

Реализация интеллектуальных функций в спайковых нейронных сетях (СНС)

Гордлеева С.Ю., к.ф.-м.н.

Лобов С.А., к.б.н.

Храмов А.Е., д.ф.-м.н.

Казанцев В.Б., д.ф.-м.н.

1. Спайковые нейронные сети в задачах нейроуправления

- Модельный нейрон, пластичность**
- Ассоциативное обучение, управление роботом**
- Модель пространственной памяти с негативным подкреплением**
- Нейромышечный интерфейс на основе спайковых нейросетей**

2. Спайковые нейронные сети в астроцитарном окружении

- Функциональная роль астроцитов в мозге**
- Модель рабочей памяти с использованием астроцитов**
- Модель градуального запоминания (“Цветная память”)**

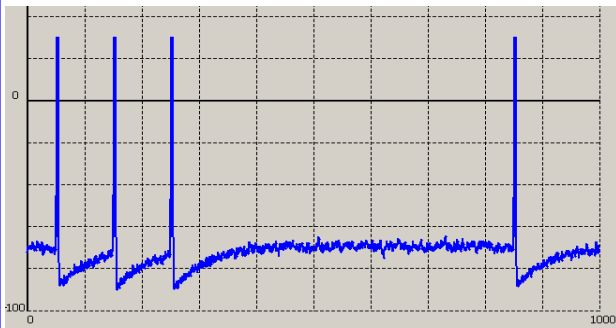
Модель нейрона Ижикевича

$$\frac{dv}{dt} = 0.04v^2 + 5v + 140 - u + I$$

$$\frac{du}{dt} = a(bv - u)$$

$$\text{если } v \geq +30mV, \quad \begin{cases} t_{sp} \leftarrow t \\ v \leftarrow c \\ u \leftarrow u + d \end{cases}$$

v – трансмембранный потенциал
 u – восстановительная переменная
 a, b, c, d – параметры
 I – внешний ток



Внешний ток нейрона

$$I(t) = \xi(t) + I_{syn}(t) + I_{stml}(t)$$

$\xi(t)$ – некоррелированный Гауссовый
 белый шум со средним 0 и
 стандартным отклонением D

$I_{syn}(t)$ – синаптический ток

$I_{stml}(t)$ – ток внешней стимуляции

Синаптический ток

$$I_{syn} = \sum_j w_{ij} g_j y_j(t)$$

w_{ij} – вес синапса, соединяющего
 нейрон j с нейроном I

g_j – коэффициент трансформации
 выходного сигнала нейрона j
 в синаптический ток

$y_{ij}(t)$ – выходной синаптический
 сигнал

Выходной сигнал нейрона - модель Tsodyks & Markram

$$\frac{dx}{dt} = \frac{z}{\tau_{rec}} - u_f x \delta(t - t_{sp})$$

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{y}{\tau_I} + u_f x \delta(t - t_{sp})$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{y}{\tau_I} - \frac{z}{\tau_{rec}}$$

$$\frac{du_f}{dt} = \frac{u_f}{\tau_{facil}} + U(1 - u_f) \delta(t - t_{sp})$$

x, y, z – доли медиатора синапса,
 находящегося в восстановленном,
 активном и инактивированном
 состоянии

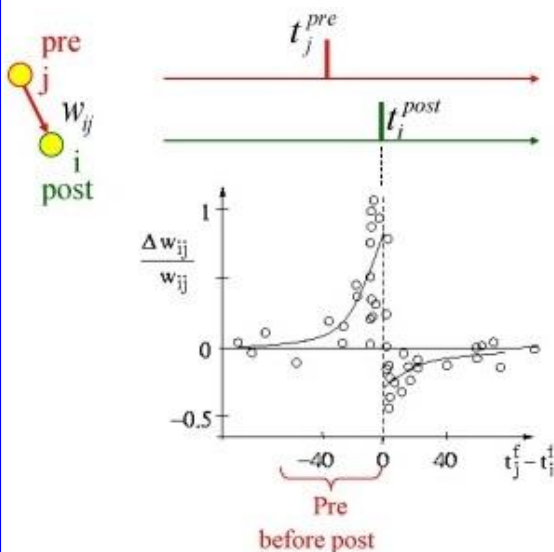
t_{sp} – время генерации импульсов
 пресинаптическим нейроном

$\tau_I, \tau_{rec}, \tau_{fac}$ – характерные времена
 процессов инактивации,
 восстановления и фасилитации

u – доля медиатора,
 высвобождаемого при каждом
 спайке из доступного резерва x



STDP-пластичность
(Spike-Timing Dependent
Plasticity – пластичность,
зависящая от соотношения
времени спайков)

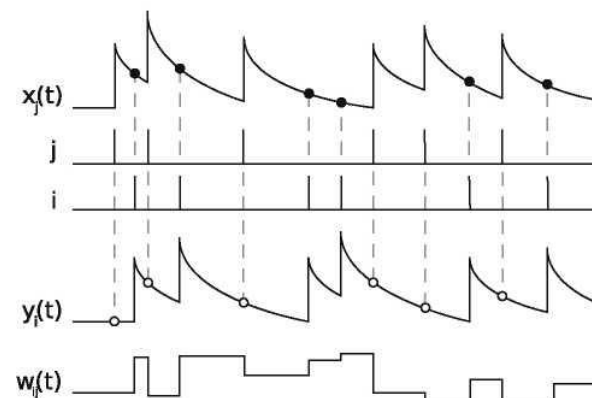


Реализация STDP с помощью локальных переменных

$$\frac{ds_i}{dt} = -\frac{s_i}{\tau} + \delta(t - t_i)$$

$$\frac{ds_j}{dt} = -\frac{s_j}{\tau} + \delta(t - t_j - \tau_{ij})$$

s_i, s_j – локальные переменные,
отслеживающие активность
постсинаптического и
пресинаптического нейронов



парное правило STDP

$$\frac{dw_{ij}}{dt} + = F_+(w_{ij})s_j(t)\delta(t - t_i)$$

$$\frac{dw_{ij}}{dt} - = -F_-(w_{ij})s_i(t)\delta(t - t_j - \tau_{ij})$$

$$F_+(w_{ij}) = \lambda(1 - w_{ij}) \quad F_-(w_{ij}) = \lambda\alpha w_{ij}$$

λ – скорость обучения
 α – параметр асимметрии,
определяющий соотношение
процессов ослабления и усиления
синапса

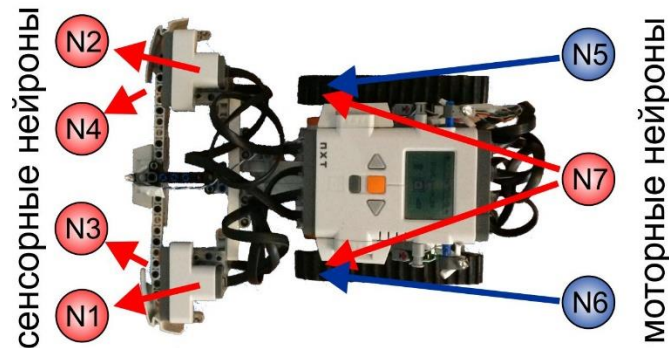
триpletное правило STDP

$$\frac{dw_{ij}}{dt} + = F_+(w_{ij})S_j^1(t)S_i^2(t)\delta(t - t_i^{sp})$$

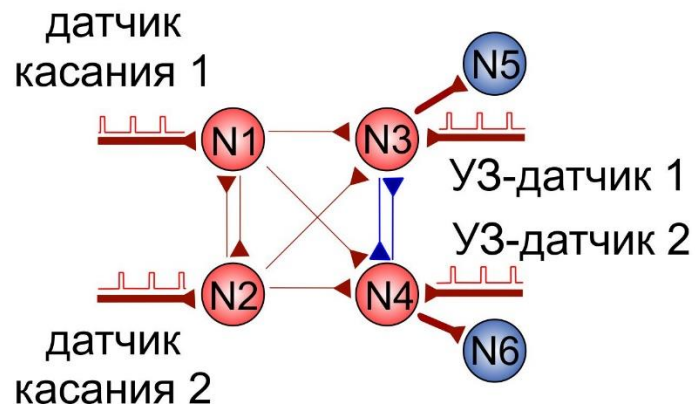
S_j^1, S_i^2 – «быстрая» и «медленная»
локальные переменные,
отслеживающие активность
пресинаптического и
постсинаптического нейронов

Протокол сопряжения СНС с роботом

самообучающийся робот

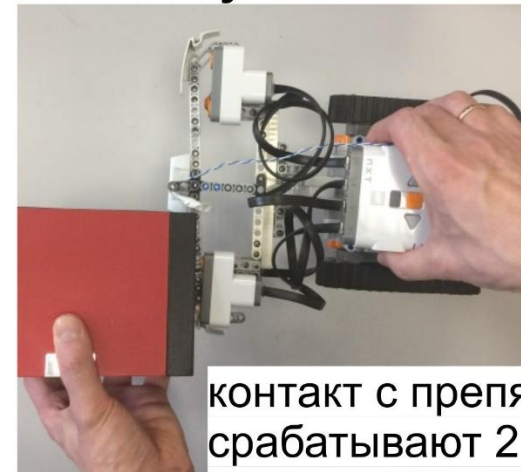


СНС



Реакция по умолчанию:
объезд препятствия
при столкновении

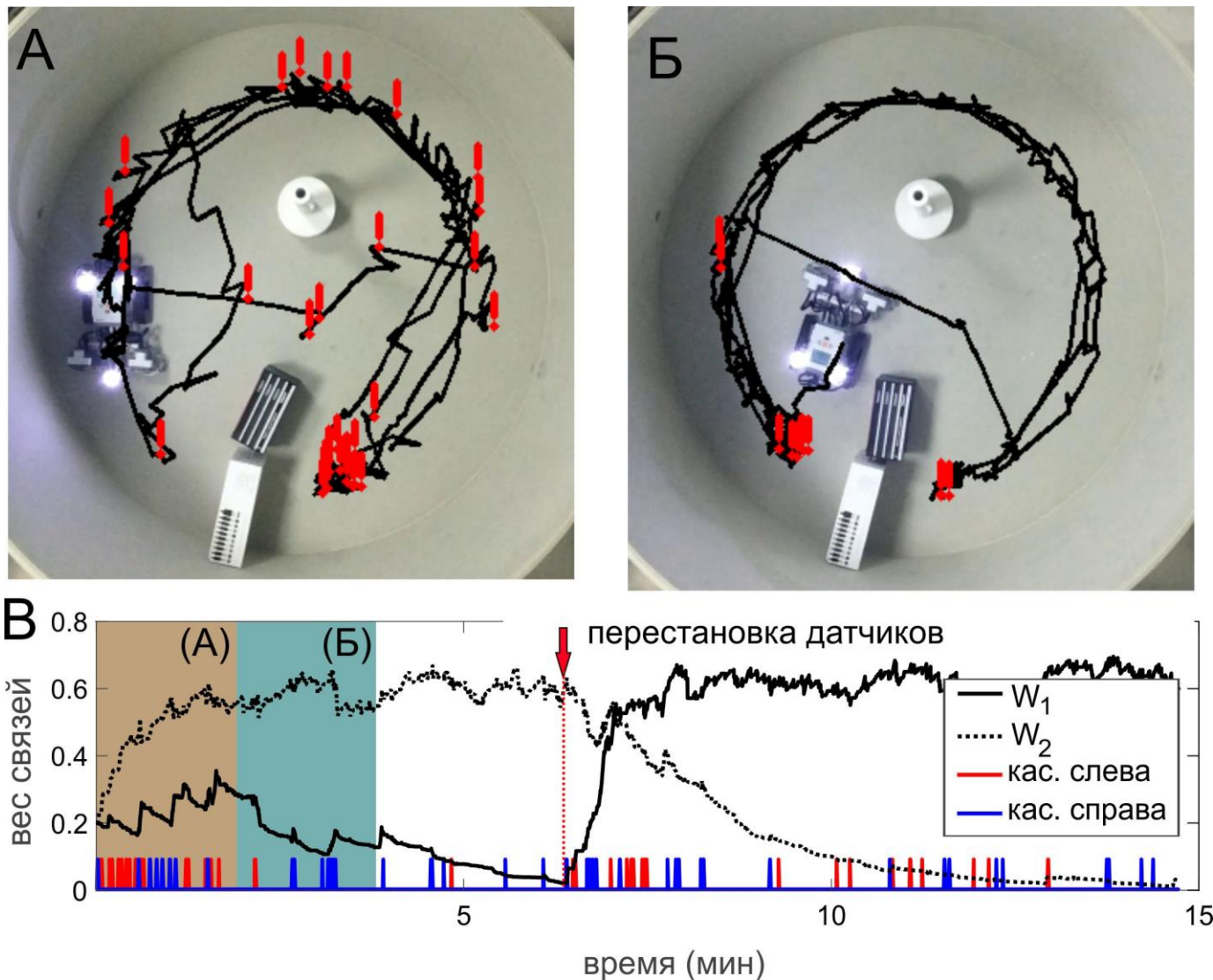
Обучение:



контакт с препятствием
срабатывают 2 датчика
с одной стороны

Реакция после обучения:
объезд препятствия
без столкновения

Ассоциативное обучение в СНС с временным кодированием



Робот, управляемый СНС демонстрирует ассоциативное обучение и возможность переобучаться при движении в реальном мире

5. Самообучающийся нейроробот: моделирование оперантного обучения

Робот обучается в процессе взаимодействия с внешней средой

Постоянная активность одного из мотонейронов обеспечивает движение робота вперед

В начале эксперимента робот объезжает препятствия, только коснувшись их:

! - моменты касания



5. Самообучающийся нейроробот: моделирование оперантного обучения

Робот обучается в процессе взаимодействия с внешней средой

Происходит ассоциирование сигналов с датчика касания и ультразвукового датчика

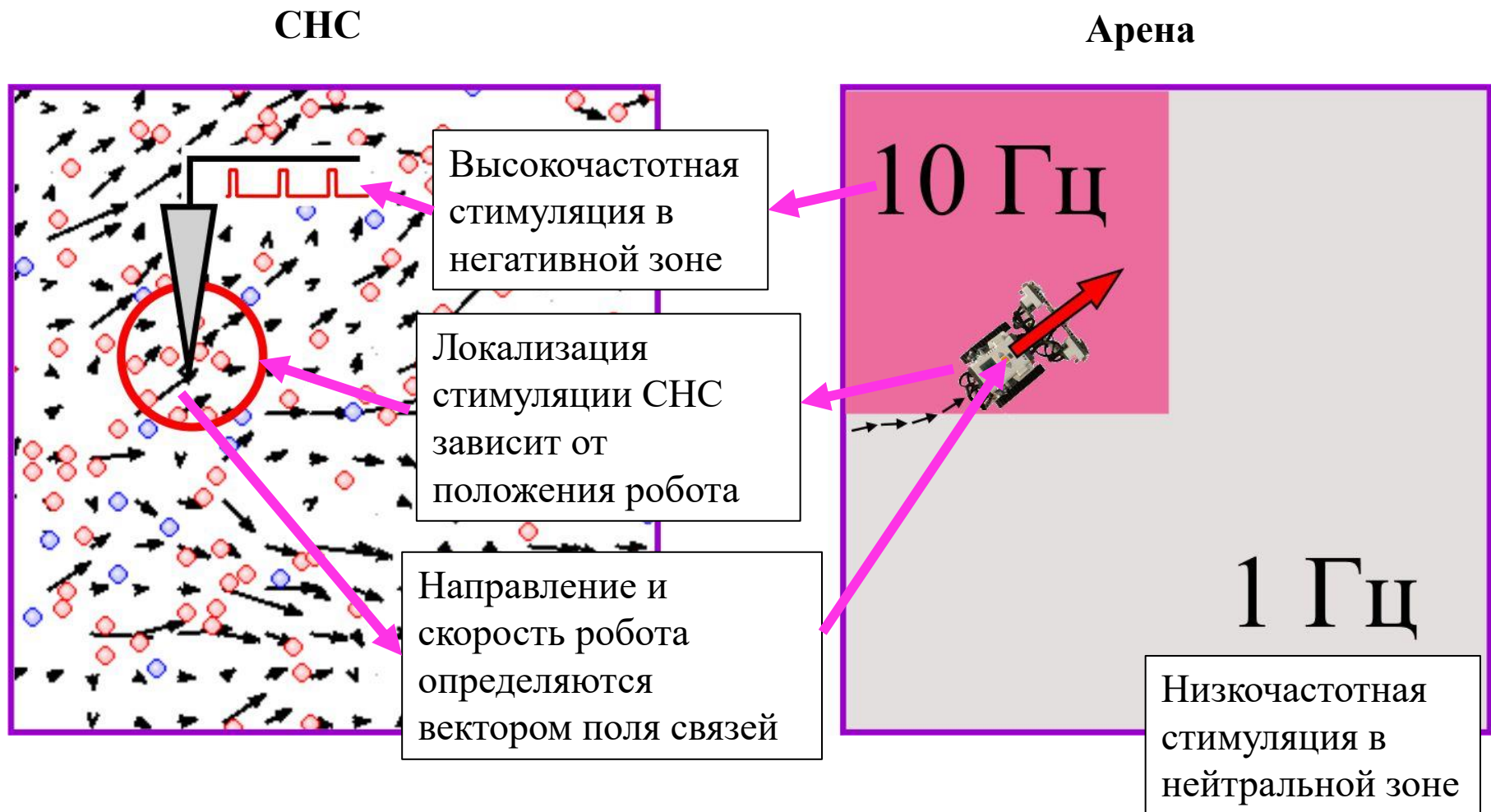
Сила связей между нейронами, активированными в одно и тоже время, усиливается

В результате самообучения робот начинает объезжать препятствия заранее, не касаясь их

Робот способен переобучиться при смене положения ультразвуковых датчиков расстояния



Протокол сопряжения СНС с роботом

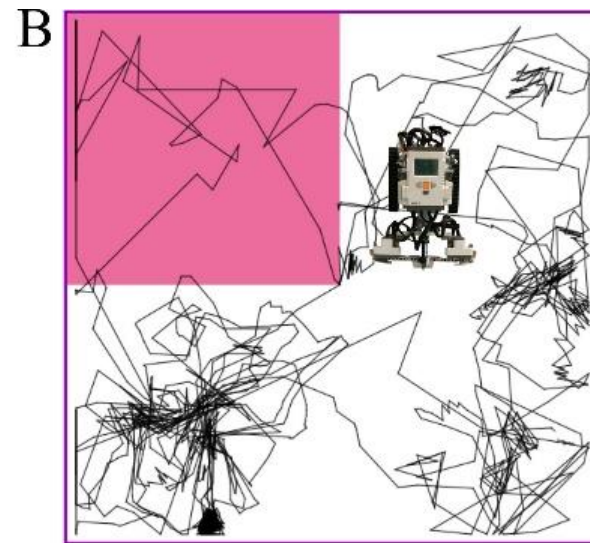
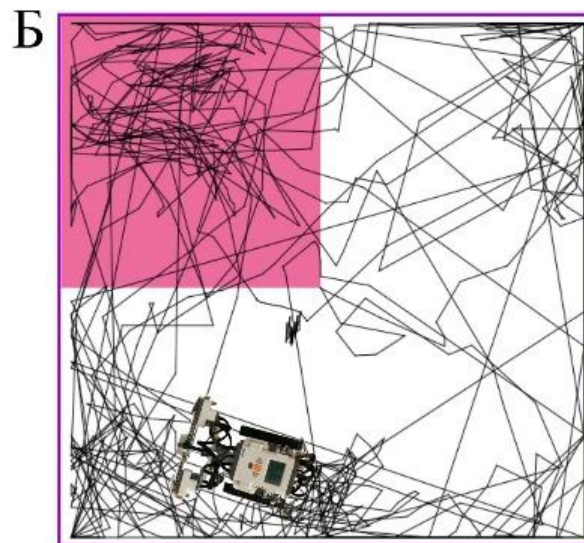
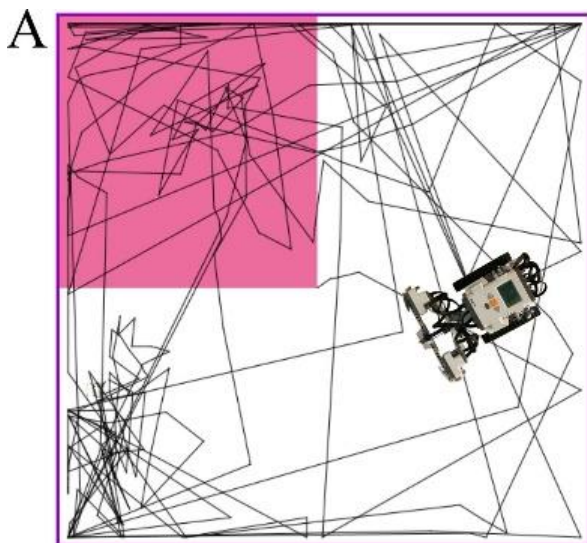


до обучения

при обучении

после обучения

Треки перемещения робота



Время нахождения в негативной зоне

$$t = 48.1\% \pm 2.8\%$$

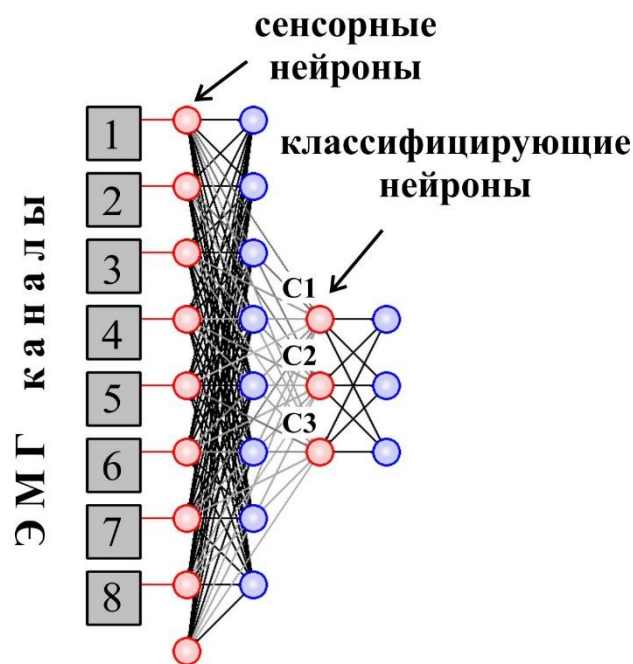
$$t = 25.2\% \pm 2.3\%$$

$$t = 7.6\% \pm 0.8$$

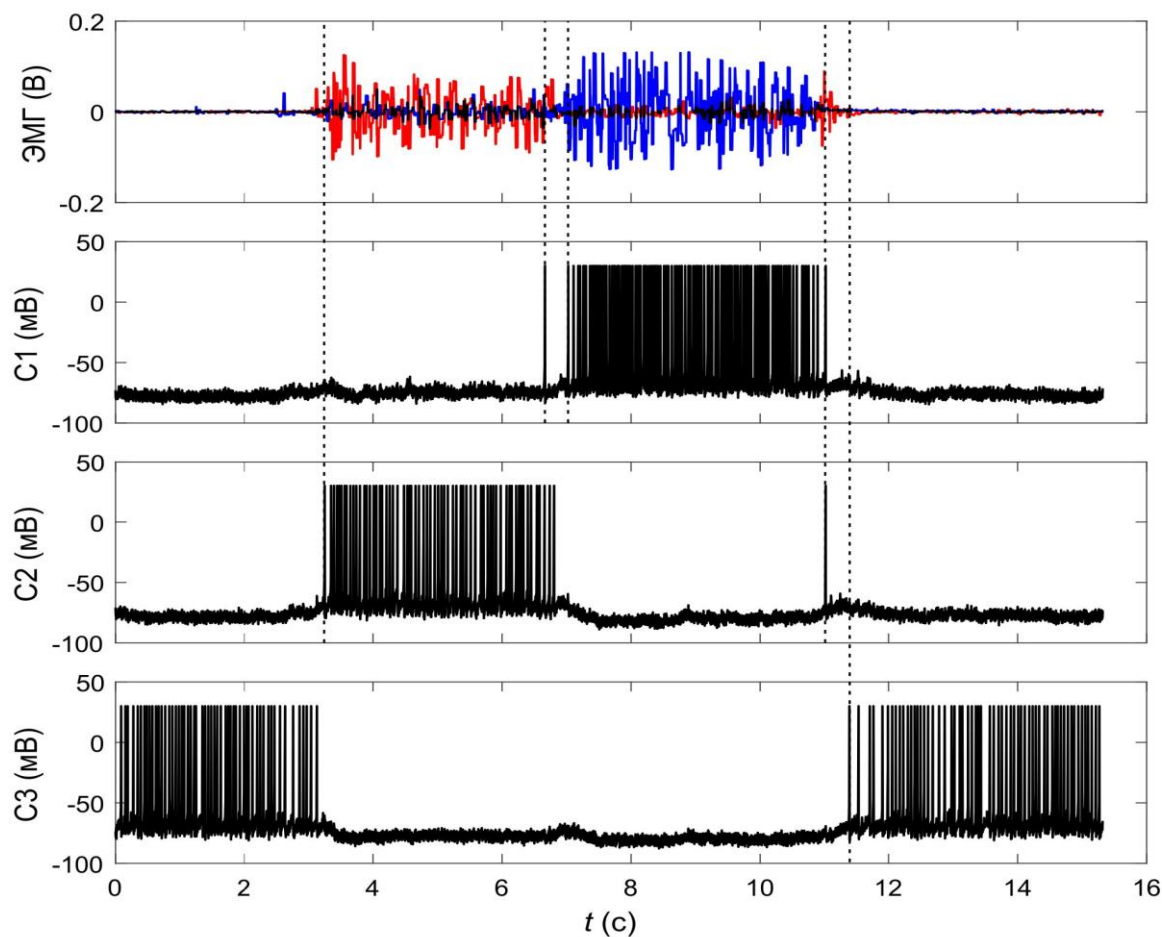
Спайковая сеть нейронов места запоминает локализацию стимуляции
Робот избегает негативной зоны

Нейромышечный интерфейс на основе СНС

СНС

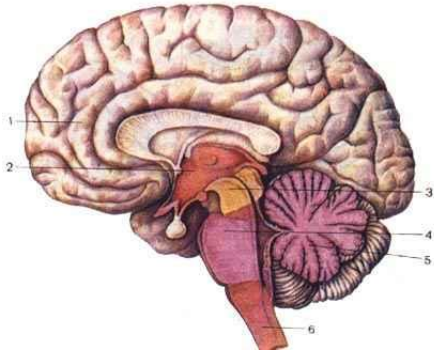


Сигналы в СНС после обучения

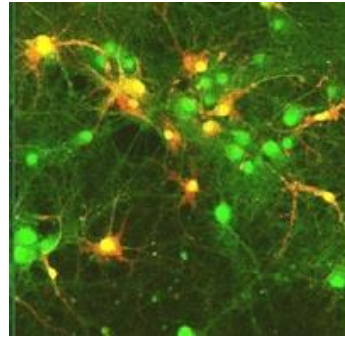


СНС обучается путем ассоциирования одновременно активированных нейронов

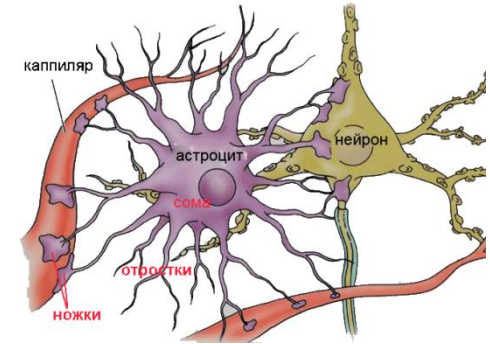
Brain



Neuron-astrocytic networks

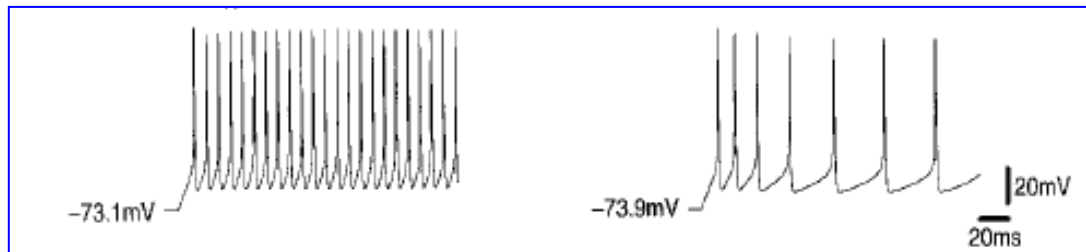


Neuron-astrocyte interaction



Neurons being the main signal cells of the brain provide the transmission and transformation of sequences of electrical pulses in a neural network.

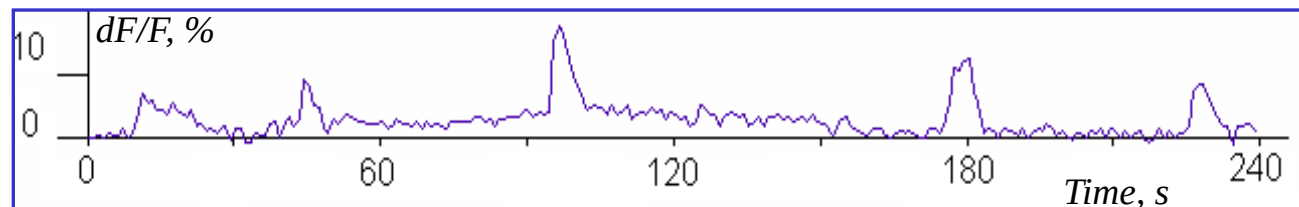
Astrocytes are not electrically excitable cells. Astrocytes display a form of cellular **excitability** based on **variations of the Ca^{2+} concentration** in the cytosol.



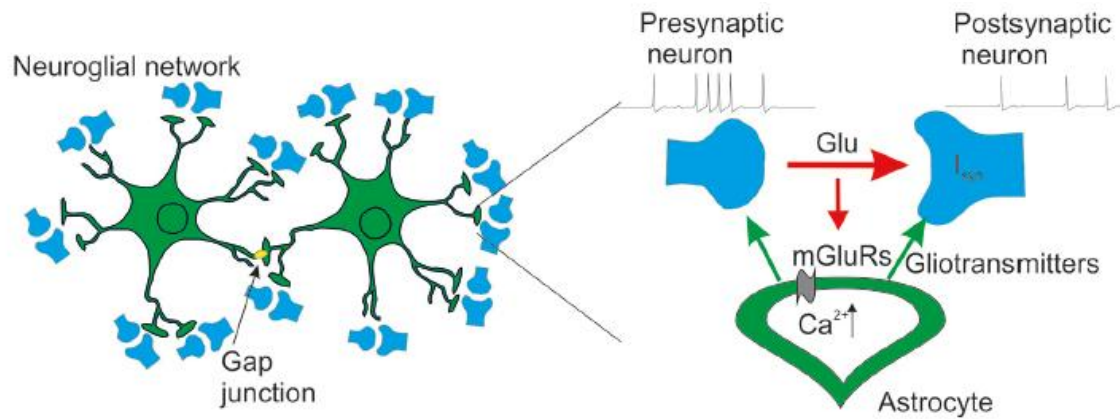
Electrical activity in neurons (1 ms)

Izhikevich E.M. Dynamical Systems. The MIT press, 2007

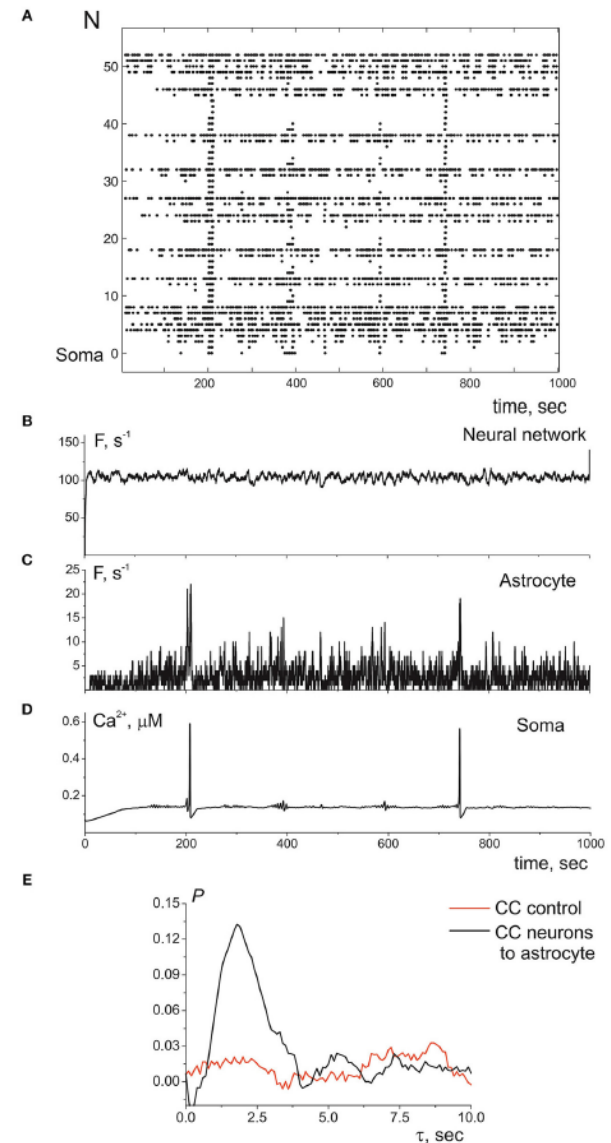
Ca^{2+} - activity in astrocyte (1 s)



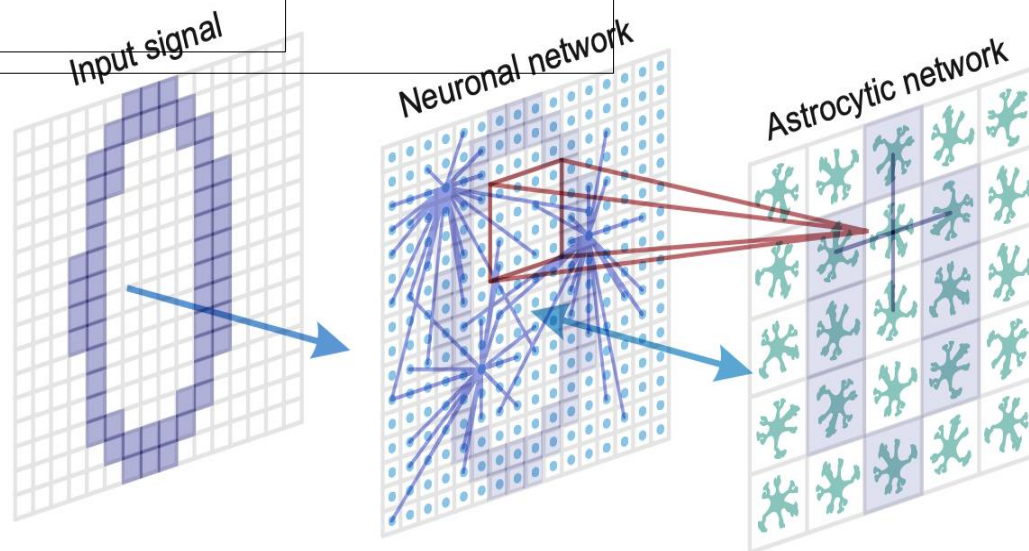
Астроцитарная модуляция передачи информации в нейронной сети



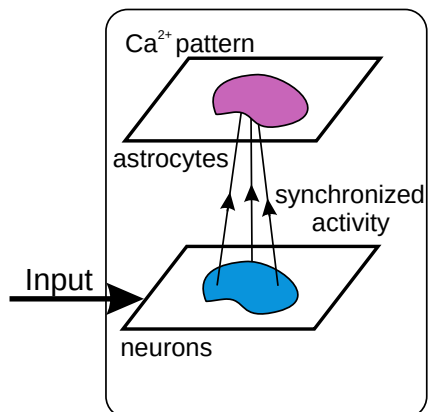
With agreement with experimental data, model astrocytes respond to neuronal bursts with a variable latency of **several seconds**. Such long latency cannot be explained by intracellular Ca^{2+} diffusion, IP3 production or Ca^{2+} release from Ca^{2+} stores which are much faster. **A model predicts explanation** that synaptically released glutamate does not directly trigger Ca^{2+} events in astrocytes, but modulates their spatial temporal properties: the frequency, the durations and the spreads.



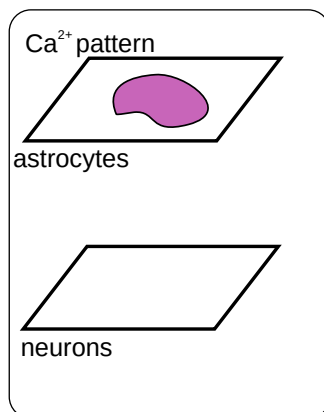
Кратковременная рабочая память в модели спайковой нейрон-астроцитарной сети



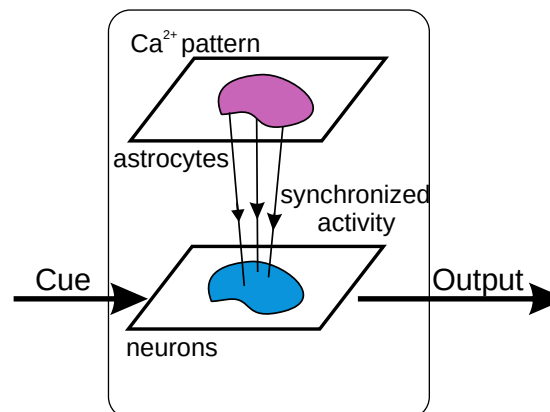
Learning



Storage

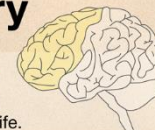


Retrieval



Working Memory

The ability to temporarily hold and manipulate information for cognitive tasks performed in daily life.



Working memory holds information for a few seconds. It is temporary.



Working memory can hold only five to seven items at a time. It has a small capacity.



Working memory holds and manipulates information.



Working memory depends on control of attention and mental effort.

Pinterest.ru

Модель спайкового нейрона Ижикевича

$$\frac{dV^{(i,j)}}{dt} = 0.04V^{(i,j)(2)} + 5V^{(i,j)} - U^{(i,j)} + 140 + I_{\text{app}}^{(i,j)} + I_{\text{syn}}^{(i,j)};$$

$$\frac{dU^{(i,j)}}{dt} = a(bV^{(i,j)} - U^{(i,j)});$$

$$\text{if } V^{(i,j)} \geq 30 \text{ mV, then } \begin{cases} V^{(i,j)} \leftarrow c \\ U^{(i,j)} \leftarrow U^{(i,j)} + d, \end{cases}$$

Импульсная связь

$$I_{\text{syn}}^{(i,j)} = \sum_{k=1}^{N_{\text{in}}^{(i,j)}} \frac{g_{\text{syn}}^{(i,j)} (E_{\text{syn}} - V^{(i,j)})}{1 + \exp(\frac{-V_{\text{pre}}^k}{k_{\text{syn}}})};$$

Воздействие нейронов на астроциты

$$\frac{dG^{(i,j)}}{dt} = -\alpha_{\text{glu}} G^{(i,j)} + k_{\text{glu}} \Theta(V^{(i,j)} - 30 \text{ mV}),$$

Воздействие астроцитов на нейроны

$$g_{\text{syn}} = \eta + \nu_{Ca},$$

$$\nu_{Ca} = \nu_{Ca}^* \Theta(Ca^{(m,n)} - Ca_{\text{thr}})$$

Модель кальциевой динамики астроцита

$$\frac{dCa^{(m,n)}}{dt} = J_{\text{ER}}^{(m,n)} - J_{\text{pump}}^{(m,n)} + J_{\text{leak}}^{(m,n)} + J_{\text{in}}^{(m,n)} - J_{\text{out}}^{(m,n)} + \text{diff}_{Ca}^{(m,n)};$$

$$\frac{dh^{(m,n)}}{dt} = a_2 \left(d_2 \frac{IP_3^{(m,n)} + d_1}{IP_3^{(m,n)} + d_3} (1 - h^{(m,n)}) - Ca^{(m,n)} h^{(m,n)} \right);$$

$$\frac{dIP_3^{(m,n)}}{dt} = \frac{IP_3^* - IP_3^{(m,n)}}{\tau_{IP_3}} + J_{\text{PLC}\delta}^{(m,n)} + J_{\text{glu}}^{(m,n)} + \text{diff}_{IP_3}^{(m,n)},$$

$$J_{\text{ER}} = c_1 \nu_1 Ca^3 h^3 IP_3^3 \frac{(c_0/c_1 - (1 + 1/c_1)Ca)}{((IP_3 + d_1)(IP_3 + d_5))^3};$$

$$J_{\text{pump}} = \frac{\nu_3 Ca^2}{k_3^2 + Ca^2};$$

$$J_{\text{leak}} = c_1 \nu_2 (c_0/c_1 - (1 + 1/c_1)Ca);$$

$$J_{\text{in}} = \frac{\nu_6 IP_3^2}{k_2^2 + IP_3^2};$$

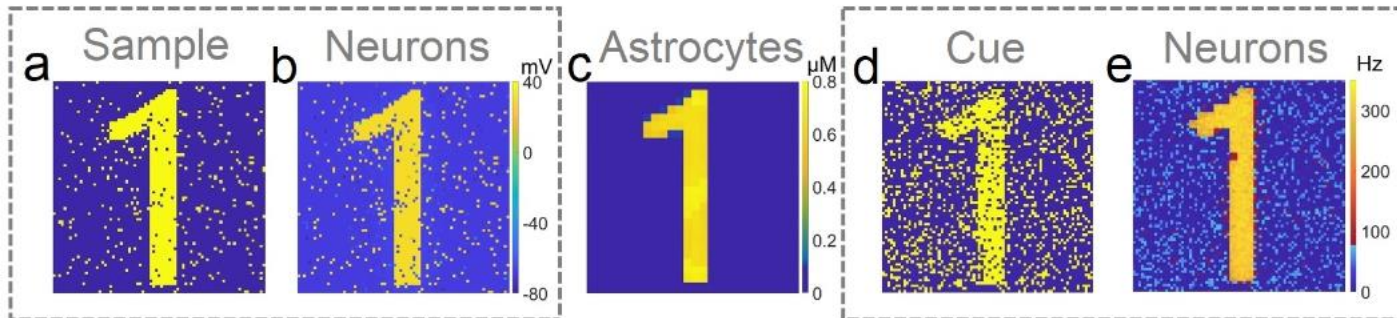
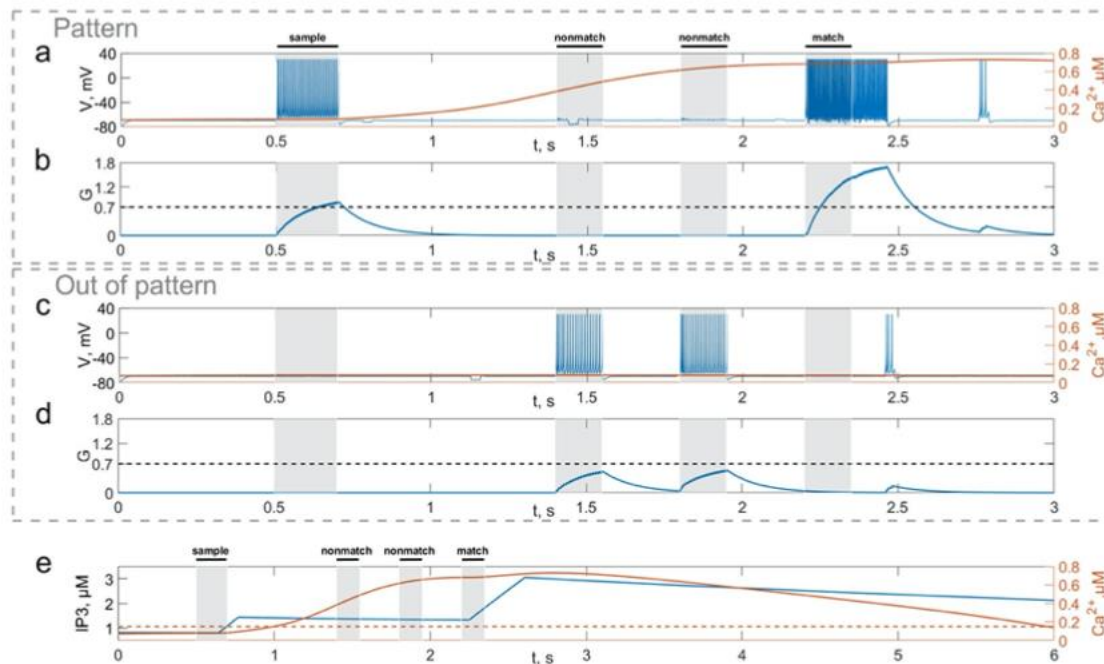
$$J_{\text{out}} = k_1 Ca;$$

Диффузионная связь между астроцитами

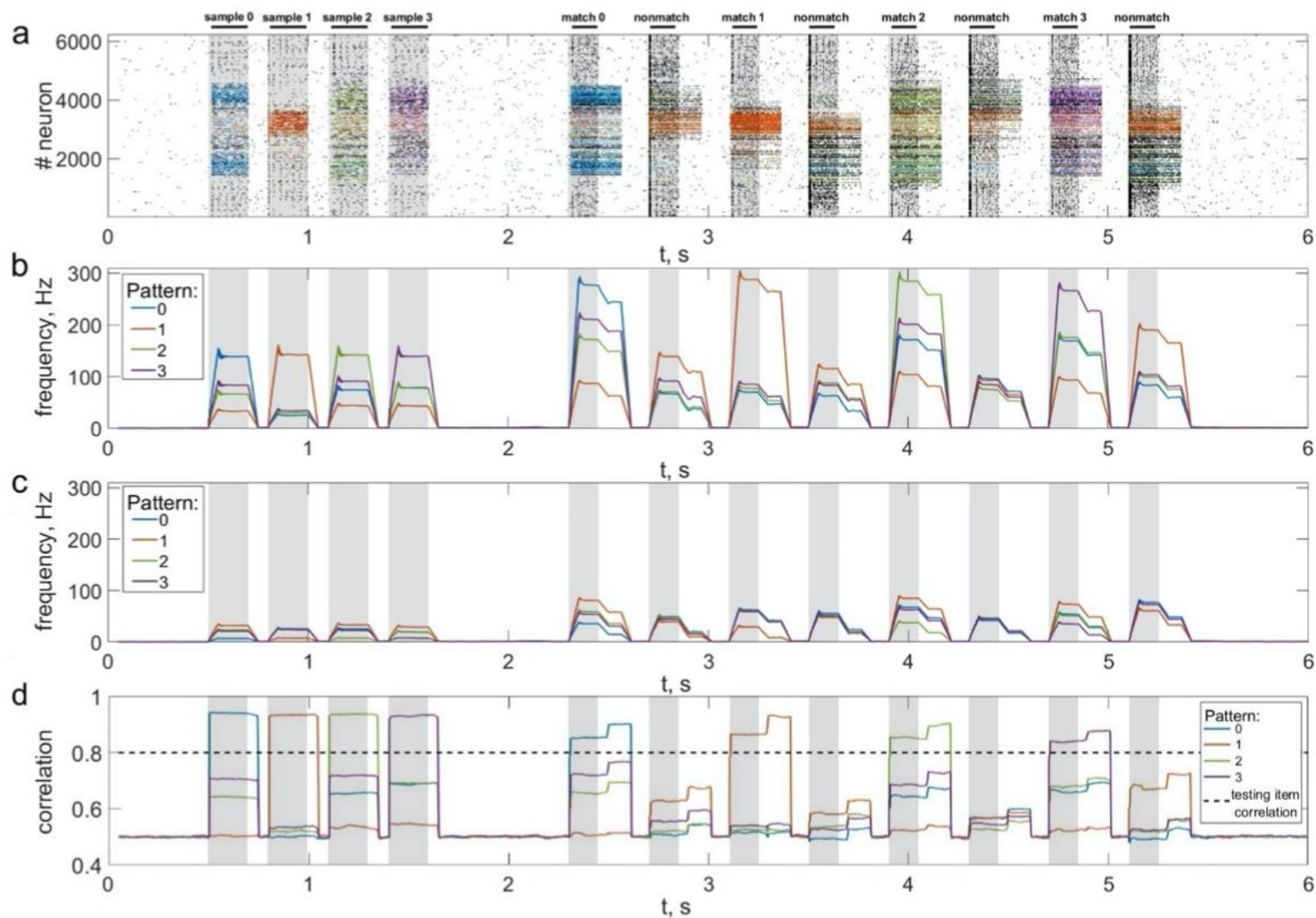
$$\text{diff}_{Ca}^{(m,n)} = d_{Ca} (\Delta Ca)^{(m,n)};$$

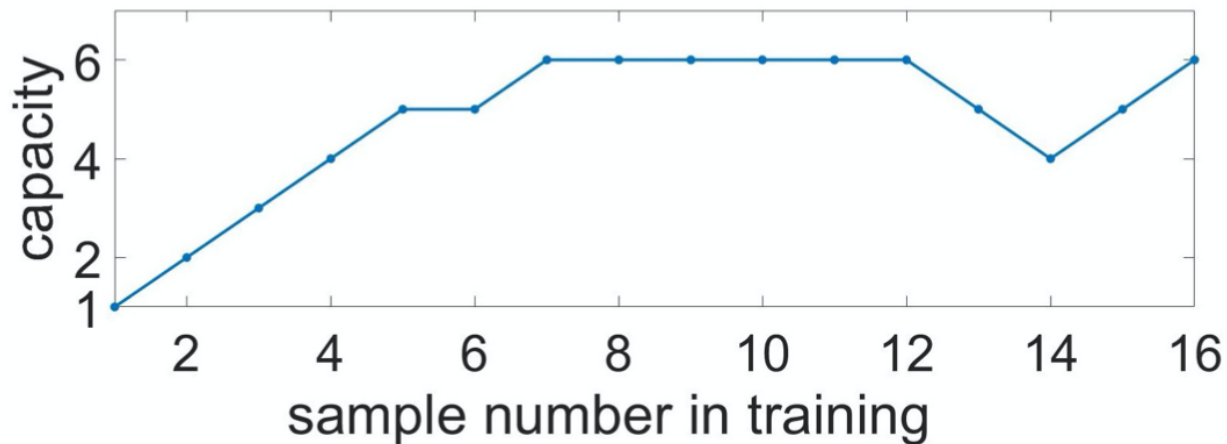
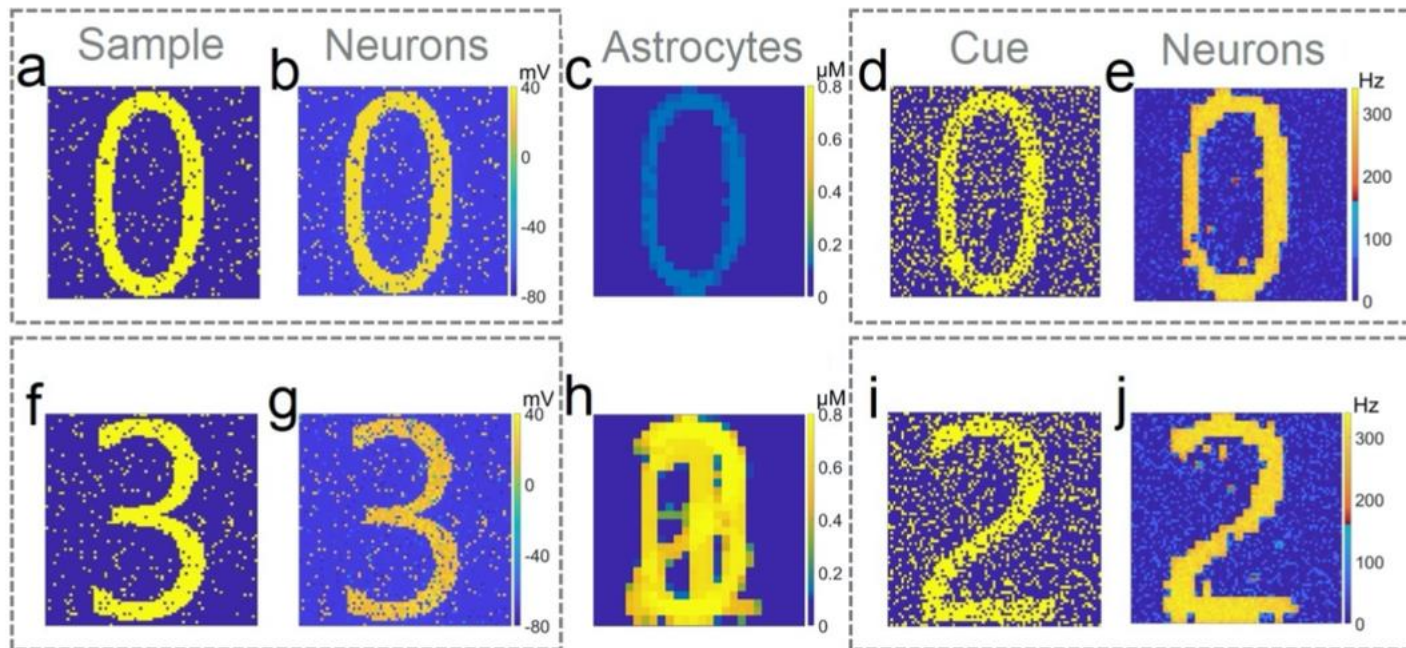
$$\text{diff}_{IP_3}^{(m,n)} = d_{IP_3} (\Delta IP_3)^{(m,n)};$$

Кратковременная рабочая память в модели спайковой нейрон-астроцитарной сети



Кратковременная рабочая память в модели спайковой нейрон-астроцитарной сети





Кратковременная рабочая память в модели спайковой нейрон-астроцитарной сети

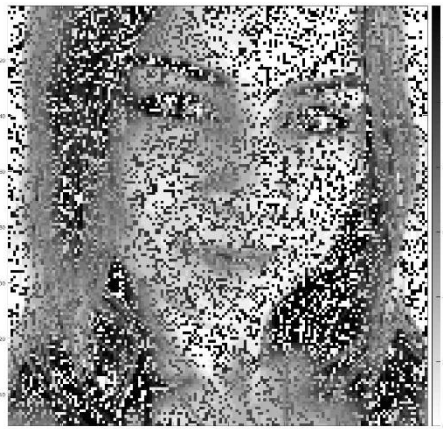
Входной сигнал



Кальциевая динамика в астроцитах



Зашумленный входной сигнал



Частота генерации в нейронной сети



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!