

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  
СПб ГУТ)))

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ

Лекция 5  
Нейроны и биологические нейронные сети.  
Линейная регрессия как математическая модель единичного  
нейрона

Выборнова Анастасия Игоревна

# План занятия

- Нейроны и биологические нейронные сети:
  - Строение нейрона.
  - Нейронные сети: дендриты и аксоны.
  - Синапсы: электрические, химические и смешанные.
  - Возбуждение нейрона.
- Линейная регрессия:
  - Определение и история.
  - Линейная регрессия как модель нейрона.

# План занятия

- Нейроны и биологические нейронные сети:
  - Строение нейрона.
  - Нейронные сети: дендриты и аксоны.
  - Синапсы: электрические, химические и смешанные.
  - Возбуждение нейрона.
- Линейная регрессия:
  - Определение и история.
  - Линейная регрессия как модель нейрона.

# Нейроны и биологические нейронные сети

**Искусственные нейронные сети** — математические модели, а также их программные или аппаратные реализации, построенные по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей.

**Биологическая нейронная сеть** — совокупность нейронов, которые связаны или функционально объединены в нервной системе, выполняют специфические физиологические функции.

# Нейроны и биологические нейронные сети

Нервная система человека построена из нейронов — клеток, способных (помимо прочего) принимать, обрабатывать и передавать электрохимические импульсы.

В организме человека находится более 85 миллиардов нейронов.

# План занятия

- Нейроны и биологические нейронные сети:
  - Строение нейрона.
  - Нейронные сети: дендриты и аксоны.
  - Синапсы: электрические, химические и смешанные.
  - Возбуждение нейрона.
- Линейная регрессия:
  - Определение и история.
  - Линейная регрессия как модель нейрона.

# Строение нейрона

Нейрон — структурно-функциональная единица нервной системы.

Нейрон является клеткой и как большинство клеток состоит из:

- Ядра (хранение и передача информации).
- Цитоплазмы — жидкости внутри клеток и органелл:
  - Эндоплазматического ретикулума и рибосом (синтез белка).
  - Митохондрий (производство энергии).
  - Аппарат Гольджи (сортировка и преобразование белков).
  - и др.

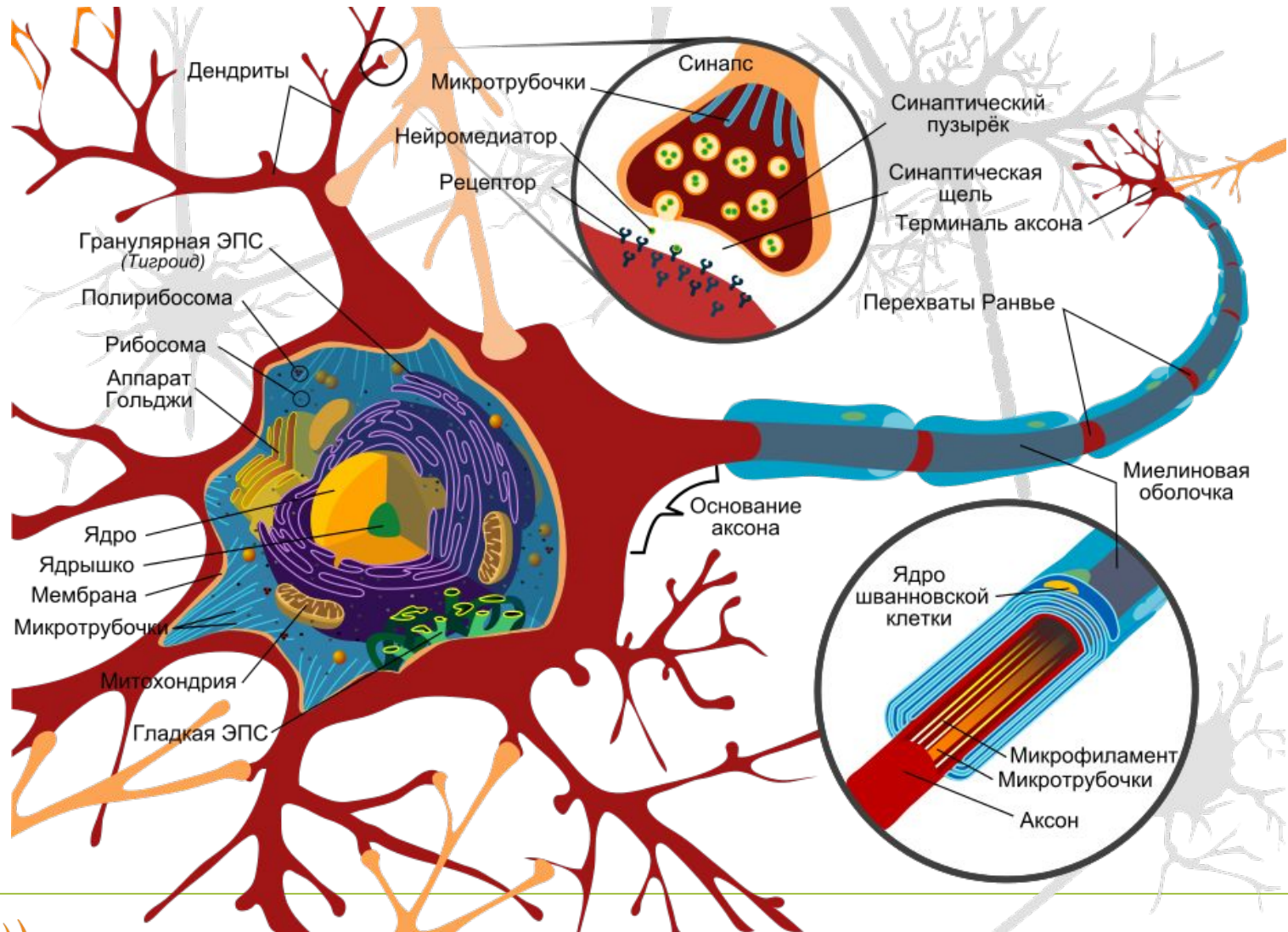
# Строение нейрона

Нейрон является клеткой и как большинство клеток состоит из (продолжение):

- Мембраны.
- Цитоскелета
- Отростков.



# Строение нейрона



# Типы нейронов

- **Афферентные нейроны** (чувствительные, сенсорные, рецепторные) — первичные клетки органов чувств, получают сигнал от клеток других типов, передают нейронам.
- **Эфферентные нейроны** (эффекторные, двигательные, моторные) — конечные нейроны, получают импульс через дендриты от других нейронов, передают через аксон клеткам органов-мишеней.
- **Ассоциативные нейроны** (вставочные или интернейроны) — осуществляют связь между эфферентными и афферентными.
- **Секреторные нейроны** — выделяют в кровь или межклеточное пространство нейрогормоны.

# План занятия

- Нейроны и биологические нейронные сети:
  - Строение нейрона.
  - Нейронные сети: дендриты и аксоны.
  - Синапсы: электрические, химические и смешанные.
  - Возбуждение нейрона.
- Линейная регрессия:
  - Определение и история.
  - Линейная регрессия как модель нейрона.

# Нейронные сети: дендриты и аксоны

Сеть из нейронов в организме формируется при помощи отростков нейронов двух типов.

**Дендриты** — короткие и разветвленные, принимают нервный импульс извне и передают телу нейрона.

**Аксон** — обычно один, длинный отросток, проводит нервный импульс от тела нейрона и передает его другим нейронам или другим органам.

1 нейрон может связываться с большим числом (тысячи и десятки тысяч) других нейронов.

# Нейронные сети: дендриты и аксоны

Сеть из нейронов в организме формируется при помощи отростков нейронов двух типов.

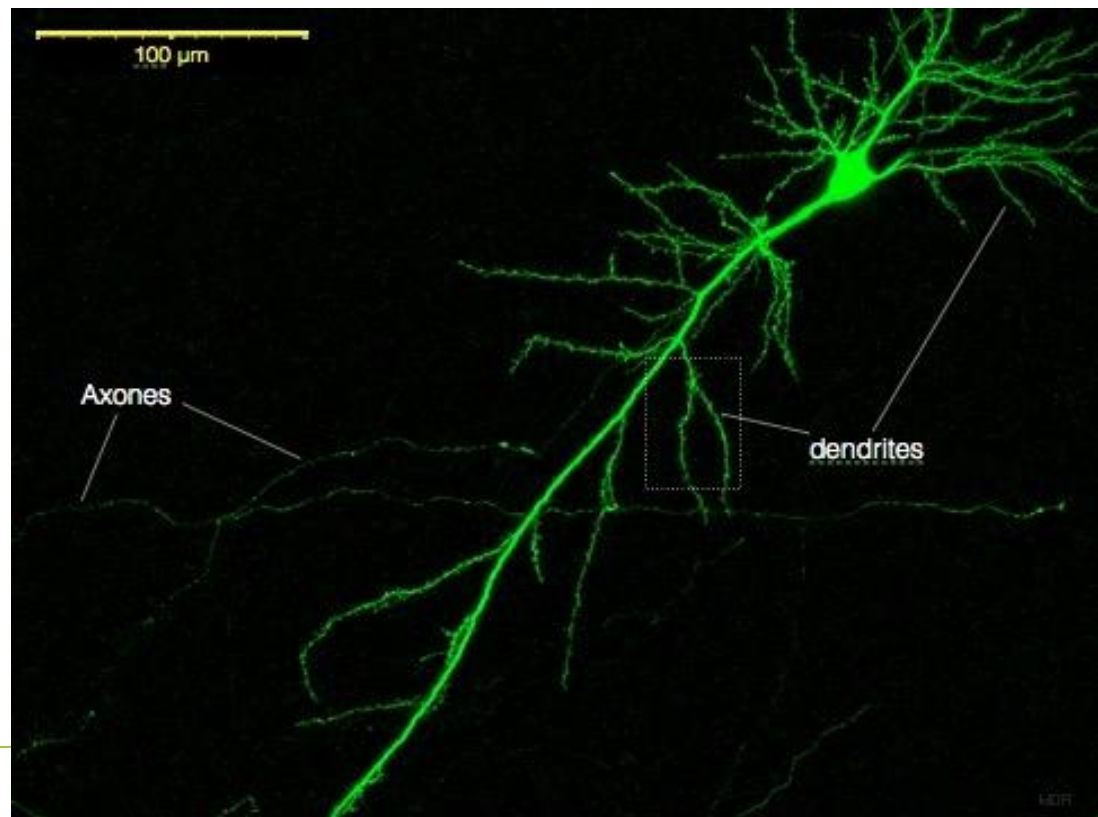
**Дендриты** — короткие и разветвленные, принимают нервный импульс извне и передают телу нейрона.

**Аксон** — обычно один, длинный отросток, проводит нервный импульс от тела нейрона и передает его другим нейронам или другим органам.

1 нейрон может связываться с большим числом (тысячи и десятки тысяч) других нейронов.

# Дендриты

Дендриты могут быть очень разнообразны по структуре ветвления, в зависимости от функции клетки.



# АКСОНЫ

Аксоны — длинные (до одного метра у крупных животных), тонкие отростки с ветвлением на конце.



# АКСОНЫ

Состав аксона:

- Цитоскелет (волокна и микротрубочки).
- Аксоплазма
- Митохондрии
- Эндоплазматический ретикулум (без рибосом)
- У некоторых — оболочка из «накручивающихся» на аксон шванновских клеток (электроизоляция, дополнительная опора, питание). Промежутки между шванновскими клетками — перехваты Ранвье.

На конце аксона находится разветвление — терминаль.

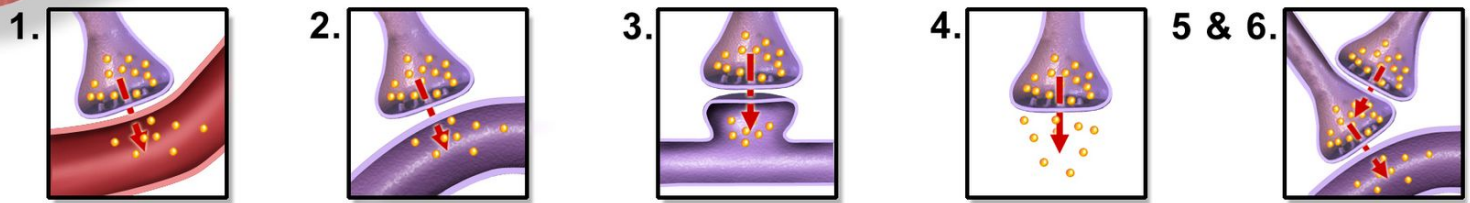
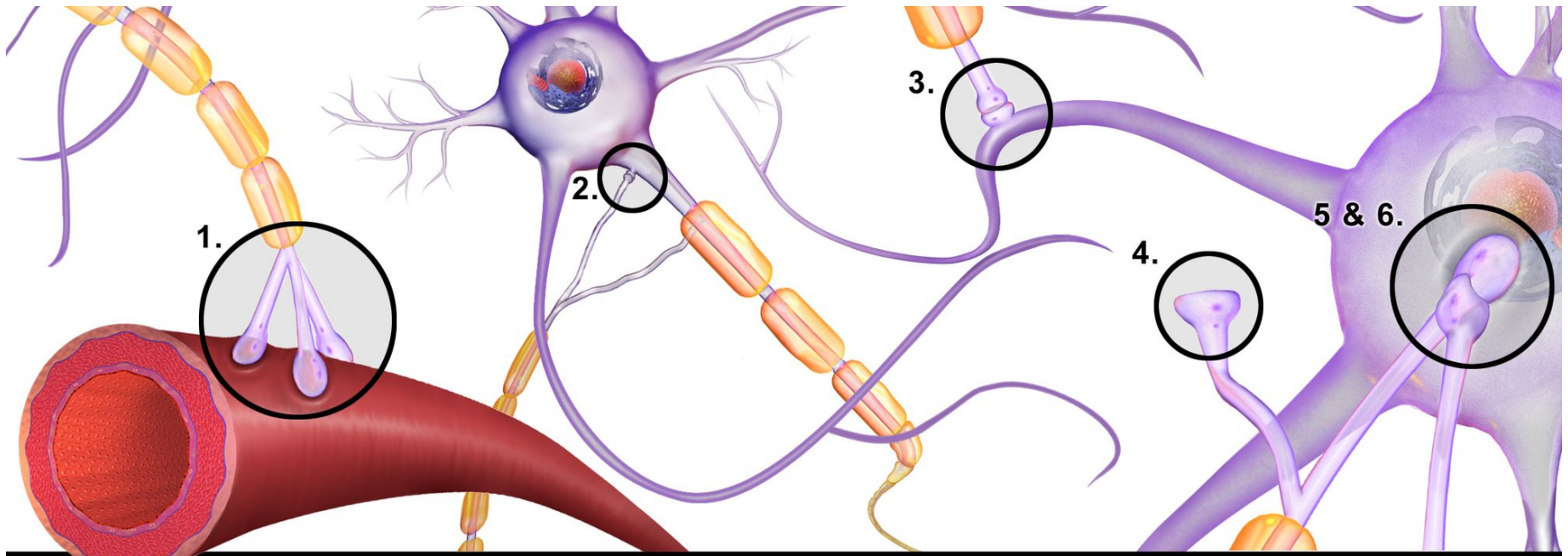


# АКСОНЫ



Скорость передачи импульса — до 100 м/с.

# Типы соединений аксона



**Axosecretory**  
Axon terminal secretes directly into bloodstream

**Axoaxonic**  
Axon terminal secretes into another axon

**Axodendritic**  
Axon terminal ends on a dendrite spine

**Axoextracellular**  
Axon with no connection secretes into extracellular fluid

**Axosomatic**  
Axon terminal ends on soma  
**Axosynaptic**  
Axon terminal ends on another axon terminal

# План занятия

- Нейроны и биологические нейронные сети:
  - Строение нейрона.
  - Нейронные сети: дендриты и аксоны.
  - Синапсы: электрические, химические и смешанные.
  - Возбуждение нейрона.
- Линейная регрессия:
  - Определение и история.
  - Линейная регрессия как модель нейрона.

# Синапсы: электрические, химические и смешанные

Синапс — место контакта между двумя нейронами или между нейроном и органом-мишенью.

Классификация синапсов:

- Возбуждающие.
- Тормозящие.
  
- Химические.
- Электрические.
- Смешанные.

# Химический синапс

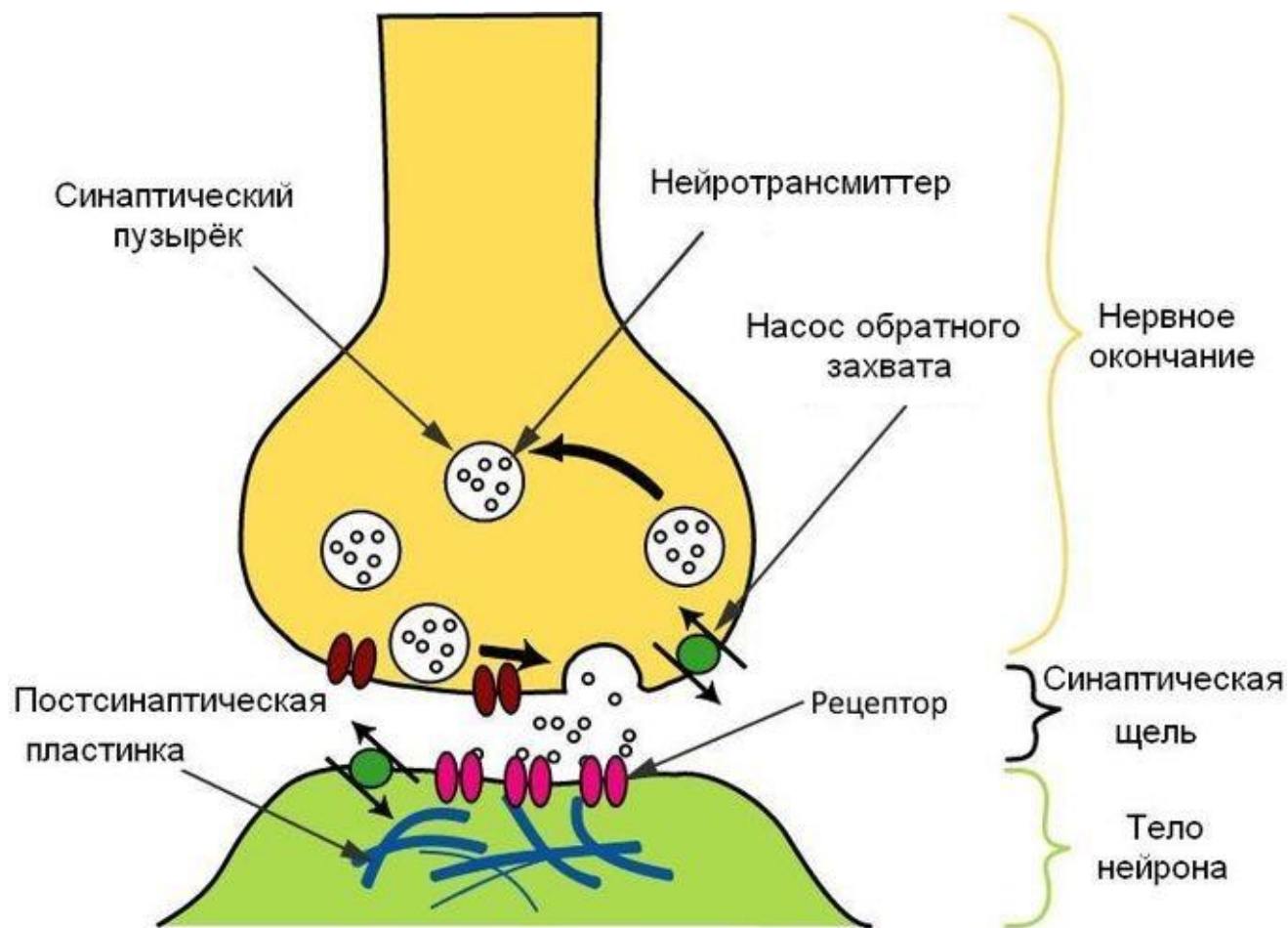
**Химический синапс** — синапс, роль переносчика сигнала в котором играет химическое вещество — **нейромедиатор** (ГАМК, глицин, глутаминовая кислота, аспарагиновая кислота, адреналин, дофамин, серотонин...)

**Пресинаптическая часть** — окончание аксона, содержащее синаптические пузырьки (40-50 нм) с нейромедиатором (или антагонистом нейромедиатора) и насосы обратного захвата.

**Синаптическая щель** — пространство 20-30 нм.

**Постсинаптическая часть** — мембрана с рецепторами к нейромедиаторам.

# Химический синапс



# Электрический синапс

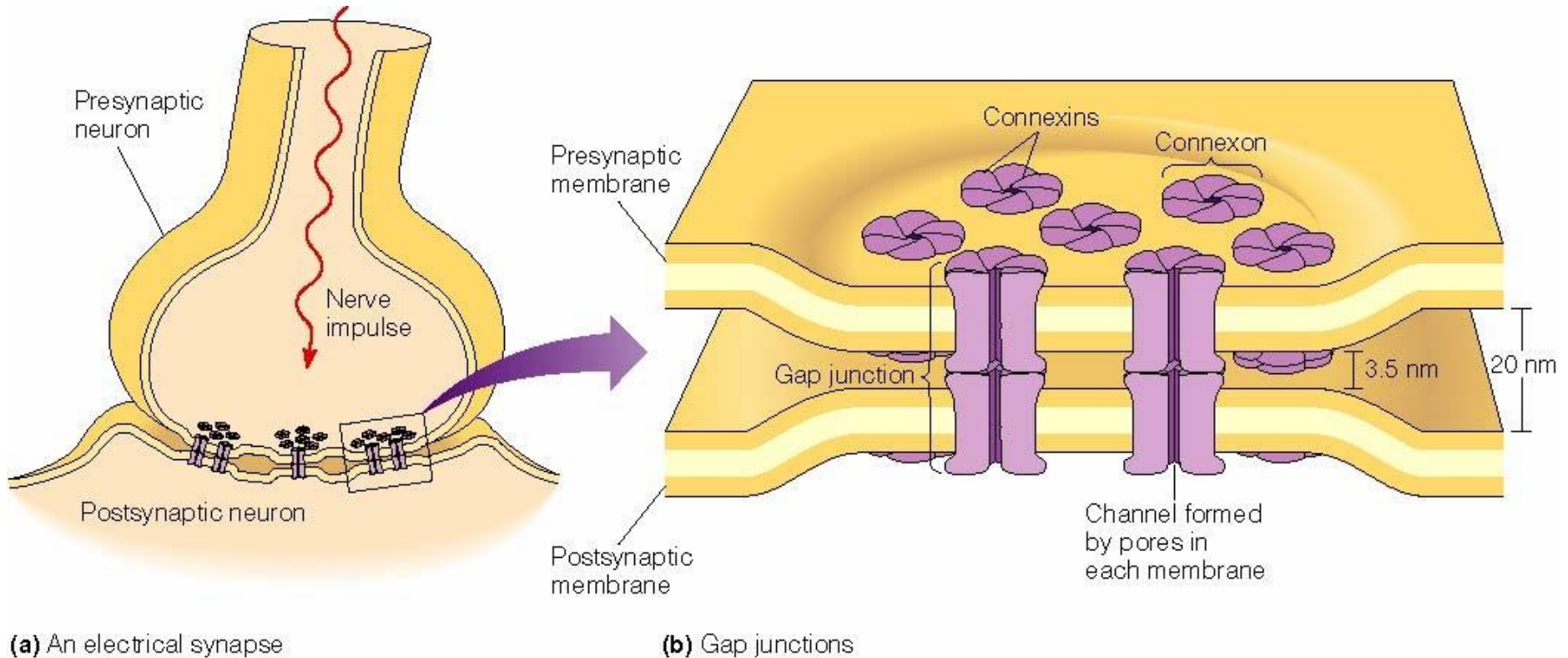
**Электрический синапс** — электрический щелевой контакт между двумя нейронами или нейроном и клеткой другого типа.

В отличие от химического синапса — могут быть и однонаправленными и двунаправленными.

Синаптическая щель 3-5 нм. Через нее проходят от двух соединяющихся частей коннексоны — упорядоченные белковые структуры, через которые могут проходить ионы и небольшие молекулы, обеспечивая перемещение электрического заряда.



# Электрический синапс



Copyright © 2005 Pearson Education, Inc. publishing as Benjamin Cummings



# Смешанный синапс

**Смешанный синапс** — совмещение химического и электрического синапса.

# Синапсы

Большинство синапсов — химические.

Электрические синапсы — в мозге млекопитающих (вместе с химическими) и ЦНС низших позвоночных и беспозвоночных.

Электрический синапс — меньшая по сравнению с химическим задержка сигнала.

# План занятия

- Нейроны и биологические нейронные сети:
  - Строение нейрона.
  - Нейронные сети: дендриты и аксоны.
  - Синапсы: электрические, химические и смешанные.
  - Возбуждение нейрона.
- Линейная регрессия:
  - Определение и история.
  - Линейная регрессия как модель нейрона.

# Возбуждение нейрона

Возбуждение нейрона — генерация нейроном потенциала действия.

- Мембрана нейрона содержит насосные каналы, создающие различные концентрации ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  вне клетки и внутри нее.
- Мембрана также содержит натриевые и калиевые каналы, которые могут быть закрыты и препятствовать выравниванию концентраций  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  или открытыми и обеспечивать это выравнивание.
- Открытие или закрытие натриевых и калиевых каналов зависит от заряда мембраны.
- Заряд мембраны может меняться под действием заряда или нейромедиаторов от аксона другого нейрона.

# Возбуждение нейрона

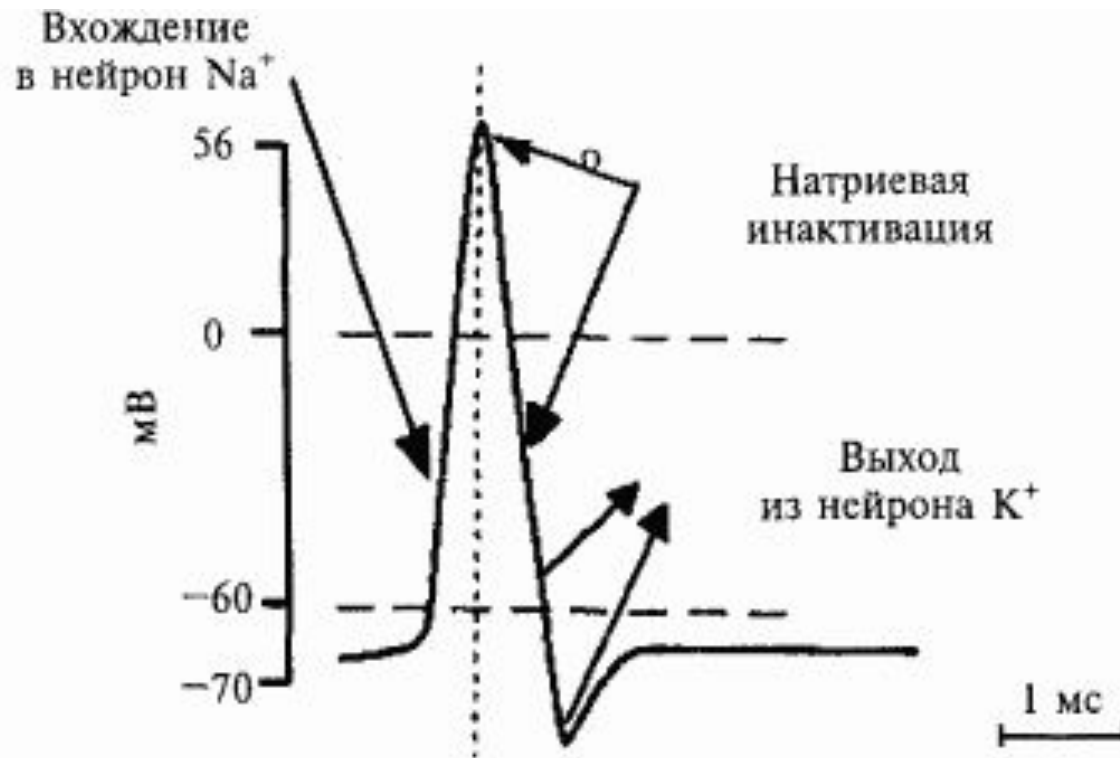
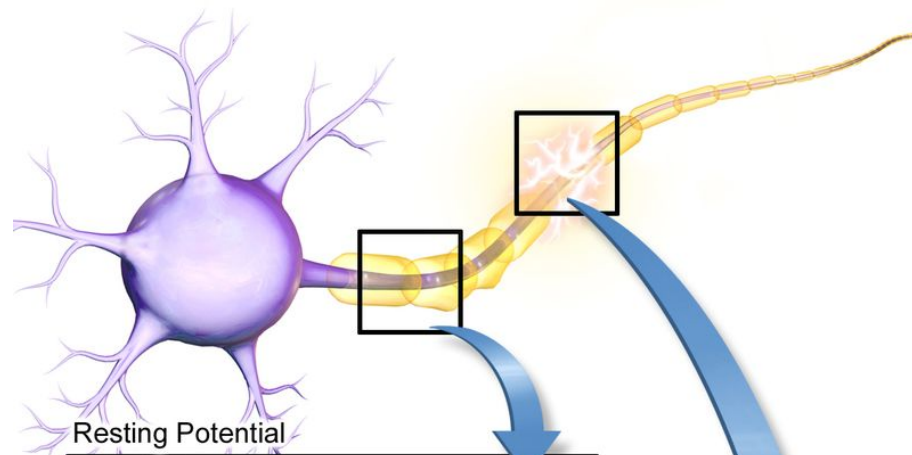
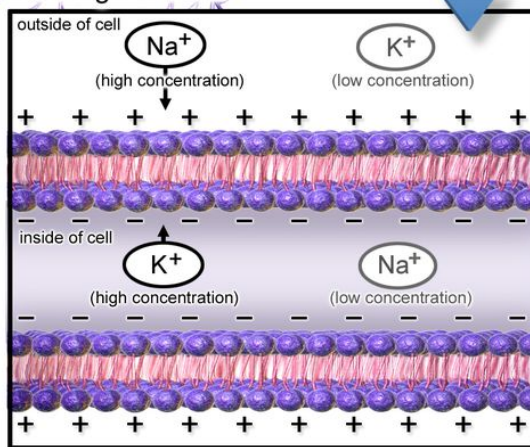


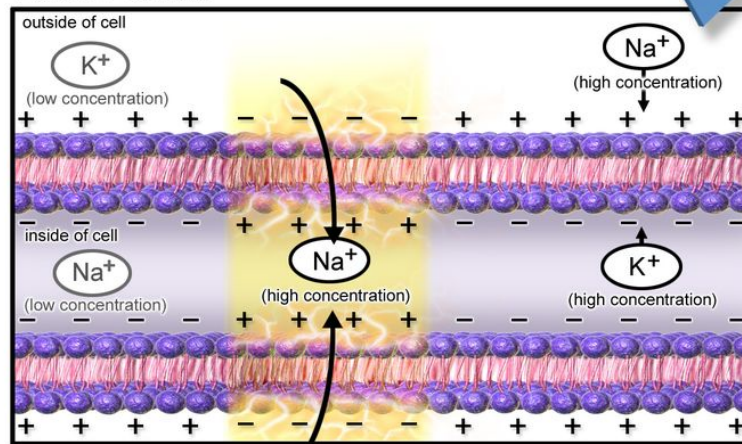
Рис. 2.7. Схема событий при возбуждении нейрона.



### Resting Potential



### Action Potential



# Возбуждение нейрона

Потенциал действия возникает на одном участке нейрона и за счет разности потенциалов между возбужденным и соседним, невозбужденным участком образуется электрический ток, который «переносит» потенциал далее по клетке.

Наличие миелиновых оболочек (шванновских клеток) приводит к ускорению передачи импульса, так как разности потенциалов возникают только между интервалами Ранвье.

## Лирическое отступление

Для понимания прогресса человечества в области моделирования мозга.

Швейцарские нейрофизиологи:

- работали 10 лет,
- использовали суперкомпьютер Blue Brain IV, входящий в топ-100 самых мощных суперкомпьютеров,
- исследовали и описали 207 типов нервных клеток,
- создали модель, включающую в себя суммарно 31 тысячу моделей нервных клеток и 37 миллионов моделей синапсов.



## Лирическое отступление

Данная модель соответствует 0,3 мм<sup>3</sup> мозга крысы.



# План занятия

- Нейроны и биологические нейронные сети:
  - Строение нейрона.
  - Нейронные сети: дендриты и аксоны.
  - Синапсы: электрические, химические и смешанные.
  - Возбуждение нейрона.
- Линейная регрессия:
  - Определение и история.
  - Линейная регрессия как модель нейрона.

# Линейная регрессия

**Регрессионный анализ** — статистический метод исследования влияния одной или нескольких независимых переменных  $X_1, X_2, \dots, X_M$  на зависимую переменную  $Y$ .

- Независимые переменные — регрессоры, предикторами.
- Зависимая переменная — критериальная переменная.

Пример: влияние средней годовой температуры и уровня осадков в винодельческом регионе на стоимость вина.

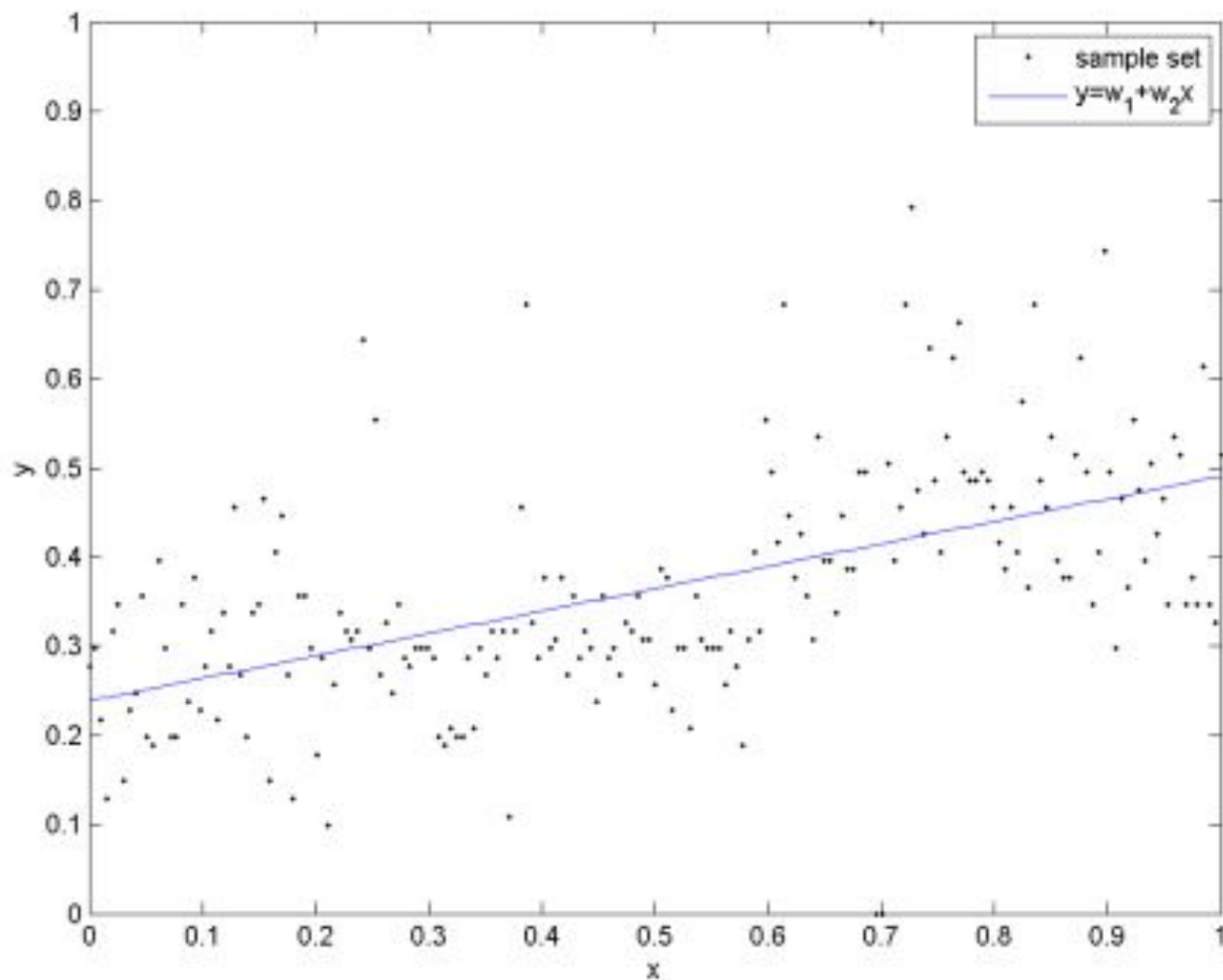
# Линейная регрессия

Линейная регрессия — регрессионная модель, где зависимость критериальной переменной от регрессоров носит линейный характер:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_M X_M$$

$b_0 \dots b_M$  — коэффициенты (параметры) регрессии.

# Линейная регрессия



# Линейная регрессия

Каким образом можно определить коэффициенты линейной регрессии? Классический подход — метод наименьших квадратов.

Суть метода заключается в подсчете квадрата разницы между реальным значением  $Y_k$  и вычисленным с помощью модели значением  $\hat{Y}_k$  для каждого измеренного значения и нахождении таких значений коэффициентов  $b_0 \dots b_M$ , при которых сумма этих квадратов разниц минимальна:

$$\sum_{k=1}^M (Y_k - \hat{Y}_k)^2 \rightarrow \min$$

# Линейная регрессия

Для решения этой задачи вводится функция невязки:

$$\sigma(\bar{b}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M (Y_k - \hat{Y}_k)^2$$

Преобразуется в систему уравнений, которая в свою очередь преобразуется в матрицы и решается при помощи метода Гаусса.

# Линейная регрессия

Метод наименьших квадратов реализован:

- в виде библиотек в некоторых языках программирования со статистическим уклоном (Python + NumPy&Scipy, R);
- в MatLab и подобных программах;
- и даже в виде онлайн-калькуляторов —

<http://math.semestr.ru/regress/corel.php>



# Линейная регрессия

XIX век, сэр Френсис Гальтон — исследование зависимости роста детей от роста родителей. Ввел термин «регрессия» как стремление к среднему.

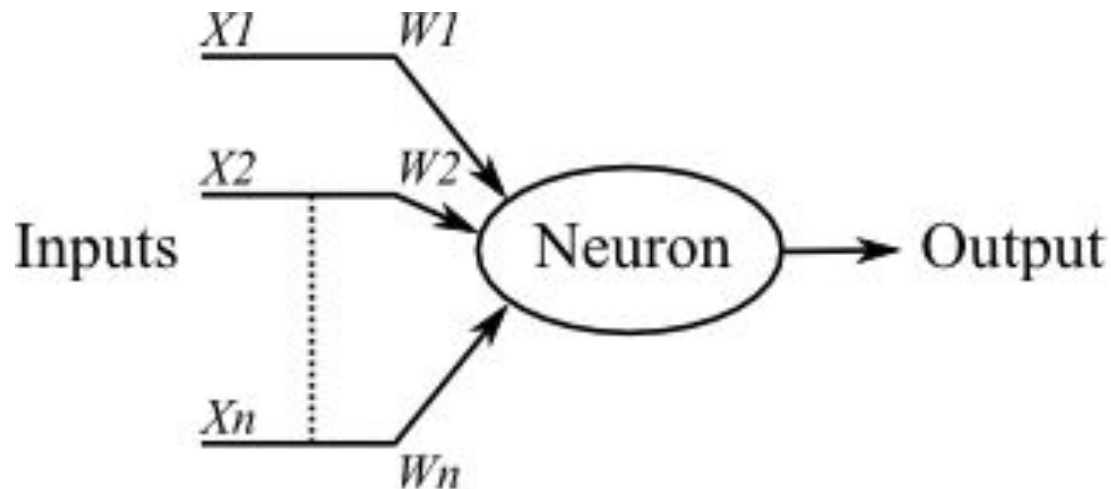
Затем термин начал применяться для обозначения любой зависимости.

# План занятия

- Нейроны и биологические нейронные сети:
  - Строение нейрона.
  - Нейронные сети: дендриты и аксоны.
  - Синапсы: электрические, химические и смешанные.
  - Возбуждение нейрона.
- Линейная регрессия:
  - Определение и история.
  - Линейная регрессия как модель нейрона.

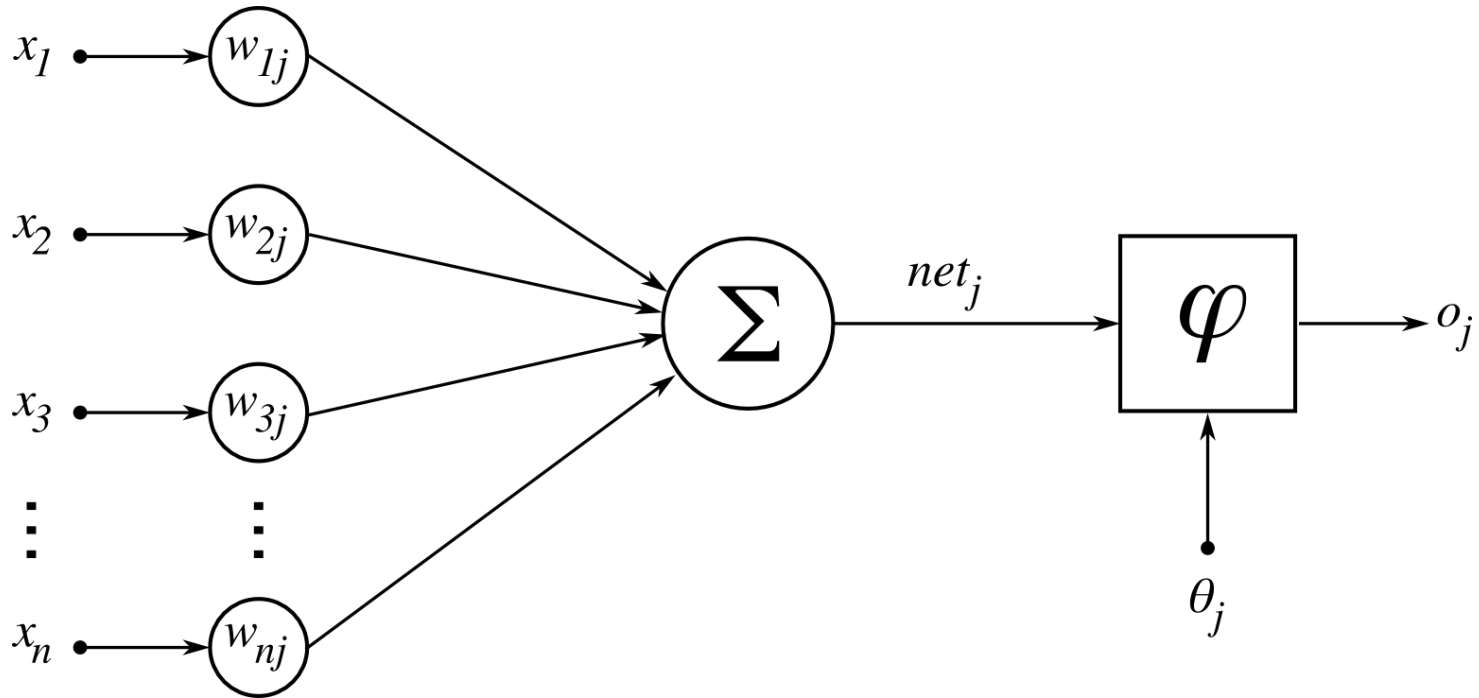
# Линейная регрессия как модель нейрона

Схема линейной регрессии за исключением некоторых деталей соответствует модели нейрона:



# Линейная регрессия как модель нейрона

Некоторые детали:



# Линейная регрессия как модель нейрона

Круг задач, которые можно решать при помощи линейной регрессии весьма ограничен:

- Одна зависимая (выходная) переменная.
- Все переменные численно выражаемы.
- Зависимость — линейная.

Объединение нескольких моделей нейронов в сеть позволяет решать задачи других классов.

# Лабораторная работа — модель нейрона

Задать для модели нейрона входные параметры из первого столбца таблицы. Записать в соответствующие ячейки таблицы результат для каждого типа передаточной функции:

|                     | <i>Порог</i> | <i>Сигмоид</i> | <i>Линейный порог</i> | <i>Гауссиана</i> | <i>Соответствие</i> |
|---------------------|--------------|----------------|-----------------------|------------------|---------------------|
| <i>1/1/0</i>        |              |                |                       |                  |                     |
| <i>-0,3/1,8/0,2</i> |              |                |                       |                  |                     |
| <i>1/0,1/0,5</i>    |              |                |                       |                  |                     |

# Практика — знакомство с языком R

```
# Loading csv files
```

```
WHO = read.csv("WHO.csv")
```

```
str(WHO)
```

```
summary(WHO)
```

```
# Subsetting
```

```
WHO_Europe = subset(WHO, Region == "Europe")
```

```
str(WHO_Europe)
```

```
# Removing variables
```

```
rm(WHO_Europe)
```

```
# Basic data analysis
```

```
mean(WHO$Under15)
```

```
sd(WHO$Under15)
```

```
summary(WHO$Under15)
```

# Практика — знакомство с языком R

```
which.min(WHO$Under15)
```

```
WHO$Country[86]
```

```
which.max(WHO$Under15)
```

```
WHO$Country[124]
```

```
# Scatterplot
```

```
plot(WHO$GNI, WHO$FertilityRate)
```

```
# Histograms
```

```
hist(WHO$CellularSubscribers)
```

```
# Boxplot
```

```
boxplot(WHO$LifeExpectancy ~ WHO$Region)
```

```
boxplot(WHO$LifeExpectancy ~ WHO$Region, xlab = "", ylab = "Life Expectancy",  
main = "Life Expectancy of Countries by Region»)
```

```
#Correlation
```

```
lm(WHO$FertilityRate ~ WHO$LifeExpectancy)
```