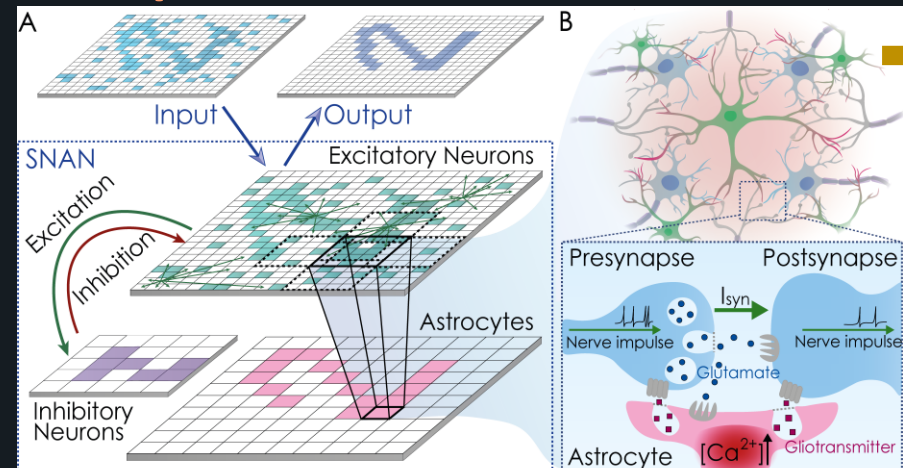


# Нейрон-Астроцитарная сеть #3

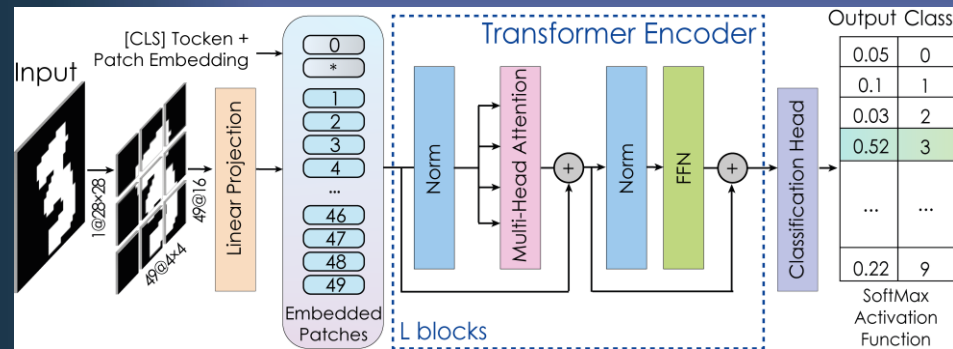


—●— with astrocytes    —●— without astrocytes

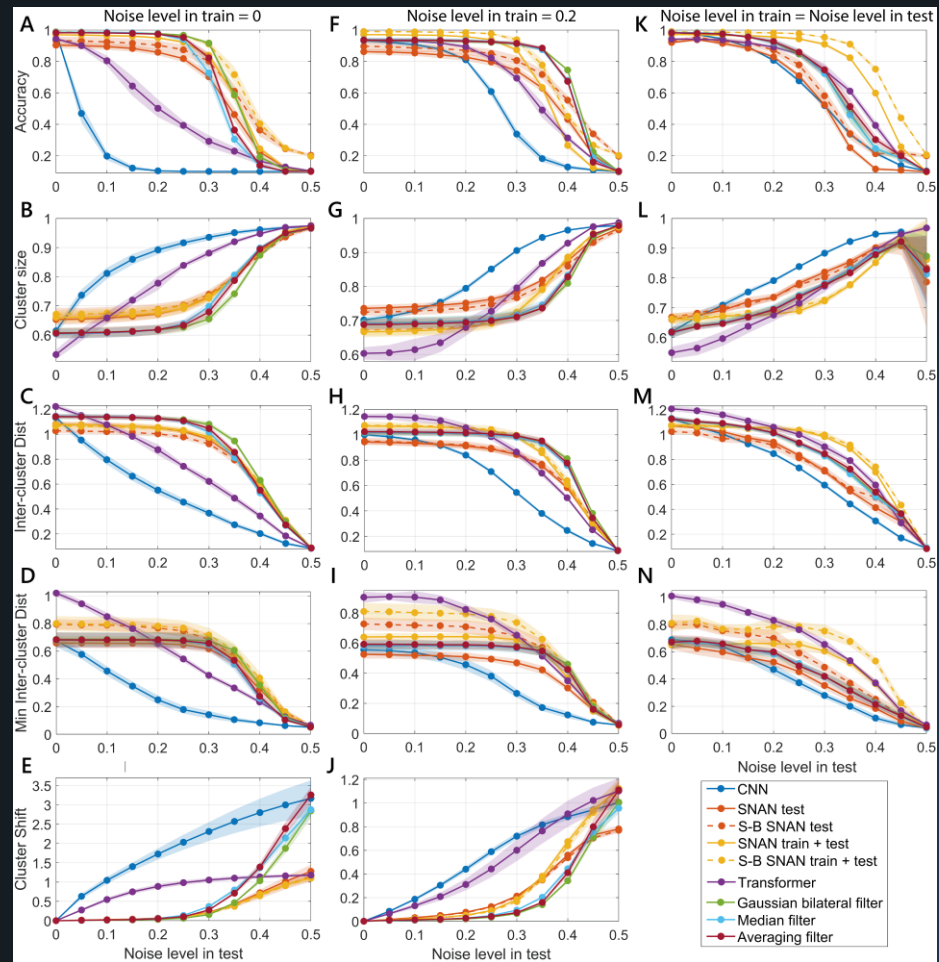
# Гибридная модель СНАС + СНС



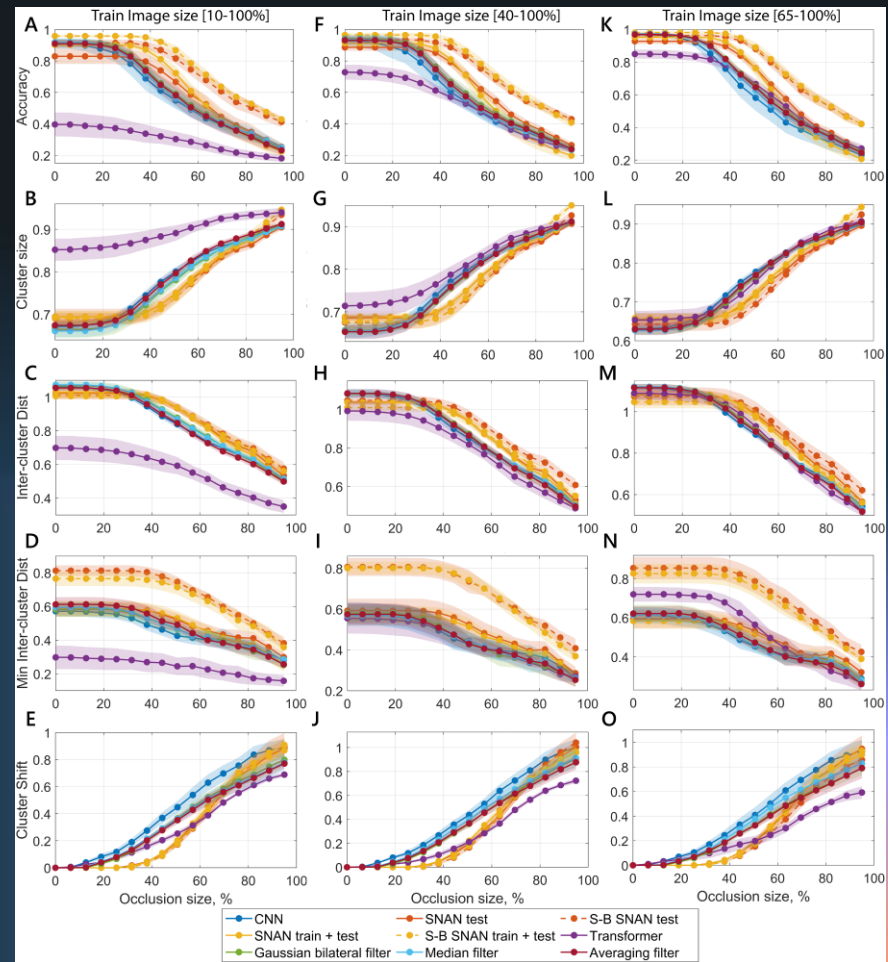
Сравнили эффективность с трансформером:

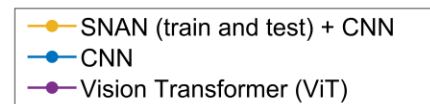
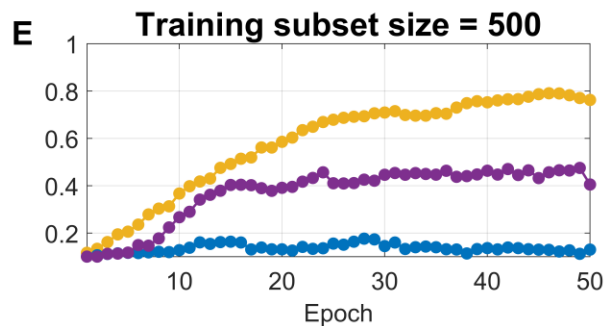
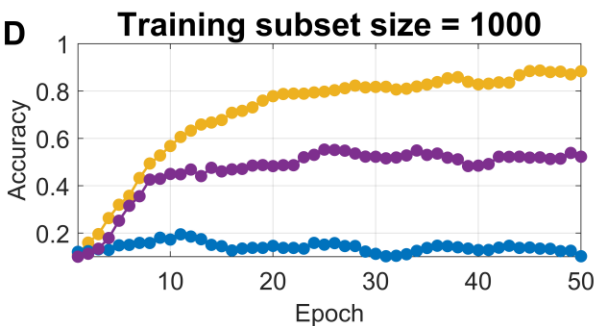
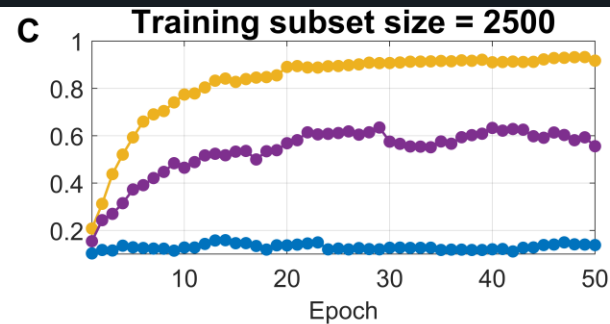
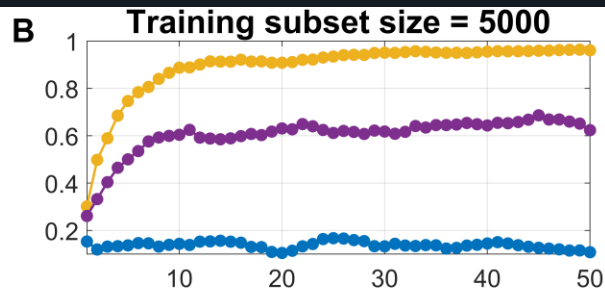
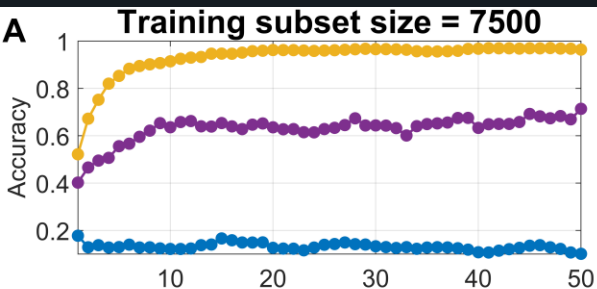


# Импульсный шум

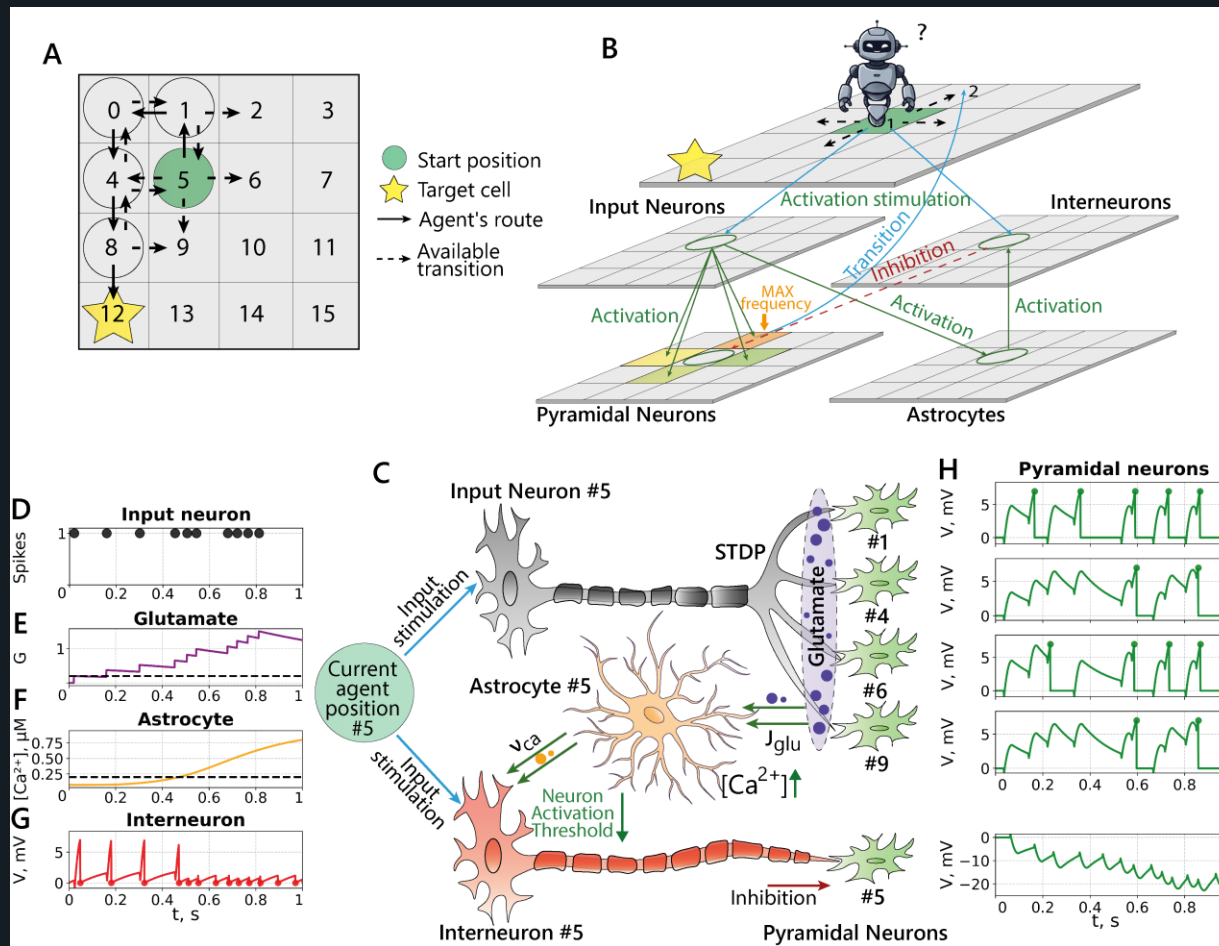


# Окклюзивный шум



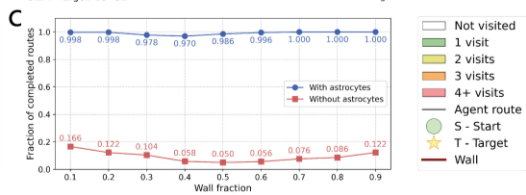
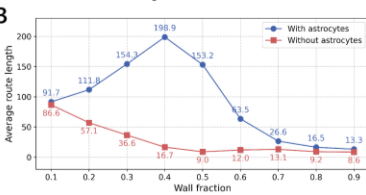
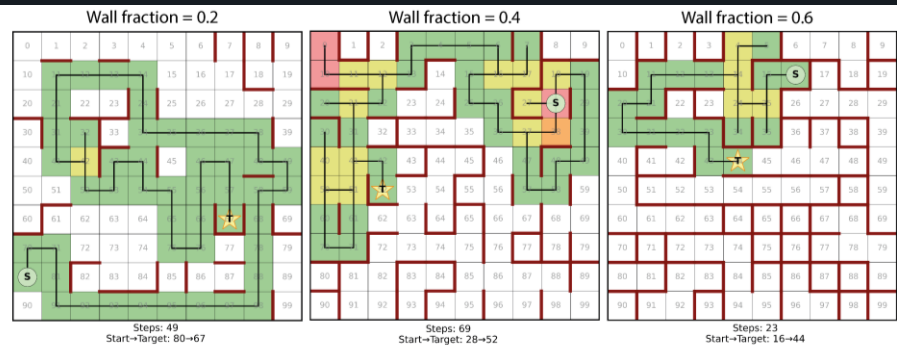


# Мемристивная нейрон-астроцитарная сеть

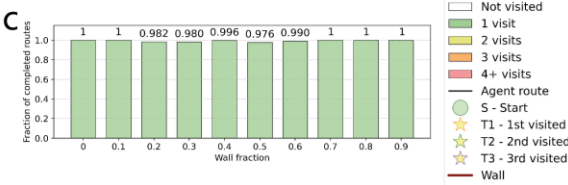
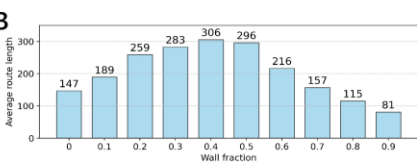
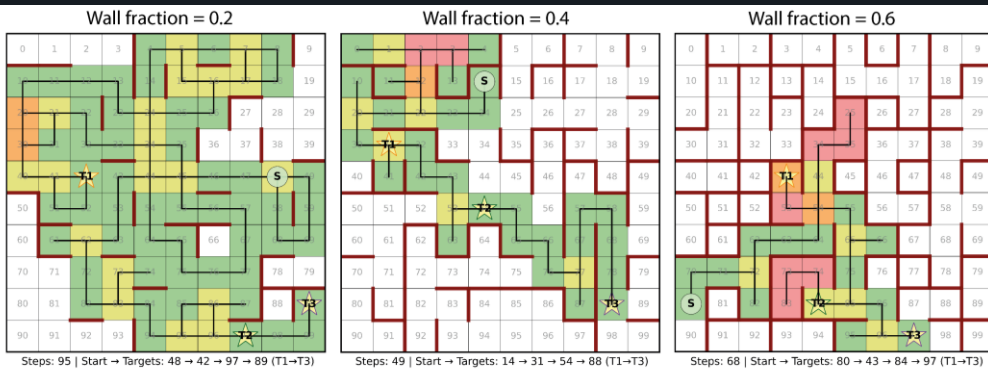




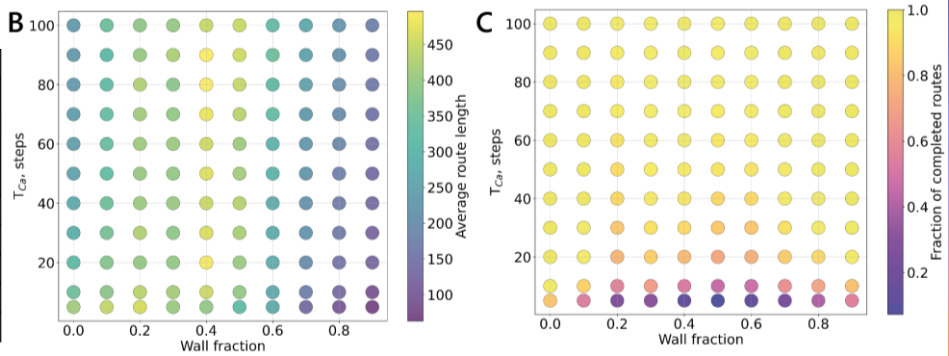
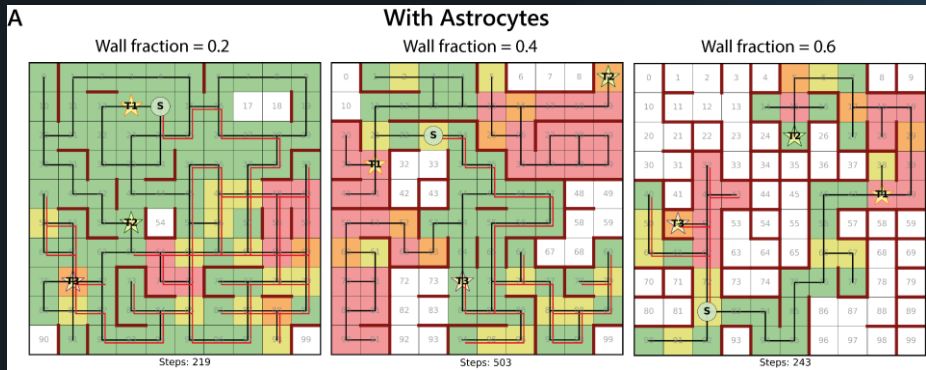
# Среда с препятствиями:



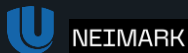
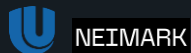
# Несколько целей:



# Многоцелевая задача с возвратом в исходную клетку:



# Спасибо!



Skoltech



Гордлеева  
Сусанна  
Юрьевна

Цыбина  
Юлия  
Александровна

Тюкин  
Иван  
Юрьевич

Заикин  
Алексей  
Анатольевич

Кривоносов  
Михаил  
Игоревич

Казанцев  
Виктор  
Борисович

Горбань  
Александр  
Николаевич

Демин  
Вячеслав  
Александрович