

# Компьютерное моделирование импульсных нейронных сетей с мемристорными связями

С.н.с. ИФП СО РАН, к.т.н. М.С. Тарков

# Искусственный интеллект

```
graph TD; A[Искусственный интеллект] --> B[Классический ИИ]; A --> C[Вычислительный интеллект];
```

## Классический ИИ

(символьная парадигма):

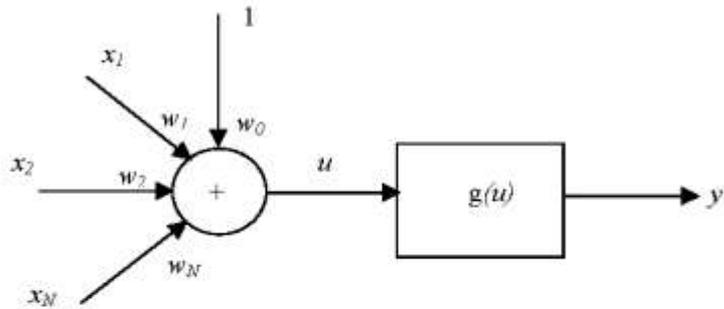
автоматизация  
доказательства теорем,  
экспертные системы,...

## Вычислительный интеллект

(коннекционистская  
парадигма):

нейронные сети,  
нечеткие системы,  
байесовы сети,  
иерархическая временная  
память, ...

## Нейрон Маккаллока-Питса

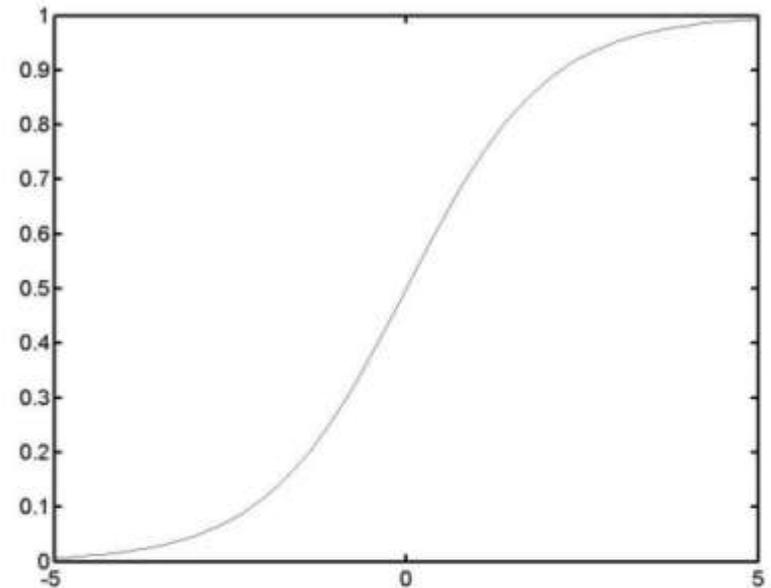


$$y = g\left(\sum_{i=0}^N w_i x_i\right)$$

$$g(s) = \begin{cases} 1, & \text{если } s > 0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$g(s) = \begin{cases} 1, & \text{если } s > 0 \\ -1, & \text{иначе} \end{cases}$$

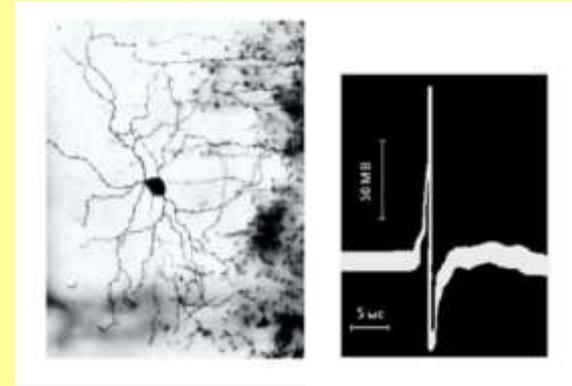
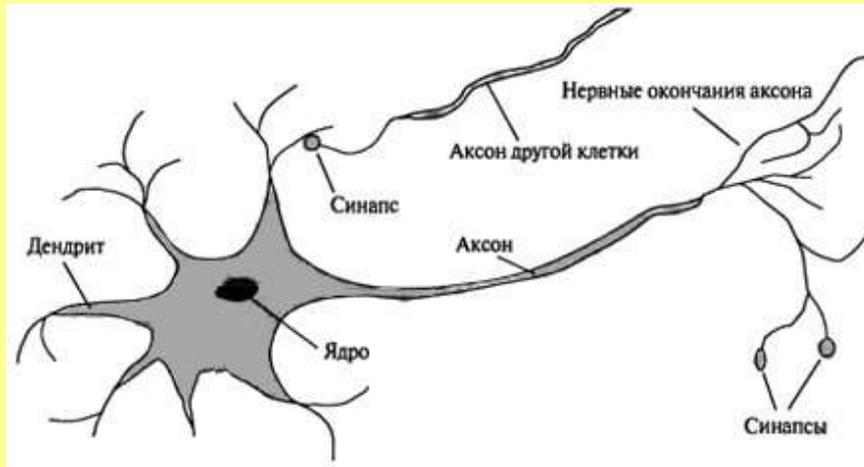
## Сигмоидальный нейрон



$$g(s) = \frac{1}{1 + e^{-\beta s}}$$

$$g(s) = \tanh(\beta s)$$

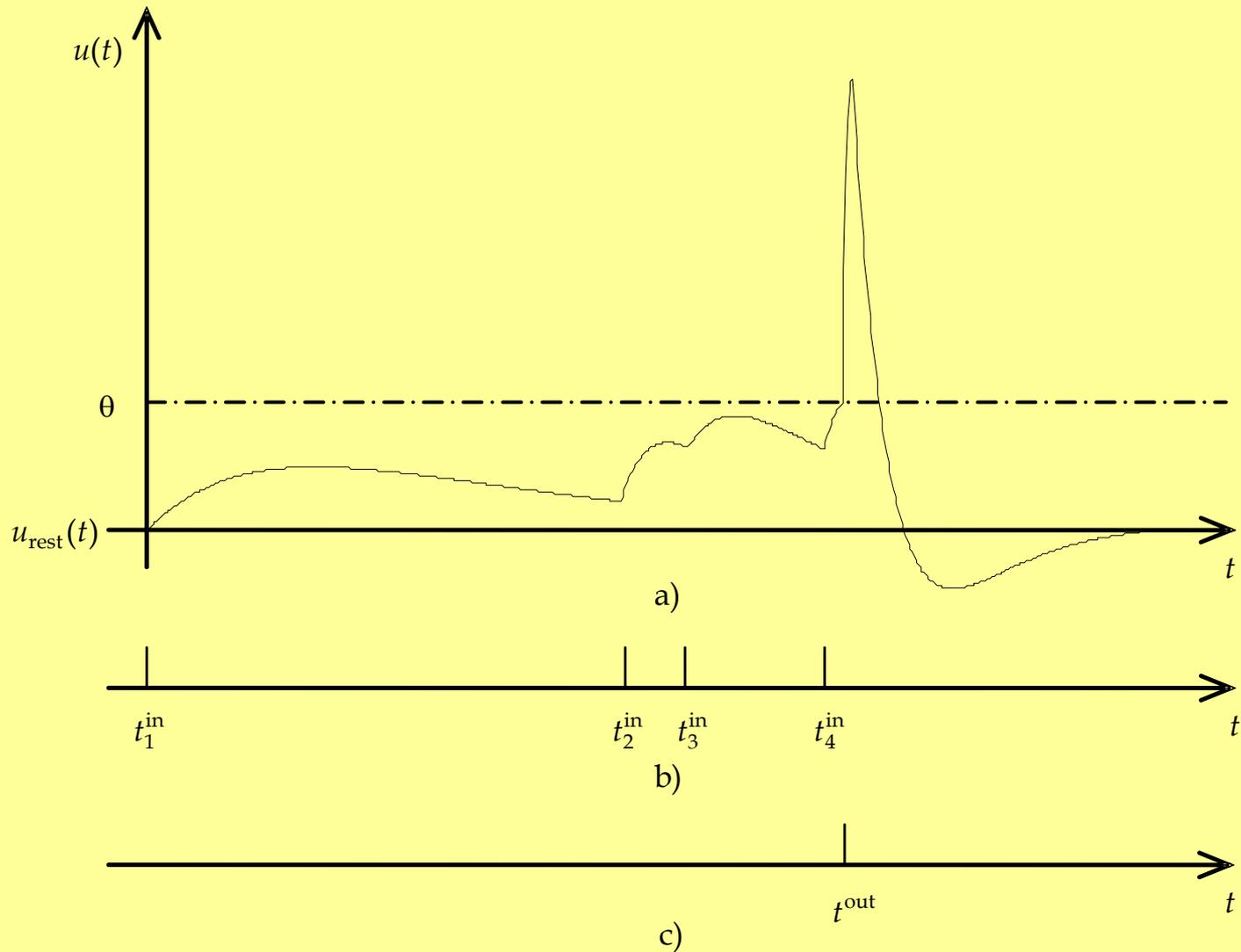
# Биологический нейрон



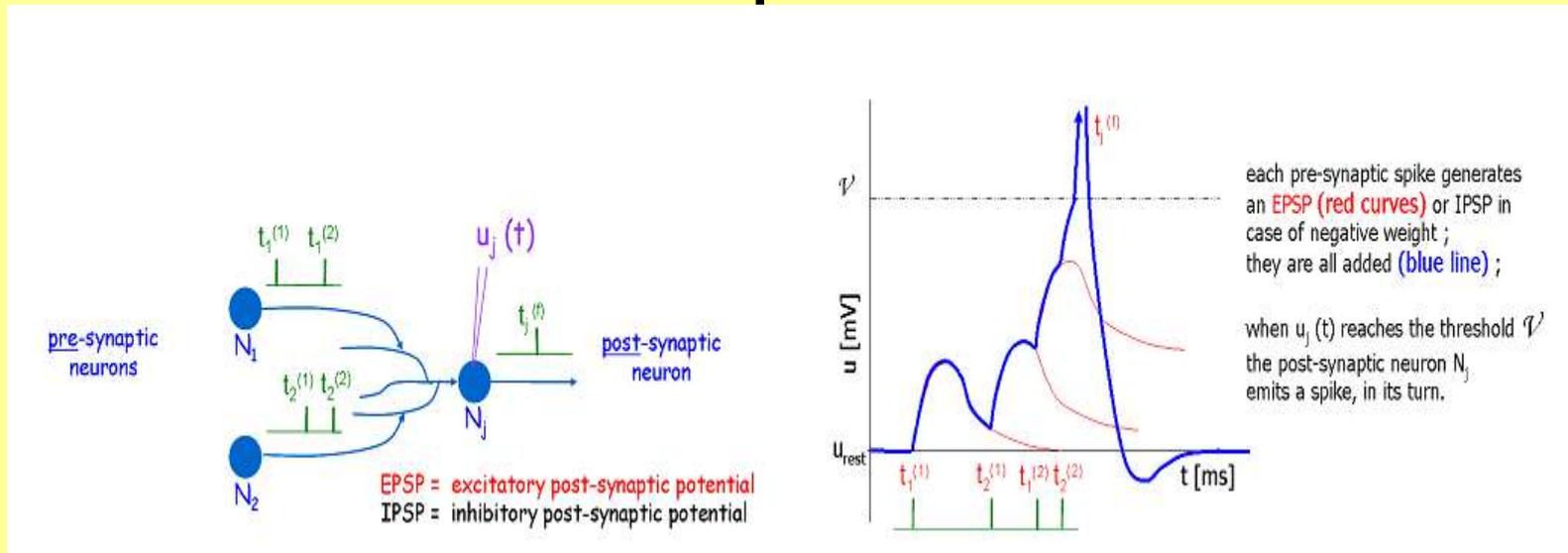
Биологический нейрон – нелинейная динамическая система, динамика которой носит вероятностный характер. Получая электрические **импульсы (спайки)** от других нейронов через синапсы, нейрон накапливает **потенциал** в теле клетки. Накопление необходимого количества потенциала заставляет нейрон выработать импульс, который передастся через аксон на синапсы других нейронов. После выработки **спайка** нейрон переходит в **рефрактерный период** (порядка 2-30 мс), в течение которого вероятность спайка резко снижается.

# Биологический нейрон

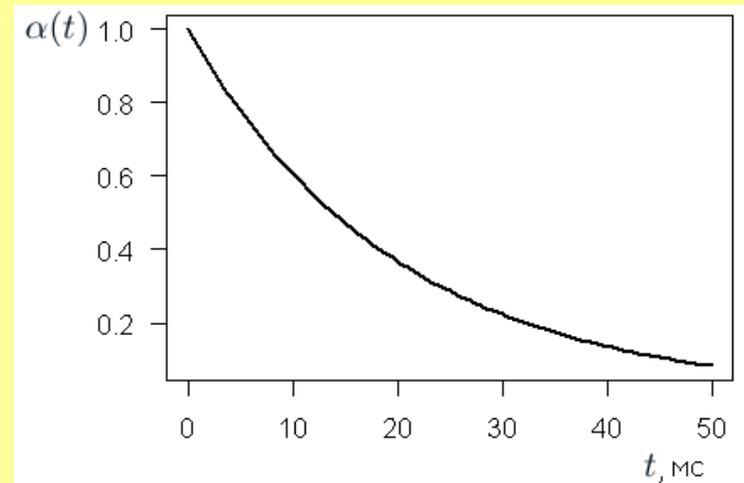
## Возбуждение тела нейрона



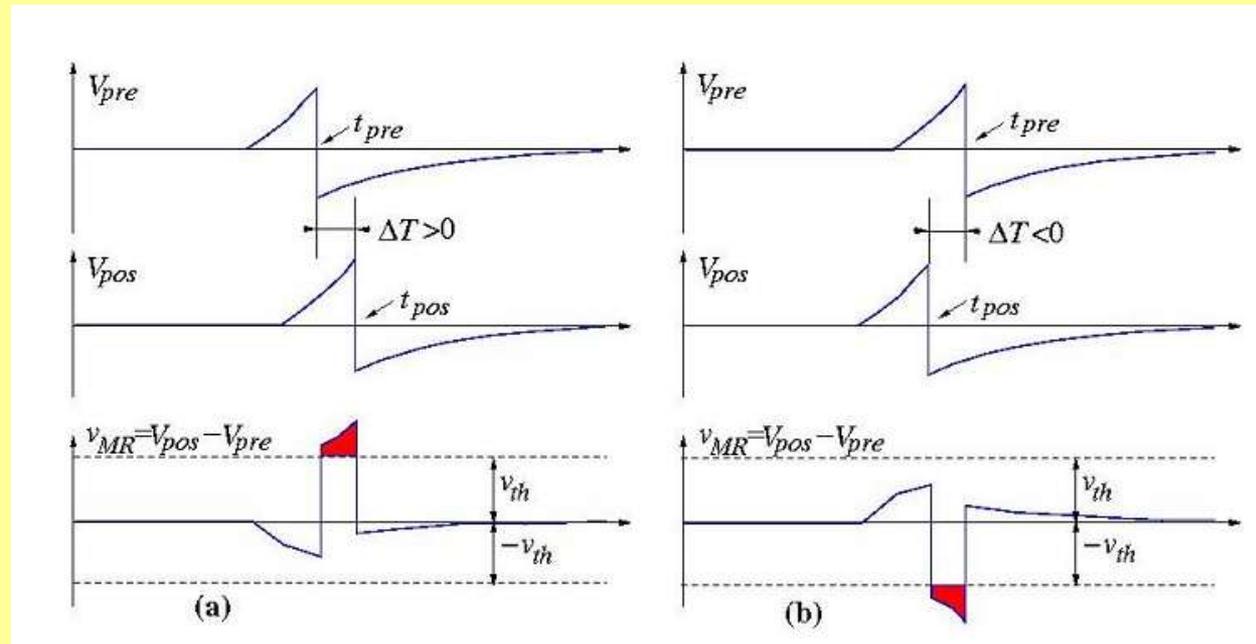
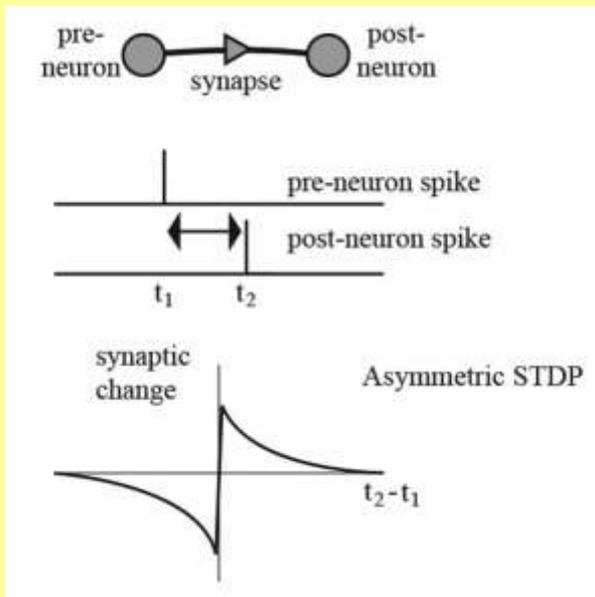
# Модель импульсного (спайкового) нейрона



$$u(t) = \sum_j w_j \sum_{t_j^f} \alpha(t - t_j^f)$$



# Spike Time Dependent Plasticity (STDP)



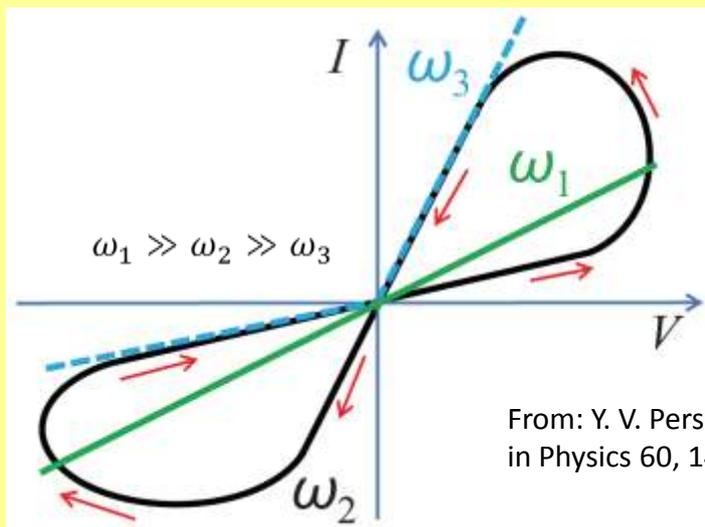
# Импульсные (спайковые) нейронные сети (ИНС)

- Данные внутри сети представляются в виде спайков – импульсов, некоторое число которых генерирует каждый нейрон
- Каждый нейрон - динамическая система, преобразующая входные спайки в выходные.
- Нейроны соединяются в сеть
- Входные данные необходимо представить в виде набора спайков
- Обучение без учителя

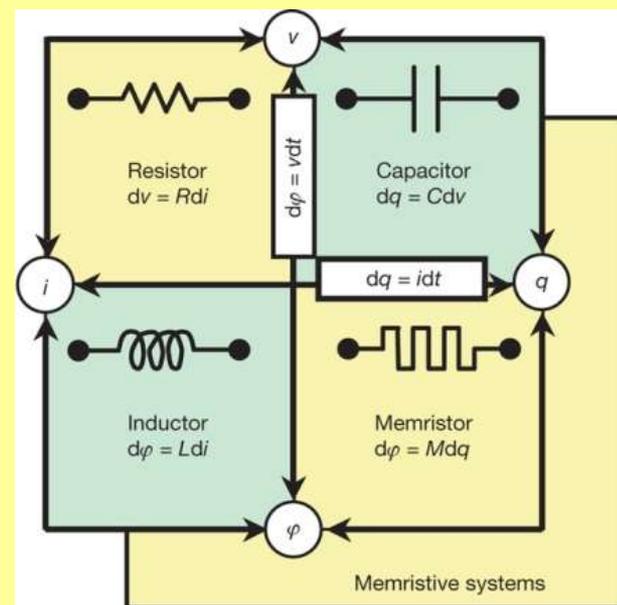
# Мемристор

Введен теоретически в 1971<sup>[1]</sup>, получен физически в 2008<sup>[2]</sup>:

- Двухполюсный пассивный элемент;
- Сопротивление зависит от истории приложенного напряжения и тока;
- Самопересекающаяся петля гистерезиса, зависящая от частоты.



From: Y. V. Pershin and M. Di Ventra, *Advances in Physics* 60, 145–227 (2011)



From [2]: D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams, *Nature* 453, 80 (2008).

[1] Chua, L. Memristor - The Missing Circuit Element. *IEEE Transactions On Circuit Theory* CT-18, 507–519 (1971).

# Применение

## Резистивная память с произвольным доступом (ReRAM)

- Энергонезависимое, обратимое переключение сопротивления;
- Высокая скорость и высокое отношение ON/OFF;
- Высокая плотность;

**Нейроморфные вычисления** – использование СБИС-систем, содержащих электронные аналоговые схемы, для симуляции нейробиологических архитектур, присутствующих в нервной системе.

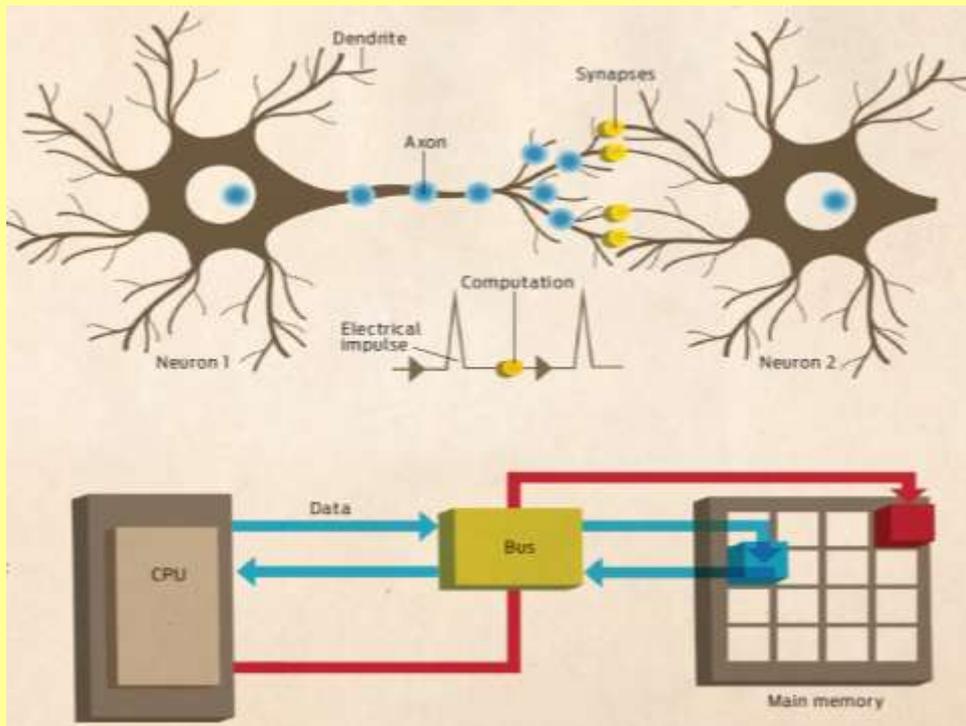
- Сходство с биологическими синапсами.

HP  
Toshiba  
Sandisk  
Samsung  
Panasonic

From: Mead, C. Neuromorphic electronic systems.  
*Proceedings of the IEEE* **78**, 1629–1636 (1990).

# Нейроморфные вычисления

Даже простейший мозг лучше суперкомпьютера:  
Секрет заключается в архитектуре!



Мозг человека:

-  $10^6$  нейронов /  $\text{cm}^2$

-  $10^{10}$  синапсов /  $\text{cm}^2$

- 2 mW /  $\text{cm}^2$

Полная потребляемая мощность:

20 Ватт

Мемристоры:

- Дешевы
- Энергетически эффективны
- Малы

- Мемристор определяется как элемент, который связывает поток и заряд

$$\phi = f(q)$$

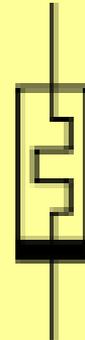
- Сопротивление мемристора вычисляется как

$$M(q) = \frac{d\phi}{dq}$$

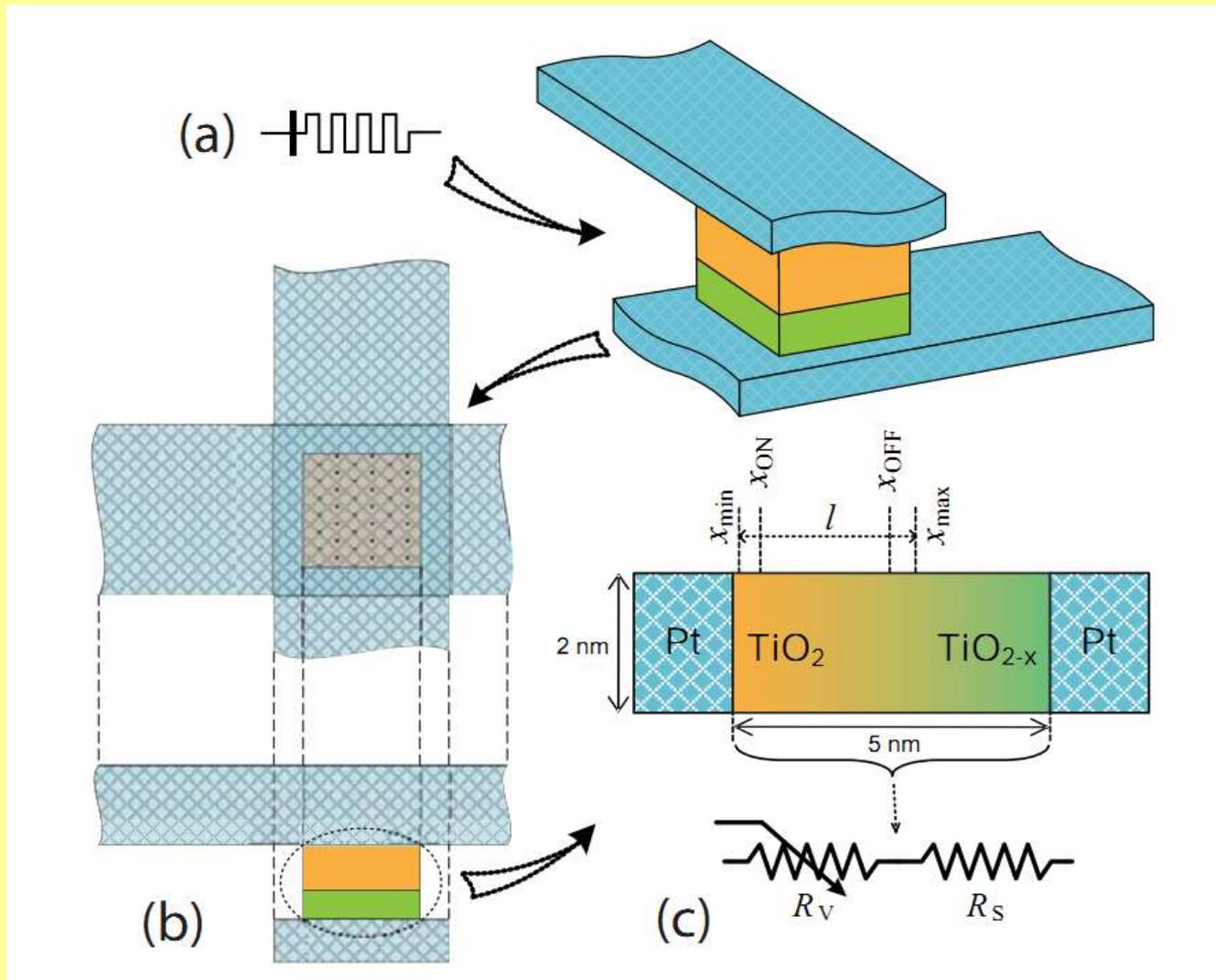
- И связано с соотношением напряжение-ток следующим образом

$$M(q(t)) = \frac{d\phi / dt}{dq / dt} = \frac{v(t)}{i(t)}$$

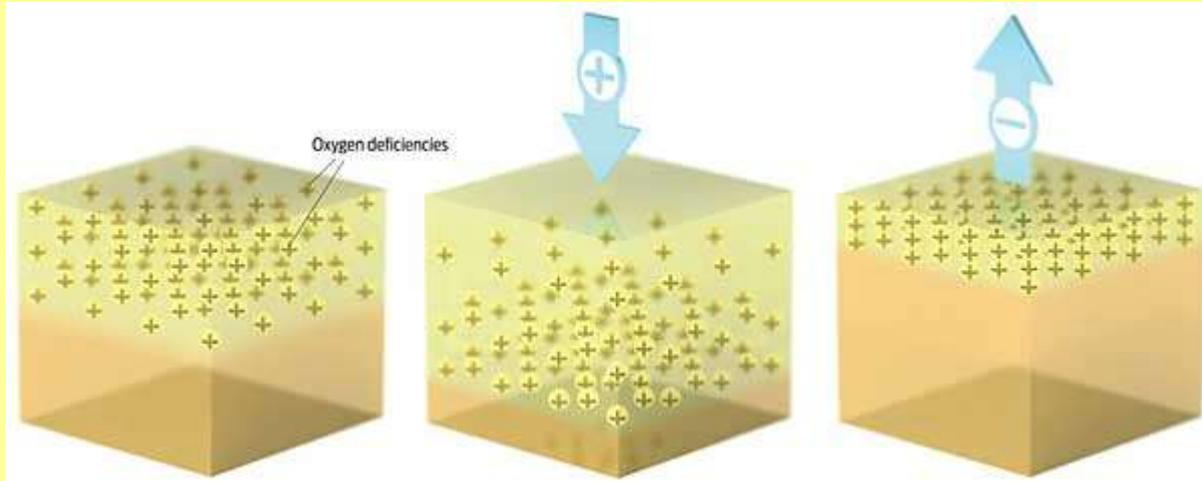
- Так сопротивление зависит от заряда



# Физическая реализация мемристора

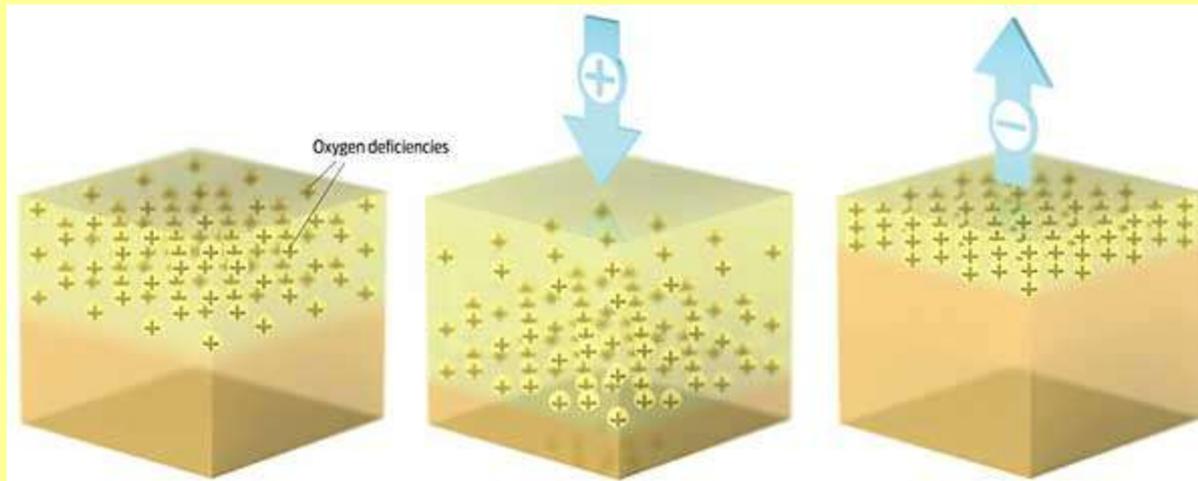


# МЕМРИСТИВНОСТЬ (СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕМРИСТОРА)



Дефицит кислорода в TiO<sub>2-x</sub> проявляется как “пузырьки” вакансий кислорода, разбросанных по верхнему слою.

- Положительное напряжение на переключателе отталкивает (положительные) вакансии кислорода в металлическом верхнем слое TiO<sub>2-x</sub>, посылая их вниз в изолирующий слой TiO<sub>2</sub>.
- Это вызывает движение границы между двумя слоями вниз, увеличивая процент проводящего слоя TiO<sub>2-x</sub> и проводимость всего переключателя.
- Чем больше приложенное напряжение, тем выше становится проводимость переключателя.



- Отрицательное напряжение на переключателе притягивает положительно заряженные пузырьки кислорода, оттягивая их от  $\text{TiO}_2$ .
  - Количество изолирующего материала  $\text{TiO}_2$  возрастает, повышая сопротивление переключателя.
  - Чем выше приложенное отрицательное напряжение, тем менее проводящим становится кубик.
- Когда напряжение отключено, пузырьки кислорода не движутся.
  - Они остаются на месте, что означает замороженность границы между двумя слоями двуокиси титана.
  - Таким образом мемристор запоминает, как велико напряжение, приложенное последний раз.

## Характеристики различных типов памяти

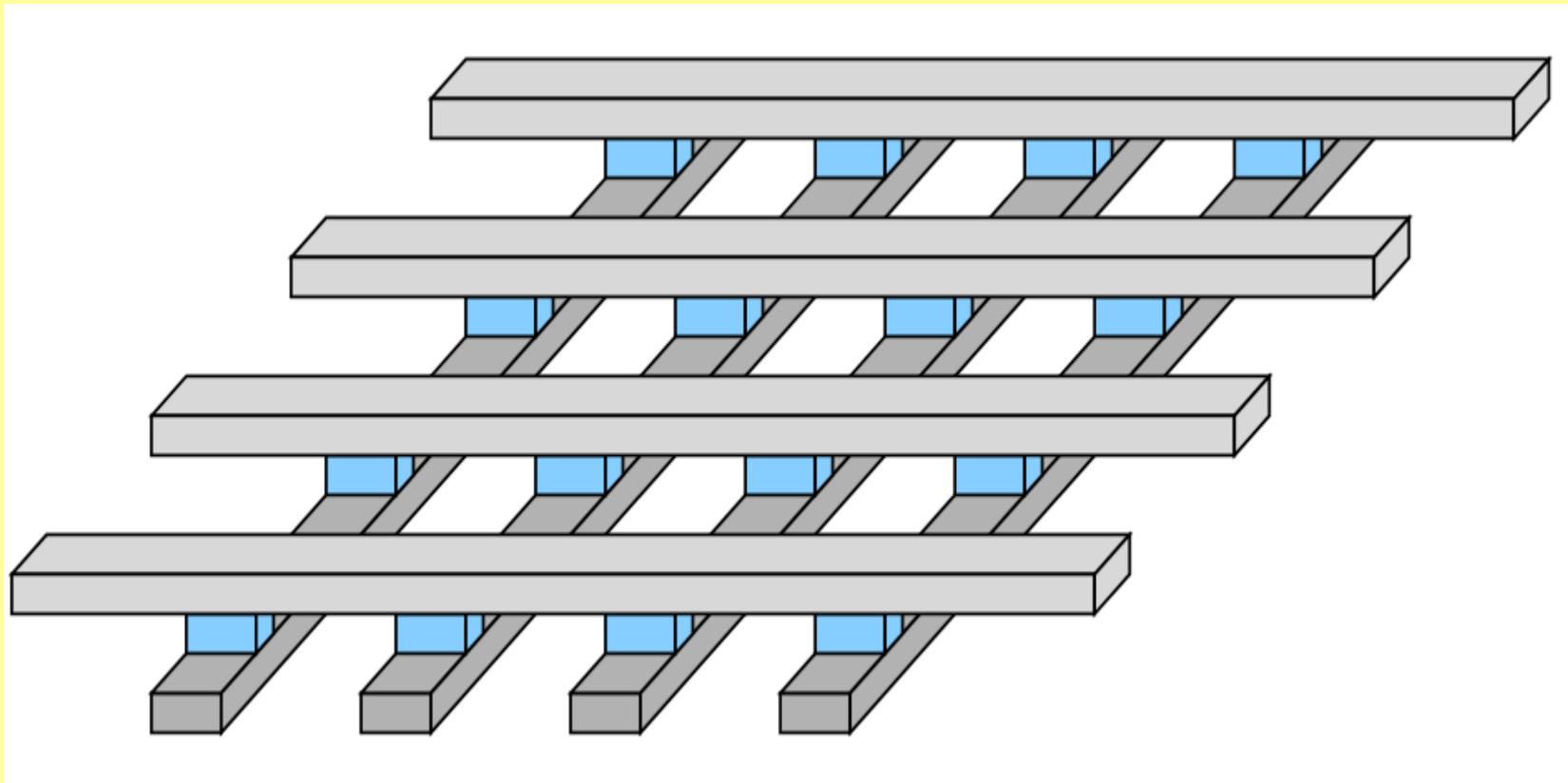
	<i>Мемристор</i>	<i>DRAM</i>	<i>FLASH</i>	<i>HDD</i>
Время чтения, [нс]	10	10 – 50	25 000	$(5-8) \cdot 10^6$
Время записи, [нс]	0,2 – 20	10 – 50	200 000	$(5-8) \cdot 10^6$
Время хранения информации	годы	менее сек.	годы	Годы
Количество циклов записи	$10^{12}$	$10^{16}$	$10^3 - 10^6$	$10^{15}$
Энергия на запись одного бита, [пДж]	0,1 – 3	2	10 000	$(1-10) \cdot 10^9$

**МЕМРИСТОР – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

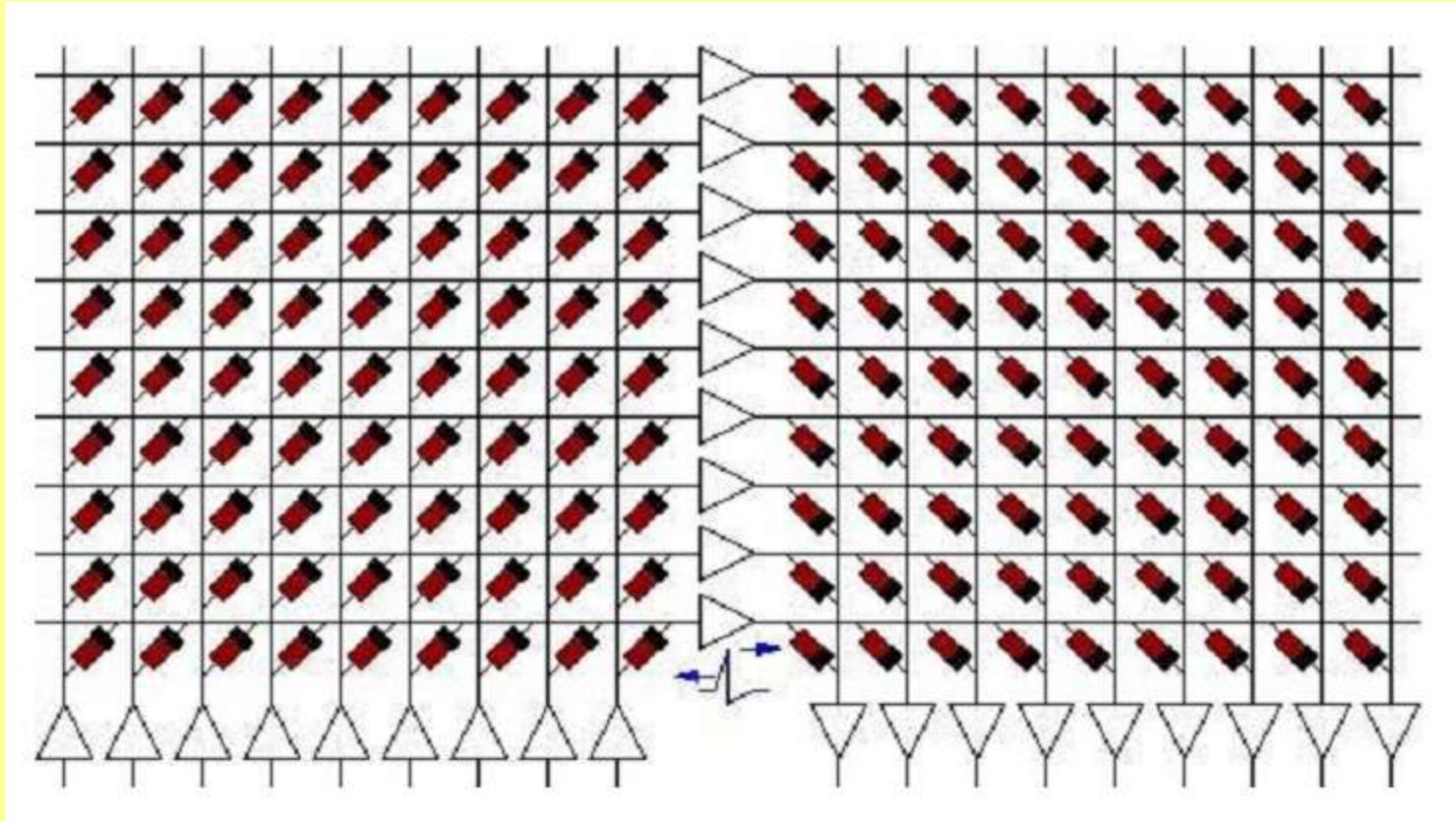
© 2012 г. В.А. ВАСИЛЬЕВ, П.С. ЧЕРНОВ

Пензенский государственный университет

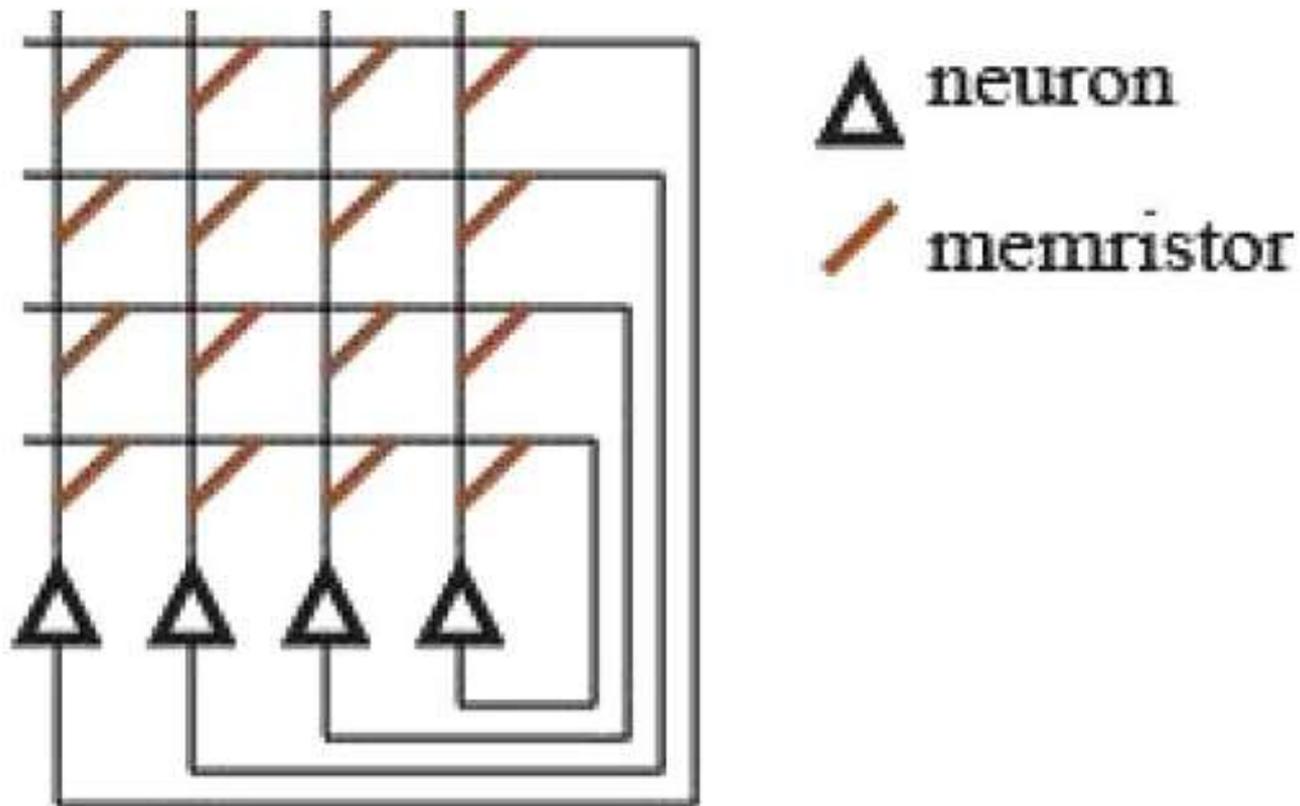
# Мемристорный кроссбар



# Многослойная нейронная сеть с мемристорными связями



# Рекуррентная нейронная сеть Хопфилда



# Цели и задачи моделирования ИНС

- Моделирование обработки сенсорной информации (зрения и слуха)
- Моделирование механизмов памяти: построение моделей механизмов рабочей и кратковременной памяти мозга; изучение принципов комбинирования недавно полученной информации с приходящими позднее стимулами.
- Исследование кодирования информации: способы трансформации одной кодировки в другую остаются неясными
- Применение ИНС в системах автоматического управления (роботобехника)
- Нейропротезирование и интерфейсы «мозг - компьютер»

# Пути изучения свойств ансамблей импульсных (спайковых) нейронов

- Изучение нейронных ансамблей живого мозга
- Изучение культур нейронов
- **Компьютерное моделирование**

Для создания практически применимых ИНС компьютерное моделирование является основным инструментом.

# Вычислительные средства для моделирования ИНС

- **Многоядерный ПК.** Низкий уровень параллелизма (~10 потоков). Можно исследовать общие свойства небольших сетей (сотни и тысячи нейронов).
- **Графические процессоры (GPGPU).** Для мощных GPGPU компании NVIDIA достижим уровень в десятки тысяч потоков. Можно изучать синаптическую пластичность и процессы самоорганизации в ИНС с числом нейронов до 100 тысяч. Минус – трудность программирования.
- **Многоцелевые суперкомпьютеры.** Дорогой, но конкурентноспособный ресурс (можно моделировать сотни миллионов нейронов и триллионы синапсов).
- **Специализированные архитектуры на базе ПЛИС.** Уровень распараллеливания до 100 тысяч. Платформа недостаточно гибкая. Создание спецвычислителей может потребовать много усилий и времени.

# Проекты нейроморфных вычислителей (1)

- **SyNAPSE** (Systems of Neuromorphic Adaptive Plastic Scalable Electronics) (DARPA & IBM)(2008-2016 гг. Минобороны США)  
Цель проекта – создание нейроморфного компьютера масштаба человеческого мозга ( $10^{10}$  нейронов,  $10^{14}$  синапсов, 1 квт энергии, меньше 2 дм<sup>3</sup> объема)  
Компания IBM выпустила **цифровой нейрочип True North** для обработки видеоинформации:  $10^6$  программируемых нейронов, 256 млн программируемых синапсов. Моделирование обеспечивается 4096 ядрами на каждом чипе (5,4 млрд транзисторов, 70 мвт энергии). Чип способен эмулировать STDP. Масштабируемость не ограничена.
- **Neurogrid** (Стэнфордский университет). Аналоговый подход к моделированию нейронов ( $10^6$  нейронов,  $6 \cdot 10^9$  синапсов). Вариабельность большого числа параметров позволяет изучать ансамбли нейронов разных типов. Проблема – устаревшая технологическая база.

## Проекты нейроморфных вычислителей (2)

- **SpiNNaker** (Манчестерский университет). Направлен на создание нейроморфной аппаратной платформы для реализации европейского проекта Human Brain Project. Проект основан на использовании специальных цифровых чипов с возможностью построения из них высокомасштабируемых модульных систем с различной топологией их соединения. Каждый чип содержит 16 процессоров ARM9 и может эмулировать в реальном времени работу десятков тысяч нейронов. Маршрутизатор обеспечивает доставку в пределах чипа  $5 \cdot 10^9$  спайков/секунду.
- **BrainScaleS** (Гейдельбергский университет). Проект нацелен на изучение и моделирование мозга человека. Создан гибридный цифро-аналоговый нейрочип. Построена система для моделирования ИНС из  $2 \cdot 10^5$  нейронов,  $5 \cdot 10^7$  синапсов.

## **Спецкурсы**

- 1 Распределенные алгоритмы (полгода)
- 2 Нейрокомпьютерные системы (год)
- 3 Квантовые компьютеры (полгода)

## **Информация для связи**

**Тарков Михаил Сергеевич**

**Тел. 333-25-37**

**E-mail: [tarkov@isp.nsc.ru](mailto:tarkov@isp.nsc.ru)**