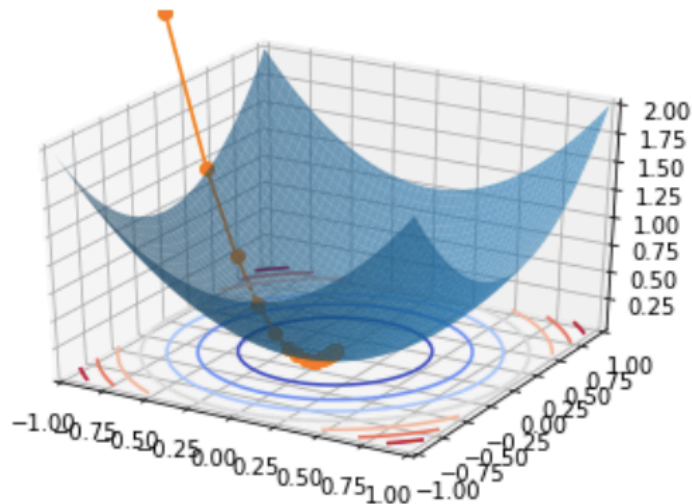


# Глубинное обучение

Надежда Чиркова

Лаборатория компании Самсунг

Высшая школа экономики



# Напоминание: задача машинного обучения

## Обучающая выборка

объект	Площадь	Год постройки	Число комнат	Цена	ответ
$x$	45	1995	1	7000000	$y$
	60	2005	2	9900000	
	35	2010	1	5500000	

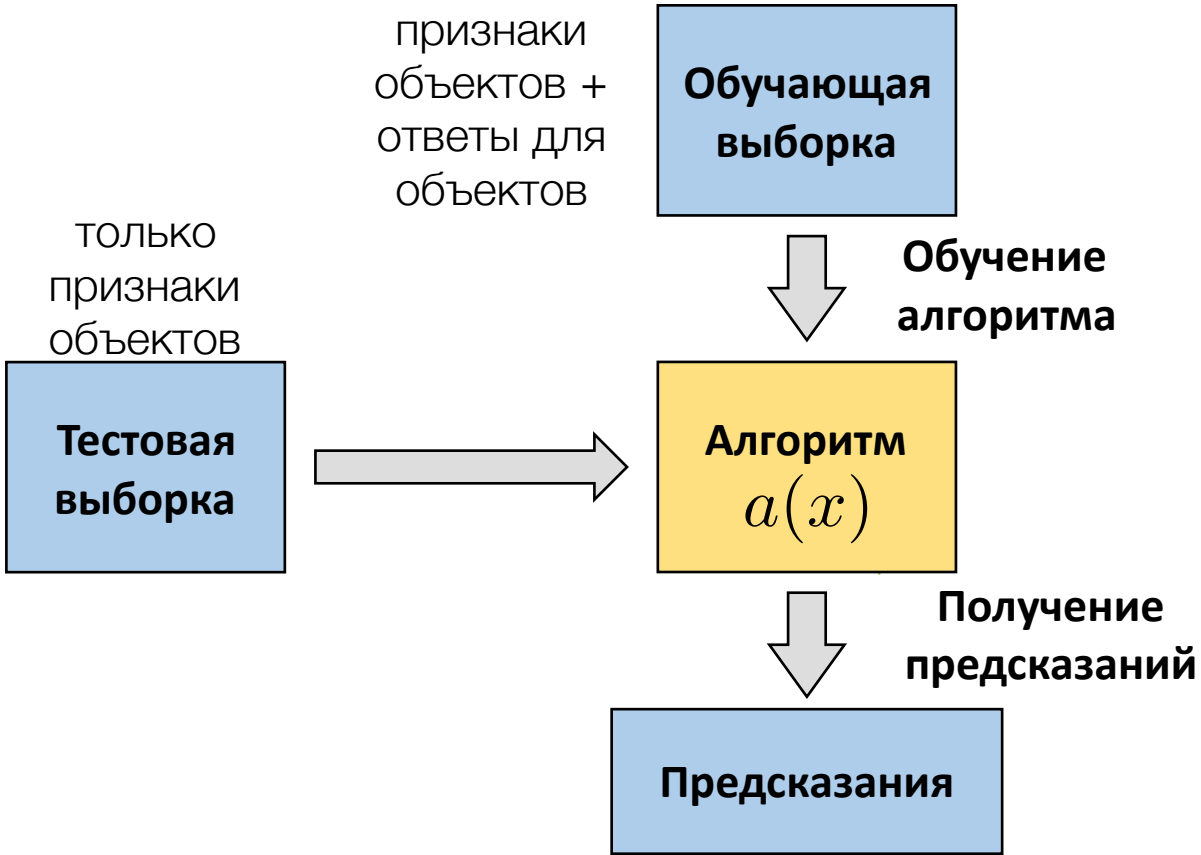
Алгоритм  
машинного обучения:

$$a(x) \approx y$$

Регрессия:  $y$  — число

Классификация:  $y \in \{1, \dots, K\}$

# Схема работы машинного обучения



# Напоминание: линейные модели

**Линейная модель** суммирует значения всех признаков с некоторыми весами

**Веса при признаках** — параметры, которые необходимо настраивать в процессе обучения

$$a(x) = w_0 + w_1x_1 + \dots + w_dx_d$$



# Нейронная сеть - обобщение линейной модели

**Линейная модель** суммирует значения всех признаков с некоторыми весами

**Весы при признаках** — параметры, которые необходимо настраивать в процессе обучения

$$a(x) = w_0 + w_1x_1 + \dots w_dx_d$$

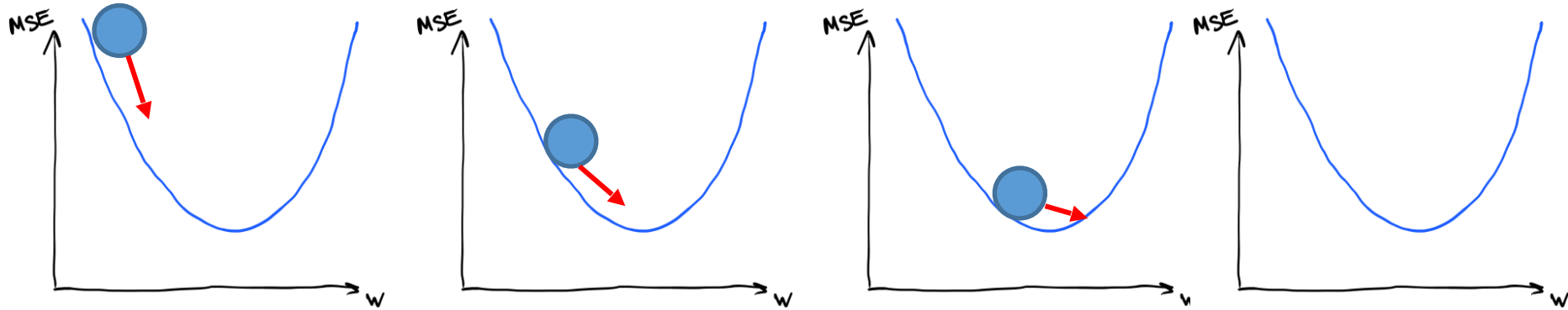
**Нейронная сеть** реализует нелинейную функцию от признаков

**Весы** — параметры, которые необходимо настраивать в процессе обучения

$$a(x) = f(x; w)$$

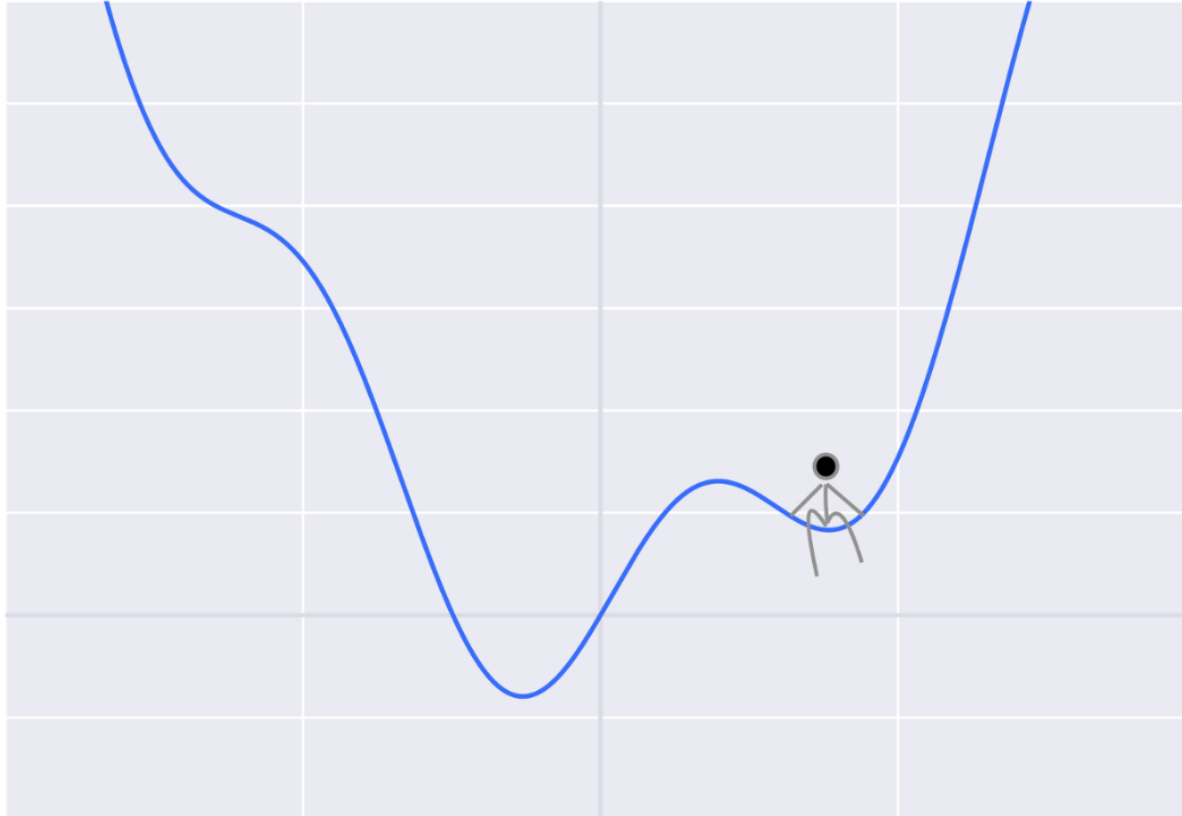
The diagram shows the equation  $a(x) = f(x; w)$  with two blue arrows pointing upwards from the words 'признаки' (features) and 'весы' (weights) to the arguments  $x$  and  $w$  of the function  $f$ .

# Обучение параметров модели



Градиентный спуск — последовательное изменение весов, уменьшающее ошибку на каждом шаге

# Проблема локальных минимумов



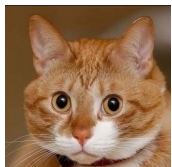
Bob chillin at a local optima



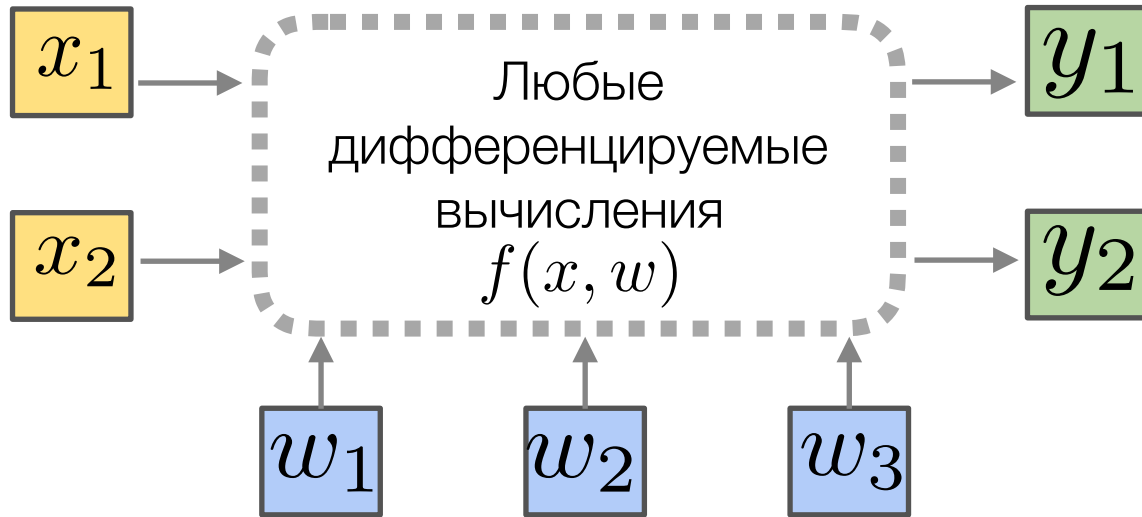
**WE NEED TO GO DEPPER**

QUINTACRE.COM

# Общая идея графа вычислений



входные  
данные  
(объект)



P(кот)

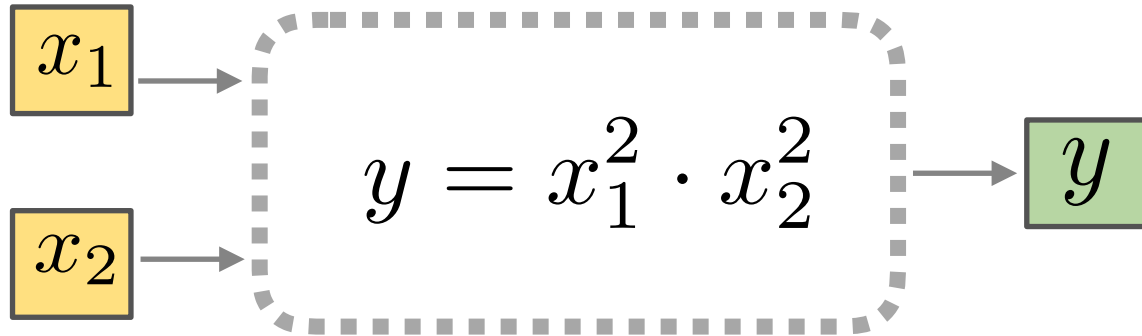
P(пес)

выходные  
данные  
(предсказание)

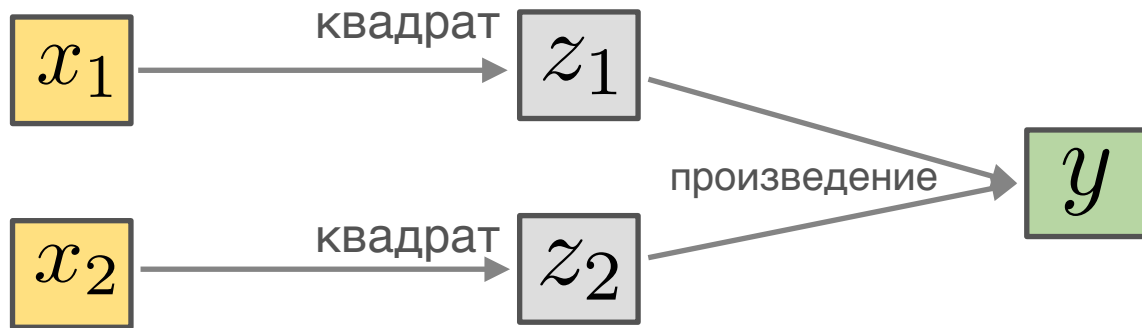
параметры

(настраиваются во время обучения)

# Пример



# Пример: разбиение на базовые операции

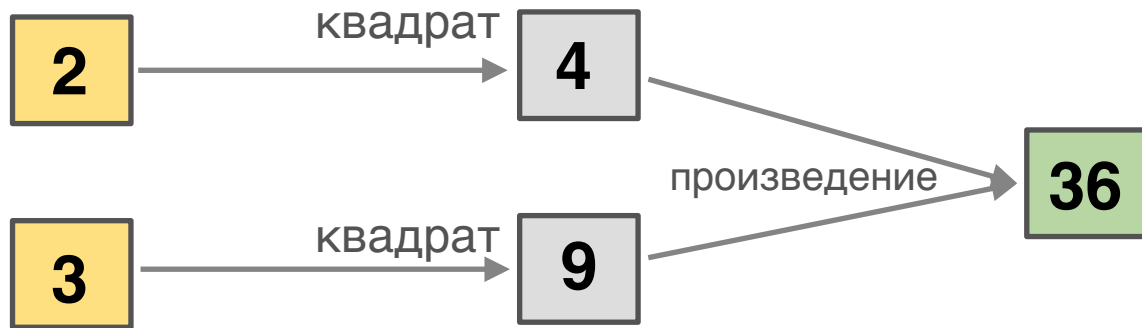


$$z_1 = x_1^2$$

$$z_2 = x_2^2$$

$$y = z_1 \cdot z_2$$

# Пример: проход вперед



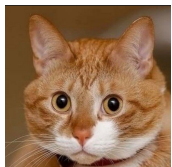
$$z_1 = x_1^2$$

$$z_2 = x_2^2$$

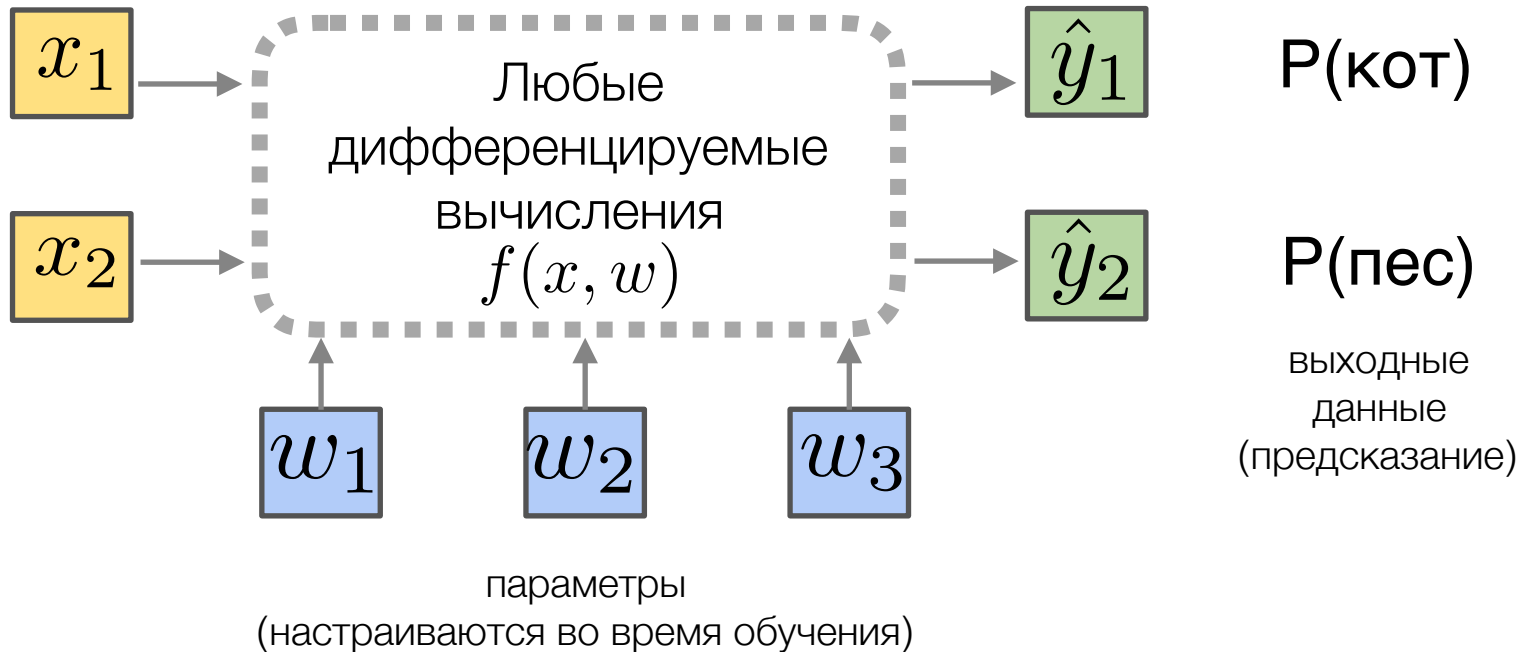
$$y = z_1 \cdot z_2$$



# Общая идея графа вычислений



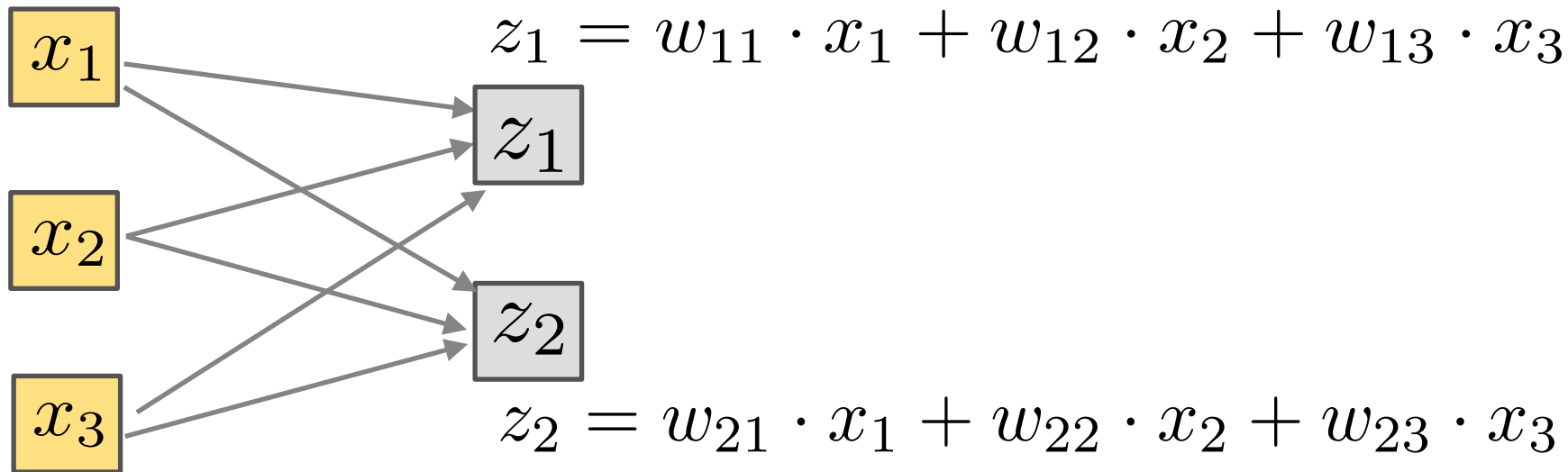
входные  
данные  
(объект)



# Примеры базовых операций (слоев)

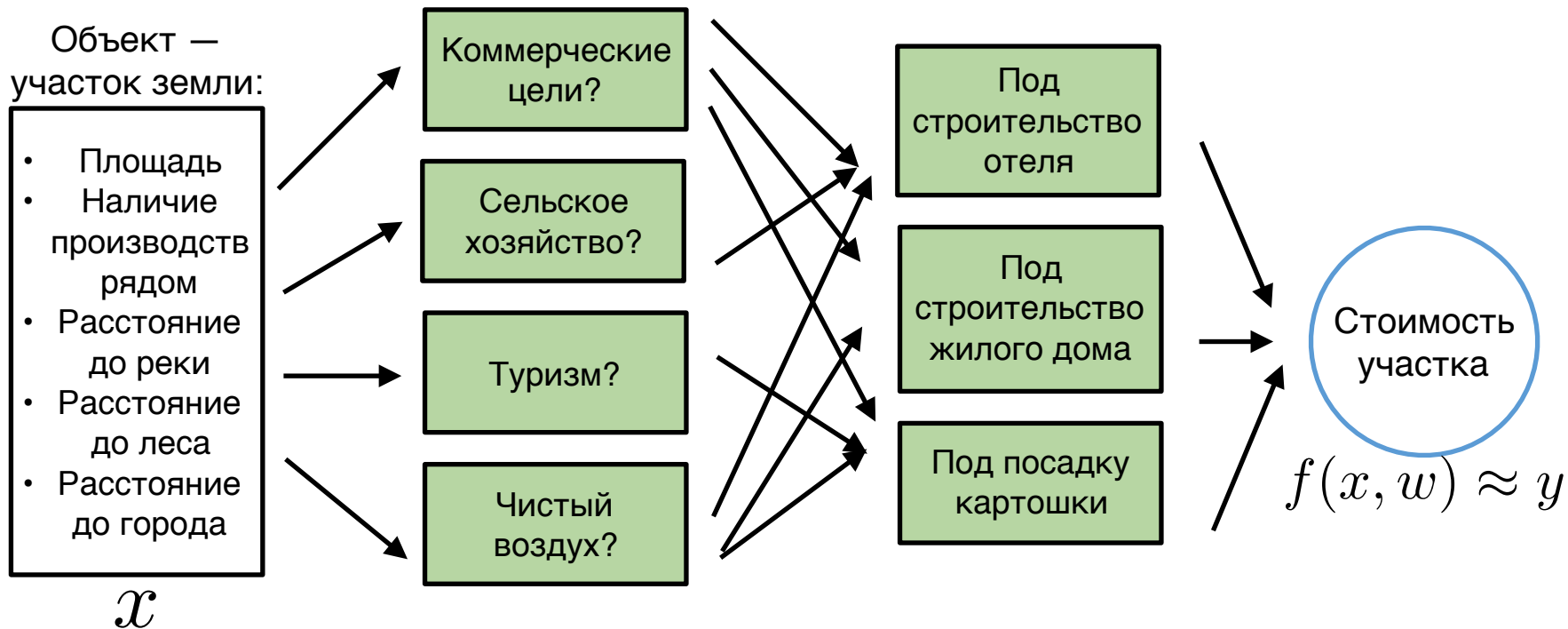
- Полносвязный слой
- Слой нелинейности
- Слой Softmax

# Полносвязный слой

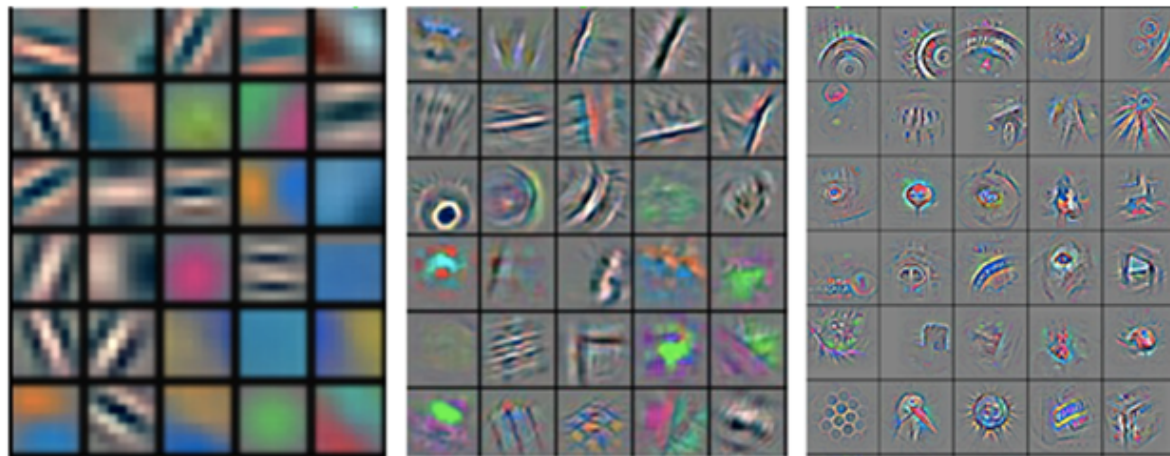
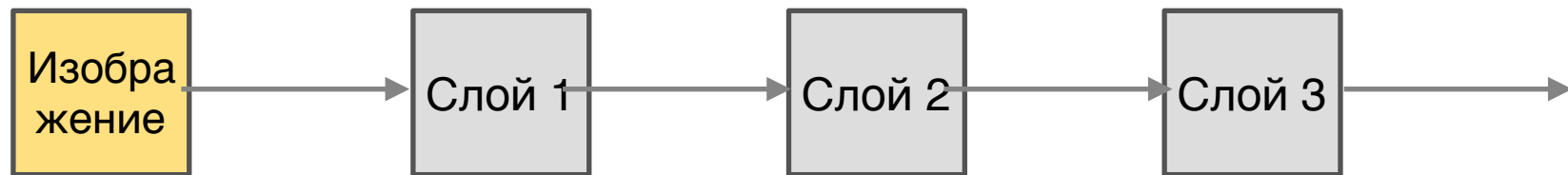


Параметры:  $w_{ij}$

# Нейронная сеть - обобщение линейной модели



# Анализ активаций в обработке изображений



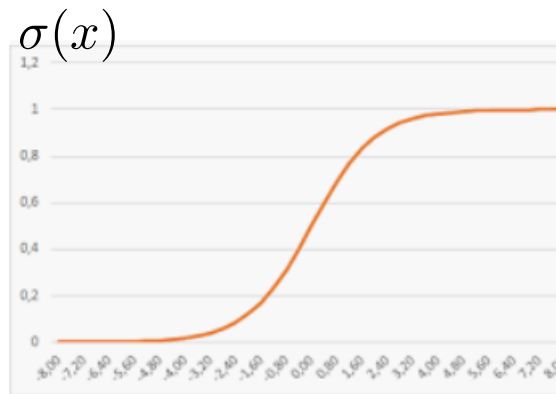
# Слой нелинейности

$$x_1 \rightarrow z_1 \quad z_1 = \sigma(x_1)$$

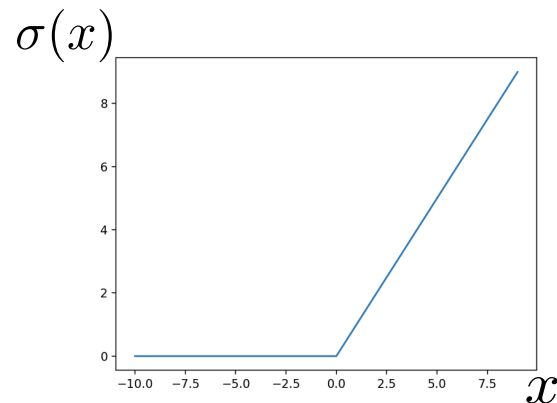
$$x_2 \rightarrow z_2 \quad z_2 = \sigma(x_2)$$

$$x_3 \rightarrow z_3 \quad z_3 = \sigma(x_3)$$

Параметров нет!

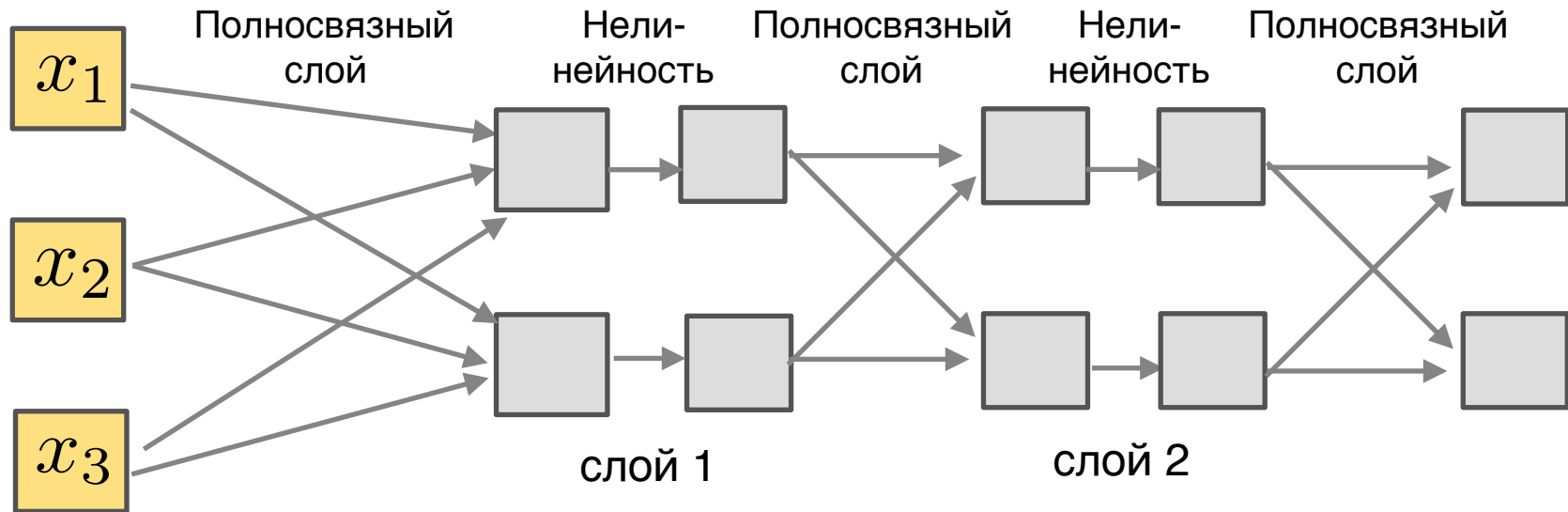


$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$$



ReLU:  $\sigma(x) = \max(0, x)$

# Полносвязная нейронная сеть (MLP)



- Архитектура MLP:
  - Кол-во слоев
  - Кол-во нейронов в каждом слое
  - Какую нелинейность использовать

# Как работать с изображениями

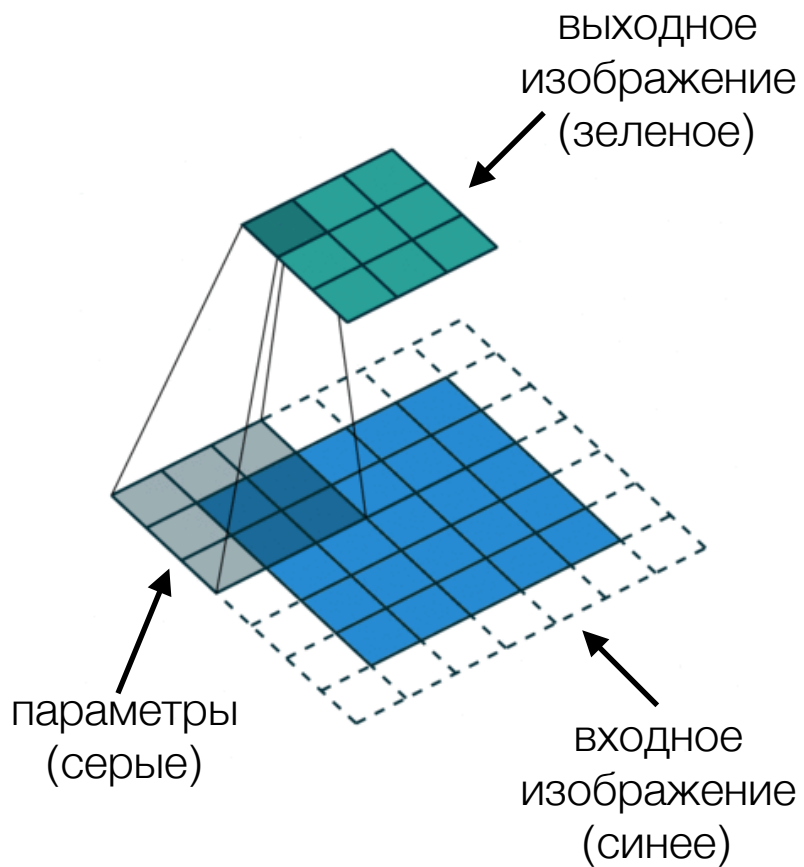
- Изображение – это набор чисел



62	62	63	64	65	66	67	67	69	70	71	72	72	73	73	73	72	72	71	70	69	67	66	66	66	65	63	62	61	60	60	
61	62	63	64	66	66	67	68	68	69	70	71	71	72	72	73	72	72	71	71	70	69	68	66	66	65	65	63	62	61	60	60
61	62	63	64	66	66	68	68	69	70	70	71	72	73	73	73	72	72	71	71	69	68	67	66	66	65	65	64	63	62	61	61
61	63	64	64	66	67	68	68	68	69	70	71	71	73	73	74	73	73	73	71	70	69	68	66	66	65	64	63	62	61	61	60
61	63	64	65	67	68	69	69	70	70	71	71	72	55	53	69	72	72	71	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	60	60	60
63	64	65	66	67	68	69	69	70	70	71	72	42	4	5	11	48	72	71	71	69	69	68	67	66	65	64	62	62	60	59	59
63	65	66	66	68	68	69	70	71	71	71	72	18	4	4	7	8	66	71	70	69	68	68	67	66	65	64	63	61	59	59	58
63	65	67	67	68	69	69	70	71	71	72	64	4	27	24	54	33	29	52	64	68	68	67	66	65	64	63	62	61	59	58	58
64	65	66	66	68	69	70	71	41	24	24	12	17	24	48	60	37	43	30	52	66	68	67	66	65	64	63	61	60	59	58	57
65	66	67	67	68	69	71	40	6	6	6	5	34	36	12	47	34	17	29	54	43	63	67	66	65	64	63	62	60	59	58	57
64	65	66	66	68	69	33	6	6	5	5	7	16	19	4	47	44	27	24	40	67	66	66	65	65	64	63	61	60	59	58	57
63	64	65	65	67	30	6	6	5	5	5	6	8	9	20	27	51	78	41	44	66	65	65	65	65	64	63	62	60	59	58	57
63	64	65	65	34	5	5	5	5	5	5	4	19	6	7	54	64	20	59	65	65	64	64	64	63	62	61	60	59	57	56	56
63	64	64	65	14	5	6	5	4	5	4	18	7	5	4	19	10	11	65	64	64	64	63	61	66	62	61	60	59	58	56	56
63	64	64	65	53	7	4	5	6	6	7	10	6	5	5	4	21	24	18	64	64	64	63	62	64	65	62	62	60	59	58	57
64	64	64	64	65	50	4	4	4	5	11	16	6	6	4	6	35	16	26	66	64	64	63	61	72	67	63	62	61	59	58	57
64	64	64	64	65	46	4	4	4	5	6	9	8	5	29	10	43	56	29	57	64	64	63	61	70	67	62	64	65	59	58	57
64	64	64	65	66	27	5	4	4	5	6	6	6	18	66	20	57	60	46	36	75	70	62	61	70	67	62	61	60	59	58	58
49	50	62	65	57	5	5	6	6	6	6	6	41	59	28	60	58	44	22	63	71	72	60	69	68	61	60	58	59	59	58	
42	52	57	52	26	5	5	5	5	5	5	5	70	50	43	61	62	64	39	42	64	60	62	56	63	65	65	67	61	53	53	
32	32	32	33	6	5	5	5	5	6	6	11	39	21	33	51	50	45	46	18	32	36	33	23	44	70	71	51	42	27	31	
50	50	51	39	5	5	5	5	6	6	6	42	69	28	34	42	39	43	37	26	29	40	26	29	26	35	42	35	33	18	19	
52	53	51	22	5	5	5	6	5	6	5	44	56	17	51	54	53	54	56	51	22	54	54	55	55	54	53	53	53	52	52	
54	54	53	8	5	5	5	5	6	5	6	13	52	42	21	51	54	51	49	49	50	22	41	45	42	42	41	40	41	44	43	42
52	52	54	36	8	5	6	6	6	6	28	55	32	32	54	53	51	51	51	51	44	25	51	51	49	49	50	49	48	46	46	46
54	54	52	53	30	7	5	6	6	5	6	40	54	29	52	51	53	56	55	52	51	38	52	52	50	49	46	46	45	46	47	
51	52	51	53	27	14	5	4	5	4	7	47	51	21	39	49	47	49	52	52	49	35	31	48	46	47	47	47	46	46	43	
48	50	51	53	25	14	17	8	4	4	17	46	40	18	43	47	46	49	52	54	53	53	54	18	50	49	46	47	47	47	45	45
49	49	49	49	22	12	20	24	6	14	35	51	39	48	48	50	51	49	51	51	52	50	41	58	48	47	47	47	45	45	46	
51	49	50	50	22	13	19	36	13	12	42	50	40	73	50	50	50	49	48	49	48	49	45	51	46	44	44	44	42	45	47	
47	49	49	47	20	16	26	39	21	15	36	48	42	61	47	48	51	47	50	51	51	51	49	47	47	47	44	43	45	46	46	
48	50	48	52	19	13	33	36	18	18	36	49	51	54	47	47	49	46	46	49	49	49	49	47	44	53	44	48	44	46	46	45



# Сверточный слой



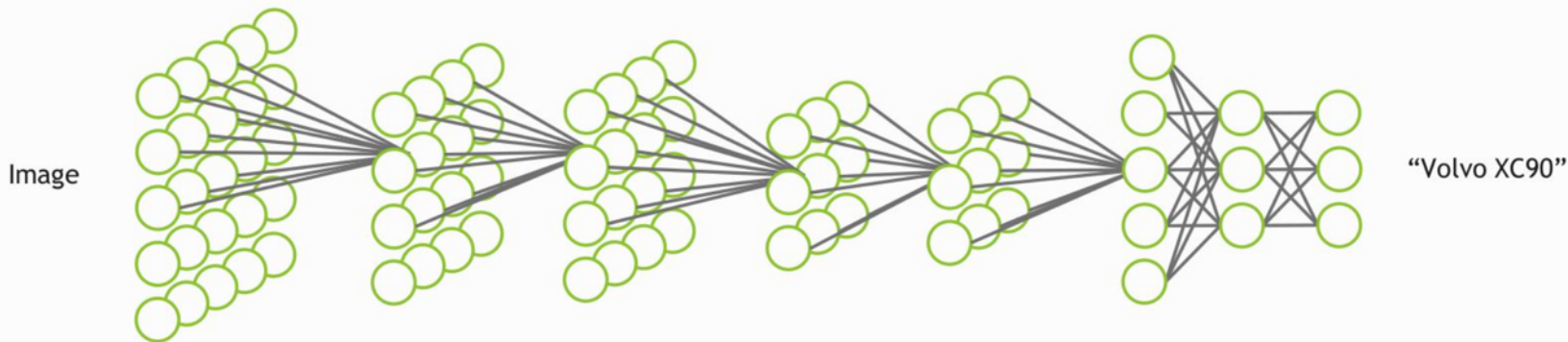
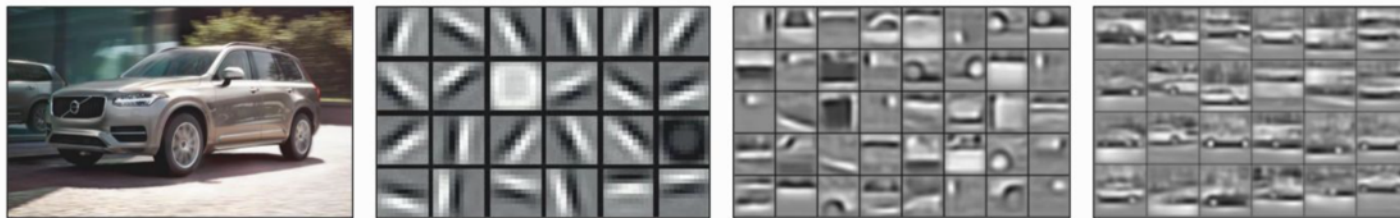
\*

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

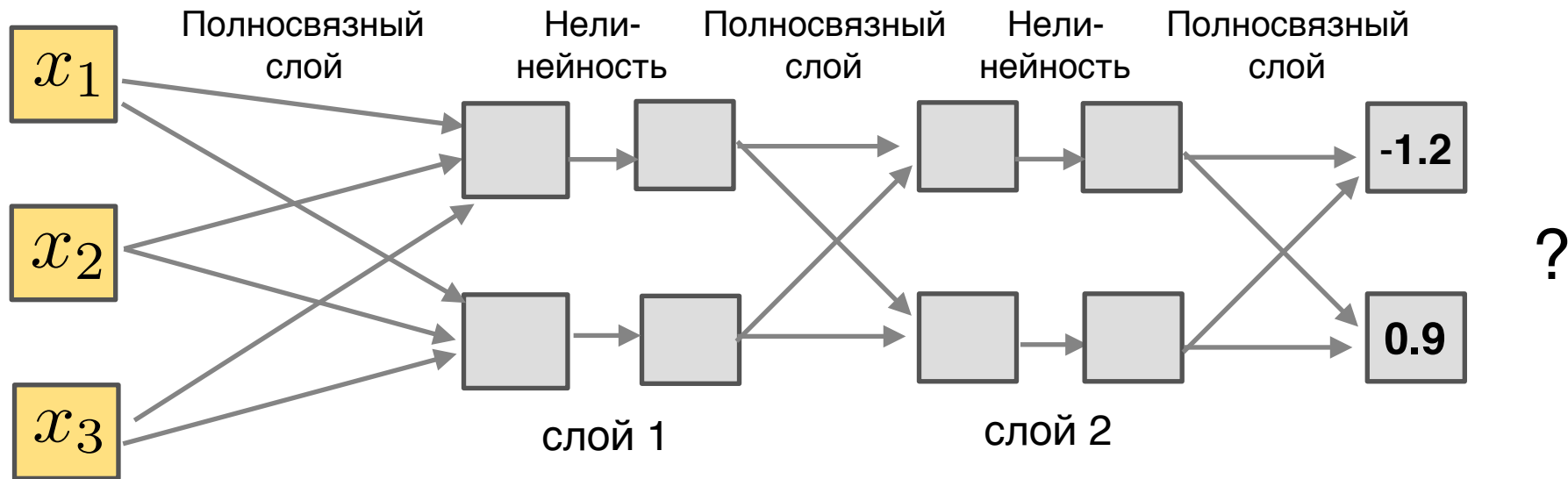


# Сверточные нейронные сети

- Иерархические признаки
- Сложные корреляции



# Полносвязная нейронная сеть (MLP)



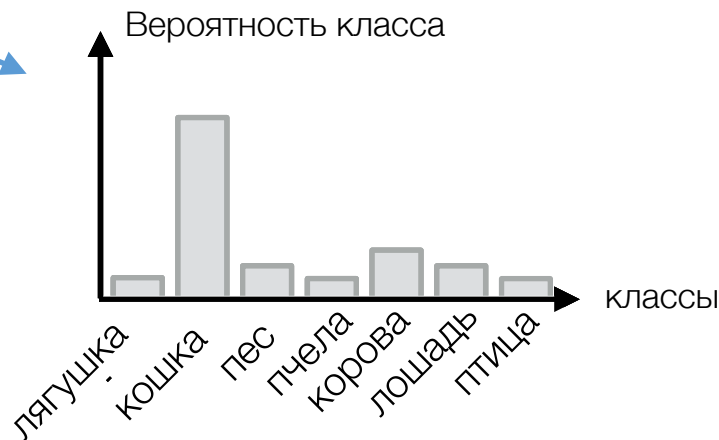
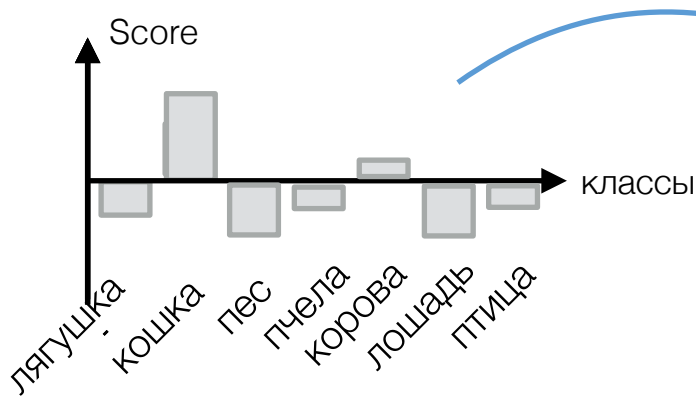
# Слой Softmax

- Последний слой нейросети в задаче классификации
- Предсказывает вероятности классов

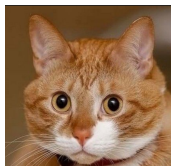
Величины  $z$  суммируются в 1!

$$z_i = \frac{\exp(x_i)}{\exp(x_1) + \dots + \exp(x_c)}$$

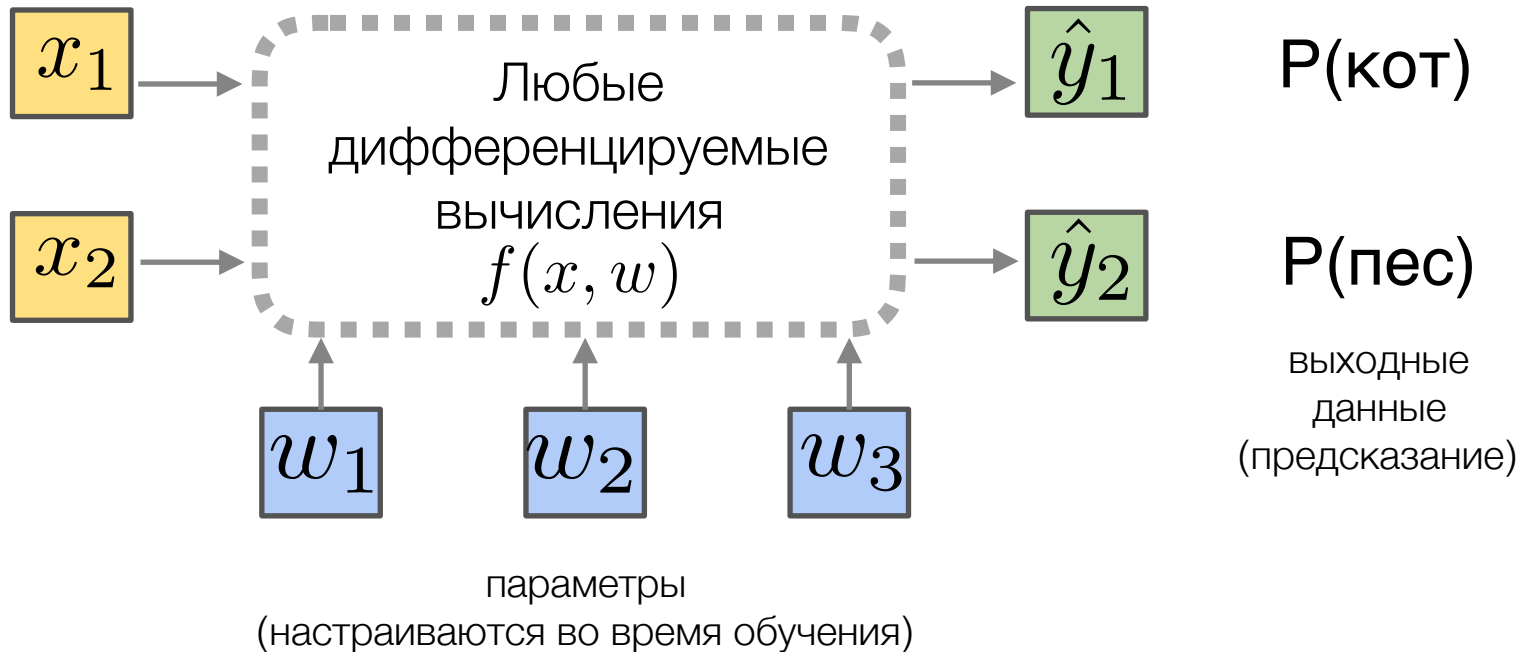
$c$  — число классов



# Общая схема нейронной сети



входные  
данные  
(объект)



# Оценка качества нейронной сети

Предсказания  
нейронной сети

пес кот жук

1	0.7	<b>0.1</b>	0.2
2	0.8	0.15	<b>0.05</b>
3	0.04	<b>0.9</b>	0.06
4	<b>0.6</b>	0.1	0.3
5	0.75	<b>0.2</b>	0.05

Правильные  
ответы  
Y

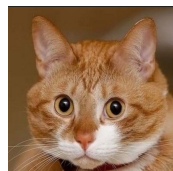
1	кот
2	жук
3	кот
4	пес
5	кот

Кросс-энтропийный  
функционал

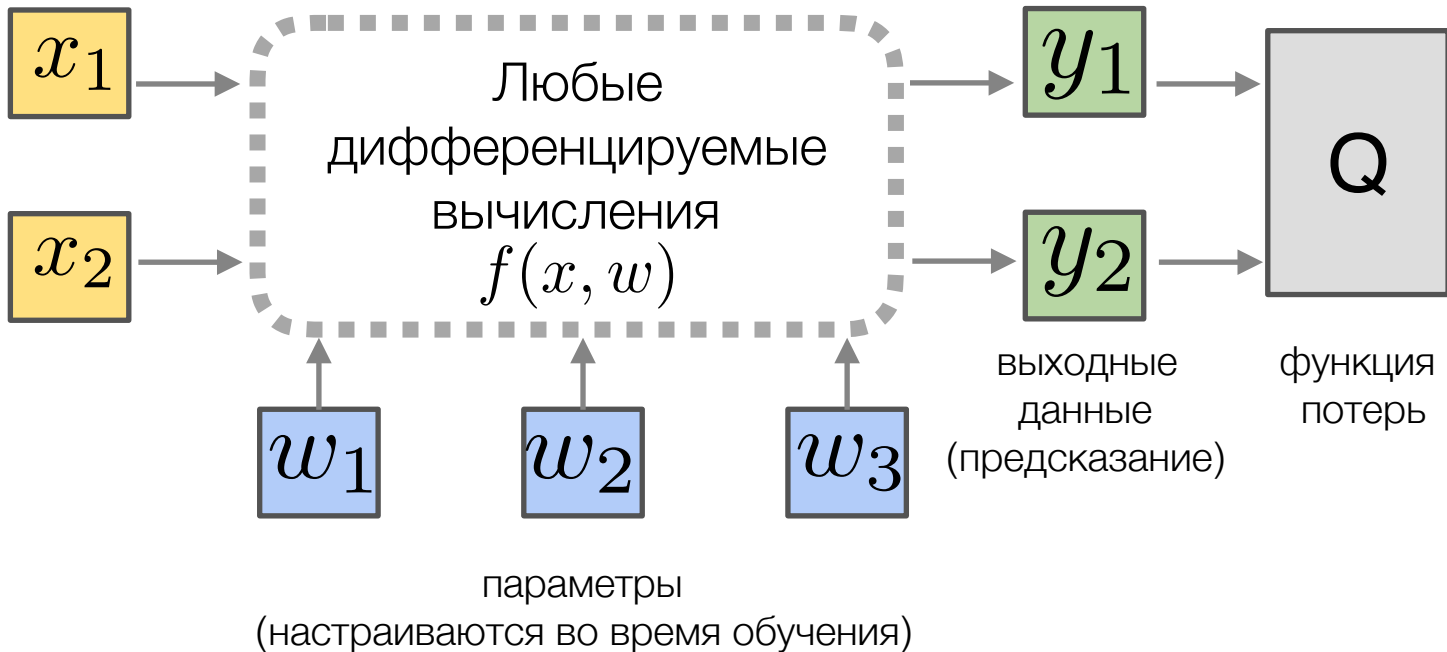
$$Q(w) = - \sum_{n=1}^N \log P(y_n | f(x_n, w))$$

$$-\log 0.1 - \log 0.05 - \log 0.9 - \log 0.6 - \log 0.2$$

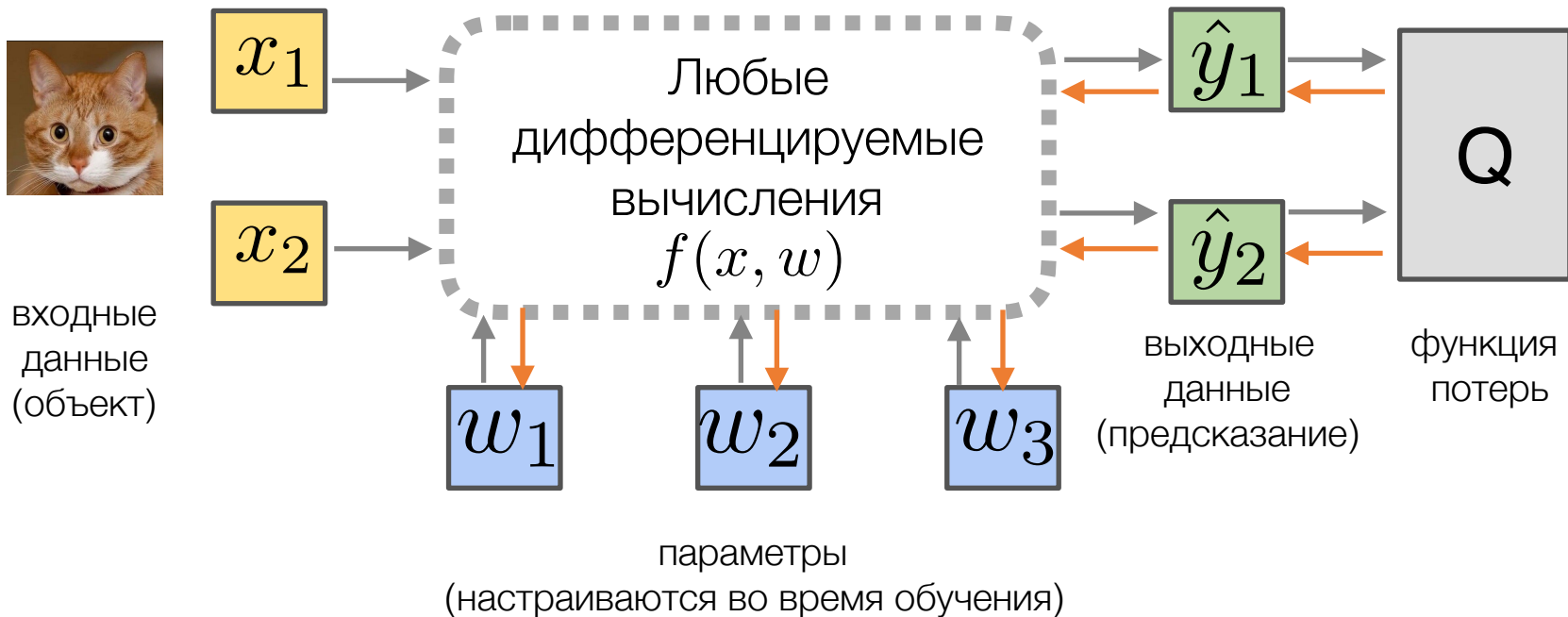
# Общая схема нейронной сети



входные  
данные  
(объект)



# Общая идея графа вычислений

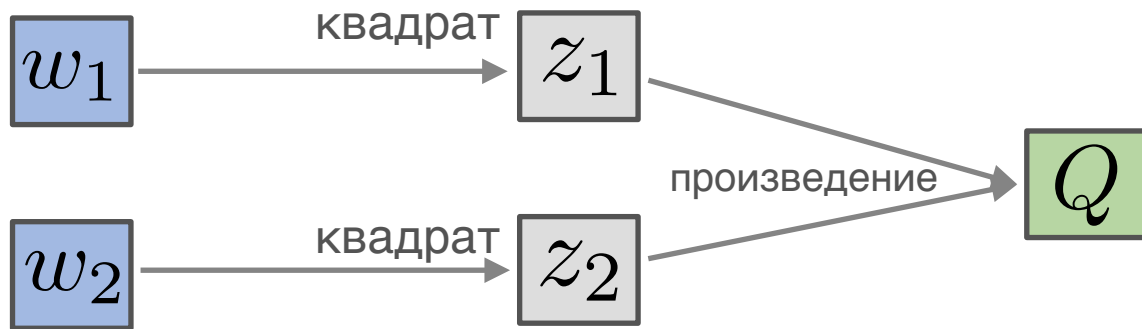


Проход вперед: вычисление предсказаний  $y$   $\longrightarrow$

Проход назад: вычисление производных по  $w$   $\longleftarrow$



# Пример: разбиение на базовые операции

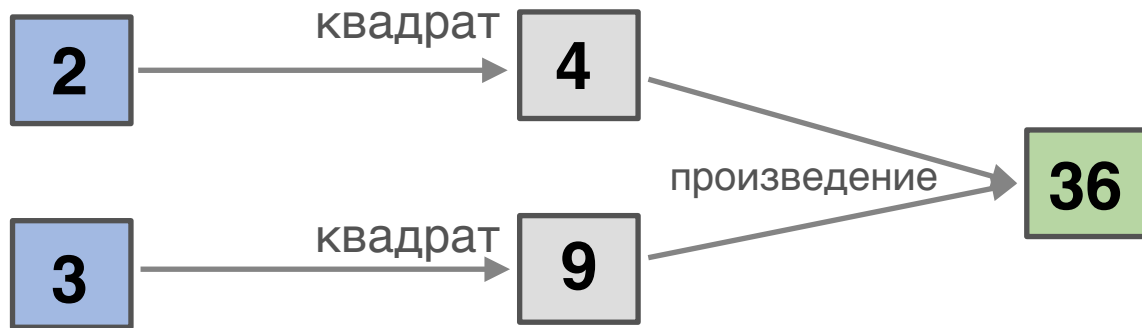


$$z_1 = w_1^2$$

$$z_2 = w_2^2$$

$$Q = z_1 \cdot z_2$$

# Пример: проход вперед



$$z_1 = w_1^2$$

$$z_2 = w_2^2$$

$$Q = z_1 \cdot z_2$$

# Пример: производные

$$Q = w_1^2 \cdot w_2^2$$

$$\frac{\partial Q}{\partial w_1} - ?$$

## Пример: производные

$$Q = w_1^2 \cdot w_2^2$$

$$\frac{\partial Q}{\partial w_1} = 2w_1 \cdot w_2^2$$

# Пример: производные базовых блоков

квадрат

произведение

проход  
вперед

$$z_1 = w_1^2$$

$$Q = z_1 \cdot z_2$$

проход  
назад

$$\frac{\partial z_1}{\partial w_1} = 2w_1$$

$$\frac{\partial Q}{\partial z_1} = z_2$$

# Пример: композиция производных

квадрат

произведение

проход  
вперед

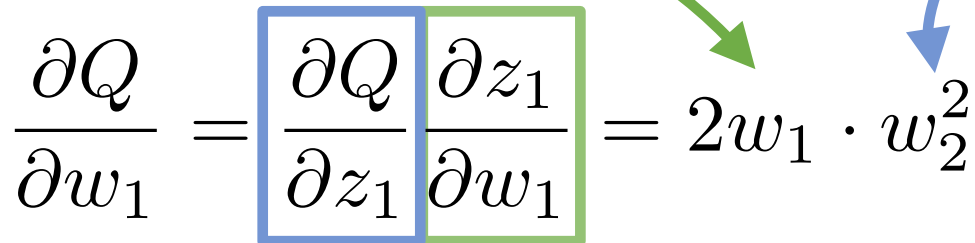
$$z_1 = w_1^2$$

$$Q = z_1 \cdot z_2$$

проход  
назад

$$\frac{\partial z_1}{\partial w_1} = 2w_1$$

$$\frac{\partial Q}{\partial z_1} = z_2$$

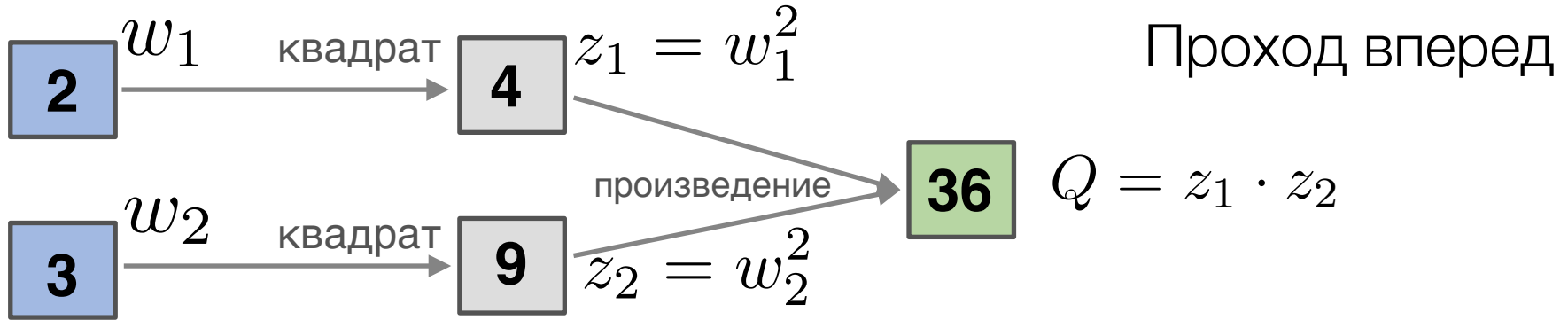
$$\frac{\partial Q}{\partial w_1} = \frac{\partial Q}{\partial z_1} \frac{\partial z_1}{\partial w_1} = 2w_1 \cdot w_2^2$$


# Пример: композиция производных

	квадрат	произведение
проход вперед	$z_1 = w_1^2$	$Q = z_1 \cdot z_2$
проход назад	$\frac{\partial z_1}{\partial w_1} = 2w_1$	$\frac{\partial Q}{\partial z_1} = z_2$

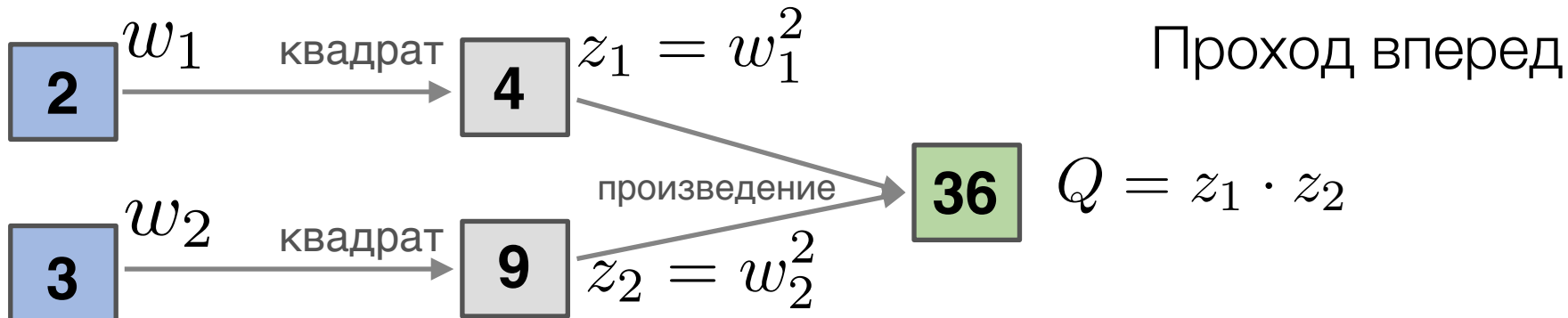
**Если мы знаем производную каждого простого блока, мы можем посчитать производные сложной функции!**

# Пример: проход вперед



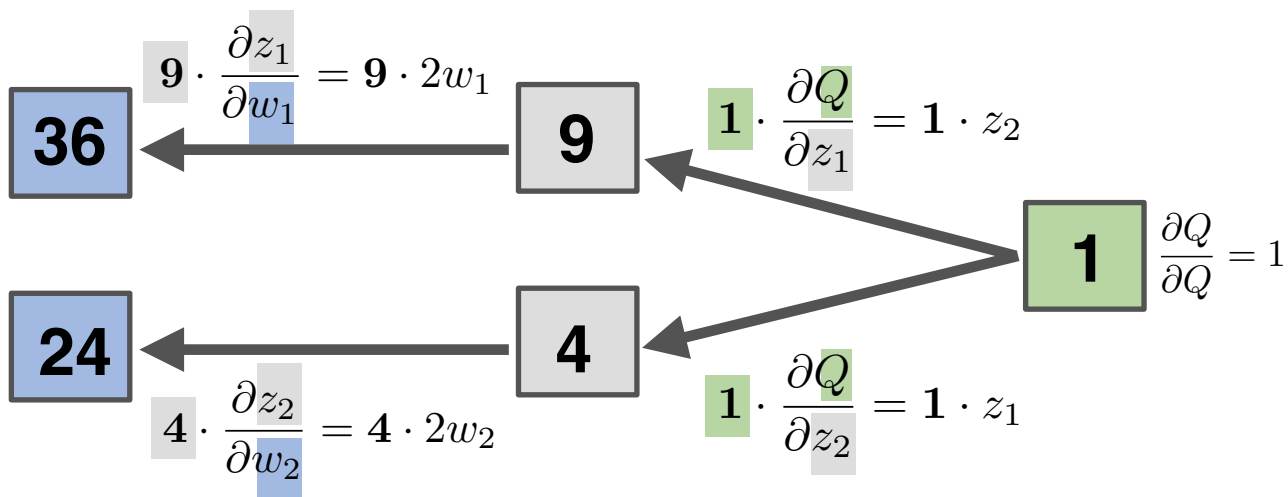


# Пример: проход назад



Прход назад:

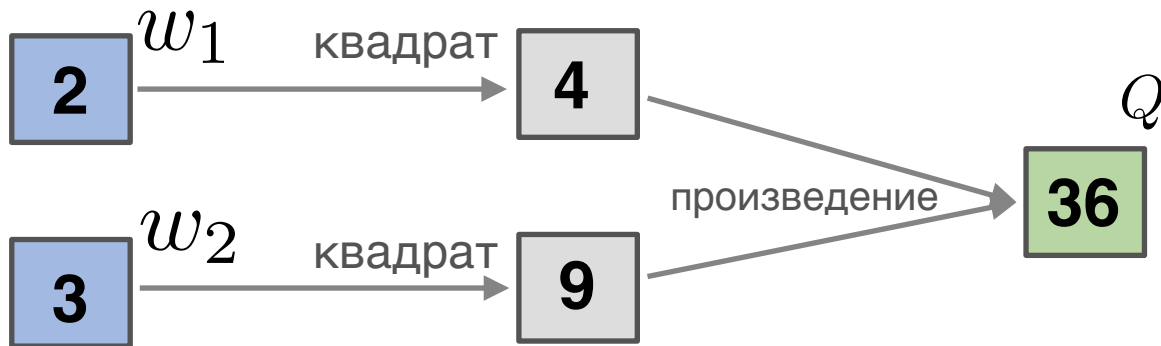
$$\frac{\partial Q}{\partial ?}$$



# Алгоритм обратного распространения ошибки

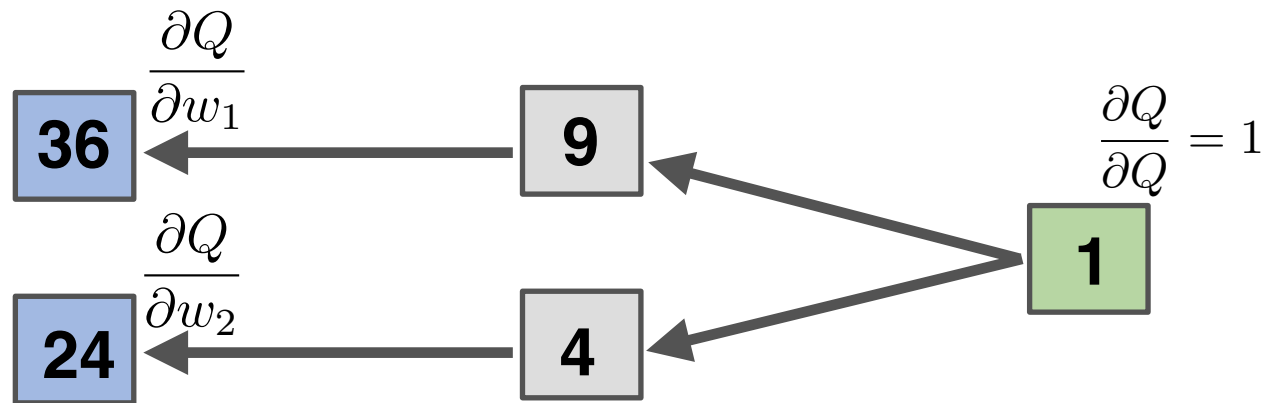
$$Q = w_1^2 \cdot w_2^2$$

Проход вперед  
(вычисление  
предсказания)

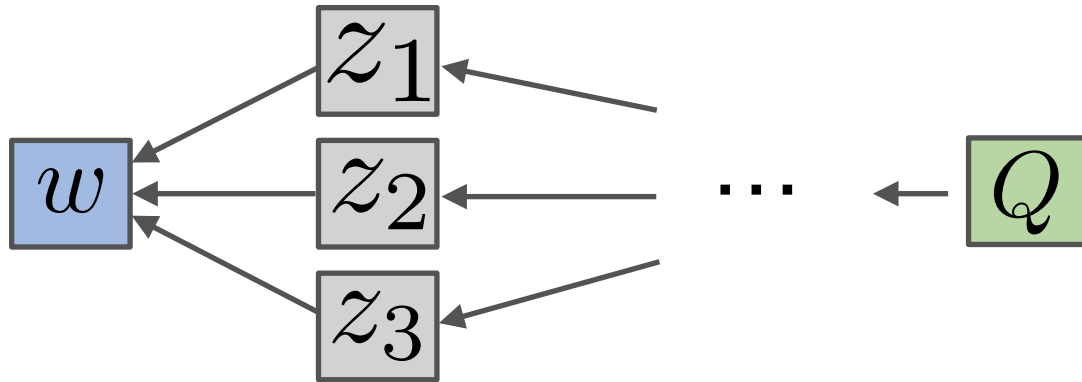


Проход назад  
(вычисление  
производных)

$$\frac{\partial Q}{\partial w_2} = 2w_2 \cdot w_1^2$$



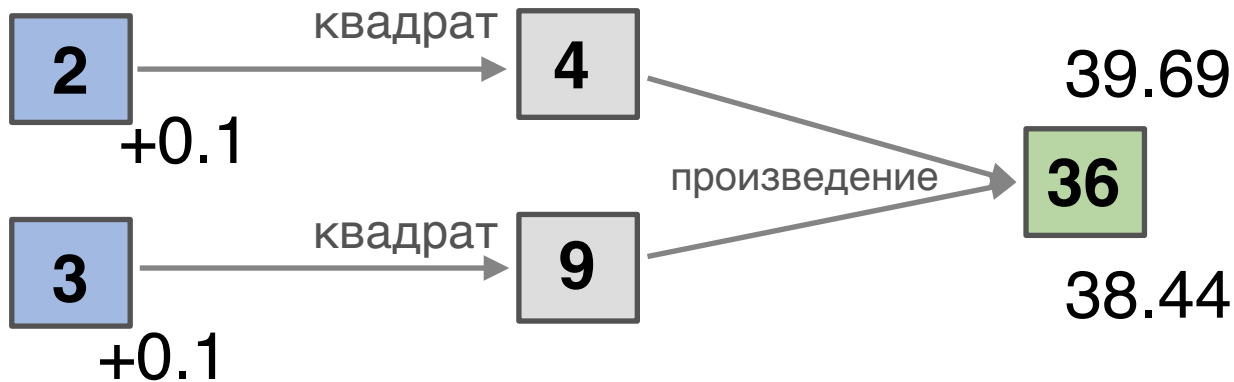
# Основная формула обратного распространения ошибки



$$\frac{\partial Q}{\partial w} = \sum_{j:w \rightarrow z_j} \frac{\partial z_j}{\partial w} \frac{\partial Q}{\partial z_j}$$

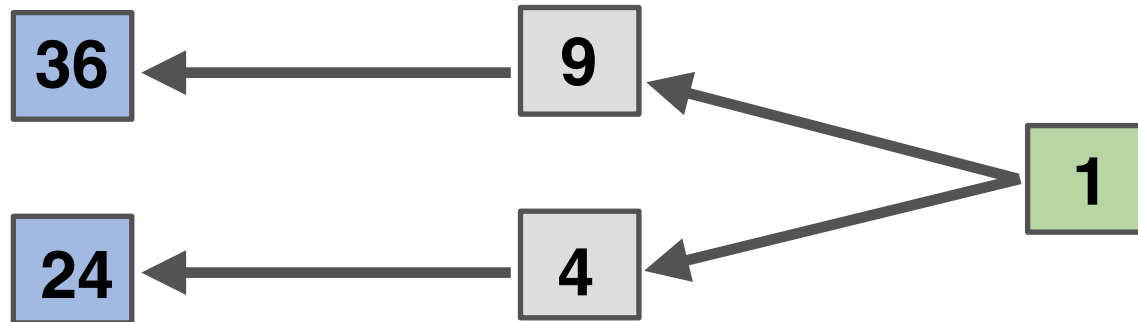
# Производные

$$Q = w_1^2 \cdot w_2^2$$



Проход вперед  
(вычисление  
предсказания)

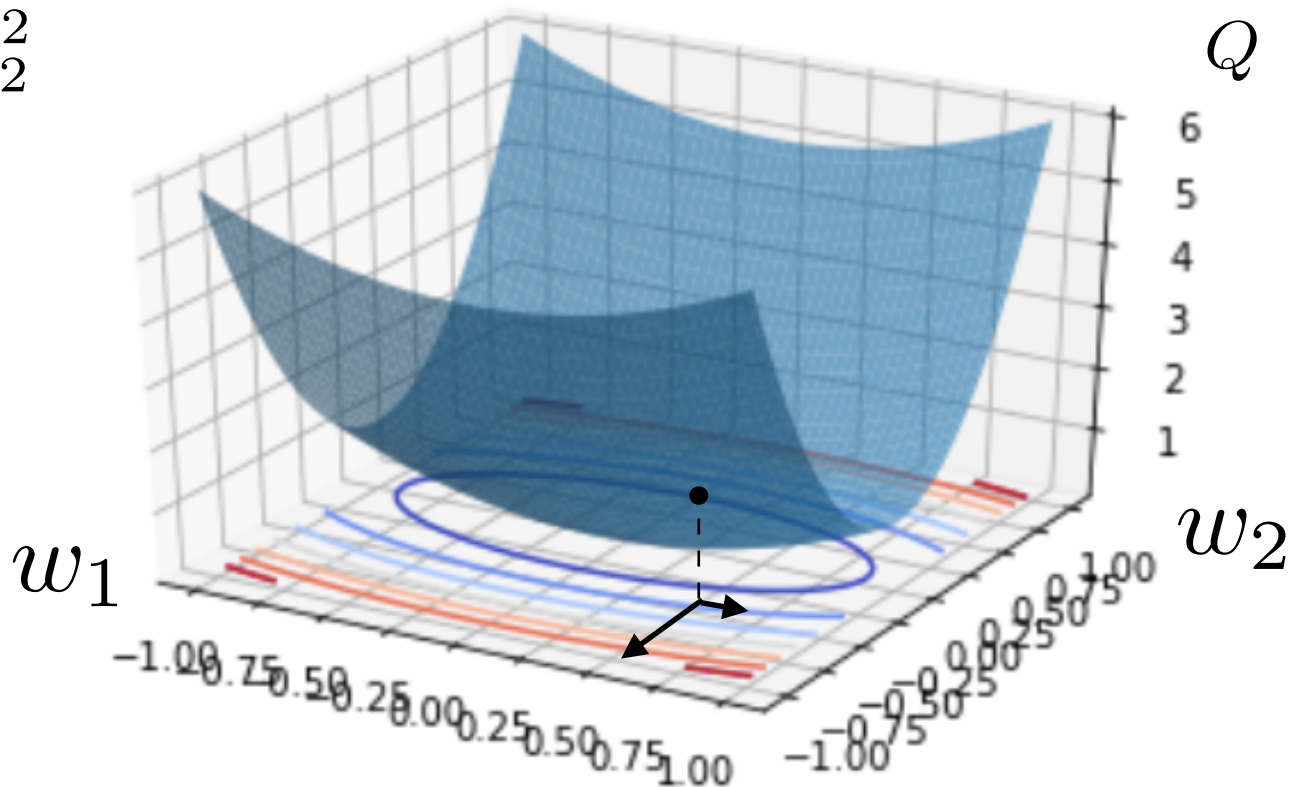
Проход назад  
(вычисление  
производных)



# Производные: визуализация


$$Q = w_1^2 + 5w_2^2$$

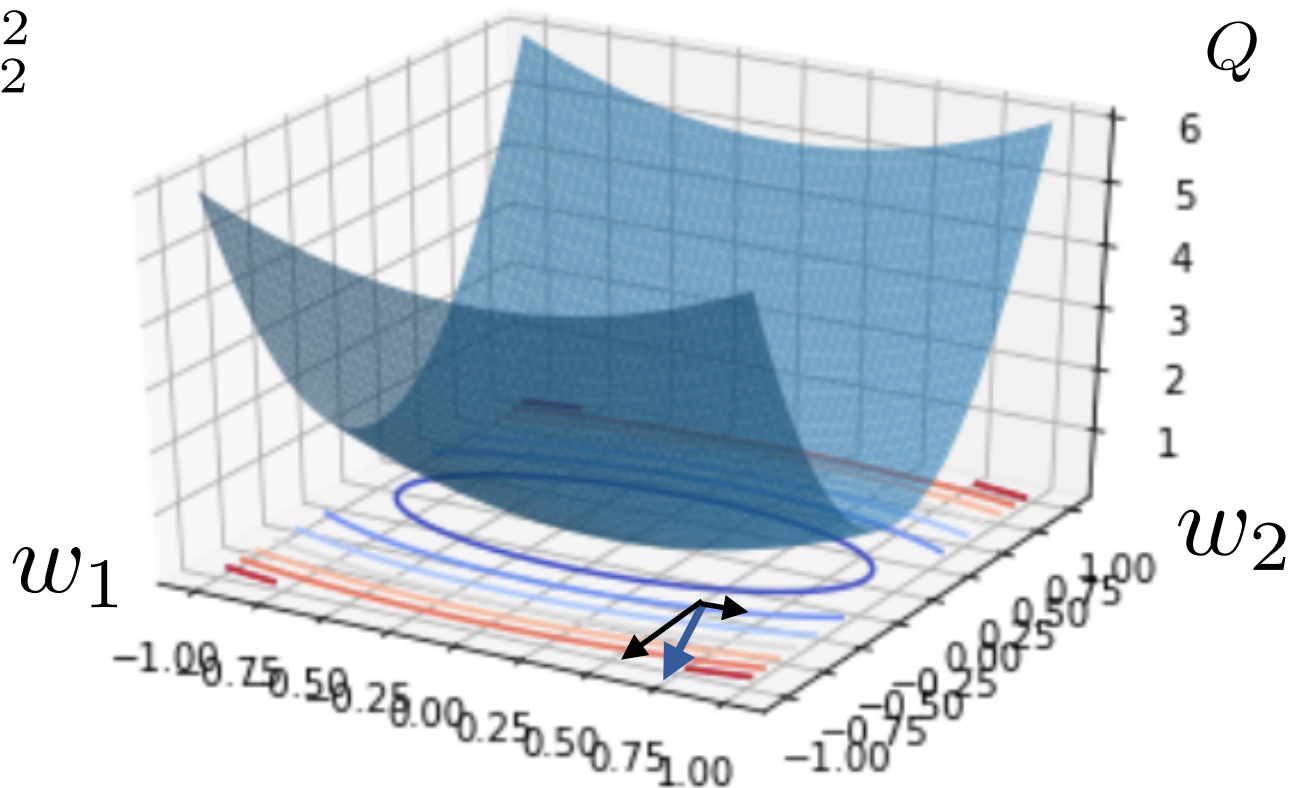
Производные показывают, как сильно изменится  $Q$ , если немного поменять  $w$



# Градиент — вектор частных производных

$$Q = w_1^2 + 5w_2^2$$

Градиент  показывает, в каком направлении  $Q$  увеличивается больше всего



# Градиентный спуск

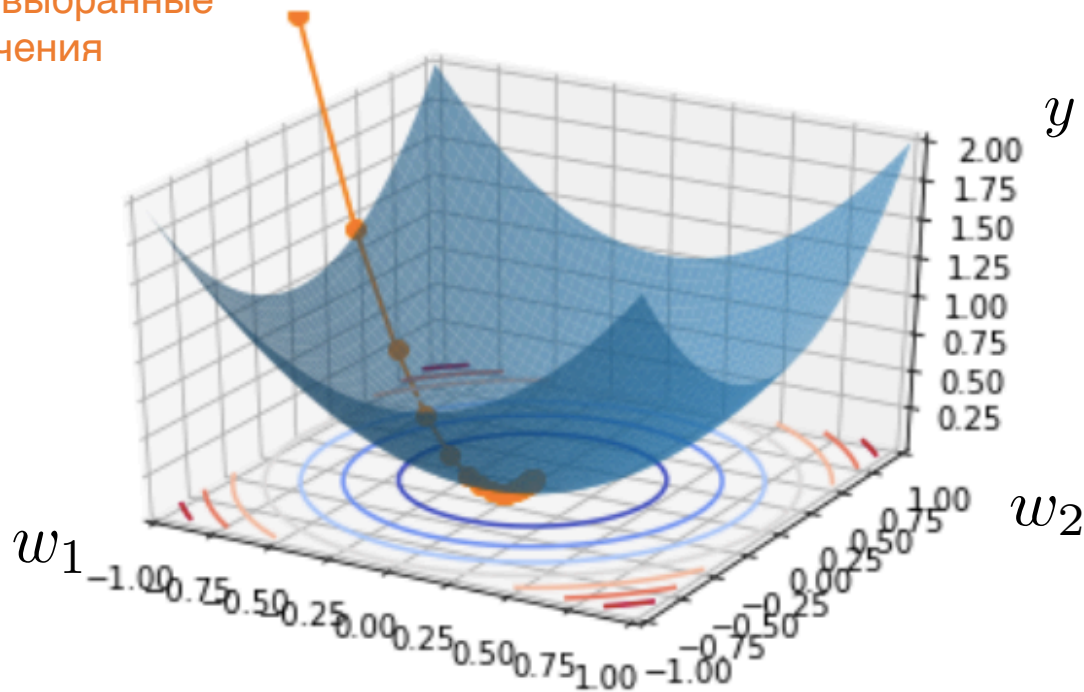
1.  $w_1 = -1$  ← случайно выбранные значения  
 $w_2 = 0.25$  ← значения

2. Повторять:

$$w_1 := w_1 - 0.01 \frac{\partial Q}{\partial w_1}$$

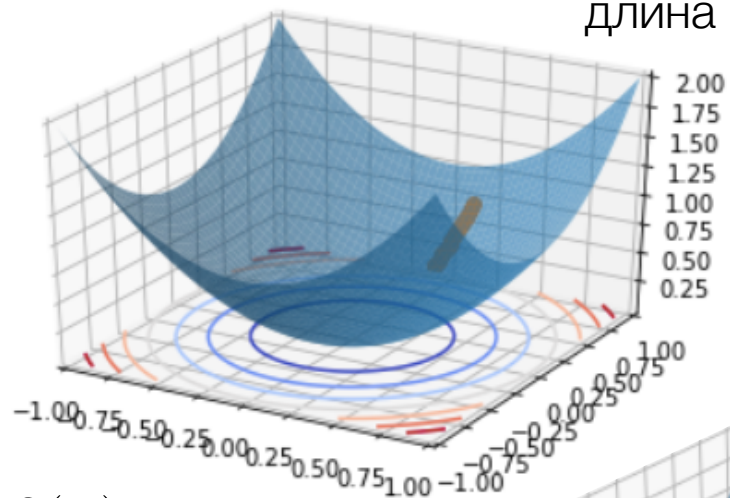
$$w_2 := w_2 - 0.01 \frac{\partial Q}{\partial w_2}$$

↑  
длина шага  
(можно менять)

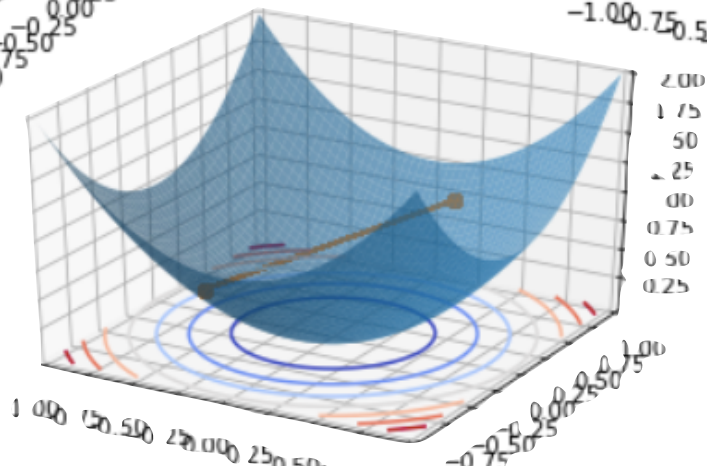
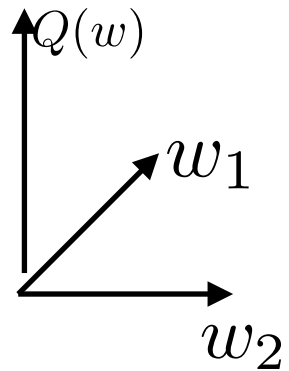
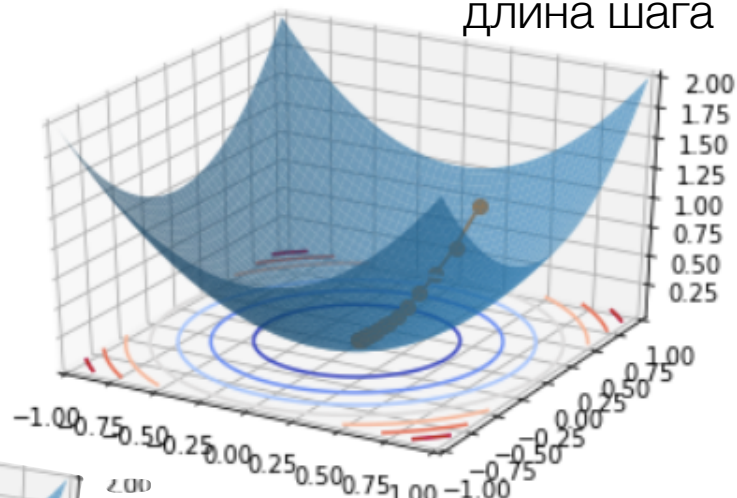


# Длина шага

Маленькая  
длина шага



Оптимальная  
длина шага



Большая  
длина шага

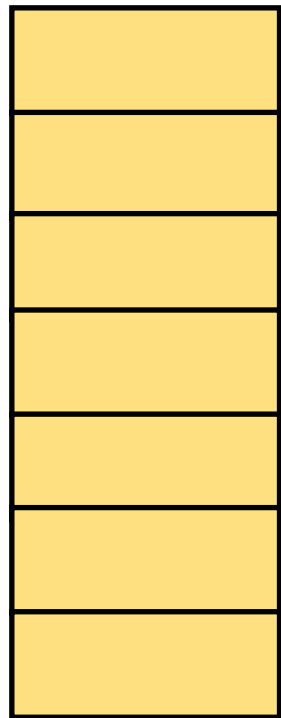


# Общая схема обучения нейронной сети

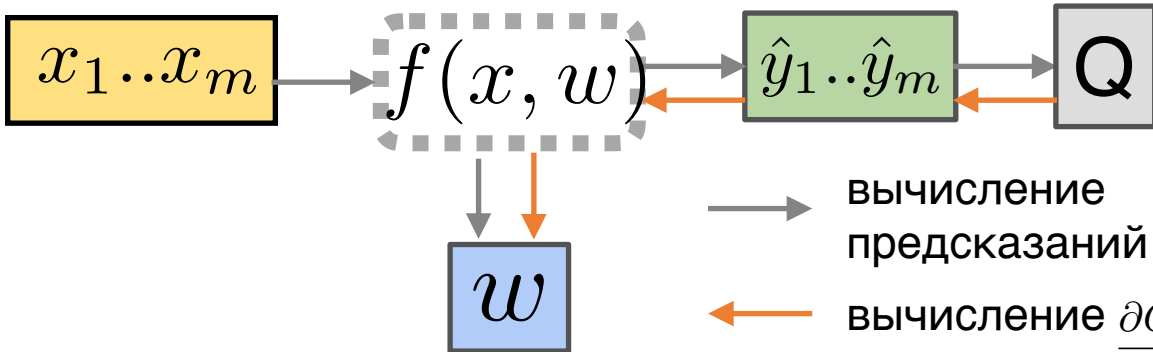
Обучающая выборка

признаки

объекты



МИНИ-  
батчи



→ вычисление  
предсказаний

← вычисление  $\frac{\partial Q}{\partial w}$   
градиентов

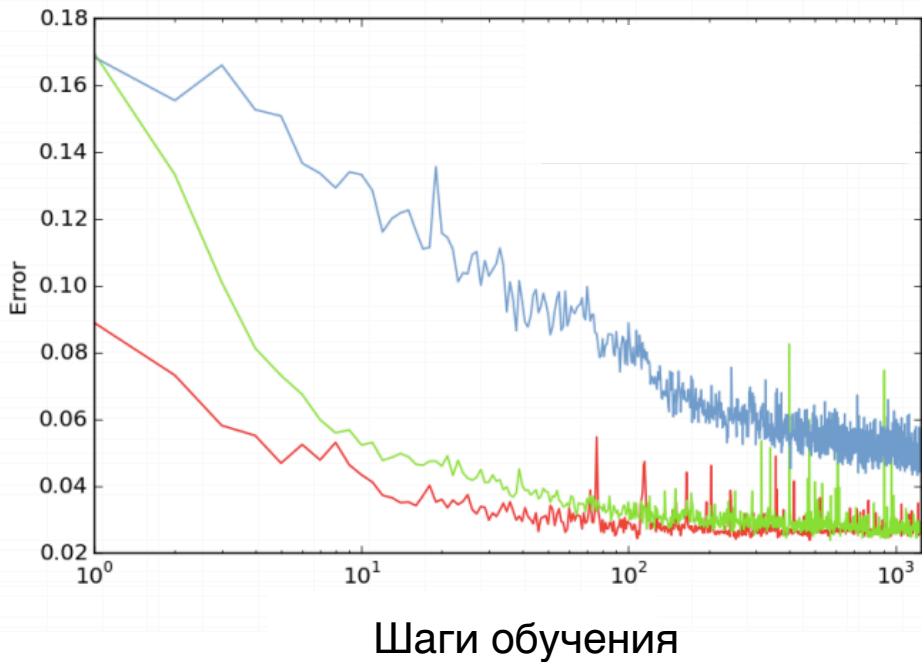
Шаг стохастического градиентного спуска:

$$w^{new} = w^{old} - \eta \frac{\partial Q}{\partial w}$$

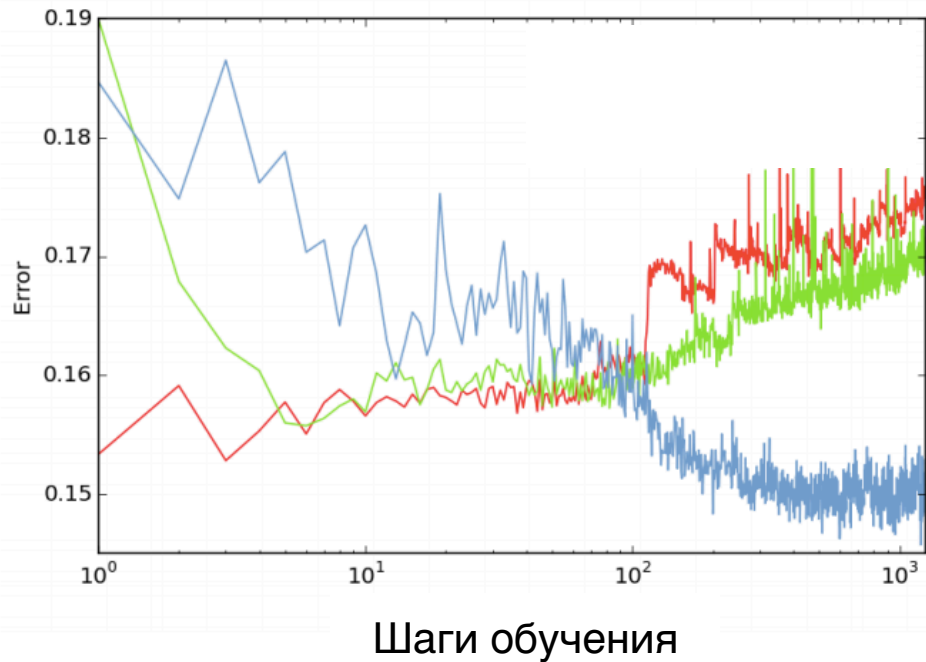
длина шага  
(гиперпараметр)

# Динамика обучения нейронной сети

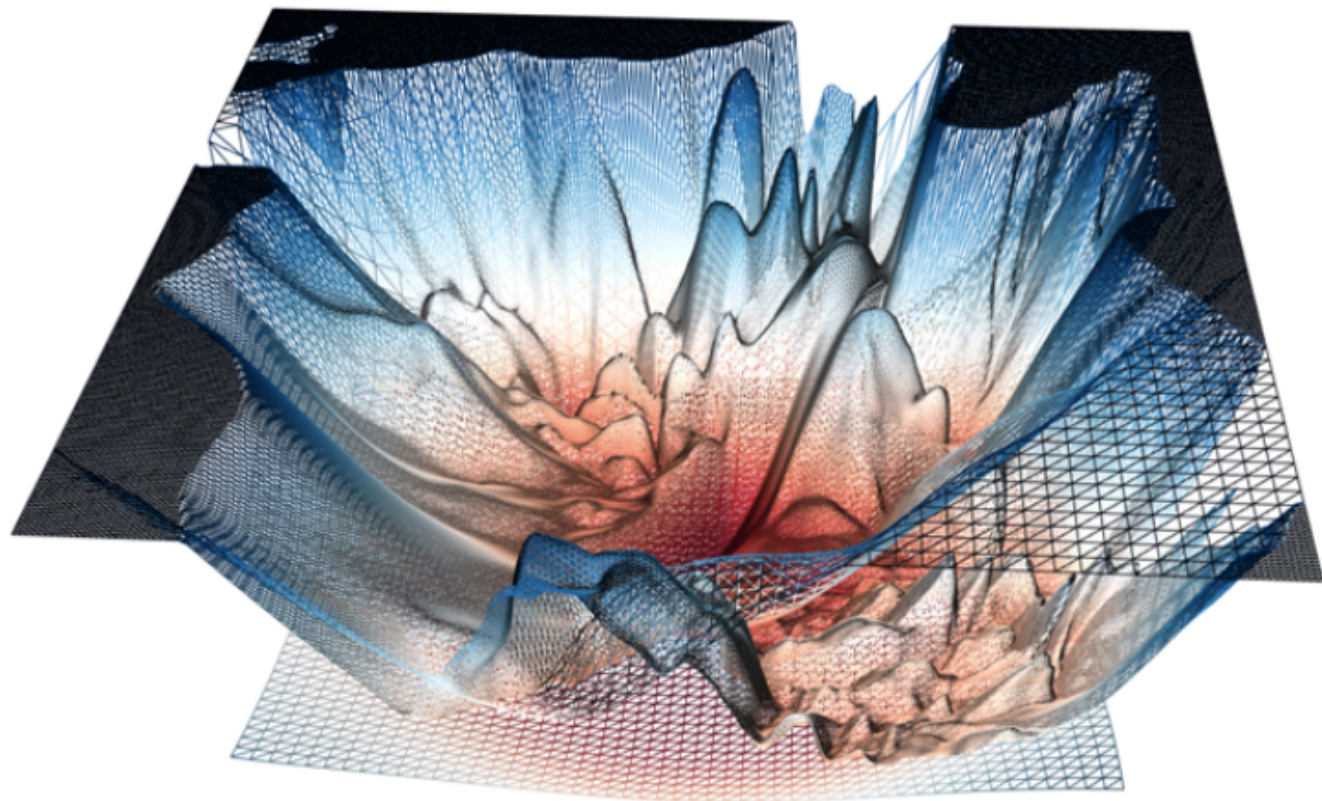
Ошибка на обучающей выборке



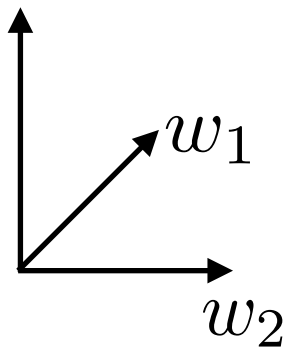
Ошибка на тестовой выборке



# Проблема локальных минимумов



ошибка



# Выбор гиперпараметров нейронной сети

- Сколько слоев выбрать? Каких слоев? Размер слоев? — архитектура нейронной сети
- Как инициализировать веса?
- Как оптимизировать веса?
- Как предотвратить переобучение? (много способов) Какие именно способы использовать?
- и т. д.

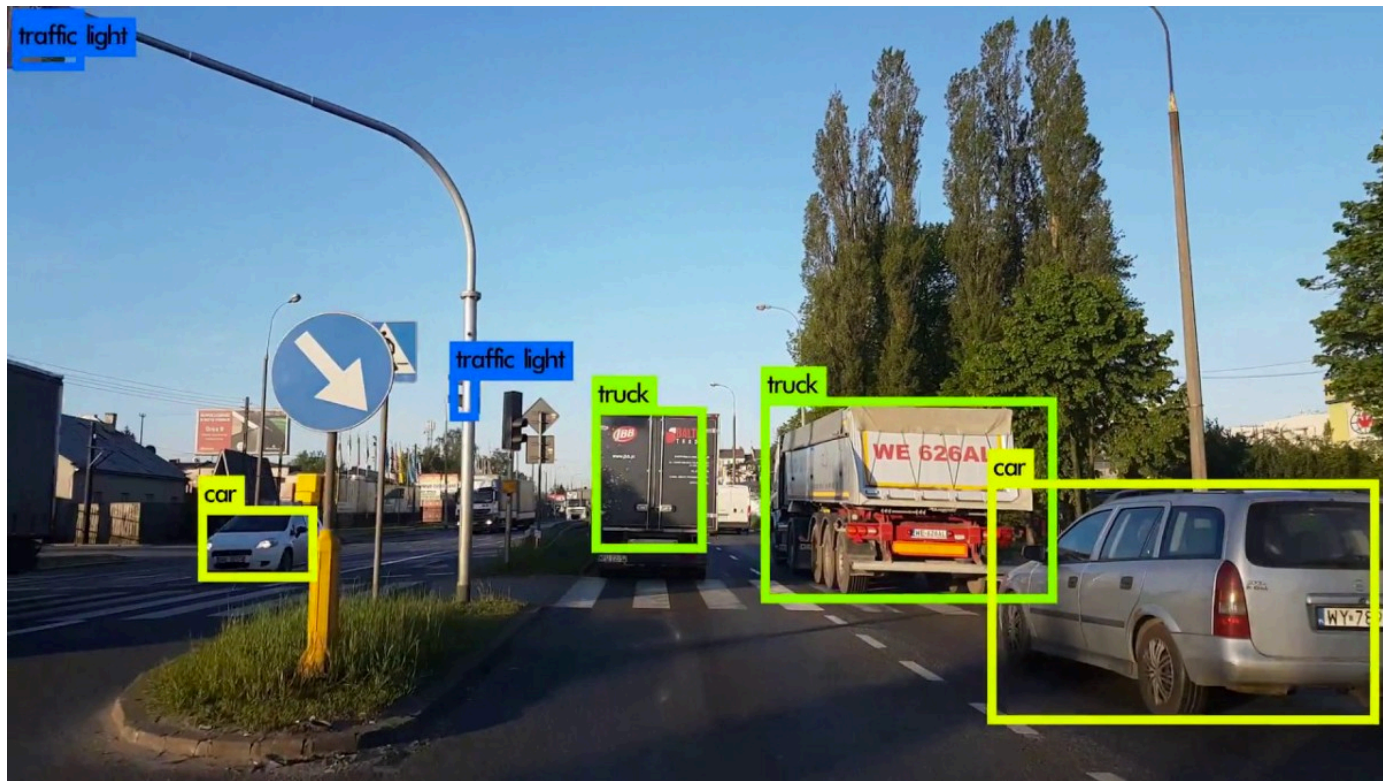
# Итоги

- Нейронные сети концептуально похожи на линейные модели, но реализуют гораздо более сложные преобразования данных
- Алгоритм обратного распространения ошибки — ключевой инструмент обучения нейронных сетей
- Самый популярный алгоритм обучения нейронных сетей — стохастический градиентный спуск

# Определение эмоции по фотографии

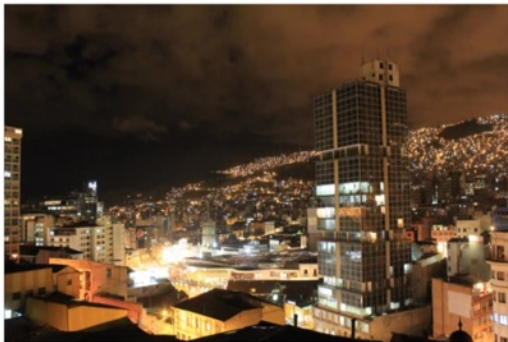
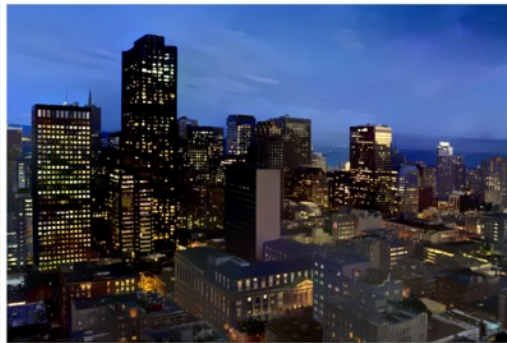


# Детекция для беспилотного авто



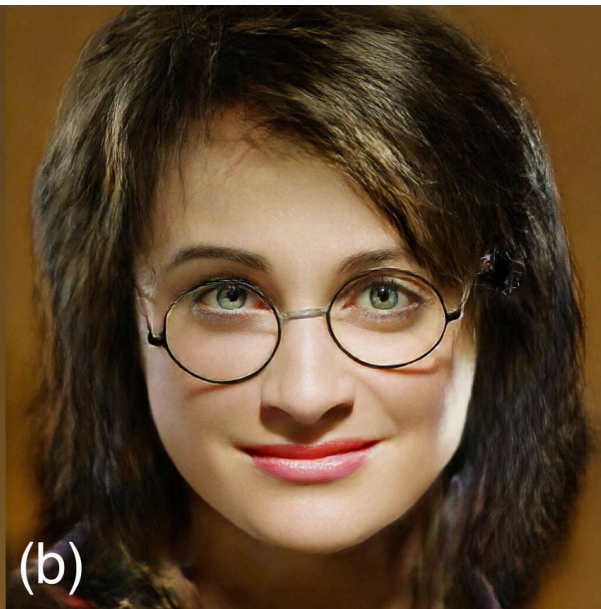
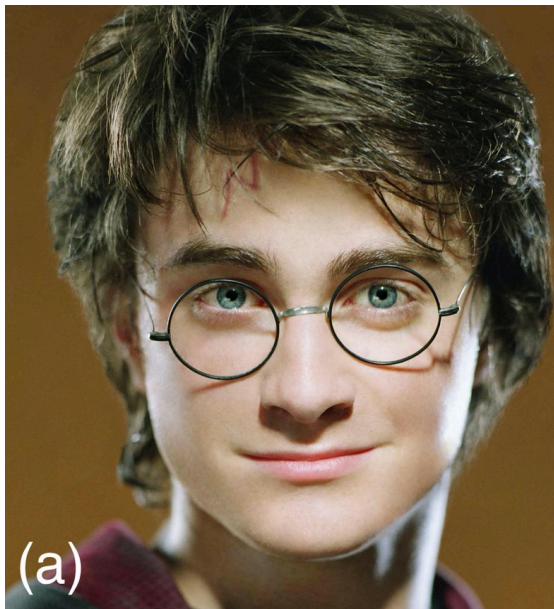


# Перенос стиля





# Еще перенос стиля



# Нейросетевой перевод

DETECT LANGUAGE

ENGLISH

RUSSIAN

SPANISH



RUSSIAN

ENGLISH

SPANISH



“What to do about mass unemployment? This is going to be a massive social challenge. There will be fewer and fewer jobs that a robot cannot do better [than a human]. These are not things that I wish will happen. These are simply things that I think probably will happen.” —Elon Musk



284/5000



«Что делать с массовой безработицей? Это будет серьезной социальной проблемой. Будет все меньше и меньше работ, которые робот не сможет выполнить лучше, чем человек. Это не то, что я желаю, чтобы это произошло. Это просто вещи, которые, я думаю, вероятно, произойдут». - Элон Маск



«Chto delat' s massovoy bezrabotitsey? Eto budet ser'yeznoy sotsial'noy problemoy. Budet vse men'she i men'she rabot, kotoryye robot ne smozhet vypolnit' luchshe, chem chelovek. Eto ne to, chto ya zhelayu, chtoby eto proizoshlo. Eto prasto veshchi, kotoryye, ya dumayu,

[Show more](#)

# Суммаризация текста

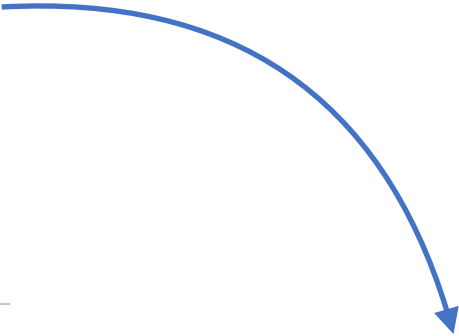
Первый скоростной подземный тоннель под Лос-Анджелесом откроется 10 декабря. Об этом написал в своем Twitter-аккаунте бизнесмен, миллиардер и глава космической компании SpaceX Илон Маск.

«Почти готов», — отметил предприниматель.

...

О своем новом проекте Маск объявил еще в конце декабря 2016 года. Он пожаловался на то, что его очень раздражают пробки в городе.

---



илон маск анонсировал первый  
скоростной тоннель под лос-анджелесом

Оценить лекцию

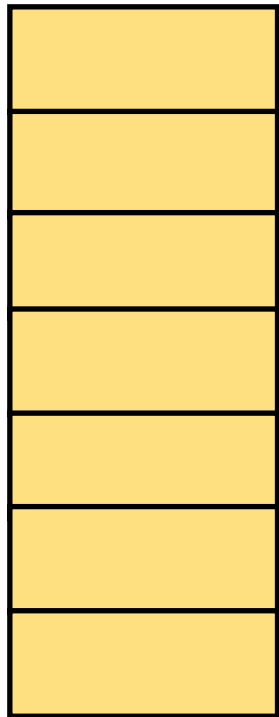


# Общая схема обучения нейронной сети

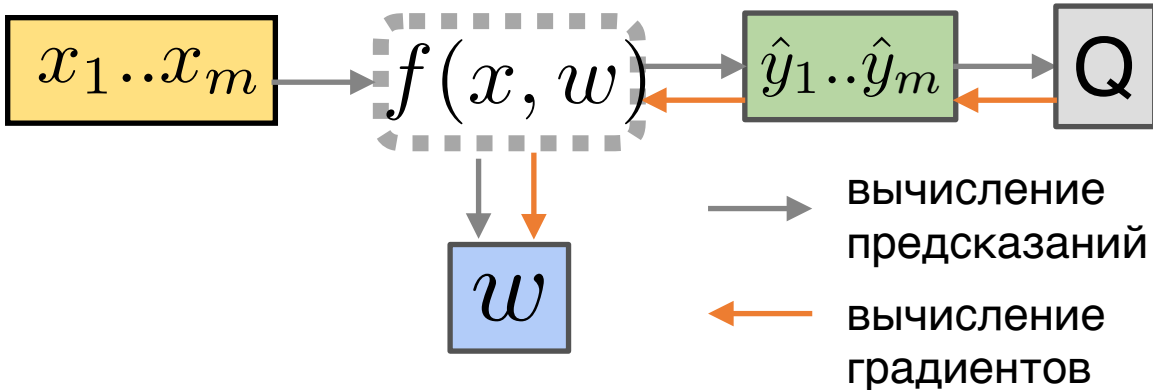
Обучающая выборка

признаки

объекты



МИНИ-  
батчи



Шаг стохастического градиентного спуска:

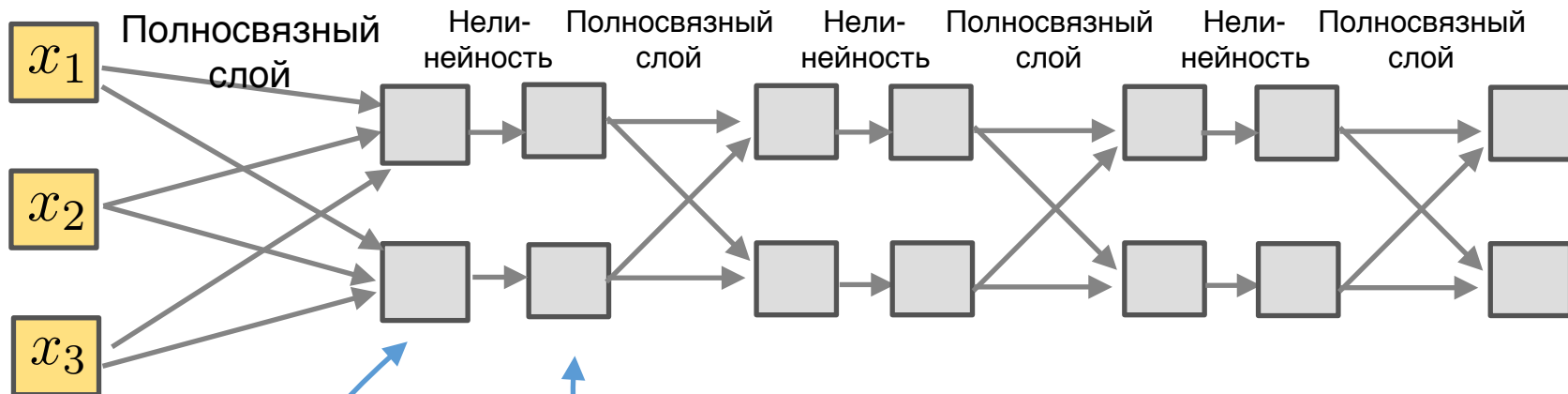
$$w^{new} = w^{old} - \eta \frac{\partial Q}{\partial w}$$

длина шага  
(гиперпараметр)

# План программной реализации

- Загрузка и подготовка данных (генерация мини-батчей!)
- Конфигурация нейросети
- Функционал качества
- Оптимизатор (стохастический градиентный спуск)
- Процедура обучения

# Трёхслойная полносвязная нейронная сеть



$$ReLU(z_2) = \max(0, z_2)$$

$$z_2 = w_{21} \cdot x_1 + w_{22} \cdot x_2 + w_{23} \cdot x_3$$