

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В МАШИННОМ ОБУЧЕНИИ



Лекторы



Спасёнов Алексей



Кузьма Храбров



Александр Рогачев



Евгений Ляпустин



Дарья Савинкина



Владимир Беляев

План курса

Блок 1

1. Введение, основы нейронных сетей
2. Детали обучения нейронных сетей
3. Сверточные сети (CNN)
4. Методы оптимизации
5. Глубинные нейронные сети
6. Детектирование
7. Сегментация
8. Интерпретация моделей

Тестирование

Блок 2

1. Рекуррентные сети (RNN)
2. Рекуррентные сети в компьютерном зрении (CRNN)
3. Нейронные сети для обработки естественного языка
4. Соперничающие сети (GAN)
5. Вариационные автокодировщики (VAE) и Diffusion Models
6. Обучение с подкреплением (RL)
7. Графовые нейронные сети (GNN)

Тестирование

Контрольные мероприятия

Домашние задания

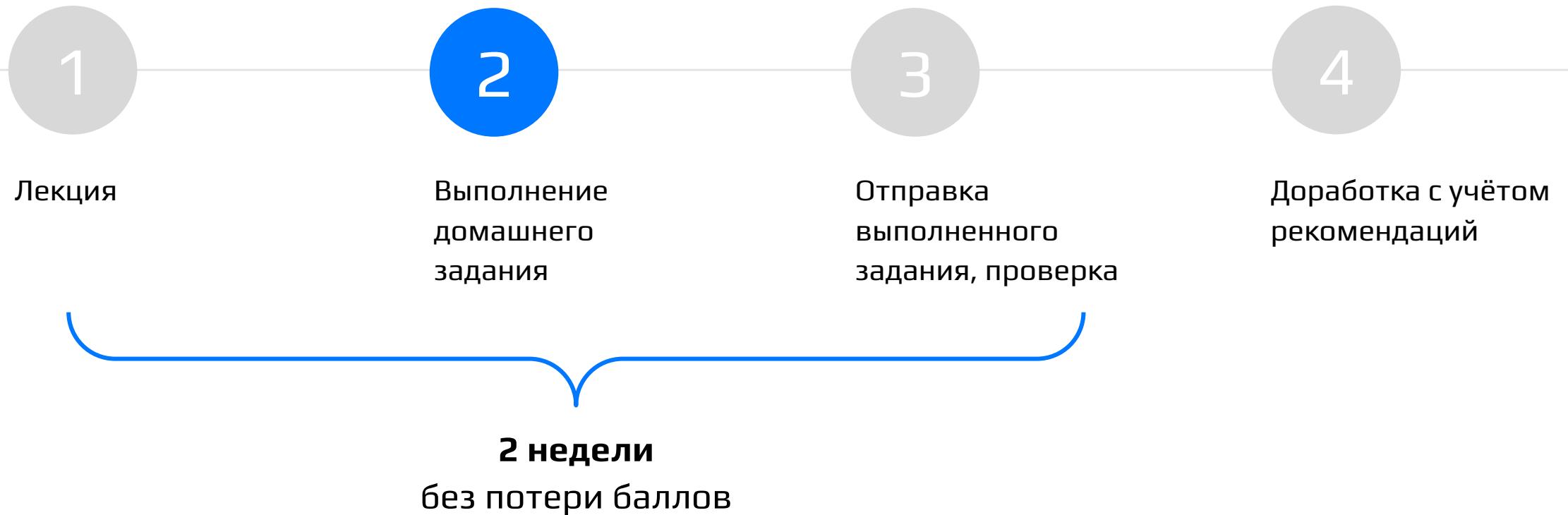
Тестирования,
проверка теории

Защита курсового
проекта

Чему научитесь после успешного завершения курса?

1. Понимать принципы обучения нейронных сетей;
2. Работать в самом популярном framework'е для DL;
3. Решать такие задачи компьютерного зрения, как классификация, детекция, сегментация;
4. Анализировать текстовые данные;
5. Генерировать различные данные (картинки, тексты);
6. Создавать нейронные сети для задачи обучения с подкреплением.

План работы над заданиями



НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В МАШИННОМ ОБУЧЕНИИ

Лекция №1



Содержание

1. История DL
2. Применение нейронных сетей
3. Многослойный персептрон
4. Обучение нейронных сетей
5. Домашнее задание

История DL

• • • • •

История AI / DL

1943	McCulloch, Pitts – нейрон (суперпозиция линейной и пороговой функций)
1950 – 70	«коннективизм», модель нейрона
1969	Minsky, Papert – книга «Персептроны»
1970 – 80	зима ИИ
1980	Fukushima – неокогнитрон (neocognitron), вид CNN
1980 – 90	экспертные системы, <i>обратное распространение</i>
1985	Hinton, Sejnowski – машины Больцмана
1990 – 2000	зима
1997	Schmidhuber, Hochreiter – LSTM
1998	LeCun – <i>LeNet (CNNs)</i> распознавание символов

2003	Bengio – NLM (neural language modeling)
2009	Распознавание речи
2012	AlexNet – победа на ImageNet ConvNets (Krizhevsky и др.)
2012	Google – DL ASR
2014	информационный / инвестиционный бум
2014	NMT seq2seq, VAE, GAN
2015	ResNet
2016 – 17	DeepMind – Alphago-Lee Sedol, AlphaZero
2018	BERT(Google), Style GANs, VQ-VAE
2019	Super-human performance on GLUE
2020	Diffusion Probabilistic Models
2022	ChatGPT

AI vs человек

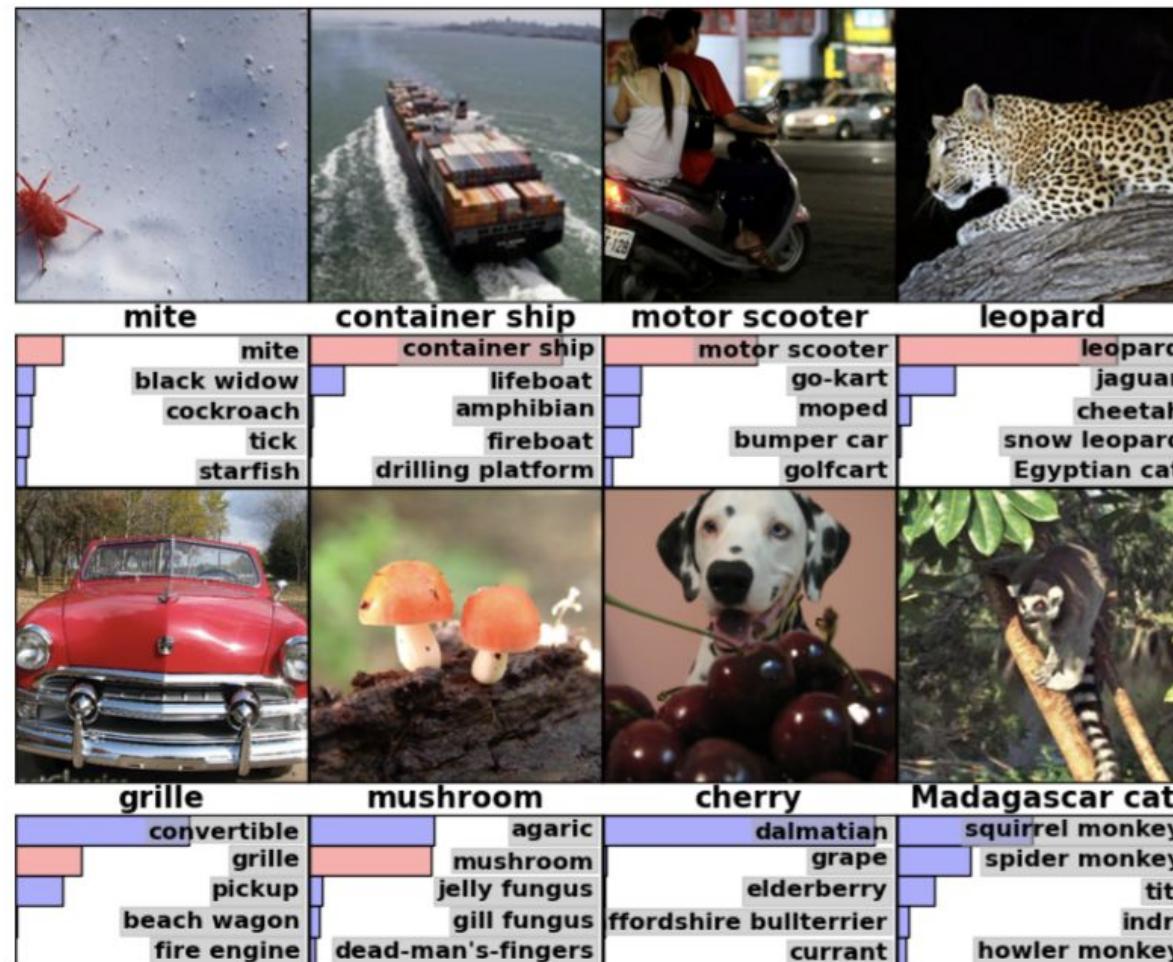
2011	Jeopardy!	IBM Watson
2015	Atari Games	Google DeepMind
2015	ImageNet	ResNet
2016-17	Go	AlphaGo, AlphaGo Master, AlphaGo Zero // Google DeepMind
2017	Poker	Libratus // CMU DeepStack // University of Alberta
2017	Ms. Pac-Man	Maluuba // Microsoft
2018	Chinese - English Translation	Microsoft
2018	Capture the Flag (Quake III Arena)	DeepMind
2018	DOTA 2	OpenAI
2018	Starcraft II	Alphastar // DeepMind
2019	Detect diabetic retinopathy (DR) with specialist-level accuracy	Google AI

Применение нейронных сетей

• • • • •

Компьютерное зрение и обработка изображений

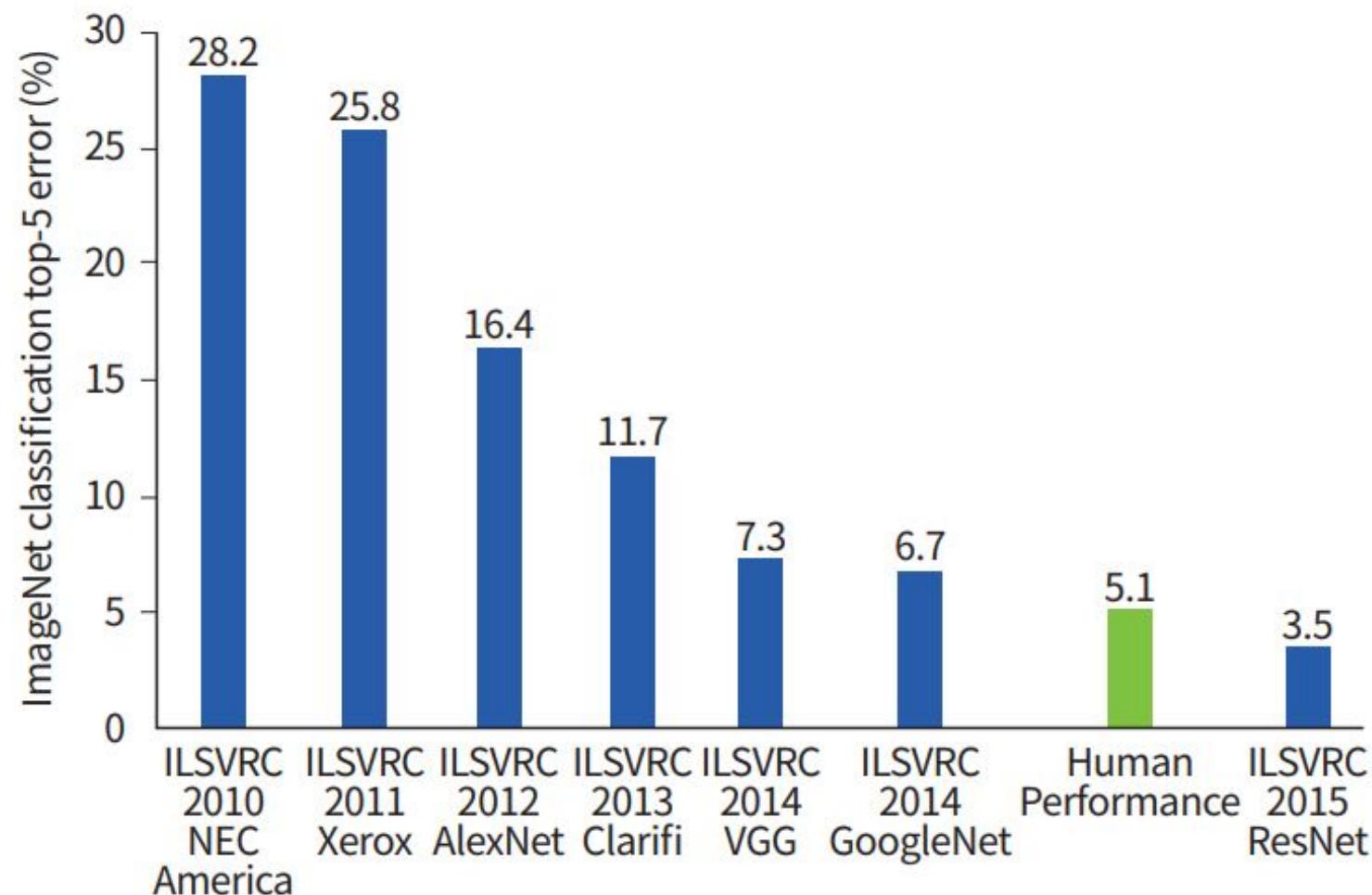
Классификация изображений



Krizhevsky, A., et al. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, NIPS, 2012

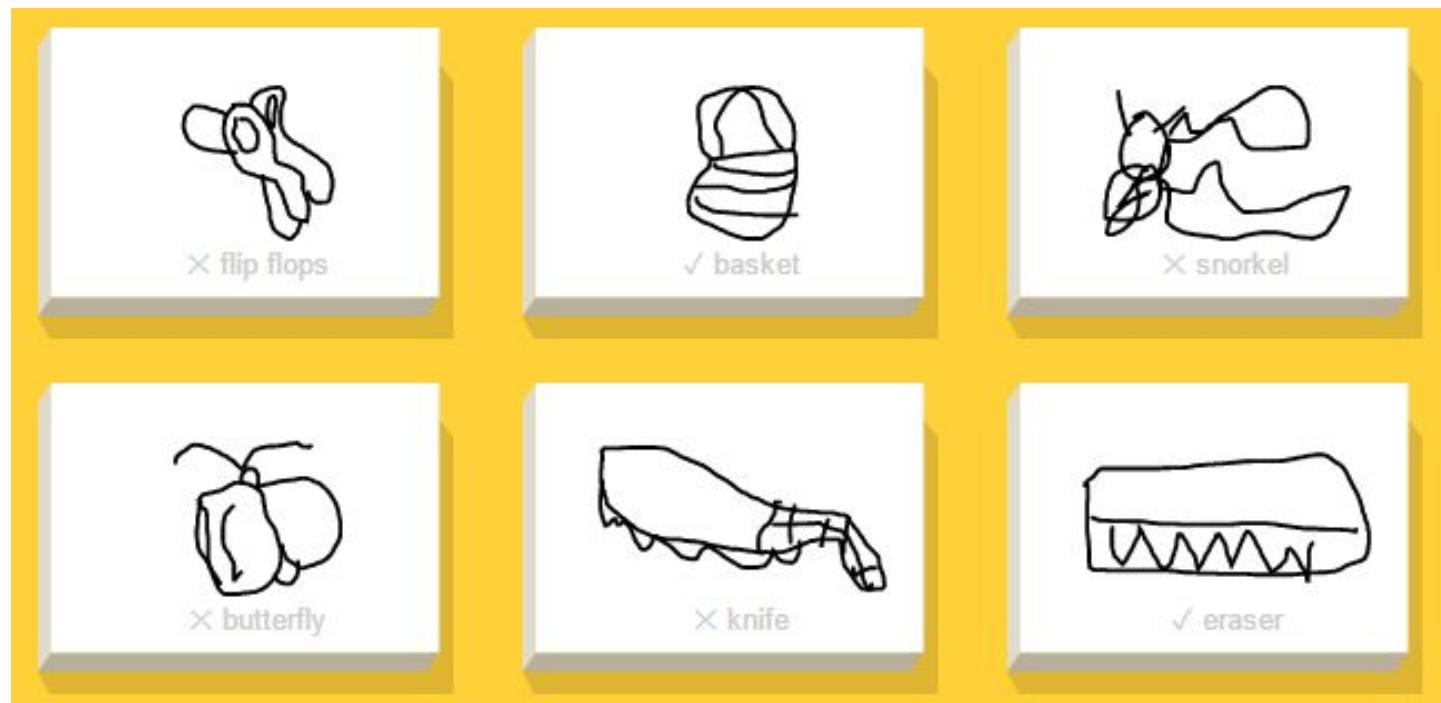
Компьютерное зрение и обработка изображений

Классификация изображений



Компьютерное зрение и обработка изображений

Классификация изображений

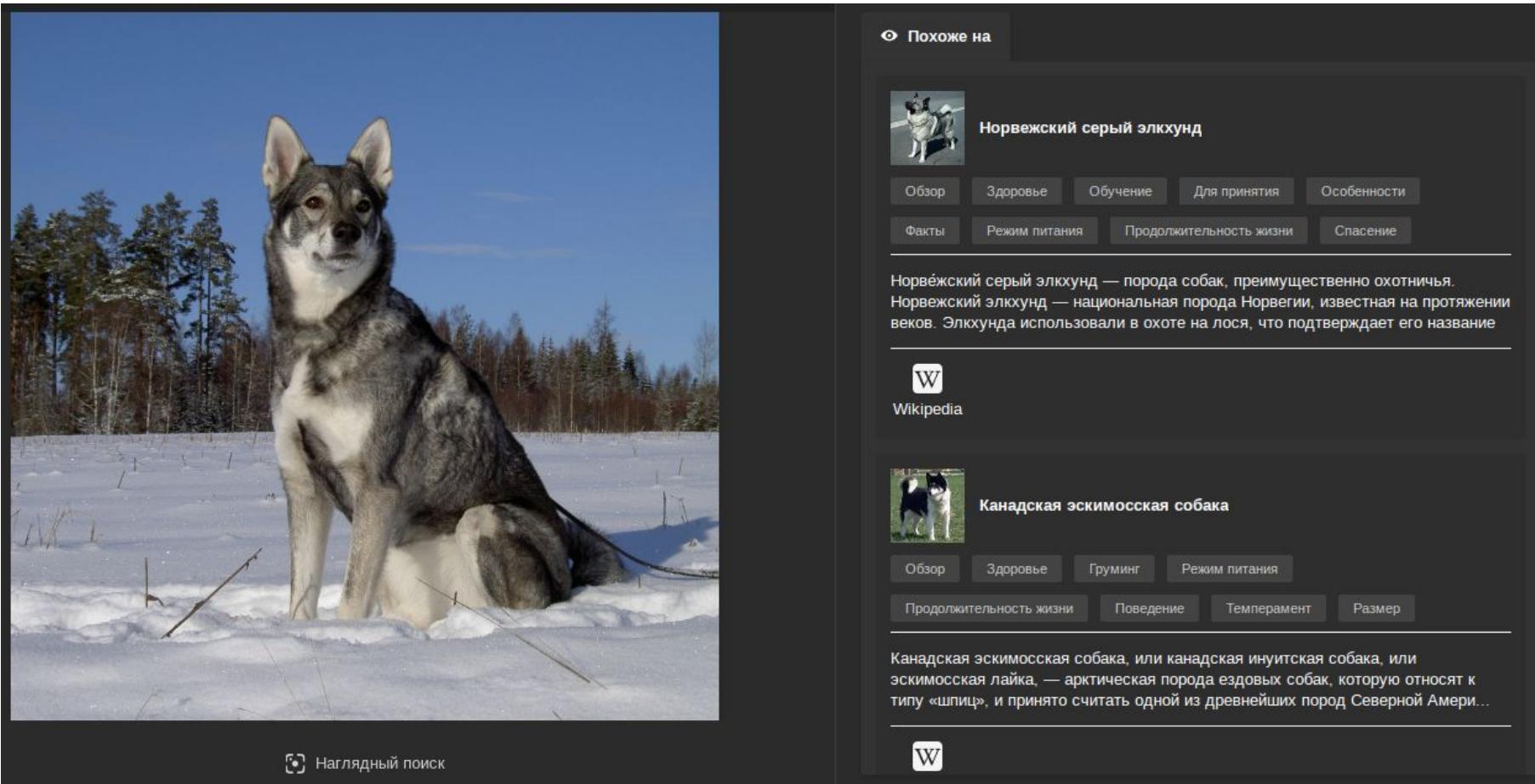


<https://quickdraw.withgoogle.com/>

<https://arxiv.org/pdf/1704.03477.pdf>

Компьютерное зрение и обработка изображений

Сервисы по классификации Определение породы собаки по фотографии / марки авто / товара

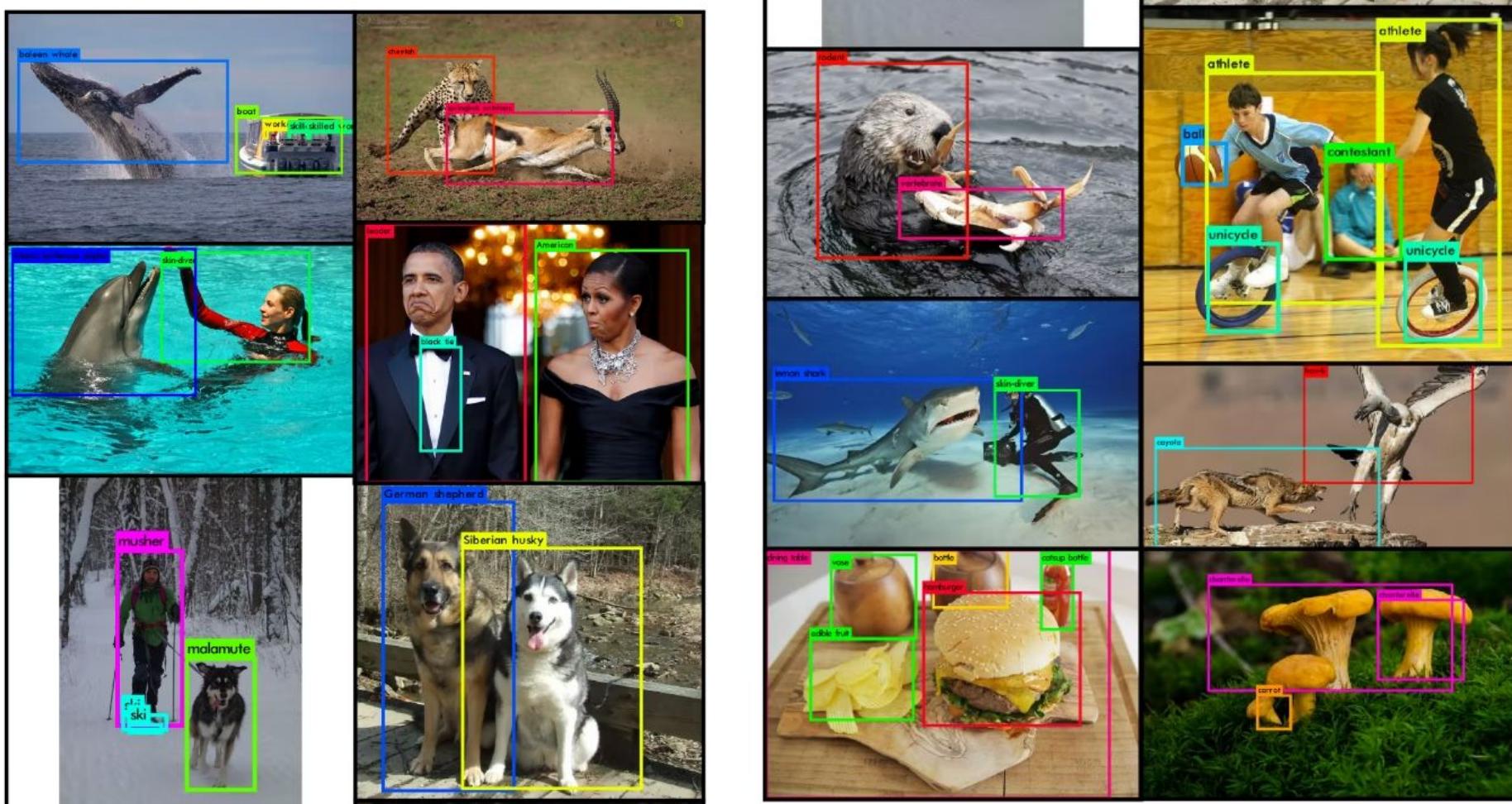


The screenshot shows a user interface for image classification. On the left is a photograph of a Norwegian Elkhund dog sitting in a snowy field. To the right, under the heading "Похоже на" (Similar to), is a card for the "Норвежский серый элхунд" (Norwegian Elkhound). The card includes tabs for Обзор (Overview), Здоровье (Health), Обучение (Training), Для принятия (Acceptance), Особенности (Features), Факты (Facts), Режим питания (Dietary regime), Продолжительность жизни (Life expectancy), and Спасение (Rescue). Below the card is a brief description: "Норвежский серый элхунд — порода собак, преимущественно охотничья. Норвежский элхунд — национальная порода Норвегии, известная на протяжении веков. Элхунда использовали в охоте на лося, что подтверждает его название". A Wikipedia logo and link are also present. Below this is another card for the "Канадская эскимосская собака" (Canadian Eskimo Dog), with similar tabs and a brief description: "Канадская эскимосская собака, или канадская инуитская собака, или эскимосская лайка, — арктическая порода ездовых собак, которую относят к типу «шиц», и принято считать одной из древнейших пород Северной Амери...". At the bottom left is a "Наглядный поиск" (Visual search) button.

<https://www.bing.com/visualsearch/Microsoft/WhatDog>

Компьютерное зрение и обработка изображений

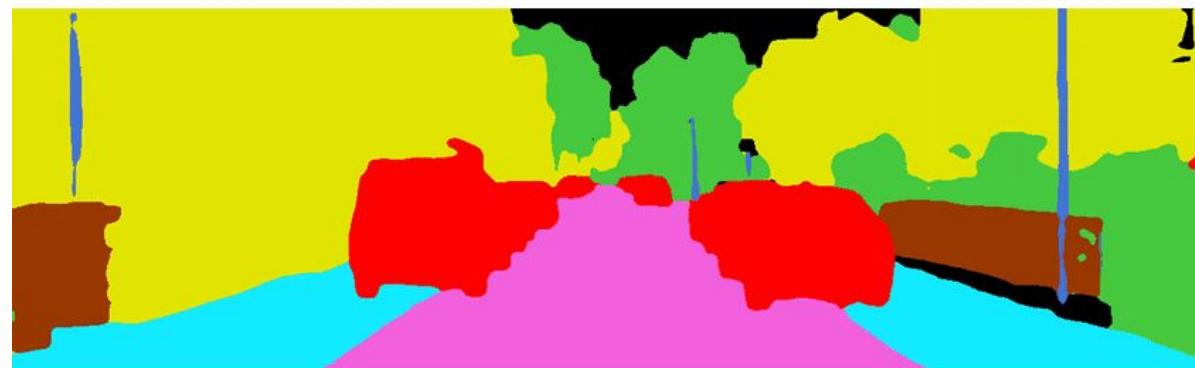
Обнаружение объектов (Object Detection)



Joseph Redmon, Ali Farhadi «YOLO9000: Better, Faster, Stronger»
<https://arxiv.org/abs/1612.08242>

Компьютерное зрение и обработка изображений

Сегментация объектов

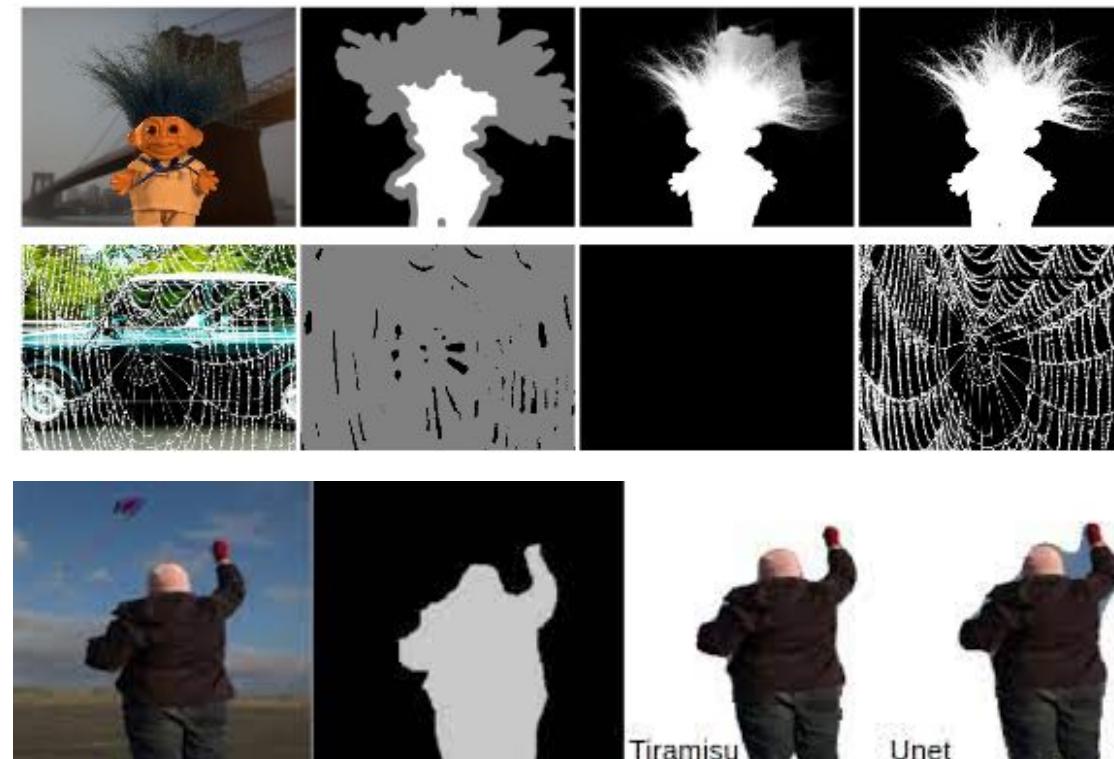


Road	Sidewalk	Building	Fence
Pole	Vegetation	Vehicle	Unlabel

<https://research.fb.com/learning-to-segment/>

Компьютерное зрение и обработка изображений

Удаление фона (Background removal)



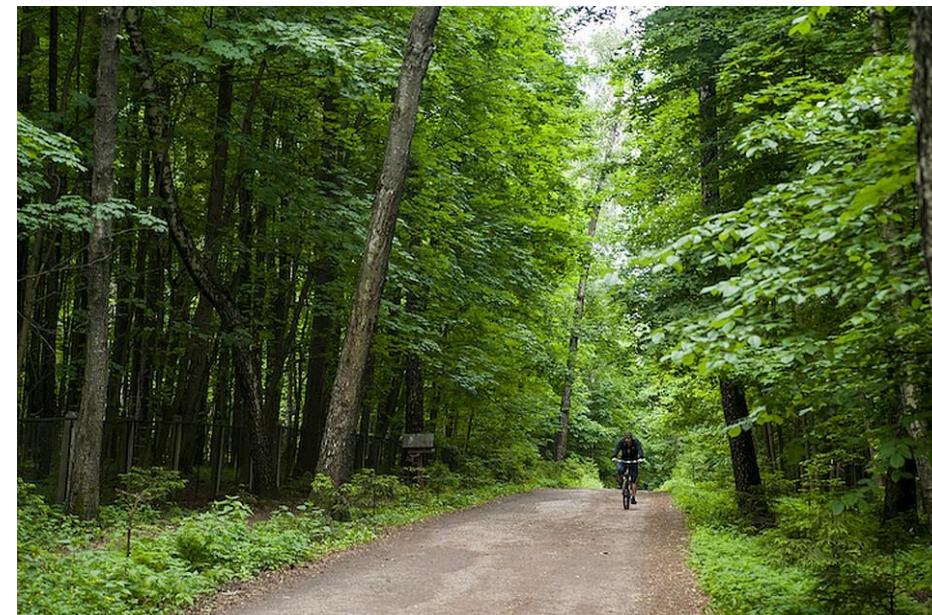
<https://towardsdatascience.com/background-removal-with-deep-learning-c4f2104b3157>
<https://github.com/YunanWu2168/Background-removal-using-deep-learning>

Компьютерное зрение и обработка изображений

Распознавание сцен (Scene recognition)



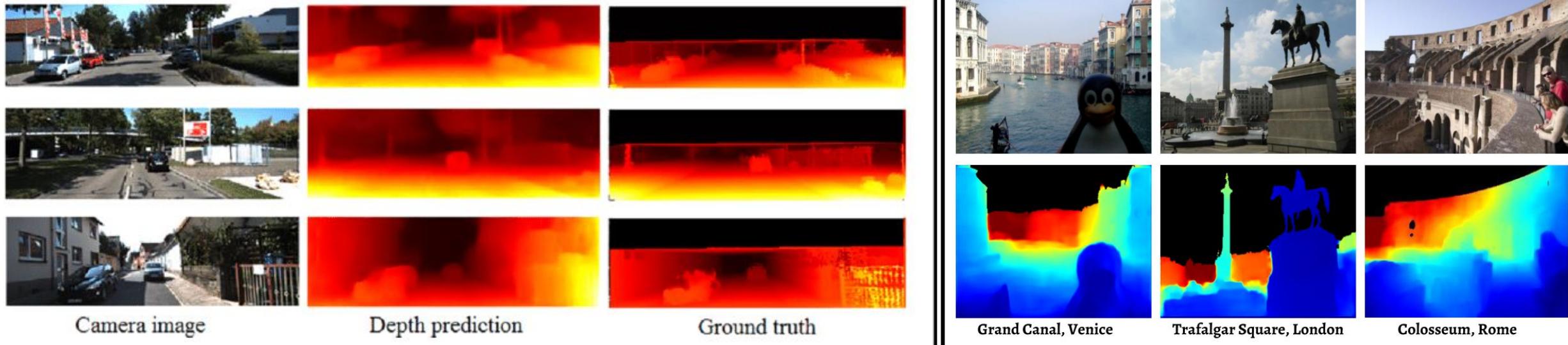
Бар



Лесная дорога

Компьютерное зрение и обработка изображений

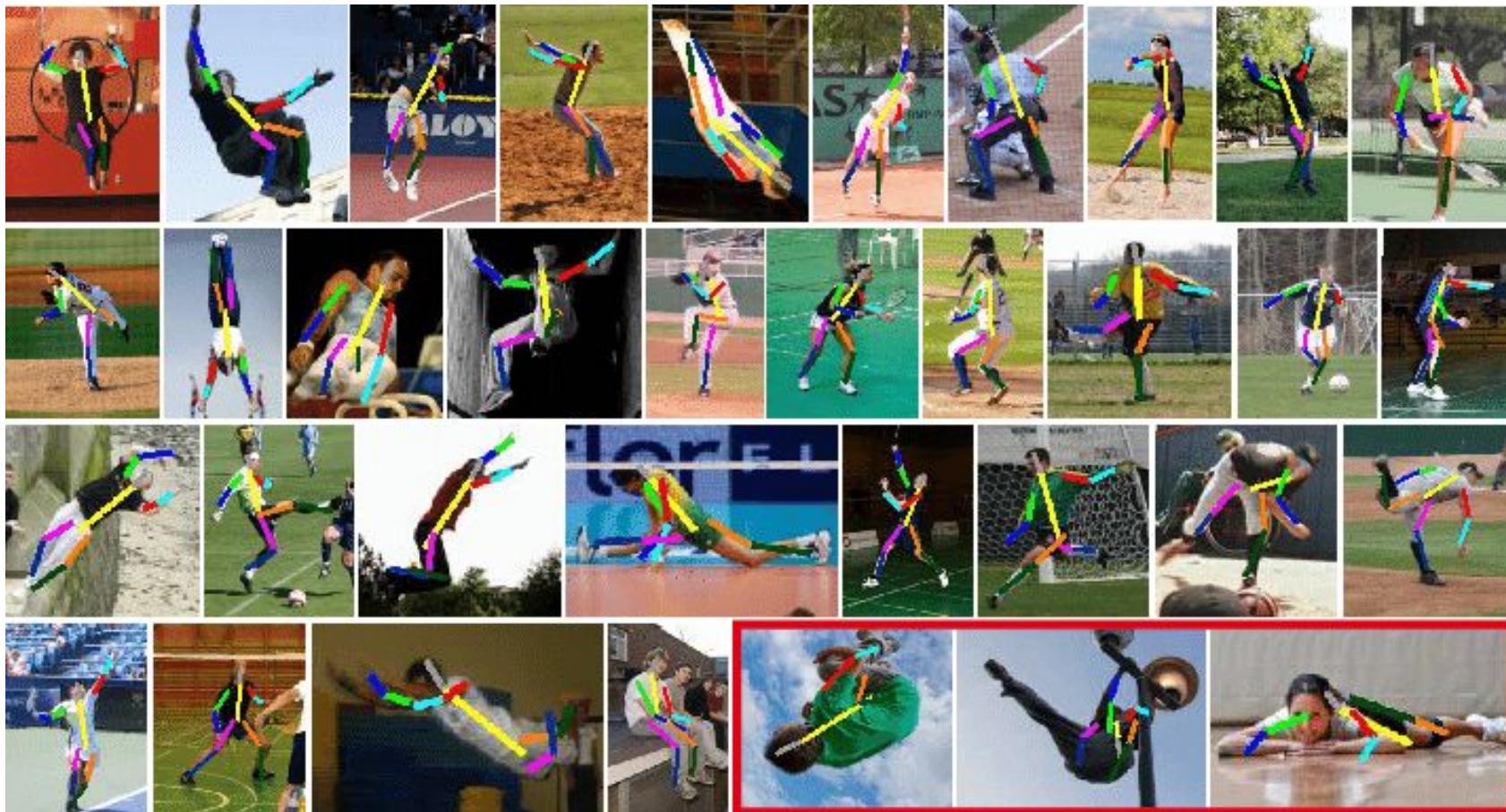
Предсказание геометрии пространства Depth prediction from single image



По одной фотографии – где здесь могут находиться объекты
<https://github.com/nianticlabs/footprints>

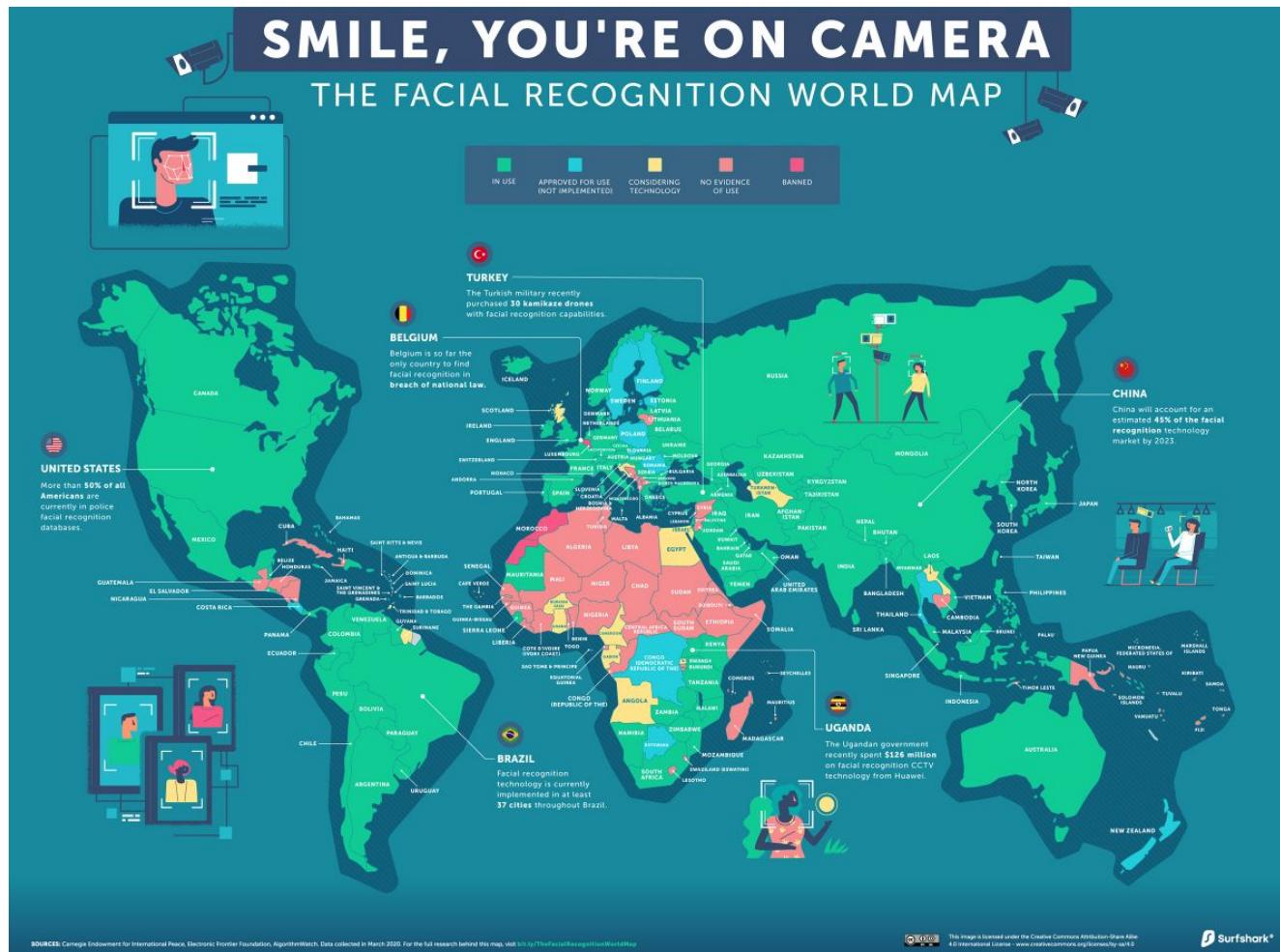
Компьютерное зрение и обработка изображений

Определение позы (Human pose estimation)



S. Wei, V. Ramakrishna, T. Kanade, and Y. Sheikh. Convolutional pose machines. CoRR, abs/1602.00134, 2016.

Компьютерное зрение и обработка изображений



<https://www.visualcapitalist.com/wp-content/uploads/2020/05/Facial-Recognition-World-Map-Full-Size.html>

Компьютерное зрение и обработка изображений

Распознавание лиц



Detection



Билл
Гейтс

↓

Recognition

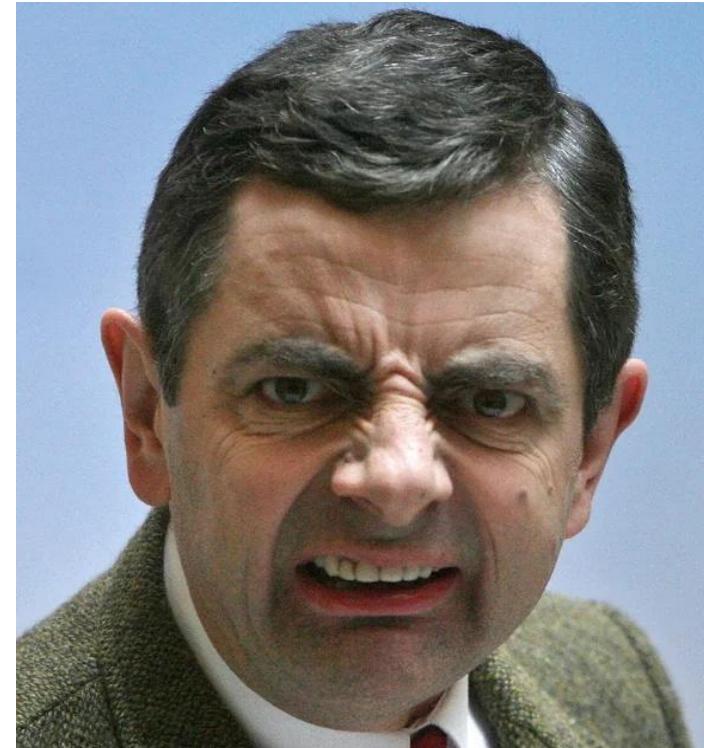
Похожие изображения



Компьютерное зрение и обработка изображений



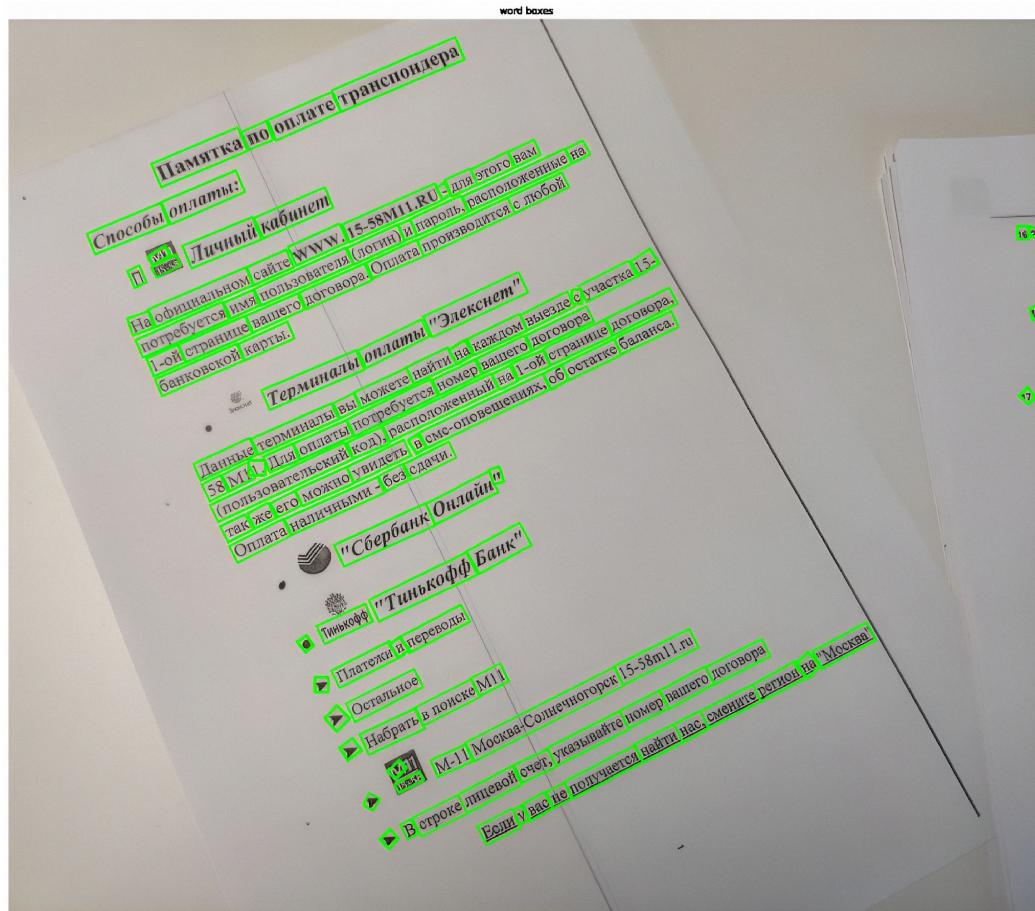
Gender: female , Age: 19.2, Emotion: Happiness



Gender: male , Age: 57.4, Emotion: Disgust

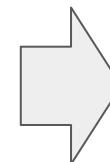
Компьютерное зрение и обработка изображений

Optical Character Recognition



Компьютерное зрение и обработка изображений

Optical Character Recognition



P685PM799
(Coordinates: [344,306,410,321])

Компьютерное зрение и обработка изображений

Генерация изображений



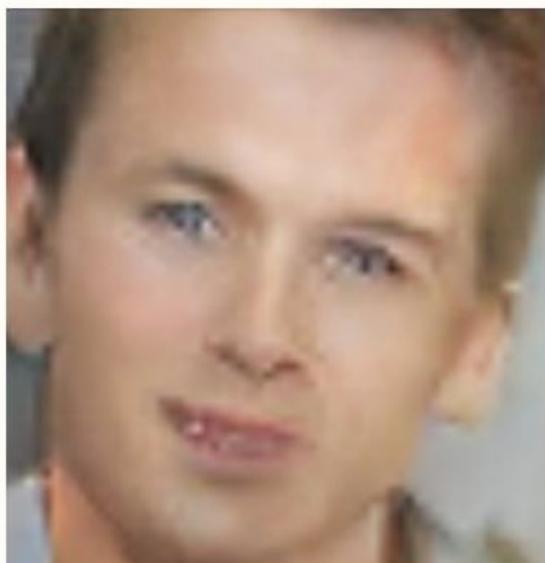
<https://hubert0527.github.io/infinityGAN/>

Компьютерное зрение и обработка изображений

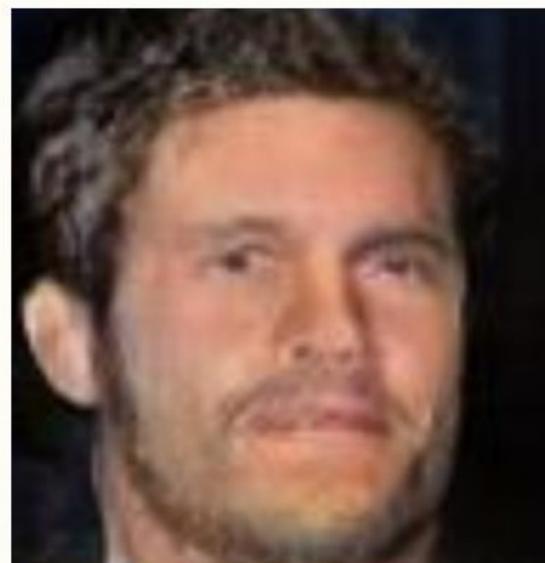
Генерация фотoreалистичных изображений и лиц



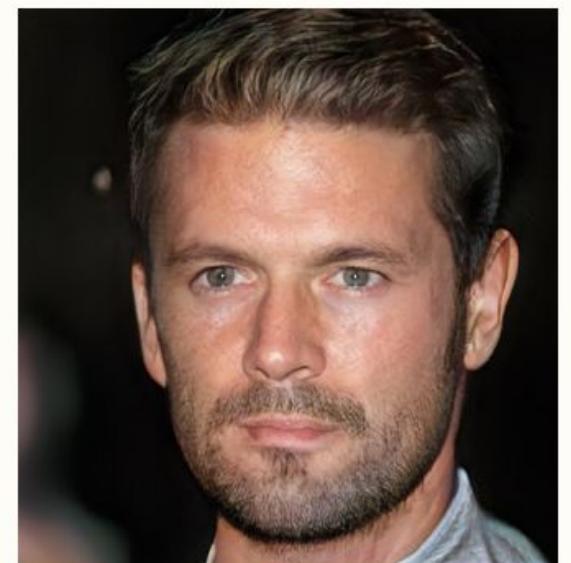
2014



2015



2016



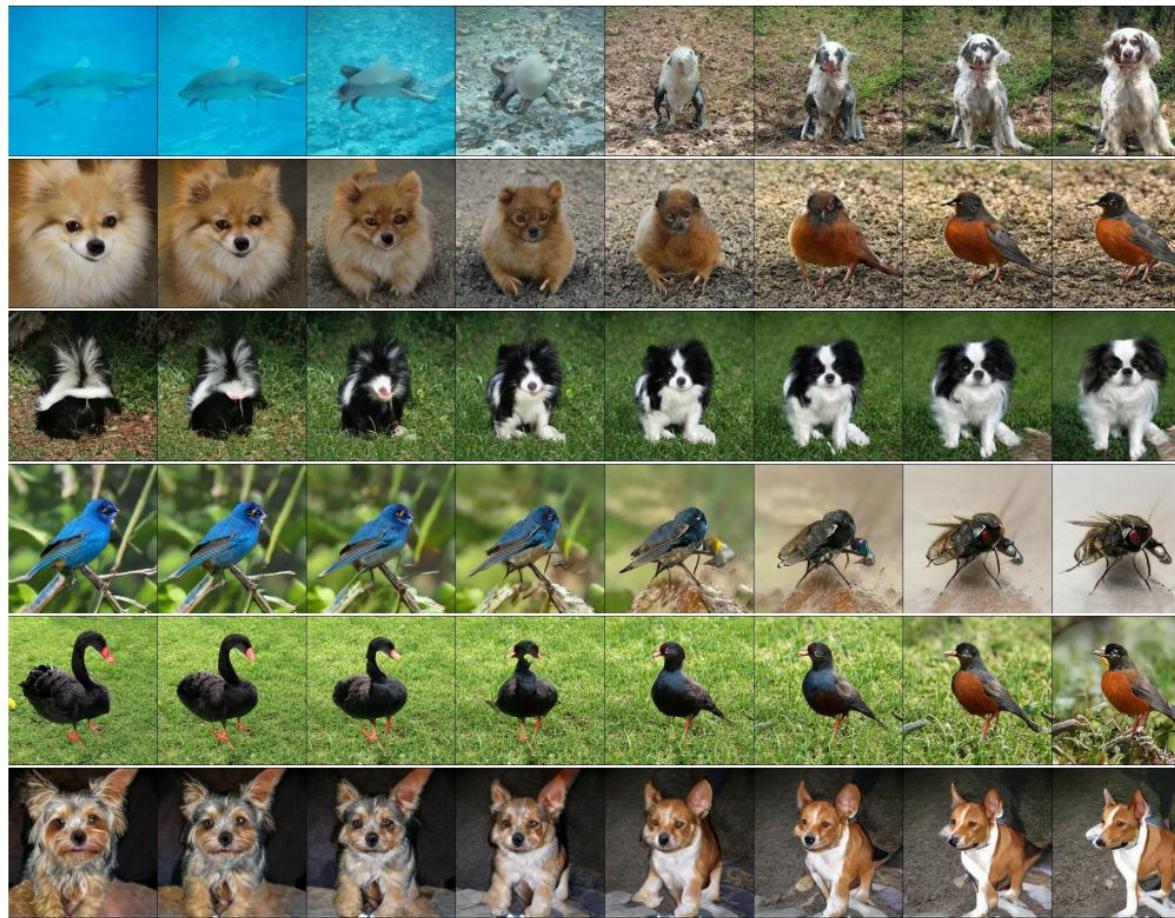
2017

<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1802/1802.07228.pdf>

http://research.nvidia.com/publication/2017-10_Progressive-Growing-of

Компьютерное зрение и обработка изображений

Интерполяция в пространстве изображений



<https://arxiv.org/pdf/1809.11096.pdf>

Компьютерное зрение и обработка изображений

Контролируемое изменение изображений, трансляция изображений



Smiling

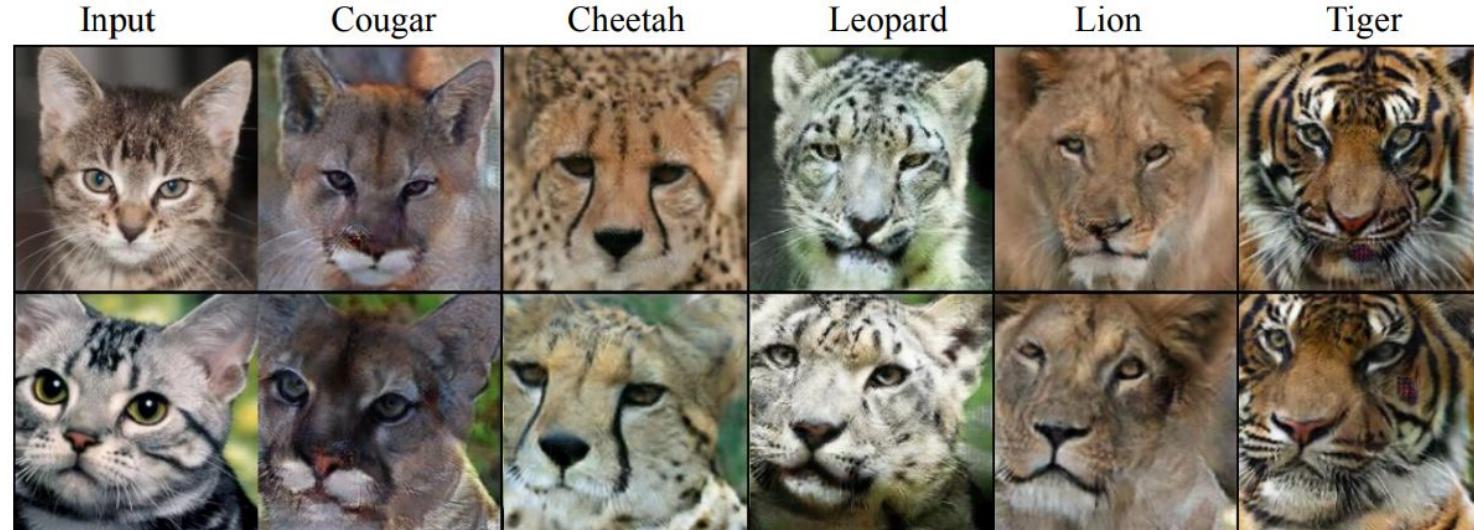
Age

Narrow Eyes

Blonde Hair

Beard

Sliders for controlling facial features.

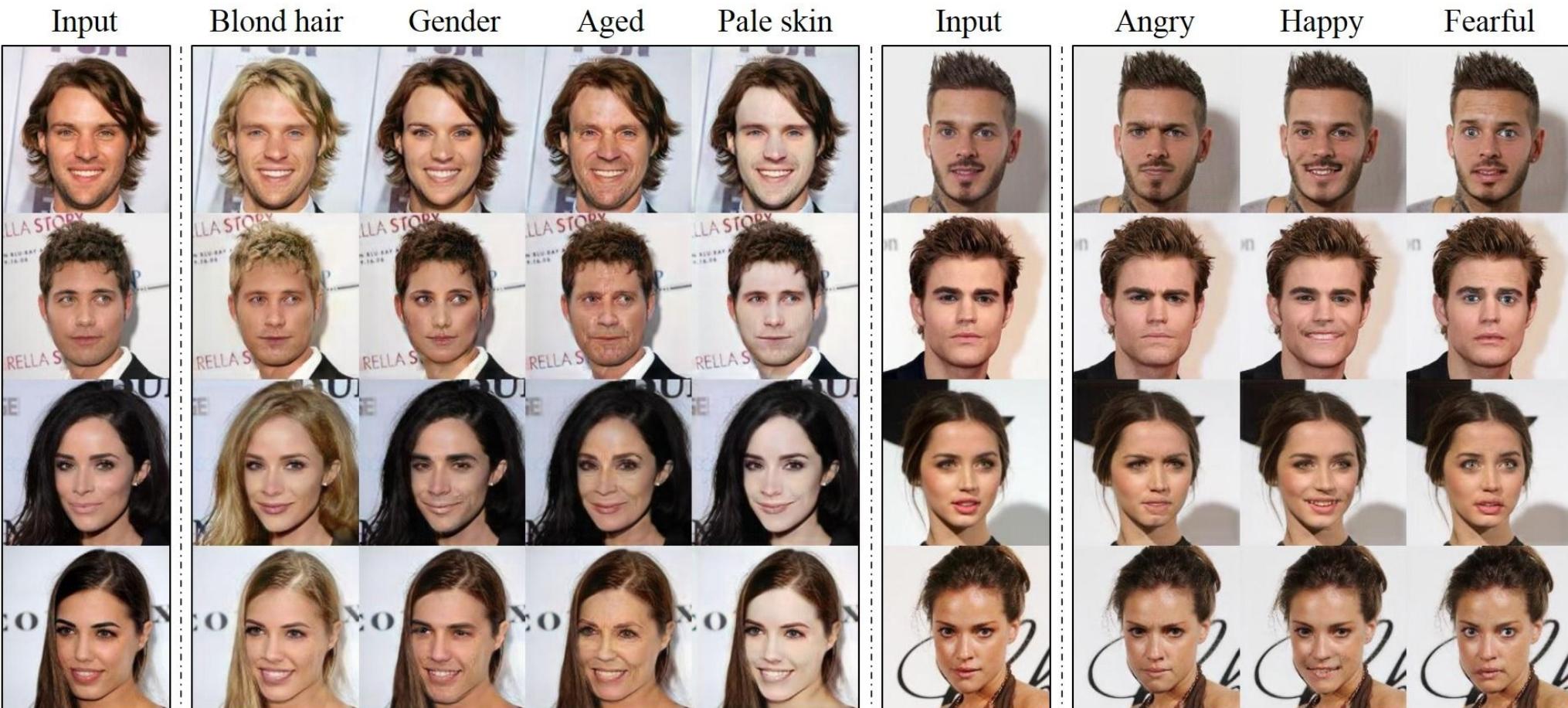


<https://arxiv.org/pdf/1703.00848.pdf>

<https://openai.com/blog/glow/>

Компьютерное зрение и обработка изображений

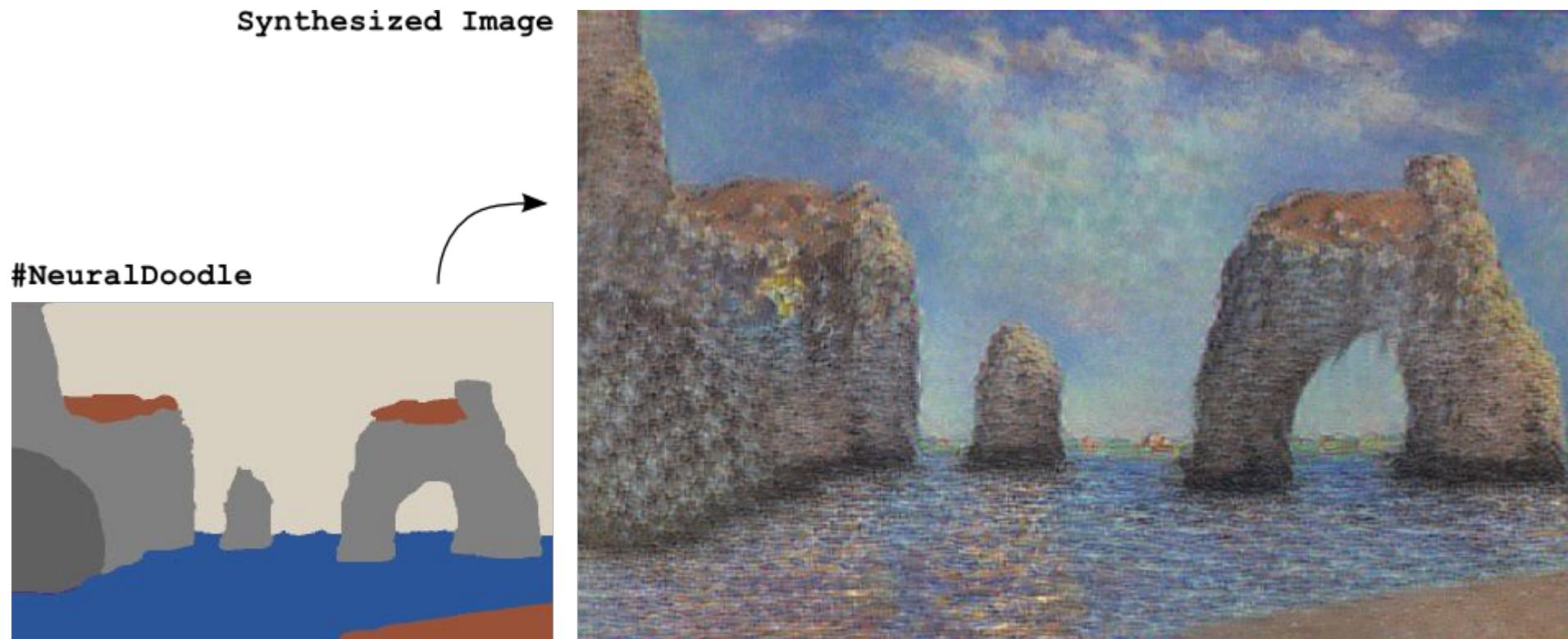
Контролируемое изменение изображений, трансляция изображений



<https://github.com/yunjey/StarGAN>

Компьютерное зрение и обработка изображений

Генерация изображений по эскизам



<https://github.com/alexjc/neural-doodle>

Компьютерное зрение и обработка изображений

Генерация изображений по эскизам

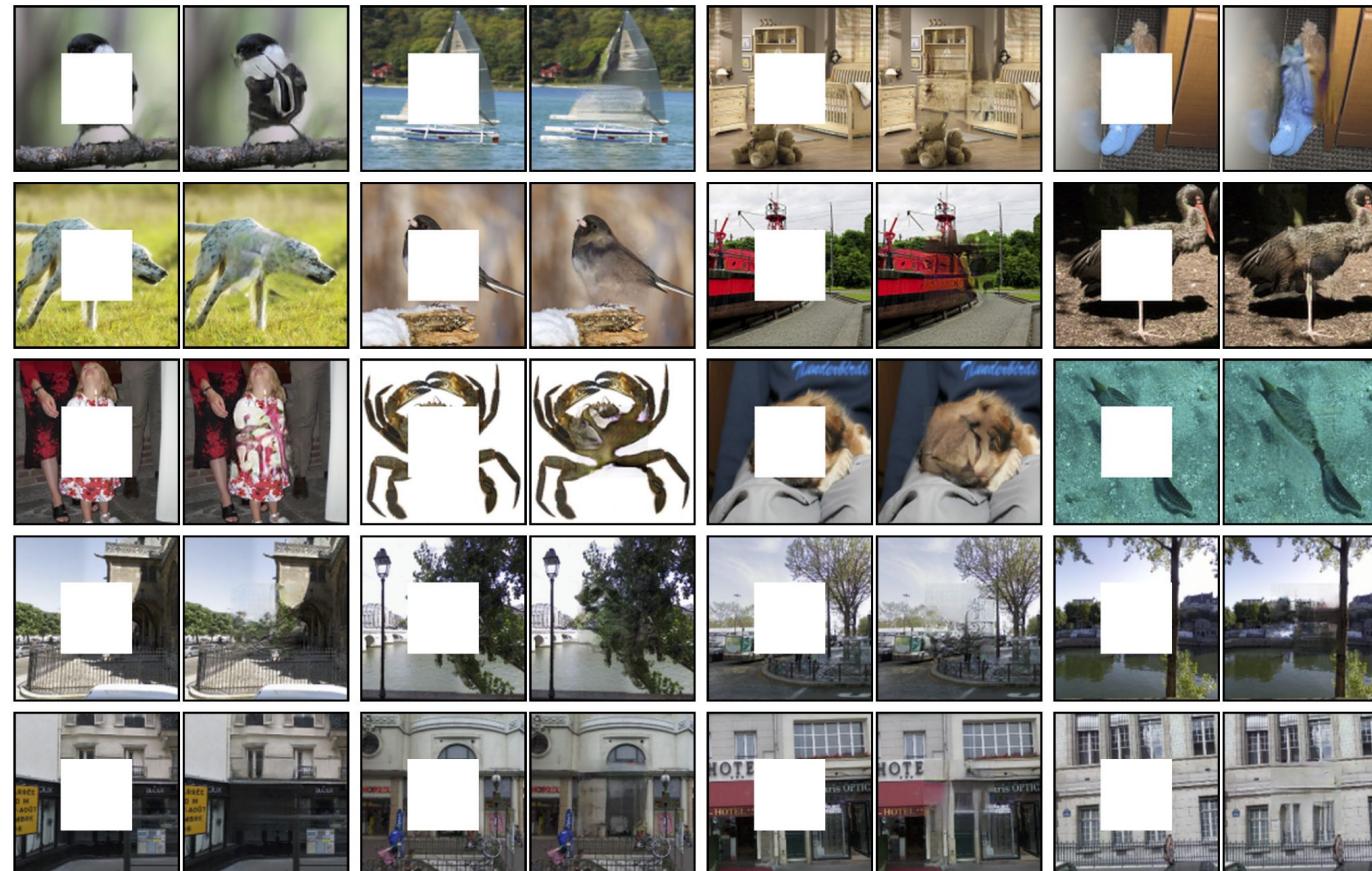


GauGAN:

<https://www.nvidia.com/en-us/research/ai-playground/>

Компьютерное зрение и обработка изображений

Улучшение изображений, дорисовка изображений (Image completion)



https://www.cs.cmu.edu/~dpathak/context_encoder/

Компьютерное зрение и обработка изображений

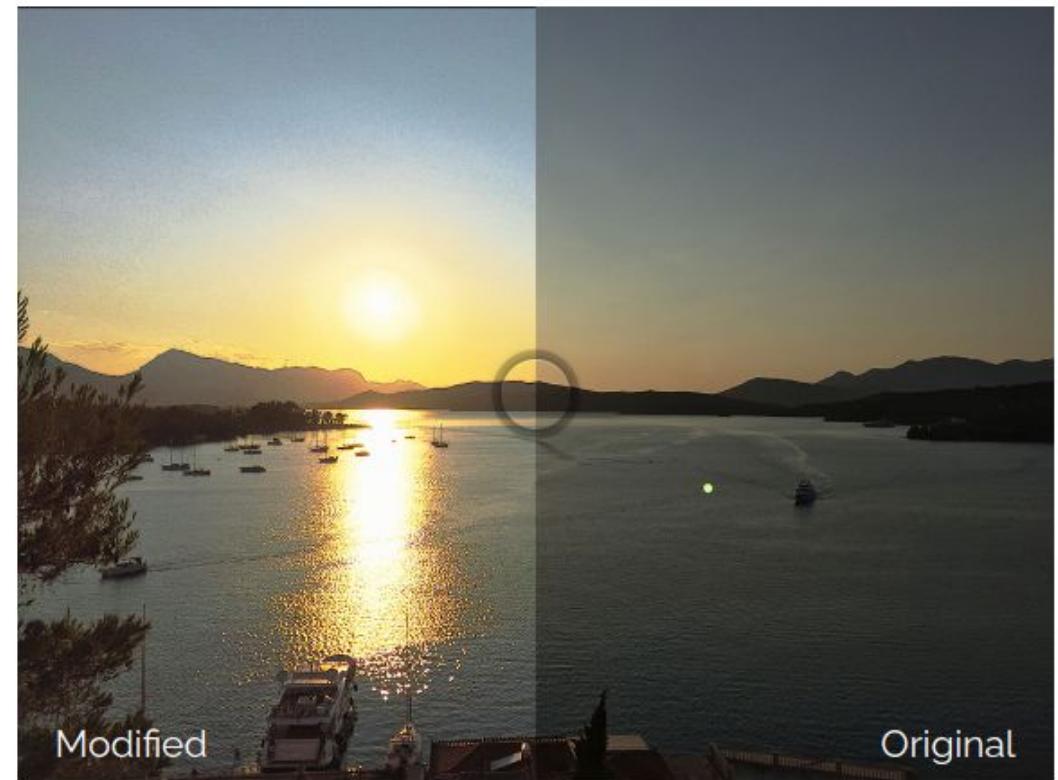
Улучшение изображений, супер-разрешение (Super-Resolution)



<https://arxiv.org/pdf/1609.04802.pdf>

Компьютерное зрение и обработка изображений

Улучшение фотографий



<https://people.ee.ethz.ch/~ihnatova/wespe.html>

Компьютерное зрение и обработка изображений

Стилизация изображений (перенос стиля)

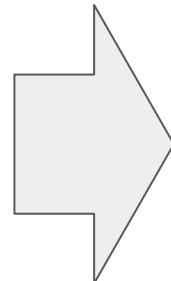


<https://deepart.io/>

<https://arxiv.org/pdf/1703.07511.pdf>

Компьютерное зрение и обработка изображений

Раскрашивание изображений



Компьютерное зрение и обработка изображений

Обработка изображений: image -> video



Input Photo



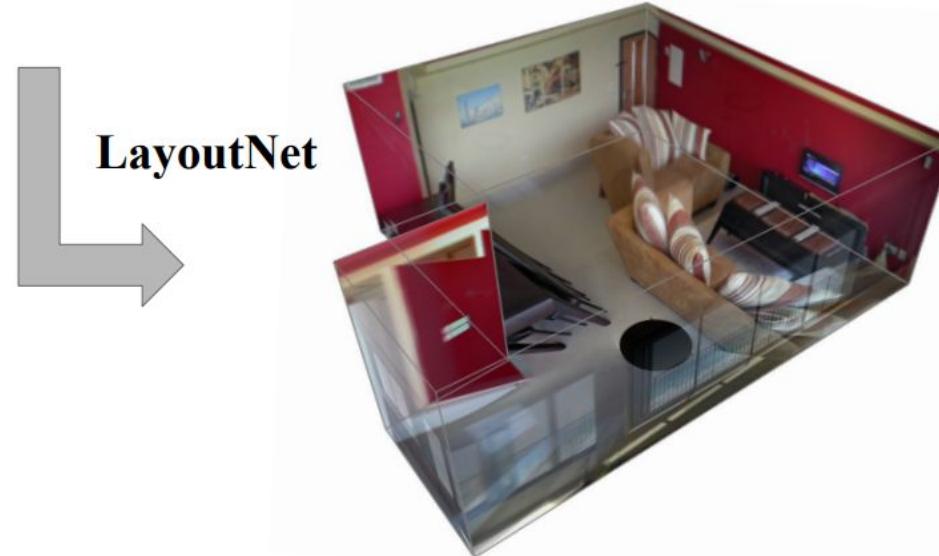
Photo Animation



<https://arxiv.org/pdf/1812.02246.pdf>

Компьютерное зрение и обработка изображений

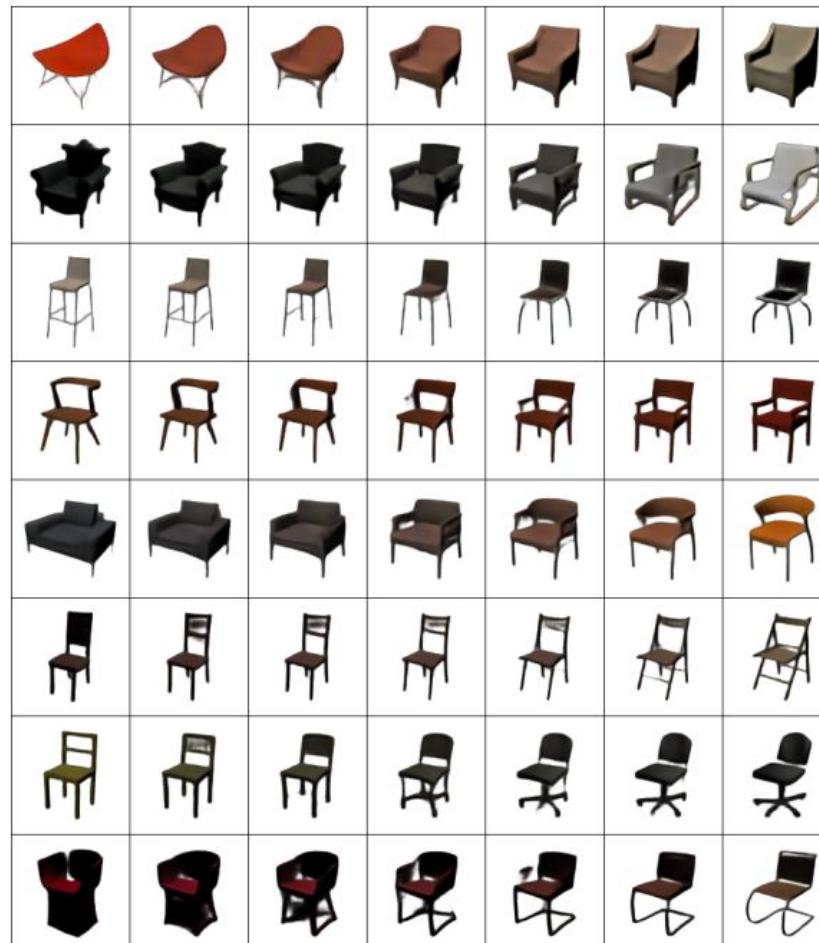
Реконструкция изображений / панорам



«LayoutNet: Reconstructing the 3D Room Layout from a Single RGB Image», 2018
<https://arxiv.org/abs/1803.08999>

Компьютерное зрение и обработка изображений

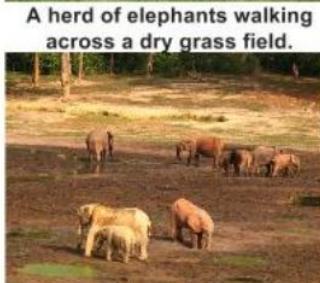
Генерация объектов / представление объектов



<https://arxiv.org/pdf/1411.5928.pdf>

Компьютерное зрение и обработка изображений

Аннотирование изображений

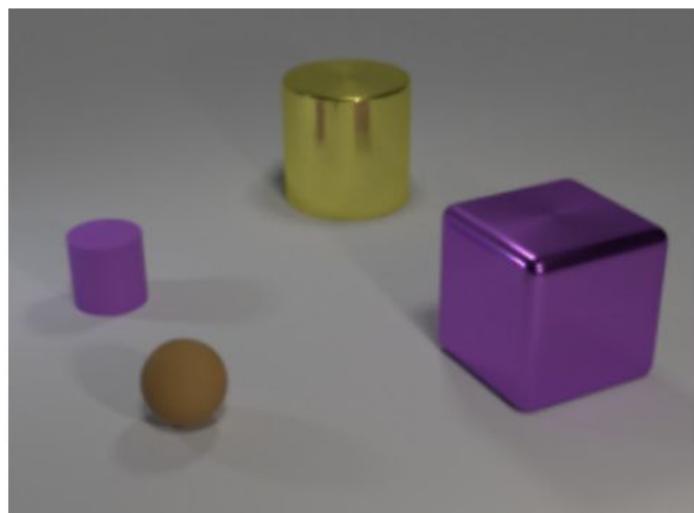


<https://arxiv.org/pdf/1411.4555.pdf>

Компьютерное зрение и обработка изображений

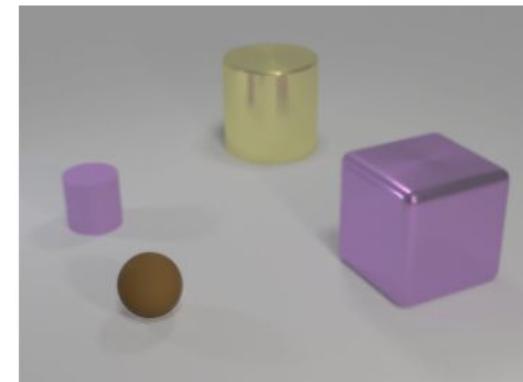
Visual reasoning

Original Image:



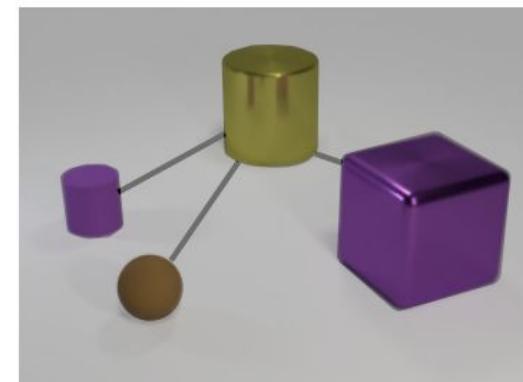
Non-relational question:

What is the size of the brown sphere?



Relational question:

Are there any rubber things that have the same size as the yellow metallic cylinder?



<https://arxiv.org/pdf/1706.01427.pdf>

Компьютерное зрение и обработка изображений

Соревнование <https://visualqa.org/roe.html>
вопросы двух форматов: OpenEnded / MultipleChoice

Who is wearing glasses?

man



woman



Where is the child sitting?

fridge



arms



Is the umbrella upside down?

yes



no



How many children are in the bed?

2



1



Компьютерное зрение и обработка изображений

Объяснение изображений (Visual Explanations)

This is a Marsh Wren because...



Definition: this bird is brown and white in color with a skinny brown beak and brown eye rings.

Explanation: this is a small brown bird with a long tail and a **white eyebrow**.

This is a Downy Woodpecker because...



Definition: this bird has a white breast black wings and a red spot on its head.

Explanation: this is a black and white bird with a **red spot** on its crown.

This is a Shiny Cowbird because...



Definition: this bird is black with a long tail and has a very short beak.

Explanation: this is a black bird with a **long tail feather** and a pointy black beak.

This is a Marsh Wren because...



Definition: this bird is brown and white in color with a skinny brown beak and brown eye rings.

Explanation: this is a small bird with a long bill and brown and black wings.

This is a Downy Woodpecker because...



Definition: this bird has a white breast black wings and a red spot on its head.

Explanation: this is a white bird with a black wing and a black and white striped head.

This is a Shiny Cowbird because...



Definition: this bird is black with a long tail and has a very short beak.

Explanation: this is a black bird with a small black beak.

Компьютерное зрение и обработка изображений

Текст в изображение (text2image)



S.Reed «Generative Adversarial Text to Image Synthesis», 2016
<https://arxiv.org/pdf/1605.05396.pdf>

Компьютерное зрение и обработка изображений

Текст в изображение (text2image) Генерация по запросу

TEXT PROMPT

an illustration of a baby daikon radish in a tutu walking a dog

AI-GENERATED
IMAGES



Edit prompt or view more images↓

TEXT PROMPT

an armchair in the shape of an avocado....

AI-GENERATED
IMAGES

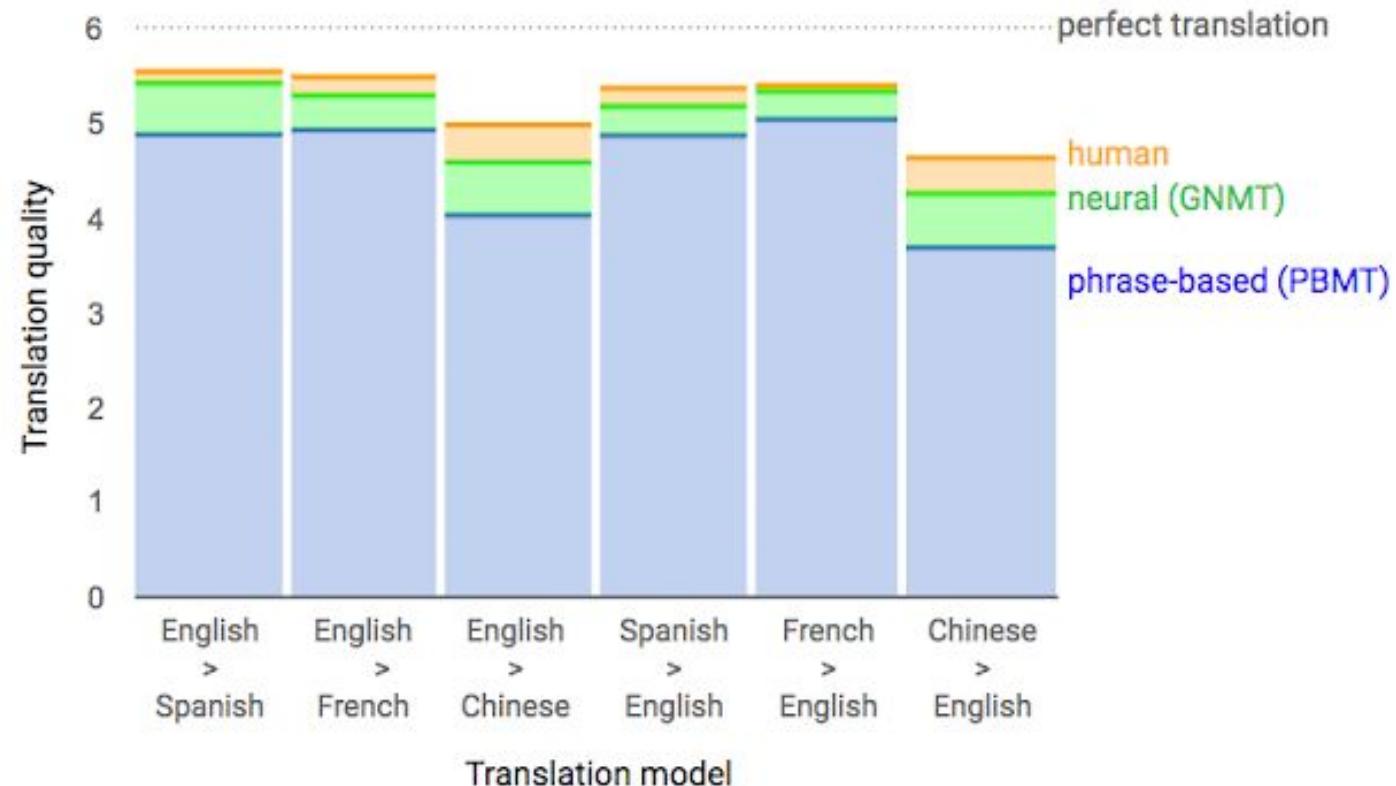


Edit prompt or view more images↓

<https://openai.com/blog/dall-e/>

Natural Language Processing

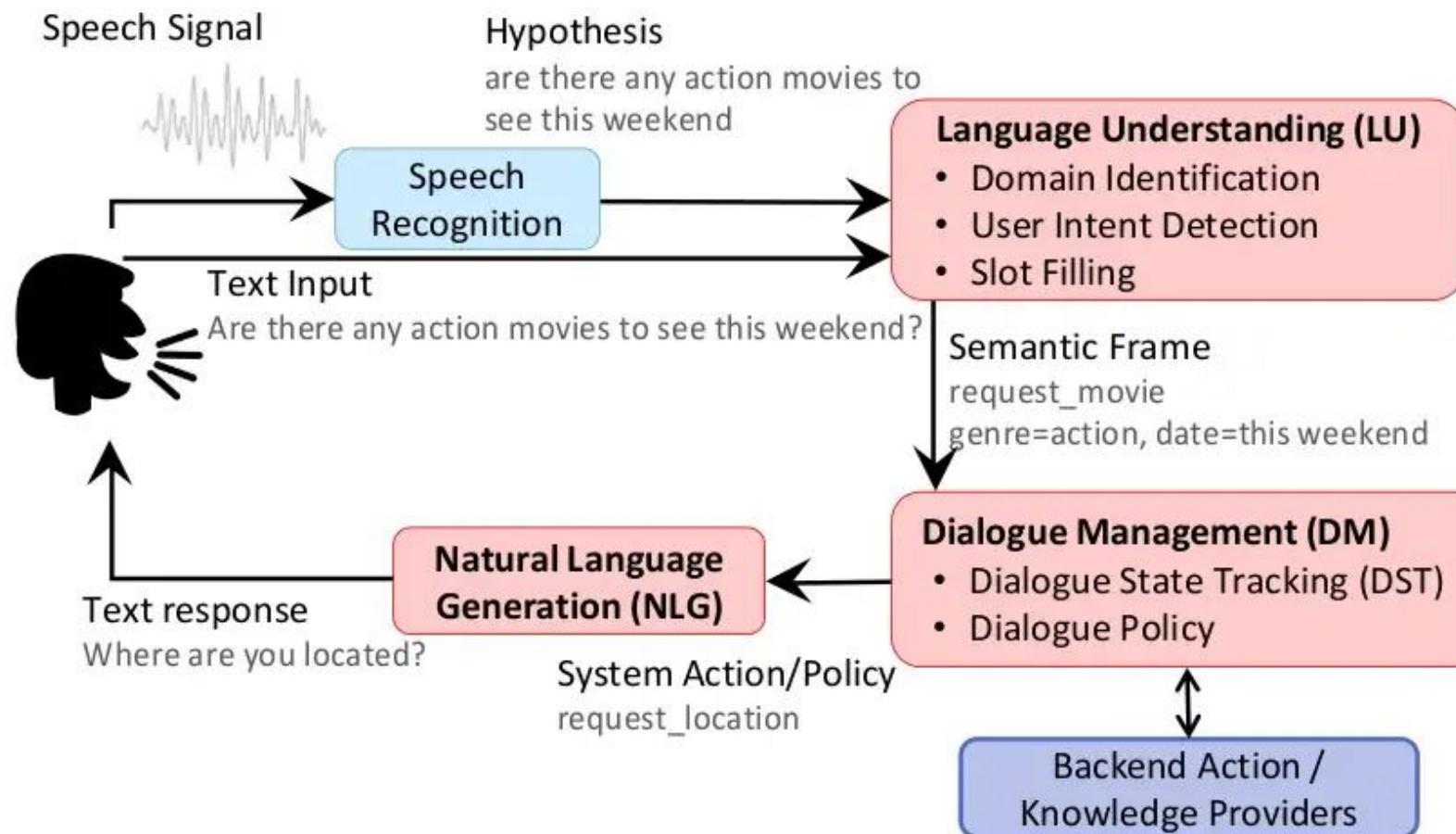
1. Понимание смысла (Language Understanding)
2. Автоматический перевод



Google's Neural Machine Translation System
<https://arxiv.org/abs/1609.08144>

Natural Language Processing

Диалоговые системы



Natural Language Processing

Языковые модели / генерация текста

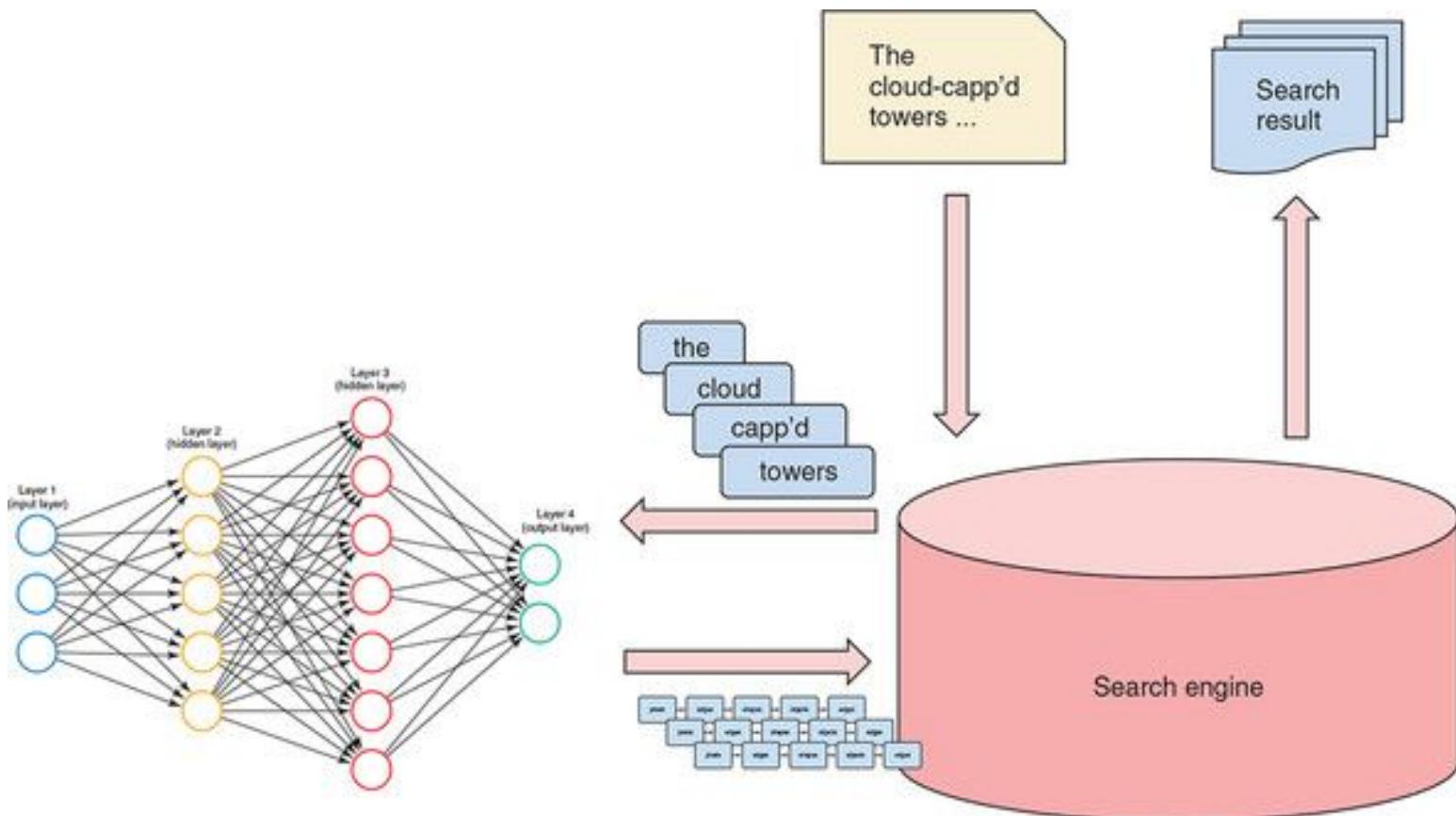
Title: United Methodists Agree to Historic Split
Subtitle: Those who oppose gay marriage will form their own denomination
Article: After two days of intense debate, the United Methodist Church has agreed to a historic split - one that is expected to end in the creation of a new denomination, one that will be "theologically and socially conservative," according to The Washington Post. The majority of delegates attending the church's annual General Conference in May voted to strengthen a ban on the ordination of LGBTQ clergy and to write new rules that will "discipline" clergy who officiate at same-sex weddings. But those who opposed these measures have a new plan: They say they will form a separate denomination by 2020, calling their church the Christian Methodist denomination.
The Post notes that the denomination, which claims 12.5 million members, was in the early 20th century the "largest Protestant denomination in the U.S.," but that it has been shrinking in recent decades. The new split will be the second in the church's history. The first occurred in 1968, when roughly 10 percent of the denomination left to form the Evangelical United Brethren Church. The Post notes that the proposed split "comes at a critical time for the church, which has been losing members for years," which has been "pushed toward the brink of a schism over the role of LGBTQ people in the church." Gay marriage is not the only issue that has divided the church. In 2016, the denomination was split over ordination of transgender clergy, with the North Pacific regional conference voting to ban them from serving as clergy, and the South Pacific regional conference voting to allow them.

Figure 3.14: The GPT-3 generated news article that humans had the greatest difficulty distinguishing from a human written article (accuracy: 12%).

<https://arxiv.org/pdf/2005.14165.pdf>

Natural Language Processing

Поиск текстовой информации



Natural Language Processing

ChatGPT

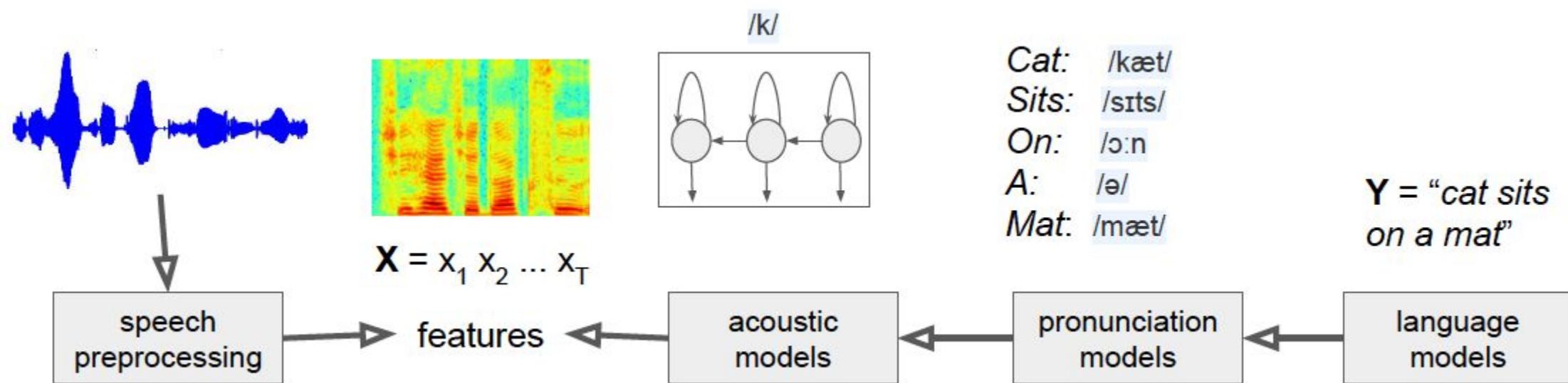
- General
 - Text Generation
 - Summarization
 - Open Domain Question Answering
 - Paraphrasing
 - Sentiment Analysis (few-shot or zero-shot)
 - Token Classification (few-shot or zero-shot)
 - Dataset Generation (few-shot or zero-shot)
 - Machine Translation
- Code
 - Code Generation
 - Code Explanation
 - Docstrings Generation
 - Programming Language Conversion
 - Data Object Conversions (JSON, XML, CSV etc.)
 - Knowledge Graph Generation



...

Обработка аудио / звуков / речи

Распознавание речи (Speech Recognition)



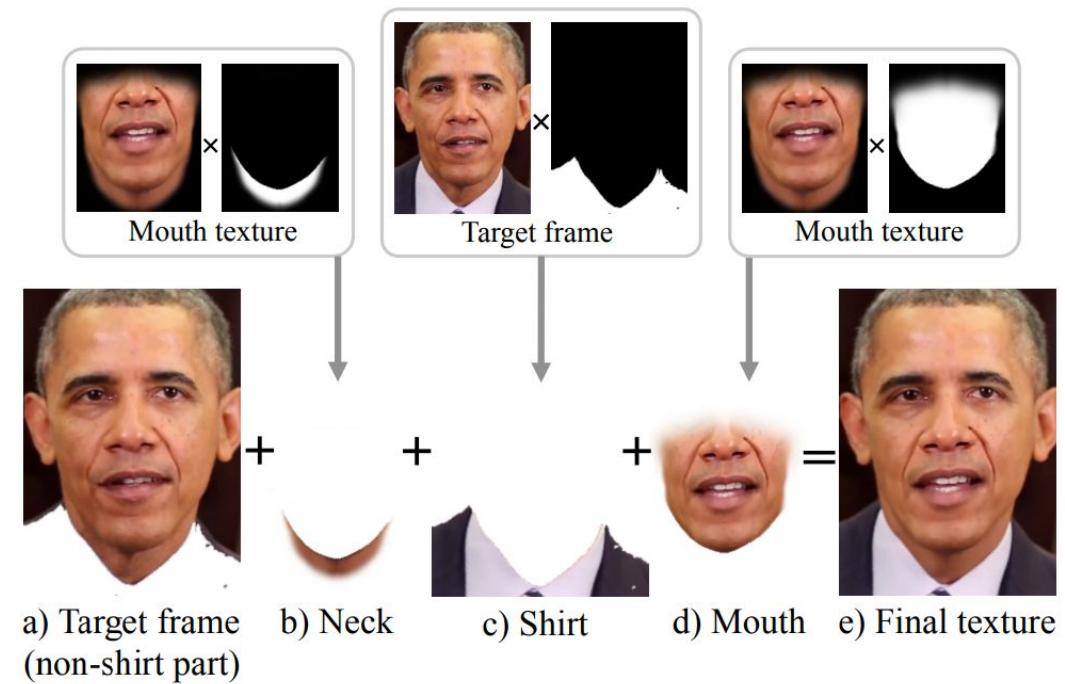
Обработка видео / аудио

Чтение по губам (Lip reading)



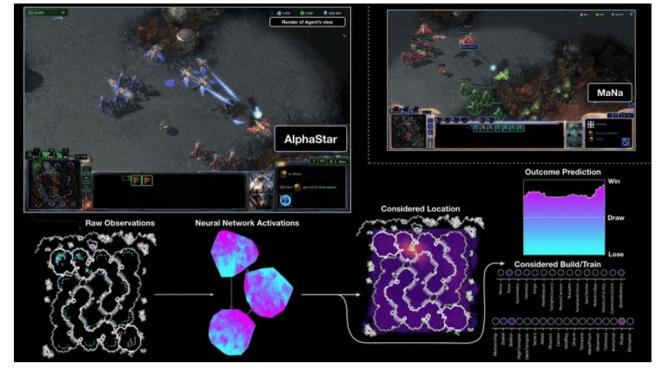
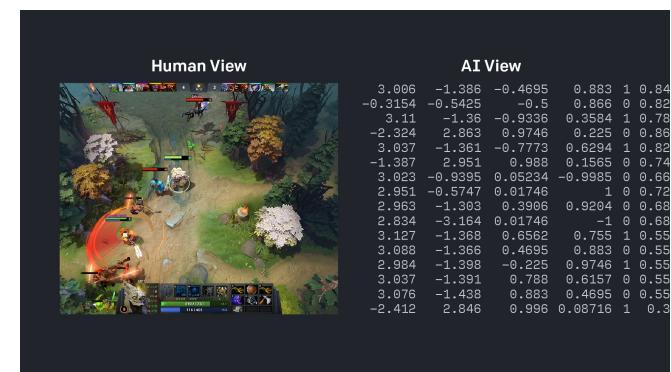
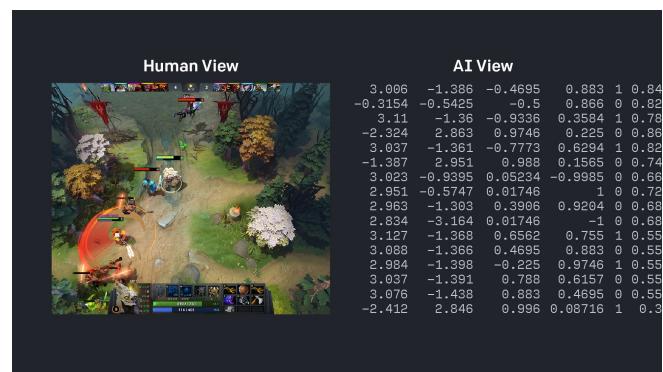
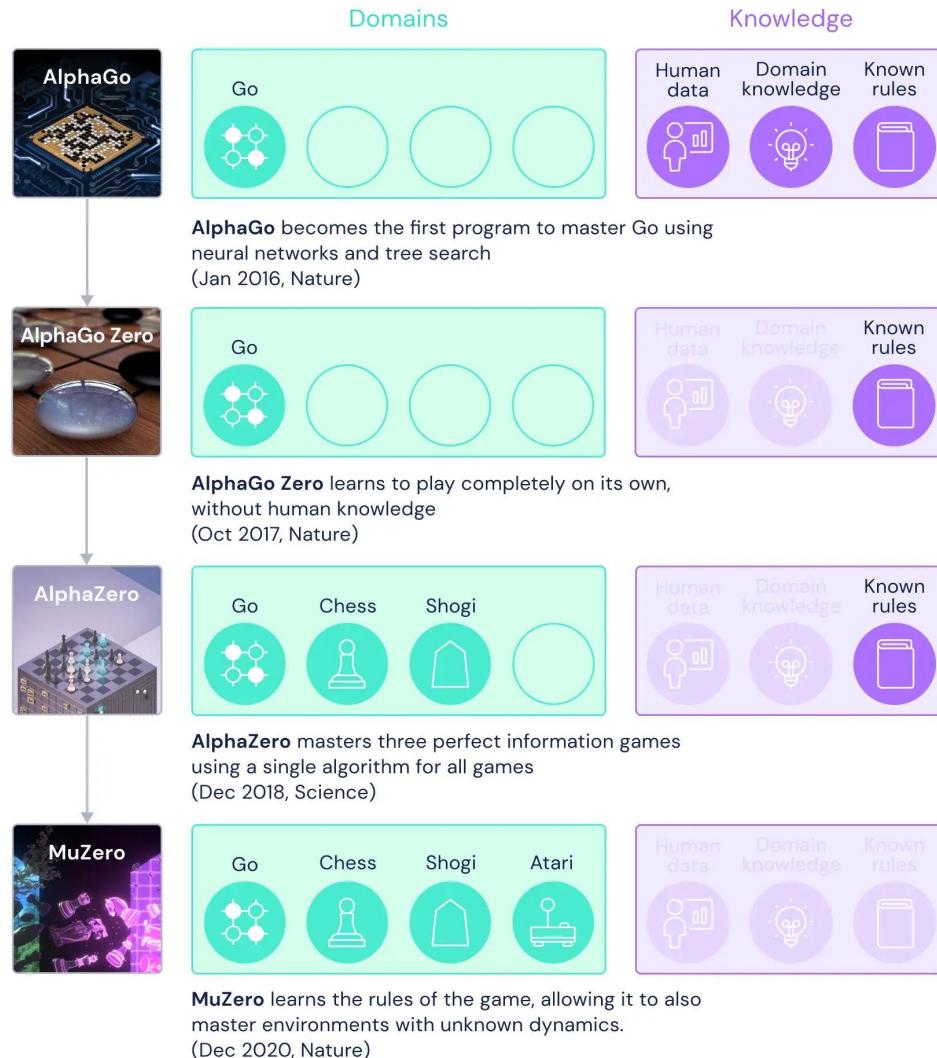
<https://arxiv.org/pdf/1611.05358v1.pdf>

Синхронизация движения губ



[http://grail.cs.washington.edu/projects/
AudioToObama/siggraph17_obama.pdf](http://grail.cs.washington.edu/projects/AudioToObama/siggraph17_obama.pdf)

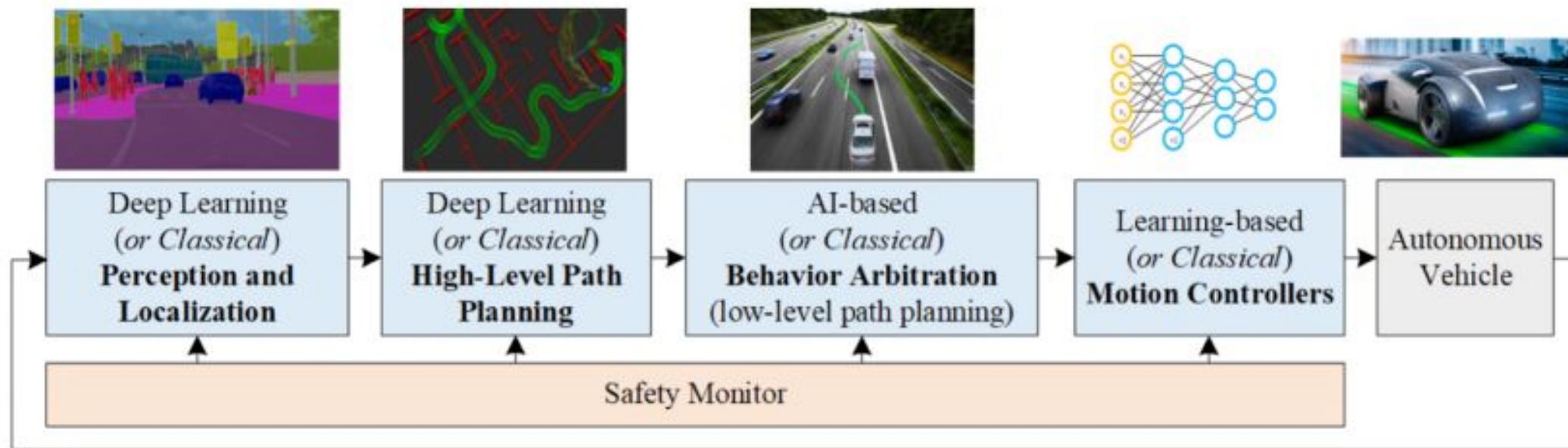
ИИ в играх: Atari, шахматы, Го, дота...



<https://www.deepmind.com/blog/muzero-mastering-go-chess-shogi-and-atari-without-rules>

Reinforcement Learning

Предсказание ситуации на дороге



<https://arxiv.org/pdf/1911.09070.pdf>

Медицина (Drug Discovery and Medical)

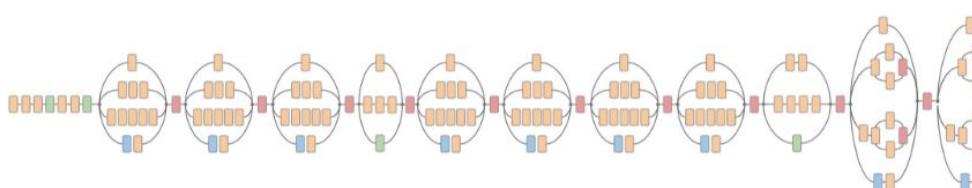
Диагностика рака кожи

Skin lesion image



- Convolution
- AvgPool
- MaxPool
- Concat
- Dropout
- Fully connected
- Softmax

Deep convolutional neural network (Inception v3)

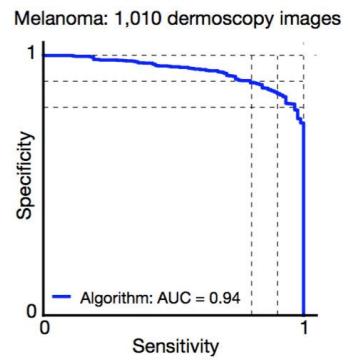
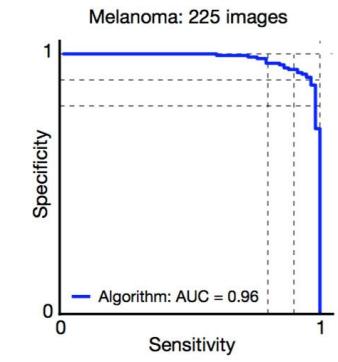
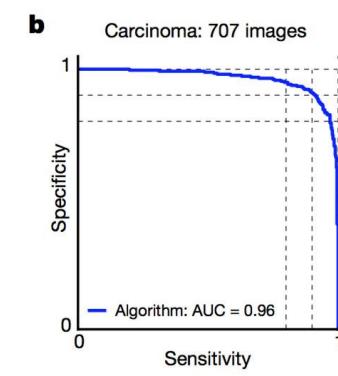
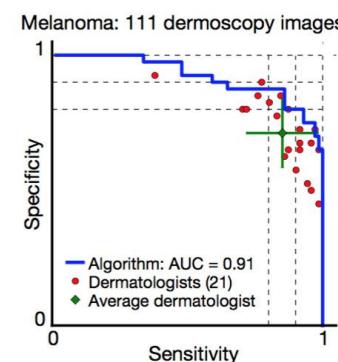
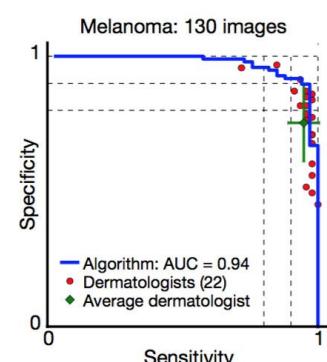
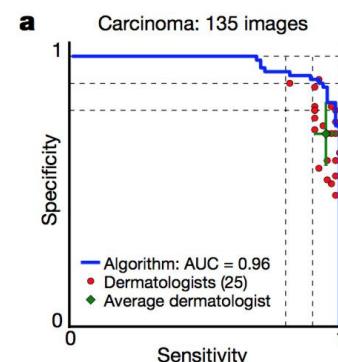


Training classes (757)

- Acral-lentiginous melanoma
- Amelanotic melanoma
- Lentigo melanoma
- ...
- Blue nevus
- Halo nevus
- Mongolian spot
- ...

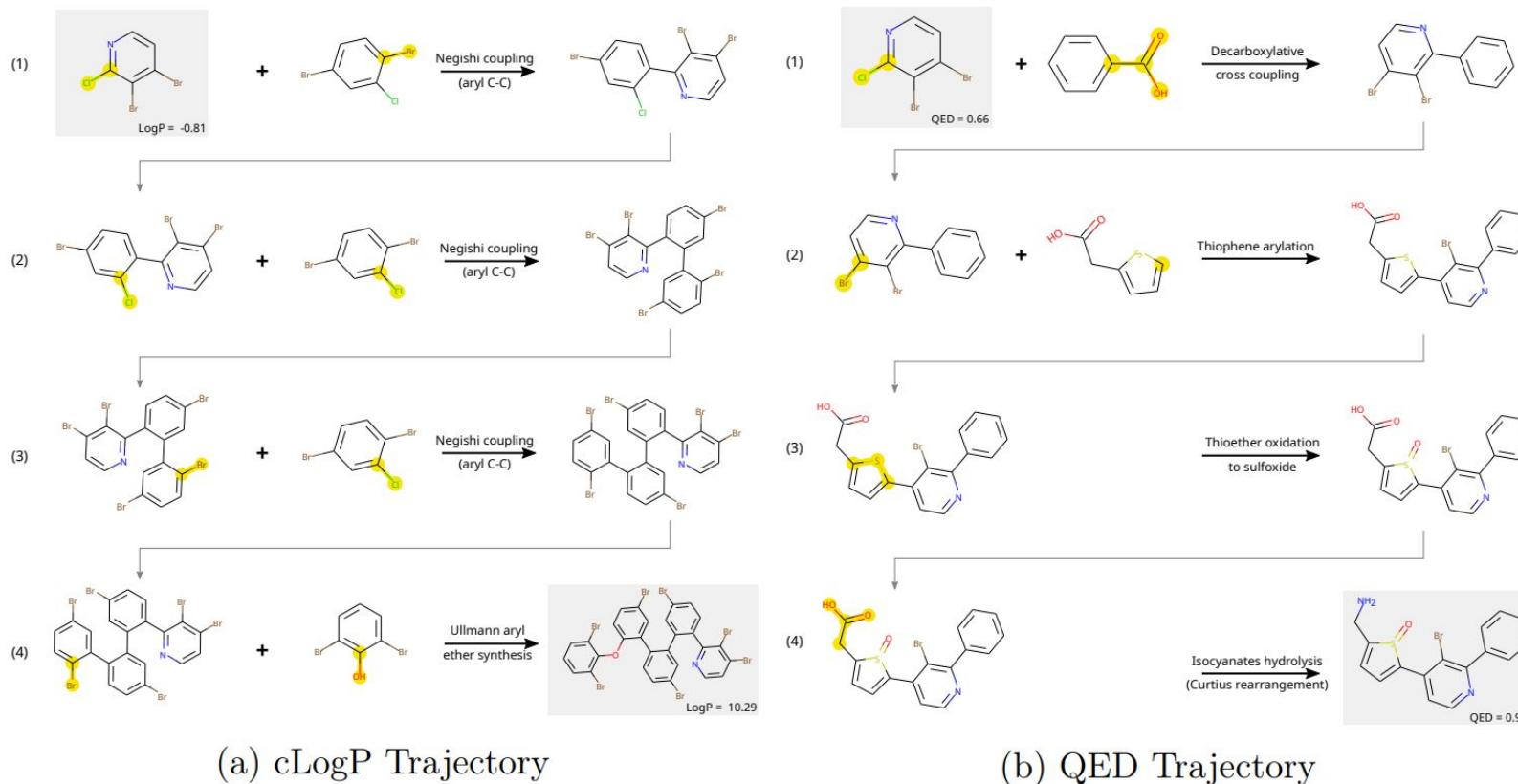
Inference classes (varies by task)

-  92% malignant melanocytic lesion
-  8% benign melanocytic lesion



Медицина (Drug Discovery and Medical)

Предсказание свойств химических соединений с помощью обучения с подкреплением



<https://arxiv.org/pdf/2004.14308.pdf>

Медицина (Drug Discovery and Medical)

Скрининг мамограмм

Test datasets

Number of women	25,856	3,097
Interpretation	Double reading	Single reading
Screening interval	3 years	1 or 2 years
Cancer follow-up	39 months	27 months
Number of cancers	414 (1.6%)	686 (22.2%)

Ground-truth determination

Positive if biopsy-confirmed within $T + 3$ months
Otherwise, negative if a second exam occurred after $T - \Delta$

Index exam

Screening interval (T)

0 T $2T$... Last available data

Evaluation

Comparison with retrospective clinical performance

UK and US test sets

Generalization across datasets

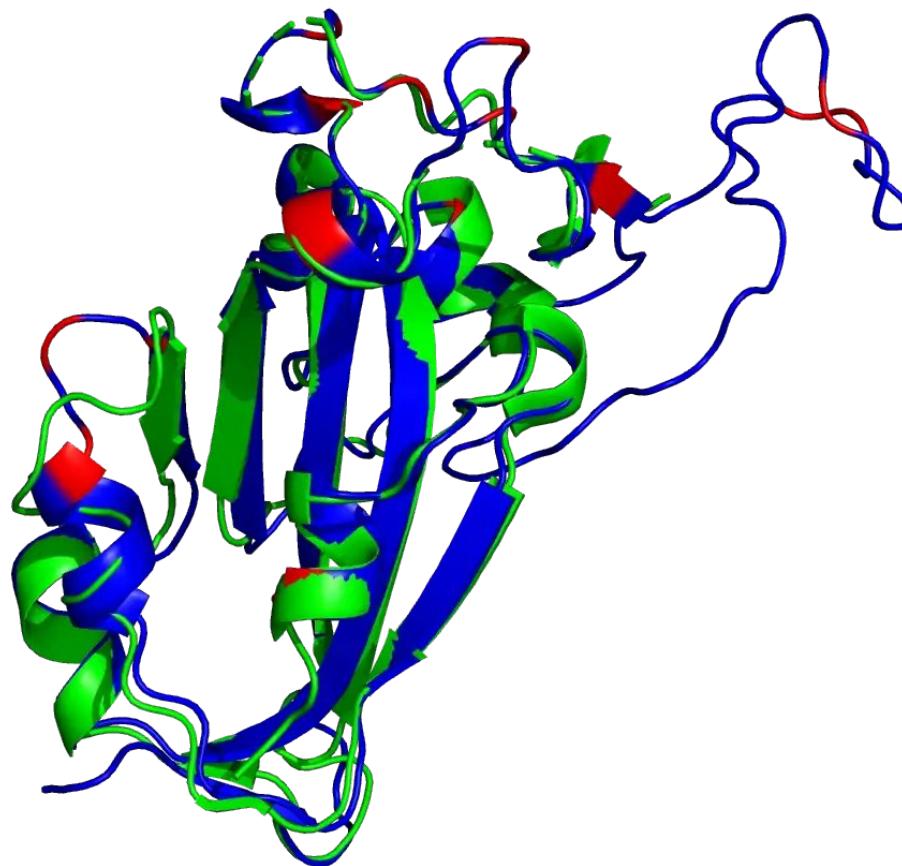
Trained on UK training set Tested on US test set

Independently conducted reader study

6 radiologists read 500 cases from US test set

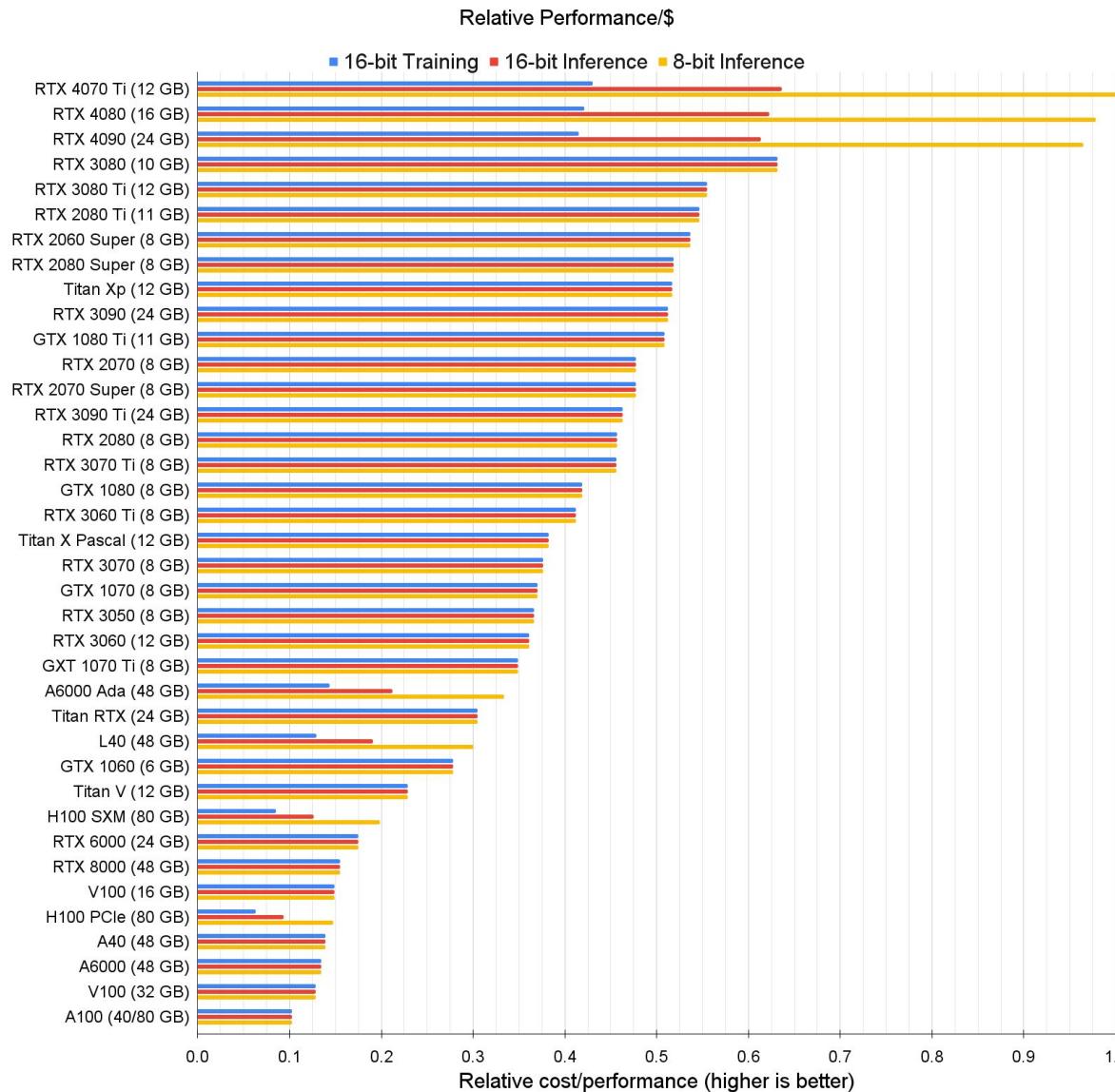
<https://www.nature.com/articles/s41586-019-1799-6>

Предсказание структуры белка и его свойств



<https://colbyford.medium.com/protein-structure-prediction-of-b-1-1-529-sars-cov-2-spoke-variant-with-alphaFold2-39c5bf9cf9ed>

Причины прогресса



1. Интенсивные исследования в ML (+ обмен идеями)
2. Огромные наборы данных (+ интернет, дататификация, миниатюризация)
3. Hardware (CPUs, GPUs + всё новое специальное)
4. Новые приёмы в обучении (Dropout, BN и т.п.)
5. Архитектурные: возможность инвариантности к некоторым преобразованиям (например масштабу) + принципиально новые идеи (ex: Transformer)
6. Интерес бизнеса

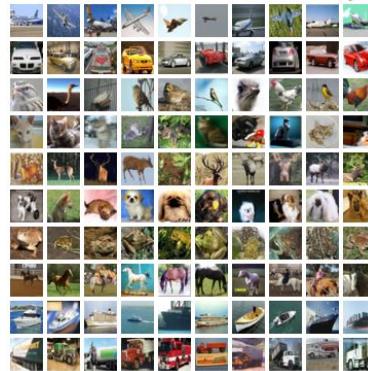
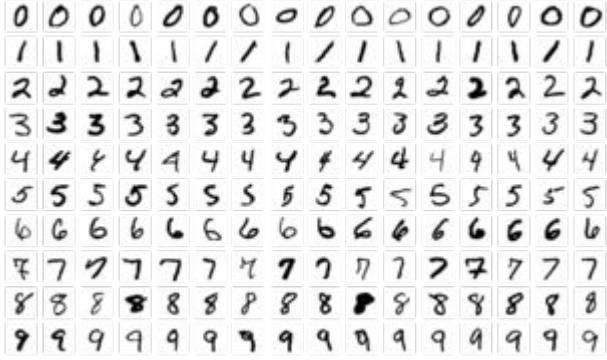
Проблемы и минусы нейросетей

- **Переобучение, большое число весов**
 - Разделение параметров
 - Использование структуры данных (архитектуры)
 - Регуляризация
- **Нестабильное обучение, долгое обучение, плохие решения**
 - Новые методы оптимизации
 - Эвристические приёмы
 - Архитектуры
 - GPU, кластеры GPU
- **Необходимость больших данных**
 - Каудсорс-разметка
 - Предобученные модели
 - Самообучение
 - One-shot-подходы
 - Эффективные представления (embeddings – стилей, интонации и т.п.)

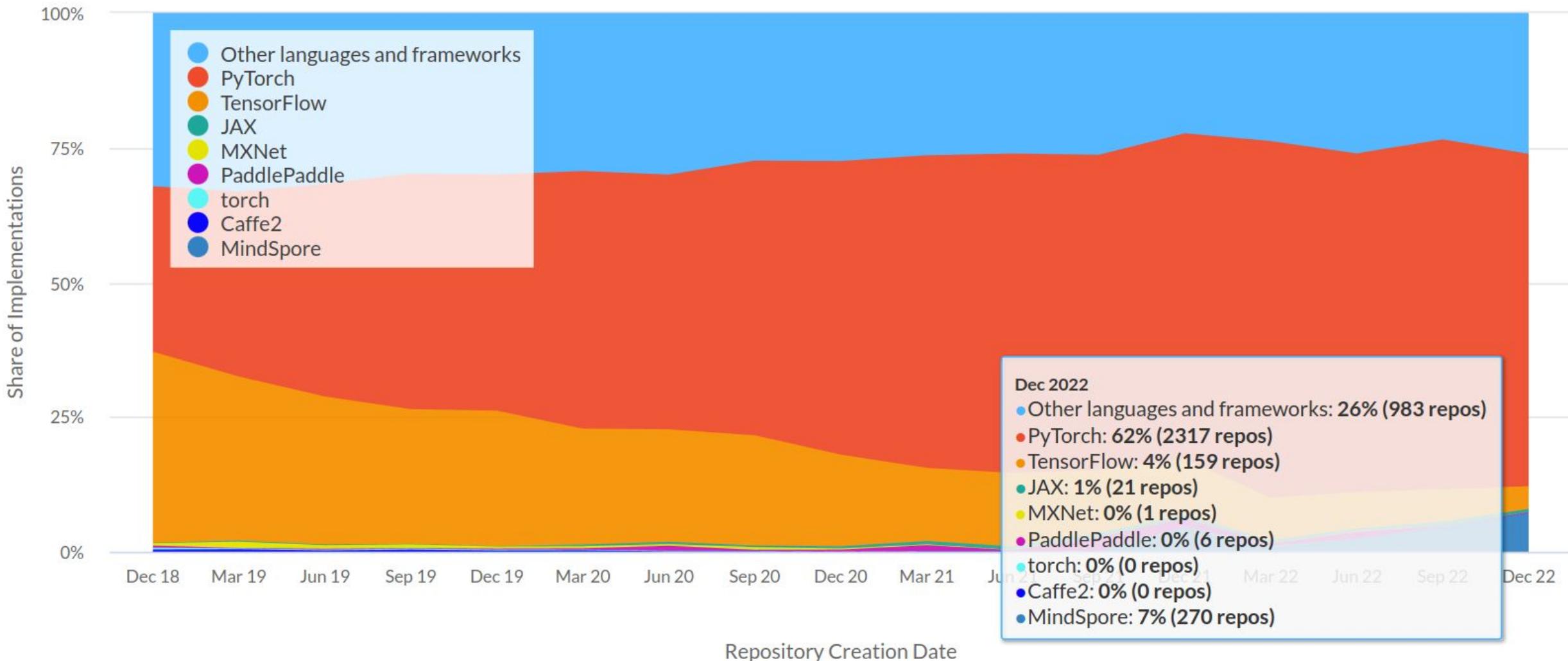
Проблемы и минусы нейросетей

- **Не учитывают «естественный контекст», слабая интерпретация решений**
 - Пока не ИИ...
 - Не учат инварианты (альтернативы – капсулевые сети и т.п.)
 - Теория интерпретаций
- **Уязвимости (возможность атак)**
 - Подходы к защите сетей
- **Ресурсоёмкость**
 - Сети облегчённой архитектуры (для мобильных приложений)
 - Обучение «Учитель-ученик»
- **Проблемы с выбором архитектуры**
 - Нет теории...
 - NAS (автоматический подбор)

Датасеты



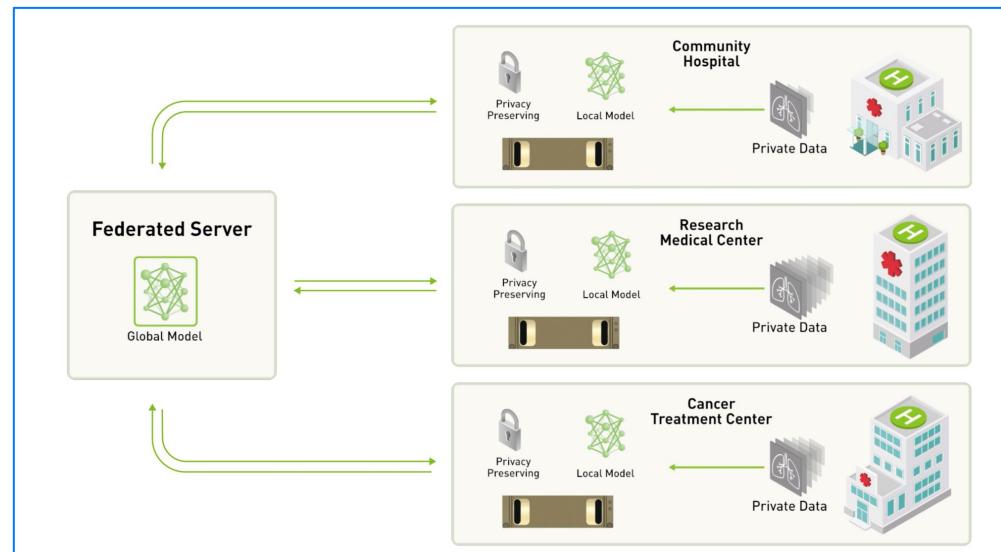
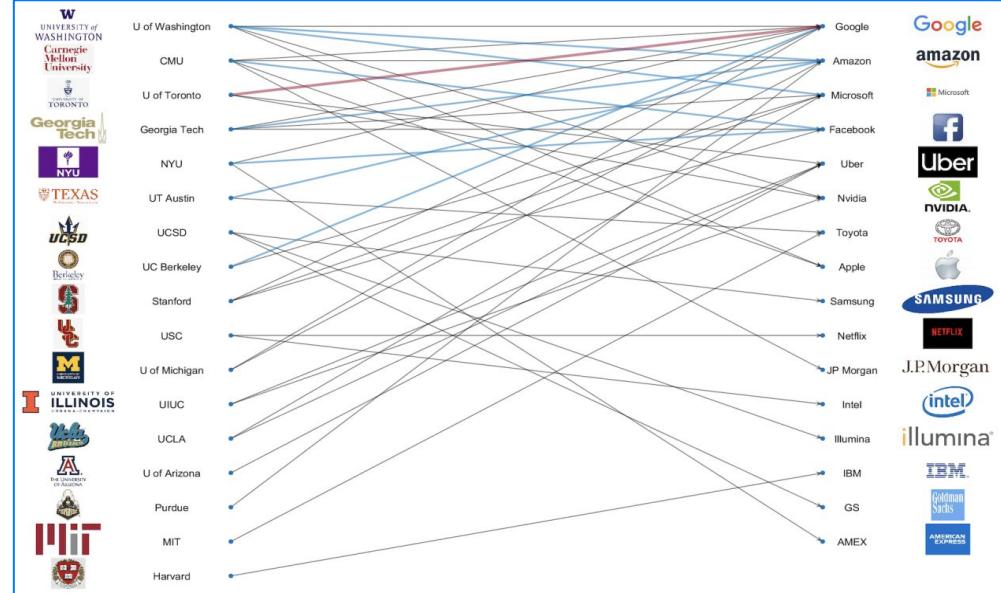
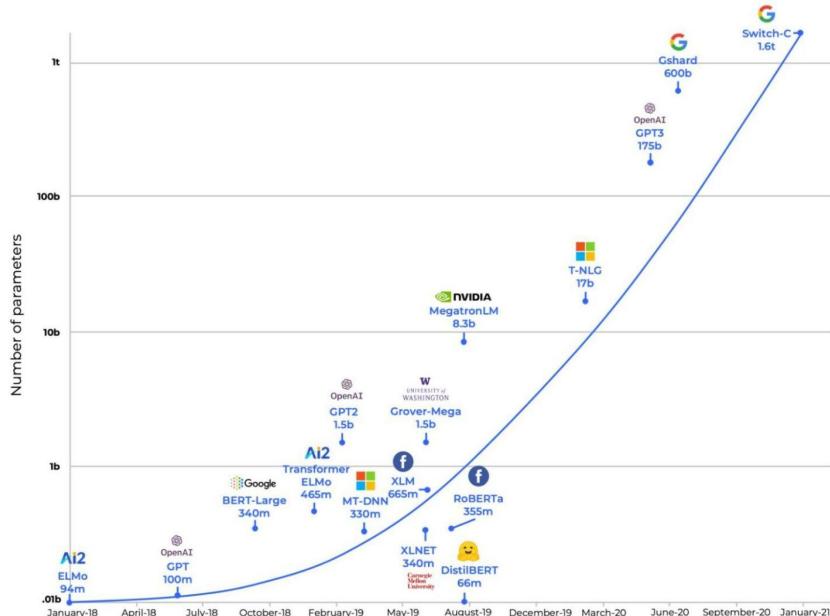
Frameworks



<https://paperswithcode.com/trends>

Тренды

1. Большие модели
2. Новые архитектуры и парадигмы
3. Федеративное обучение (Federated Learning)
4. Академическое сообщество «переезжает» в компании
5. Хорошие открытые библиотеки



Большое количество материалов

Лекции:

- Александр Дьяконов
 - <https://www.youtube.com/@alexanderdyakonov8305>
- Антон Осокин
 - https://github.com/aosokin/DL_CSHSE_spring2018
- Роман Соловьёв
 - <https://youtube.com/playlist?list=PLMyPRULSXkaWaJrQOWCBw0nVVVydPsPPj>
- Deep Learning School
 - <https://www.youtube.com/@DeepLearningSchool>
- Радослав Нейчев
 - https://www.youtube.com/playlist?list=PL4_hYwCyhAvY7k32D65q3xJVo8X8dc3Ye
- Техносфера
 - https://www.youtube.com/playlist?list=PLrCZzMib1e9oOGNLh6_d65HyfdqlJwTQP
- Computer Science Center
 - <https://www.youtube.com/watch?v=orgXajB6z58&list=PLlb7e2G7aSpTh7pQG8ek1Uv5-zatv84vY>

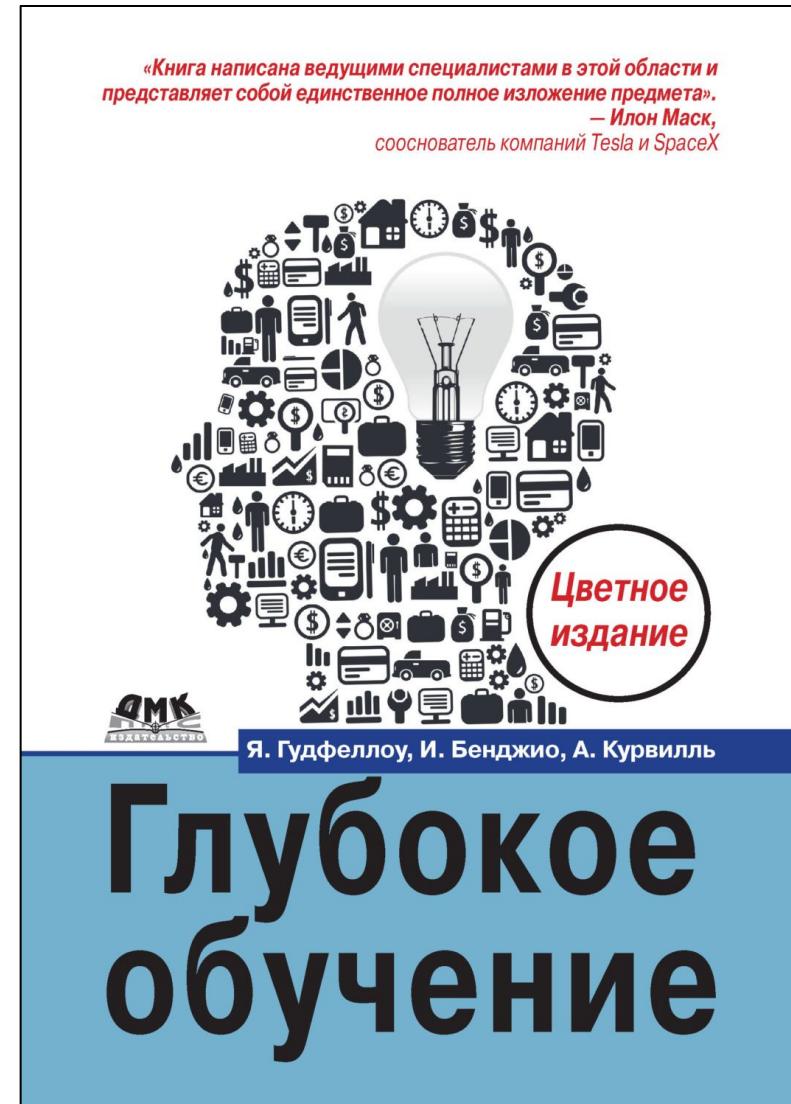
Большое количество материалов

Книги:

- Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville «Deep Learning»
- Mohamed Elgendi «Deep Learning for Vision Systems»
- Ричард Саттон, Эндрю Барто «Обучение с подкреплением»
- Адриан Роузброк «Deep Learning for Computer Vision with Python»
- Эндрю Траск «Grokking Deep Learning»
- Сергей Николенко «Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей»
- Сандро Сканси «Introduction to Deep Learning»
- Эндрю Ын «Machine Learning Yearning»
- Кристоф Молнар «Interpretable Machine Learning»
- Максим Лапань «Deep Reinforcement Learning Hands-On»

«Книга написана ведущими специалистами в этой области и представляет собой единственное полное изложение предмета».

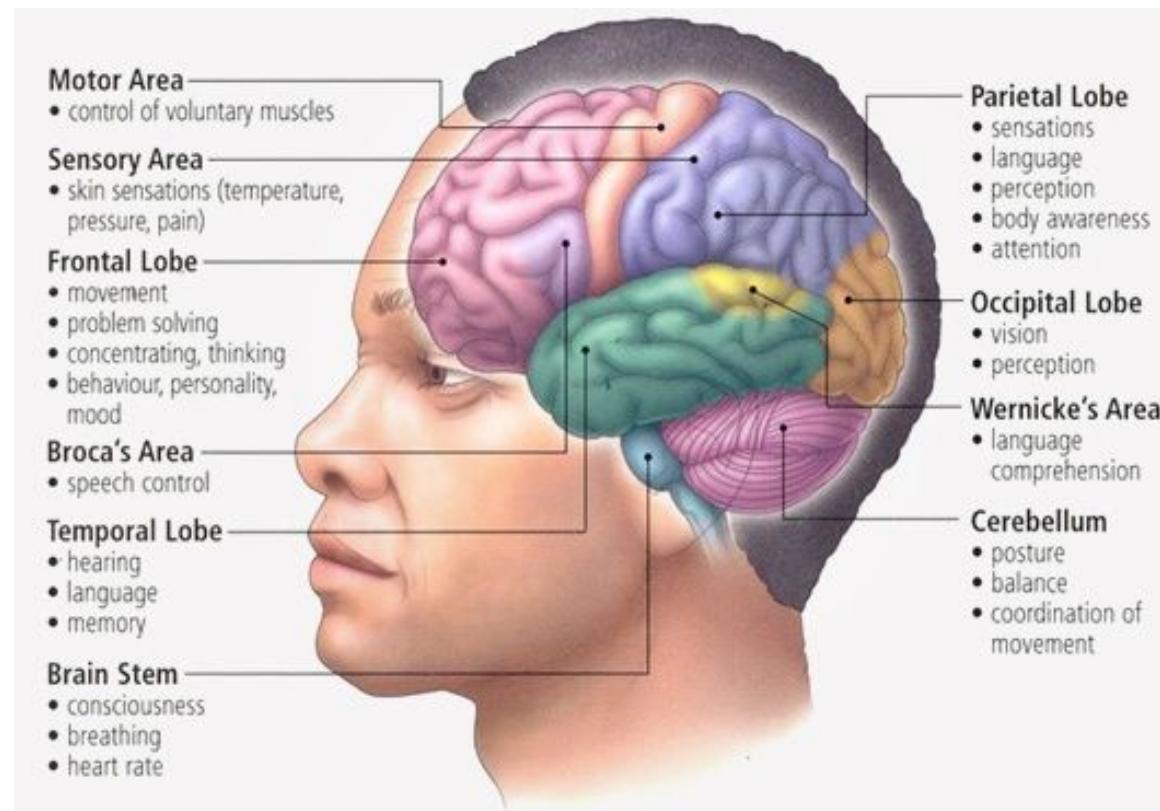
— Илон Маск,
сооснователь компаний Tesla и SpaceX



Многослойный персепtron

• • • • •

Структура мозга человека



Количество нейронов:

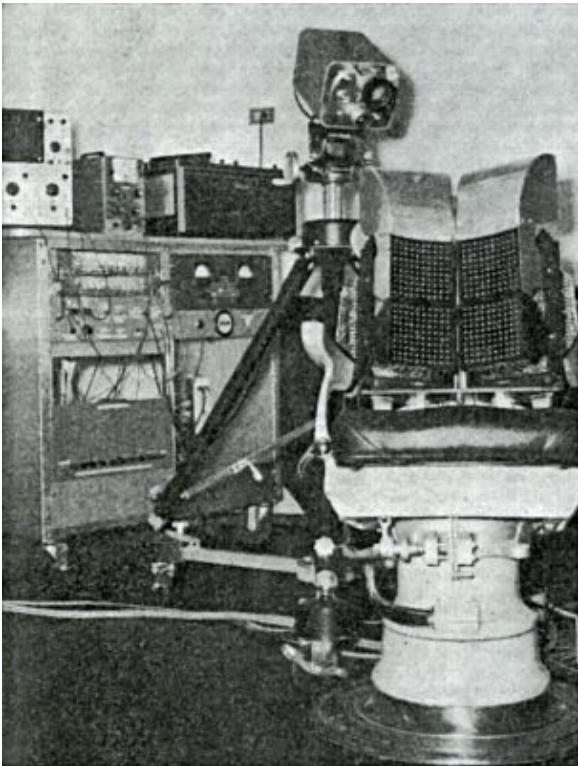
- 86 млрд

Число транзисторов:

- [GPU] GH100 Hopper: 80 млрд
- [CPU] Apple M2 Max: 67 млрд

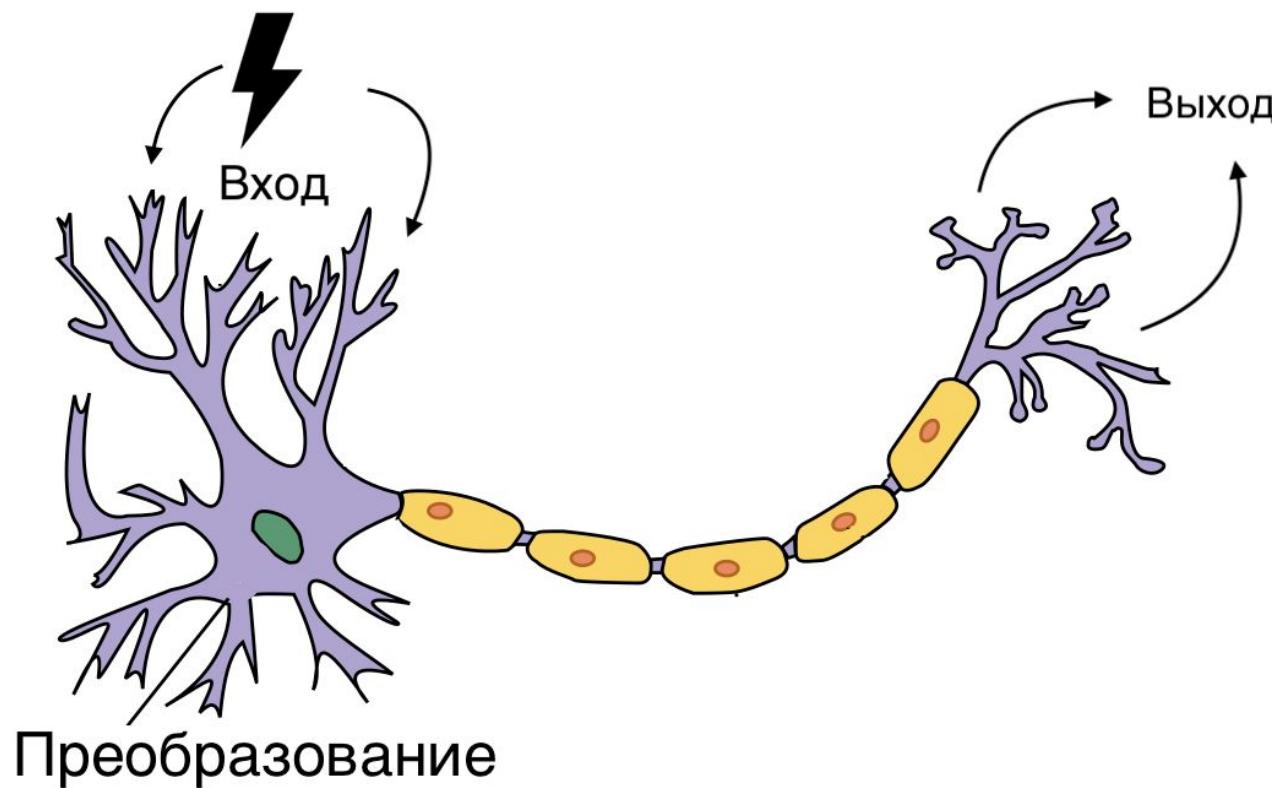
Нейроны обладают
нейропластичностью

Нейропластиность



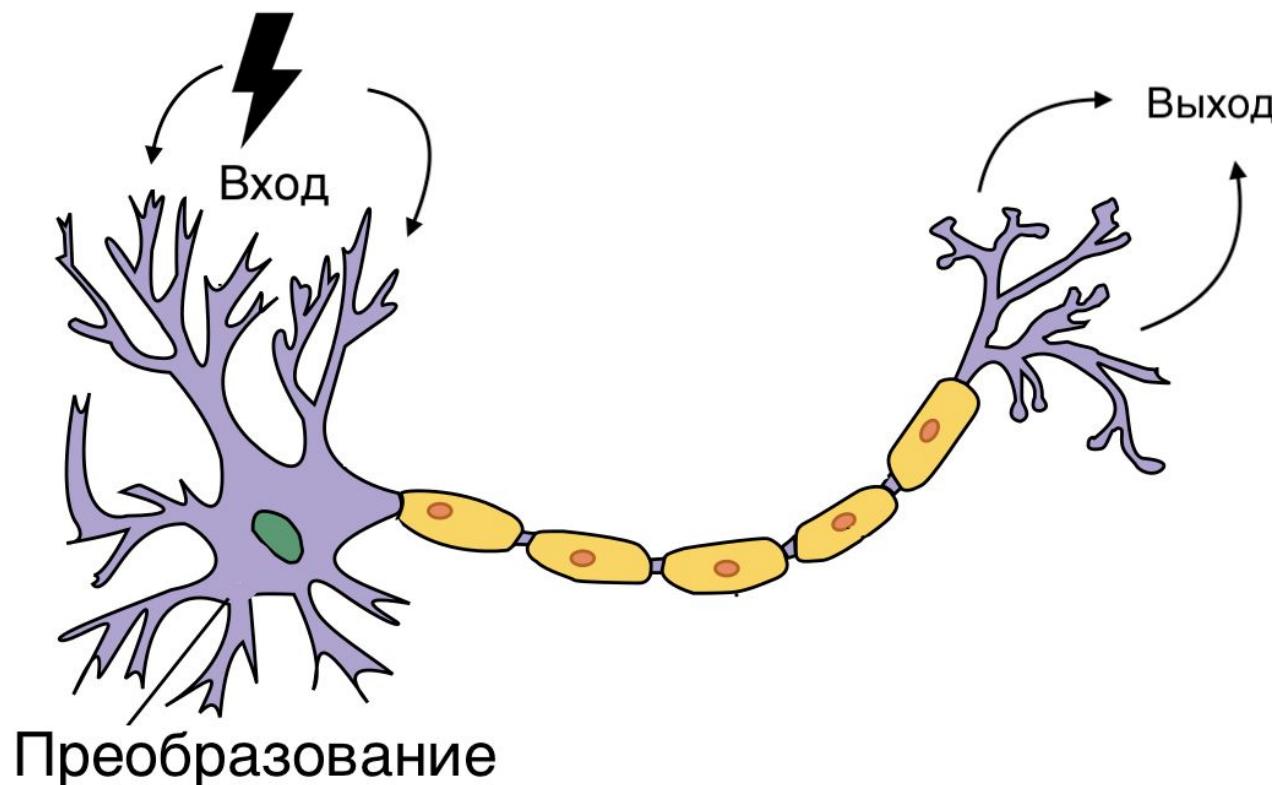
Пол Бак-и-Рита (Paul Bach-y-Rita)
Создан прибор (BrainPort), основой которого является матрица
электродов (до 20 на 20 штук), присоединяемых к языку (1969)

Биологический нейрон



Выходной сигнал посыпается при достижении
определенного уровня входного сигнала.

Биологический нейрон

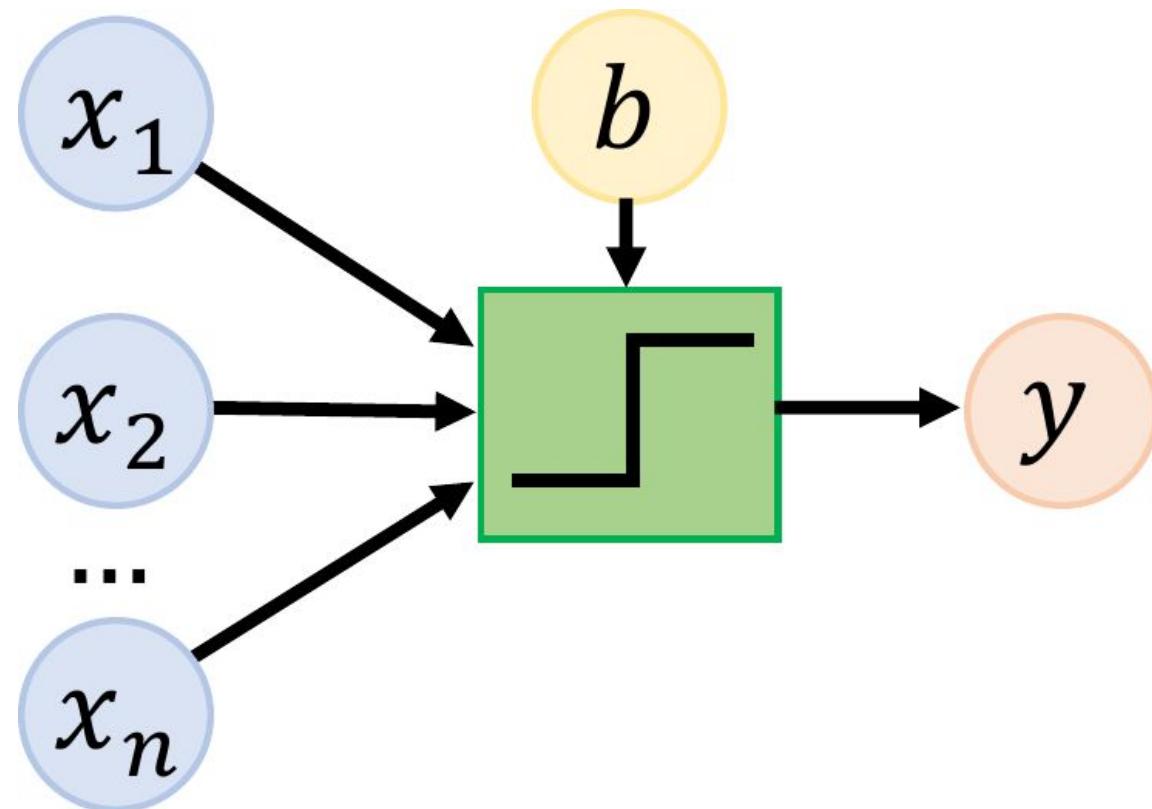


Выходной сигнал посыпается при достижении определенного уровня входного сигнала.

Модель:

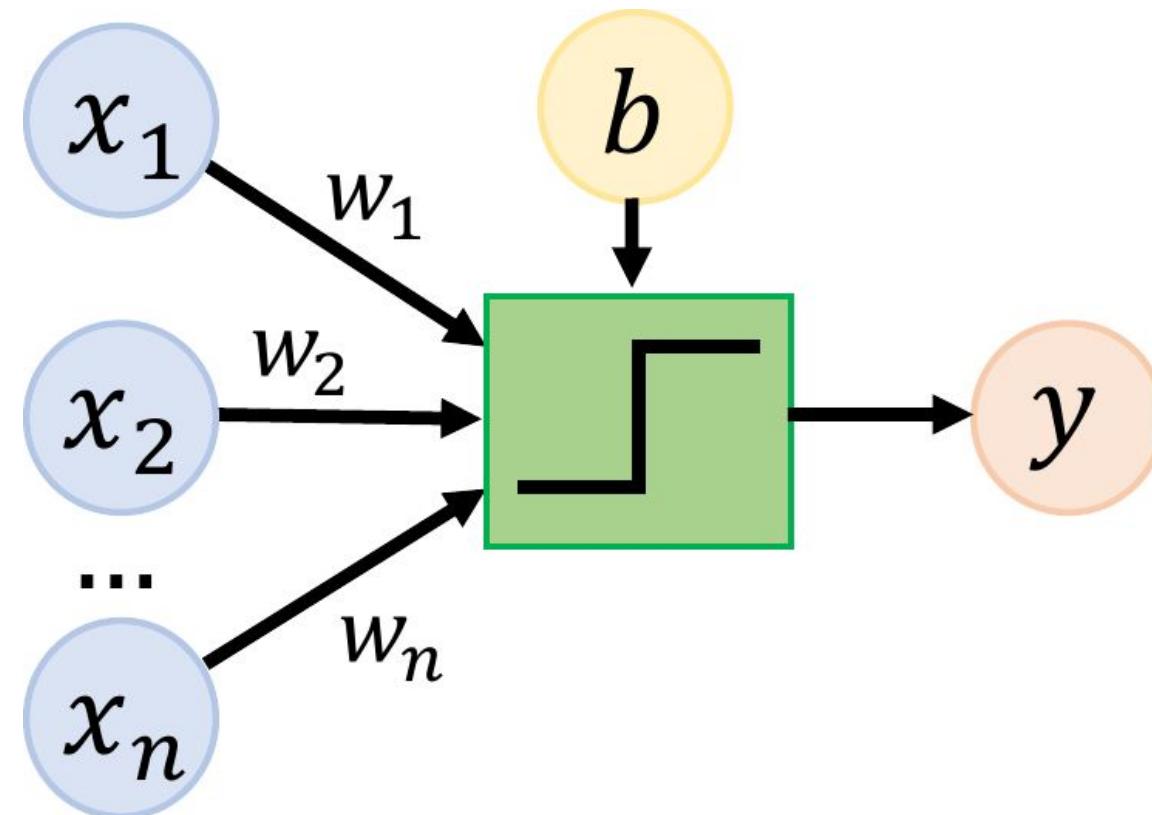
$$y = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^N x_i > b \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} = I\left[\sum_{i=1}^N x_i > b\right]$$

Модель 1. Схема



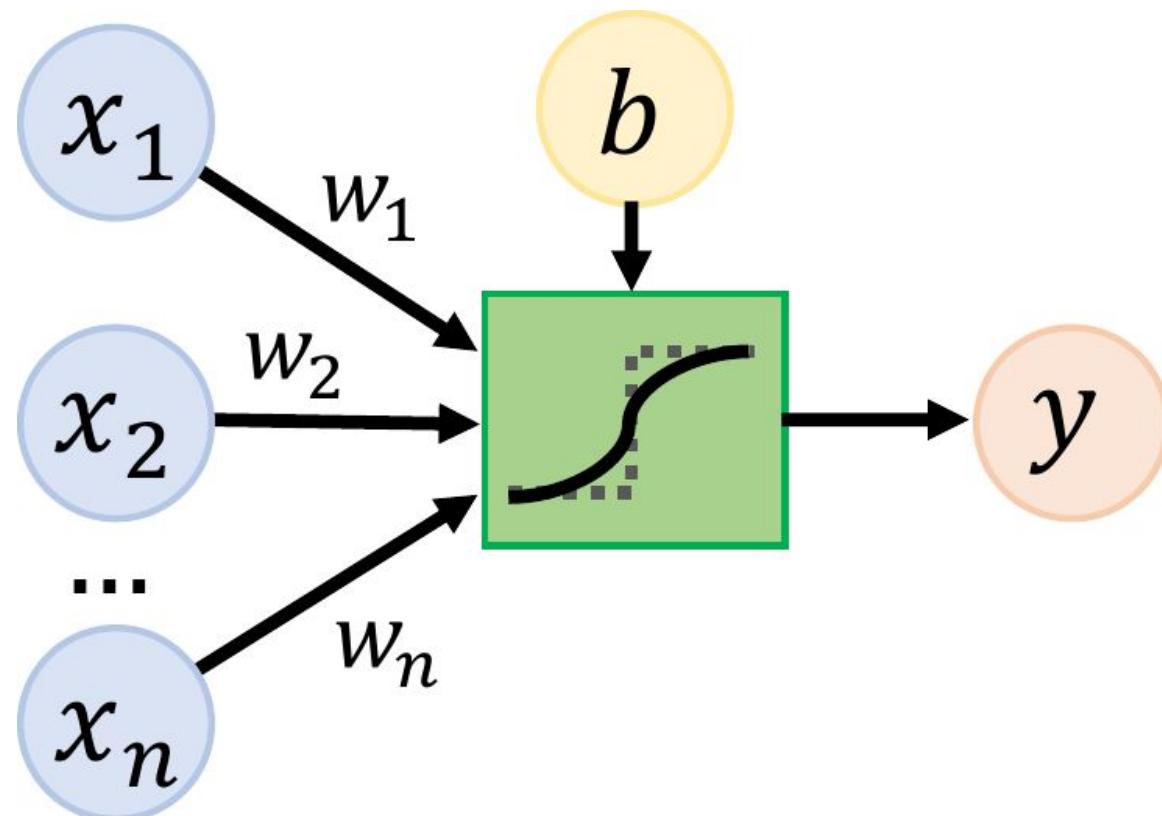
$$y = I\left[\sum_{i=1}^N x_i > b\right]$$

Модель 2. Чувствительность нейронов



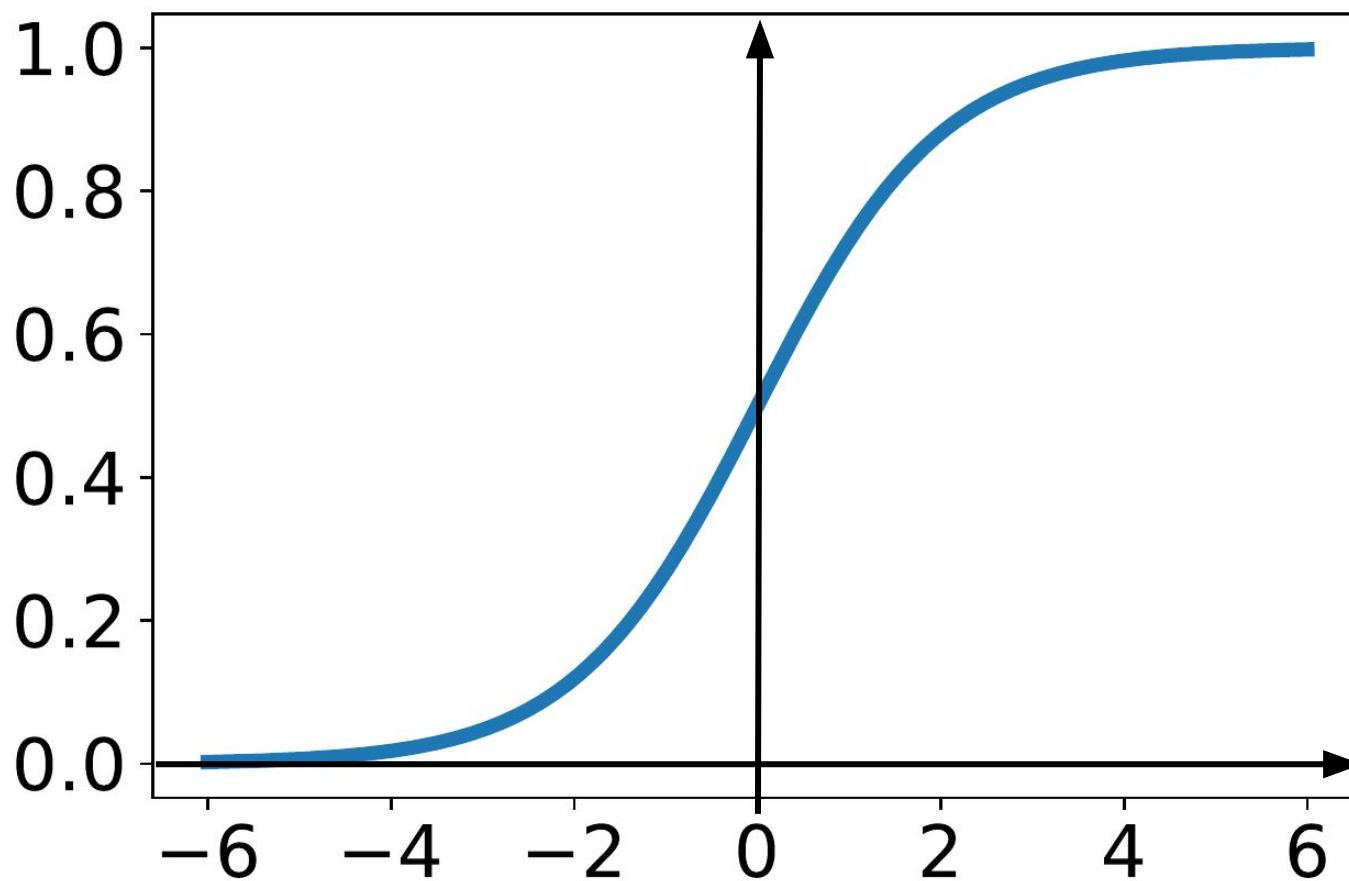
$$y = I \left[\sum_{i=1}^N w_i x_i > b \right] = I[w^T x > b]$$

Модель 3. Непрерывная активация



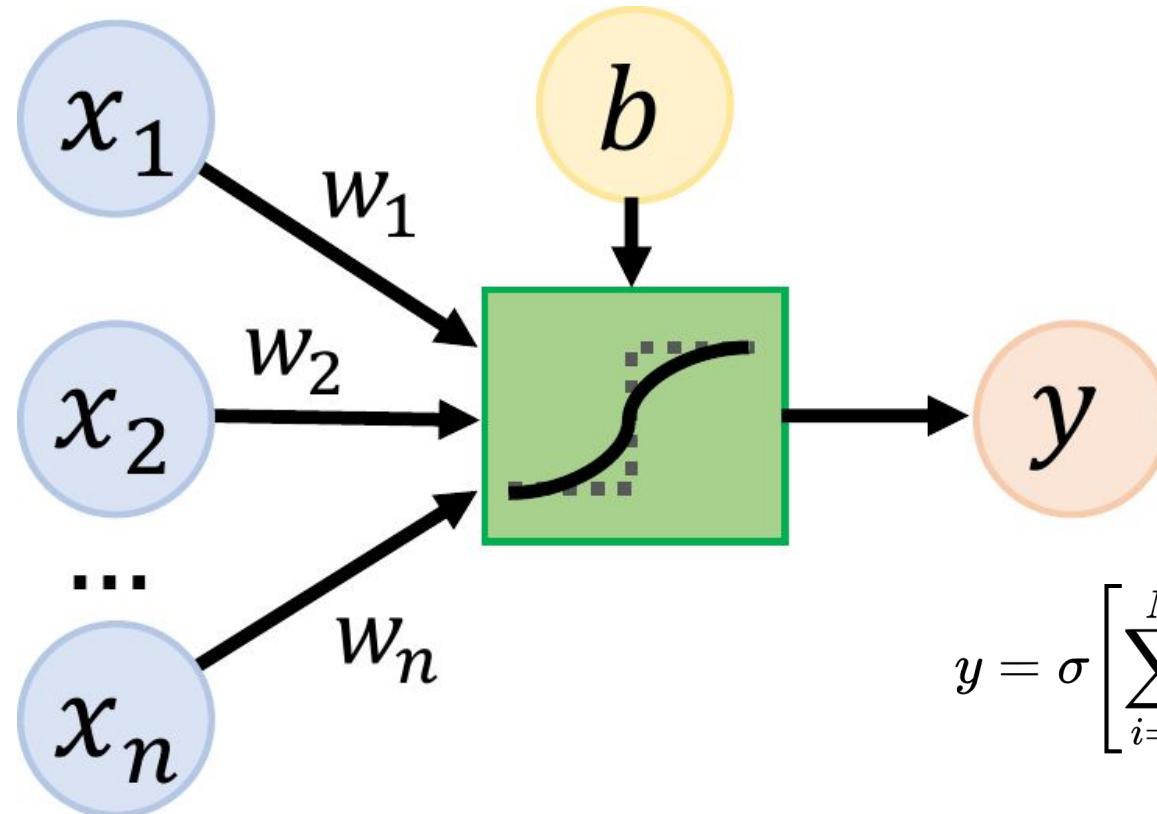
$$y = \sigma \left[\sum_{i=1}^N w_i x_i + b \right] = \sigma [w^T x + b]$$

Функция активации



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

Перцептрон

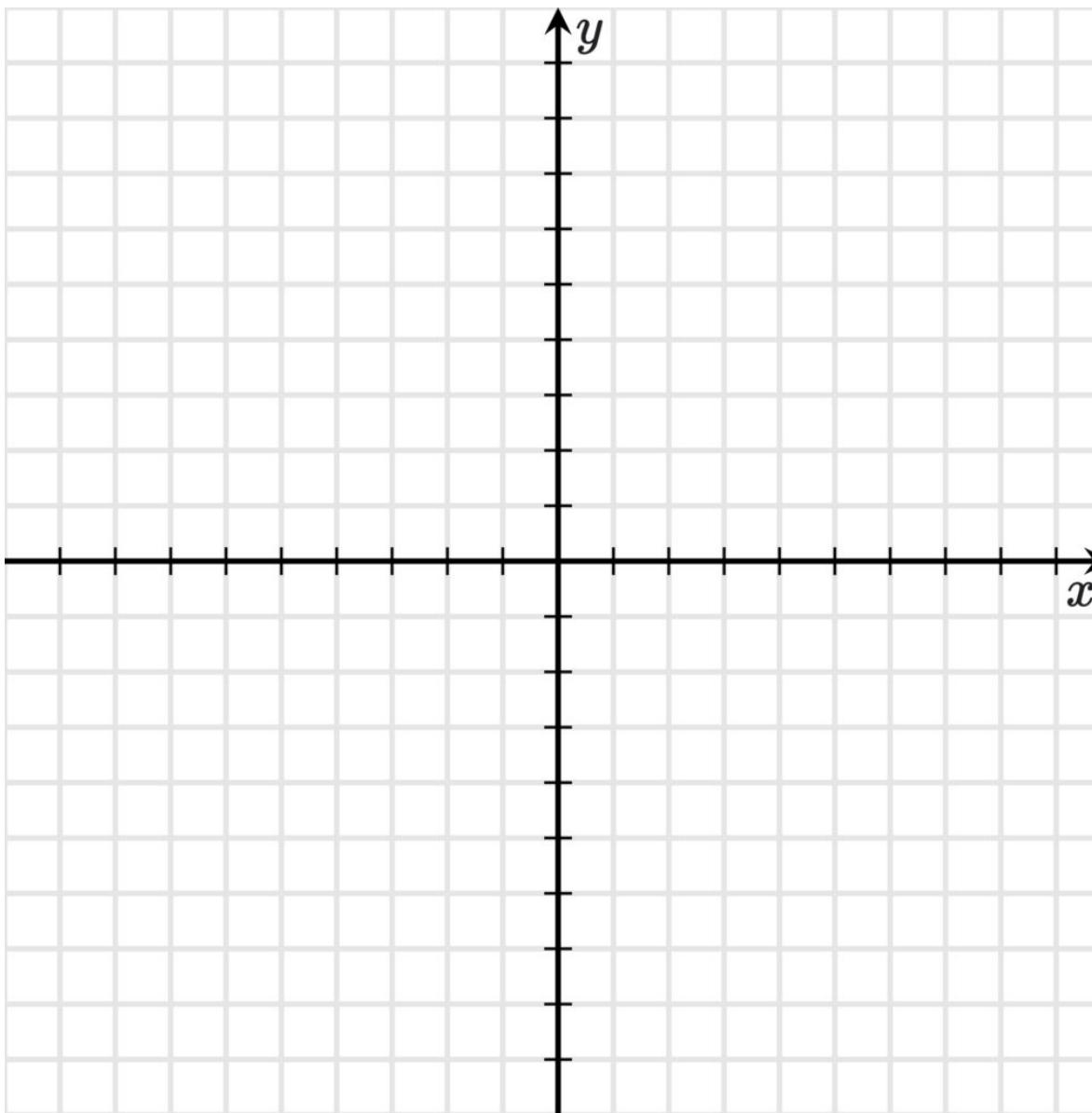


$$y = \sigma \left[\sum_{i=1}^N w_i x_i + b \right] = \sigma [w^T x + b]$$

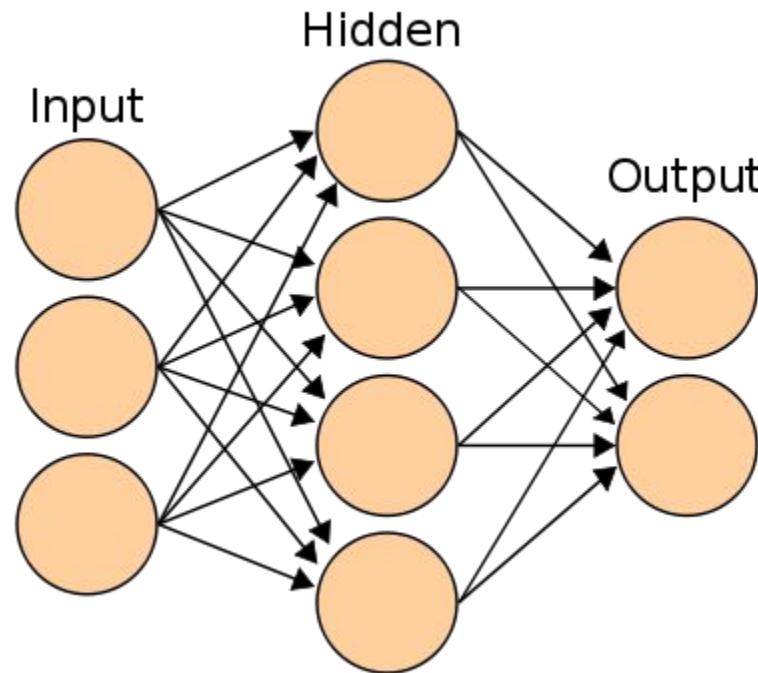
- Можем моделировать: NOT, AND, OR
- Не можем моделировать: XOR

Перцептрон

		AND	OR	XOR
0	0	0	0	0
0	1	0	1	1
1	0	0	1	1
1	1	1	1	0



Сети с одним скрытым слоем



Теорема (универсальный аппроксиматор)

Любую непрерывную на компакте функцию можно равномерно приблизить нейронной сетью с одним скрытым слоем.

https://en.wikipedia.org/wiki/Compact_space

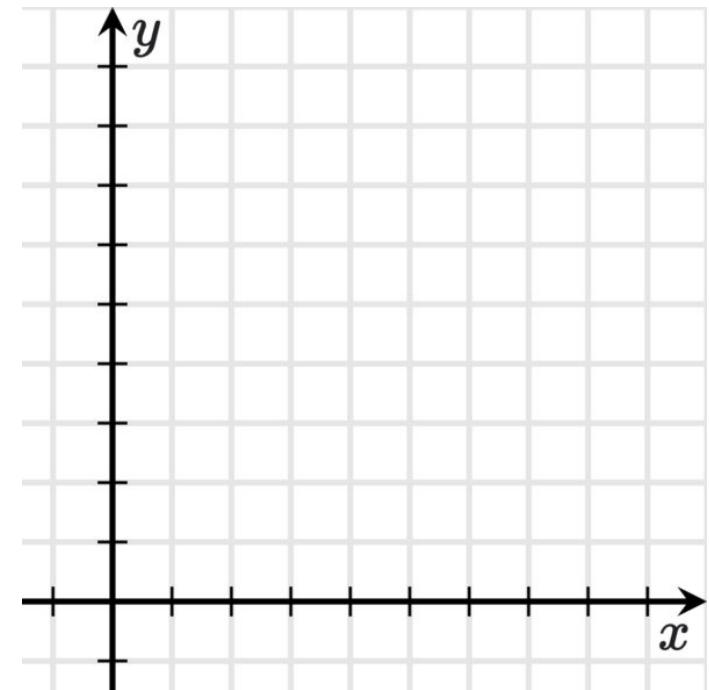
<http://neuralnetworksanddeeplearning.com/chap4.html>

Идея доказательства

1. Рассмотрим случай $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$
2. Достаточно рассматривать $m = 1$
3. Заменяем функцию на кусочно-постоянную
4. Учимся приближать
$$f(x) = I[a \leq x \leq b]$$
с помощью первого слоя
5. Учимся приближать

$$f(x) = \sum_{i=1}^N f\left(\frac{a_i + b_i}{2}\right) I[a_i \leq x \leq b_i]$$

с помощью второго слоя

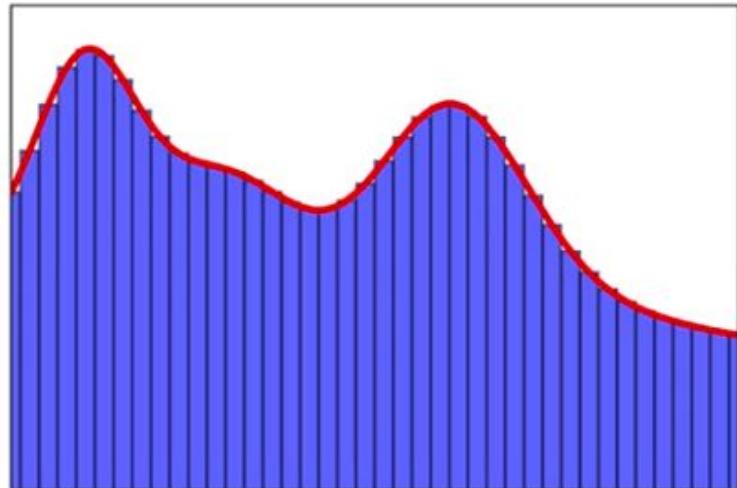
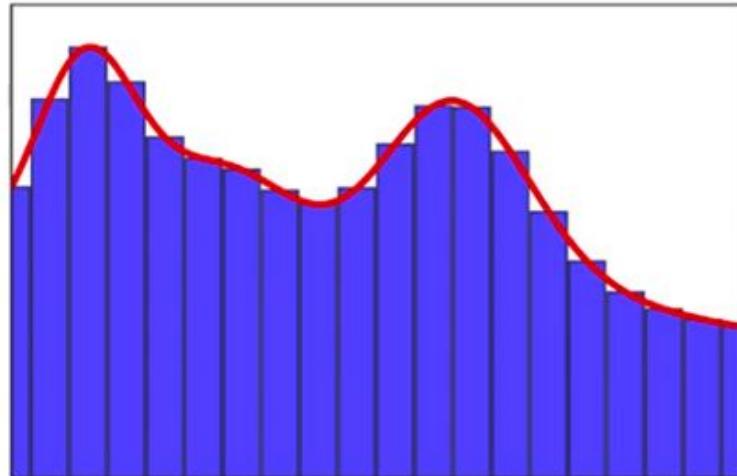


Идея доказательства

1. Рассмотрим случай $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$
2. Достаточно рассматривать $m = 1$
3. Заменяем функцию на кусочно-постоянную
4. Учимся приближать
$$f(x) = I[a \leq x \leq b]$$
с помощью первого слоя
5. Учимся приближать

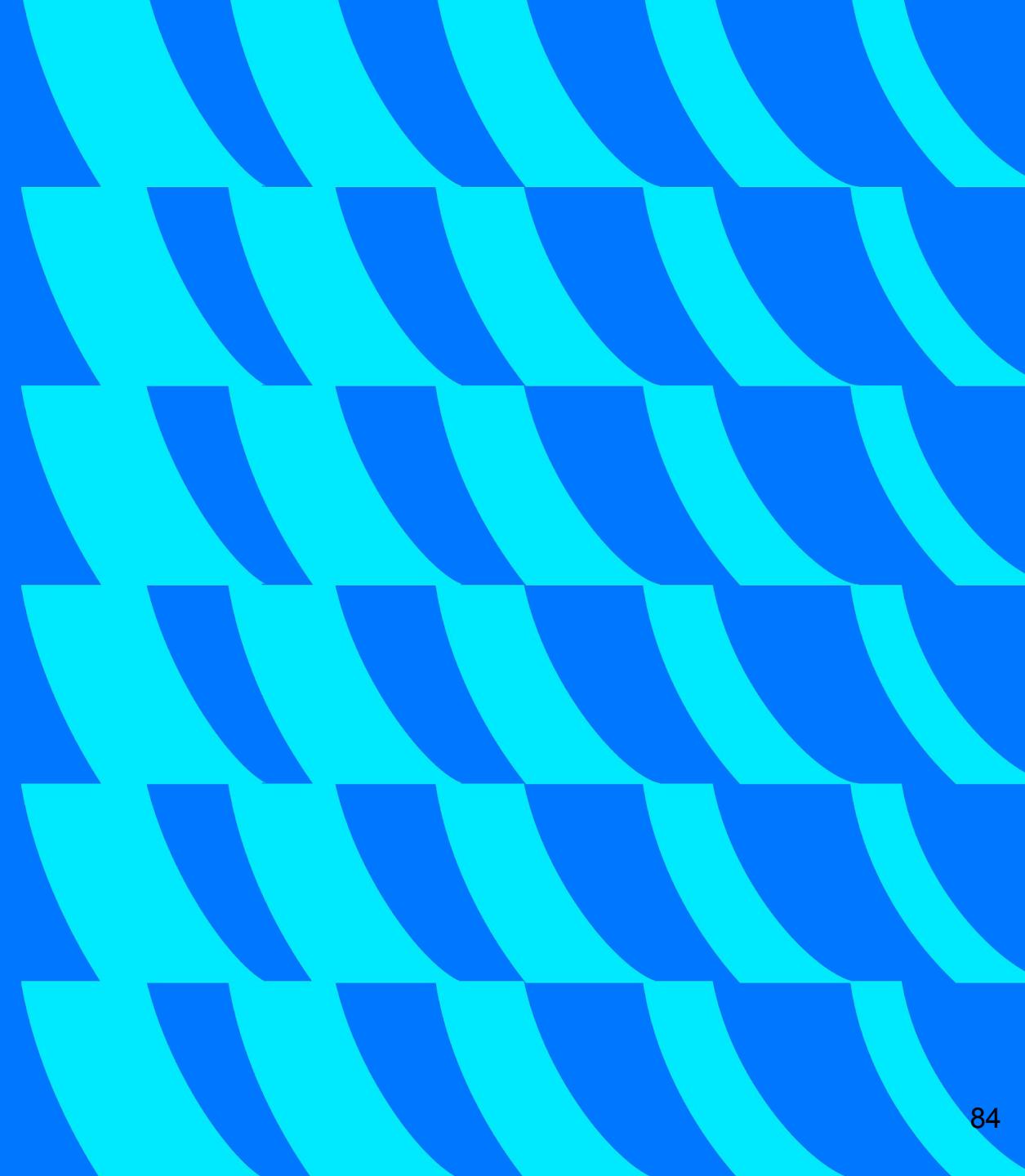
$$f(x) = \sum_{i=1}^N f\left(\frac{a_i + b_i}{2}\right) I[a_i \leq x \leq b_i]$$

с помощью второго слоя



Обучение нейронных сетей

• • • • •



Как обучить нейронную сеть?

Обучить нейронную сеть – подобрать значения всех настраиваемых параметров (веса и смещения).

Два этапа:

1. Задать функцию потерь \mathcal{L}
2. Подобрать веса, минимизирующие \mathcal{L}

Регрессия

Хотим предсказать непрерывную величину y для объекта X (задача регрессии).

Имеется выборка $(X_1, t_1), \dots, (X_n, t_n)$. Пусть сеть предсказала y на объекте с правильной меткой t . Функция потерь: $\delta = t - y$

- Mean Squared Error (MSE): δ^2
- Mean Absolute Error (MAE): $|\delta|$
- Разная стоимость пере- и недопрогноза:
 $\delta^2(a \cdot I[\delta < 0] + b \cdot I[\delta \geq 0])$

Классификация

Хотим предсказать класс объекта. Функция потерь: $-\sum_{c=1}^C I[t = c] \log p_c$

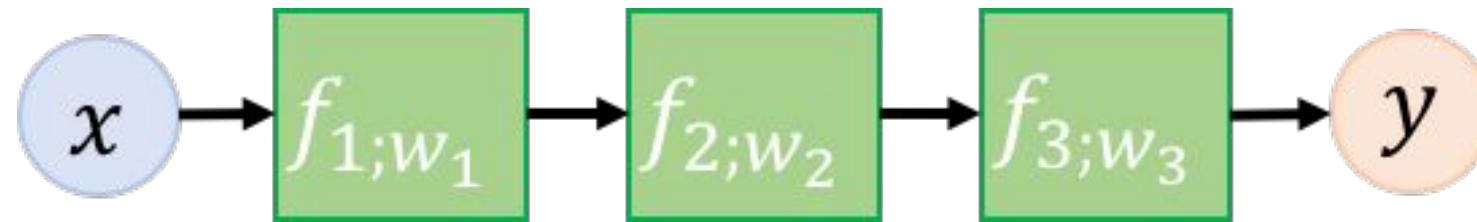
p_1, \dots, p_C — предсказания вероятностей от нейросети: $\sum_{c=1}^C p_c = 1$

- Как обеспечить условие: $\sum_{c=1}^C p_c = 1$?
- («мягкий» максимум) $p_i = \frac{e^{y_i}}{\sum_{k=1}^C e^{y_k}} \leftarrow \text{Softmax}$

Отдельный случай: бинарная классификация.

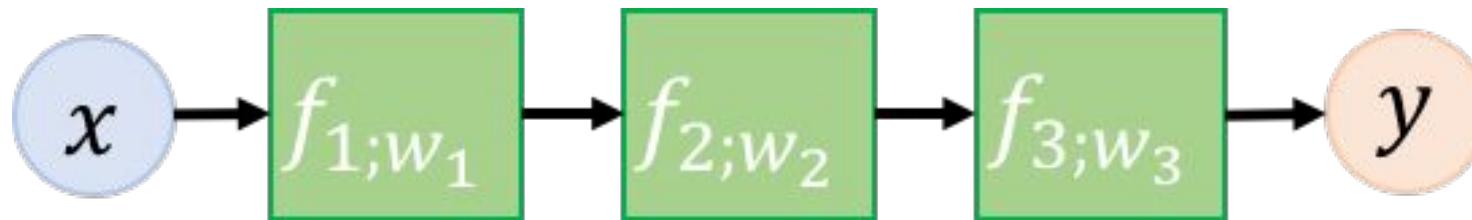
- $\mathcal{L} = -t \log(p) - (1-t) \log(1-p)$
- Достаточно одного выхода нейросети, пропущенного через σ

Обучение



$$y = f_3(f_2(f_1(x; w_1); w_2); w_3)$$

Обучение

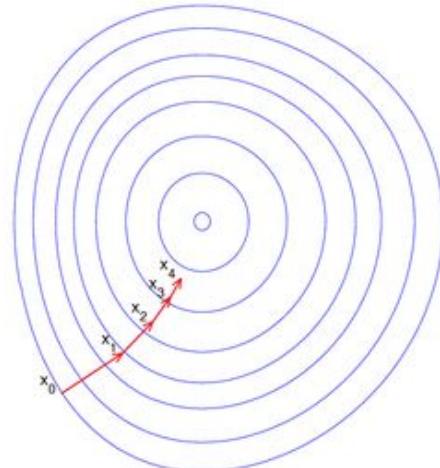
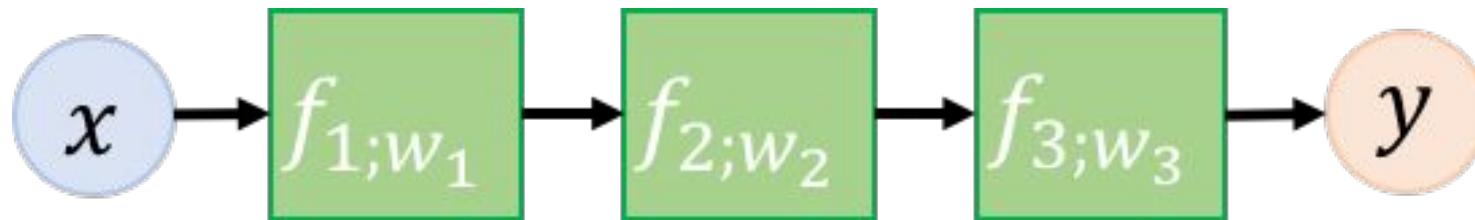


$$y = f_3(f_2(f_1(x; w_1); w_2); w_3)$$

$$y = \sigma(W_3[\sigma(W_2[\sigma(W_1x + b_1)] + b_2)] + b_3)$$

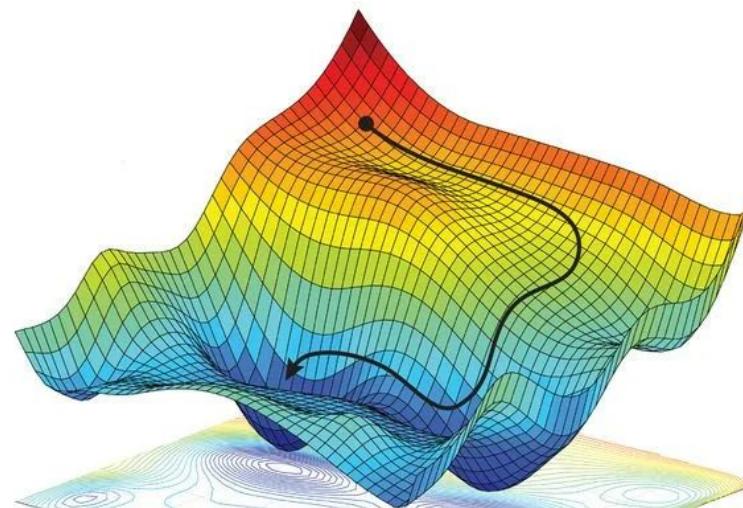
$$\mathcal{L} = \|y - t\|^2 = \min_{W_1, W_2, W_3, b_1, b_2, b_3}$$

Обучение

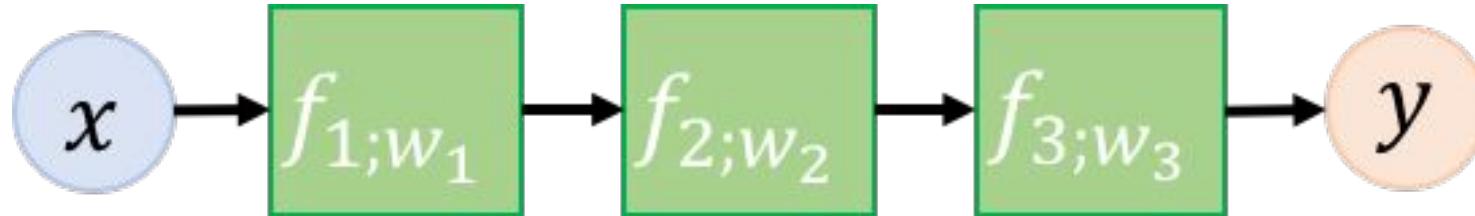


Градиентный спуск:

1. $W^0 \leftarrow$ Начальное приближение: $W_i \sim N(0, 0.1)$, $b_i = 0$
2. WHILE not converged:
3. $W^k \leftarrow W^{k-1} - \eta \nabla_W \mathcal{L}$



Обучение



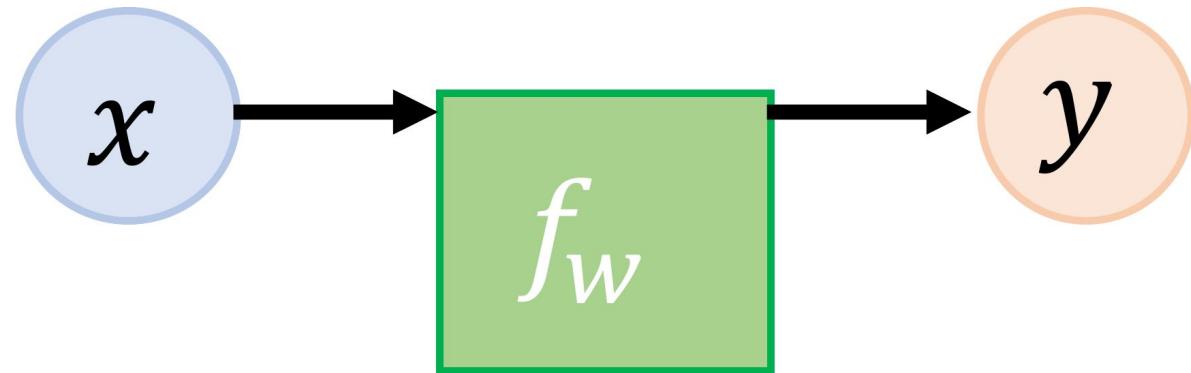
Градиентный спуск:

1. $W^0 \leftarrow$ Начальное приближение: $W_i \sim N(0, 0.1)$, $b_i = 0$
2. WHILE not converged:
3. $W^k \leftarrow W^{k-1} - \eta \nabla_W \mathcal{L}$

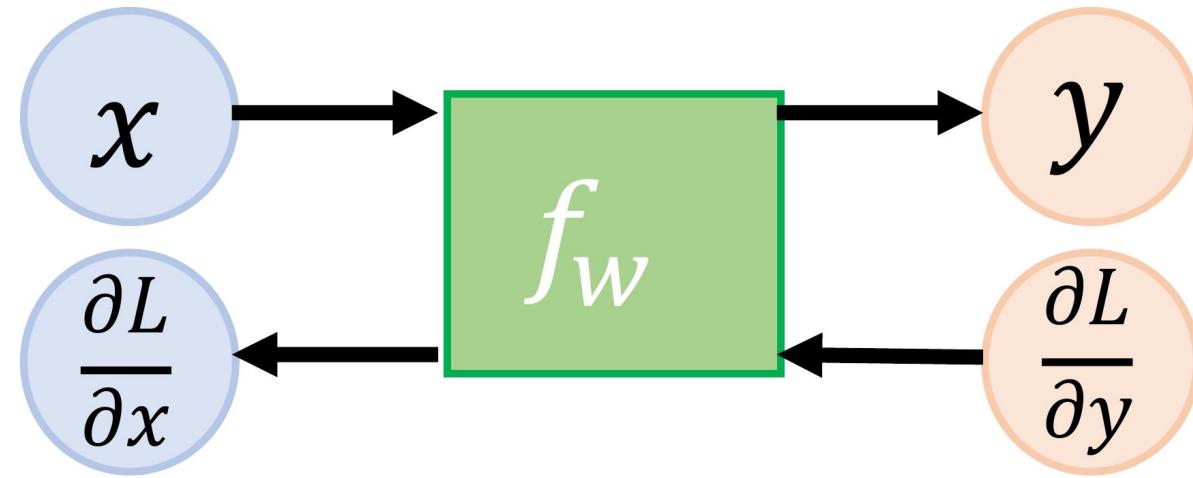
$$y = \sigma(W_3[\sigma(W_2[\sigma(W_1x + b_1)] + b_2)] + b_3)$$

Сложность вычисления градиента растет с увеличением размера сети

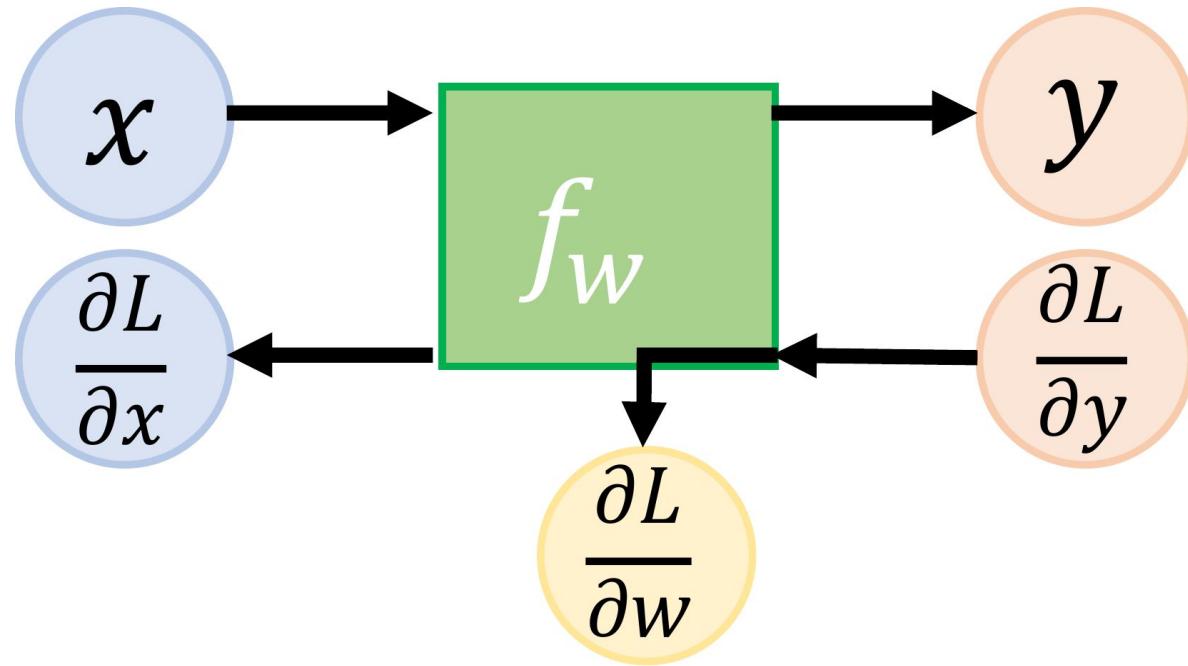
Back propagation



Back propagation



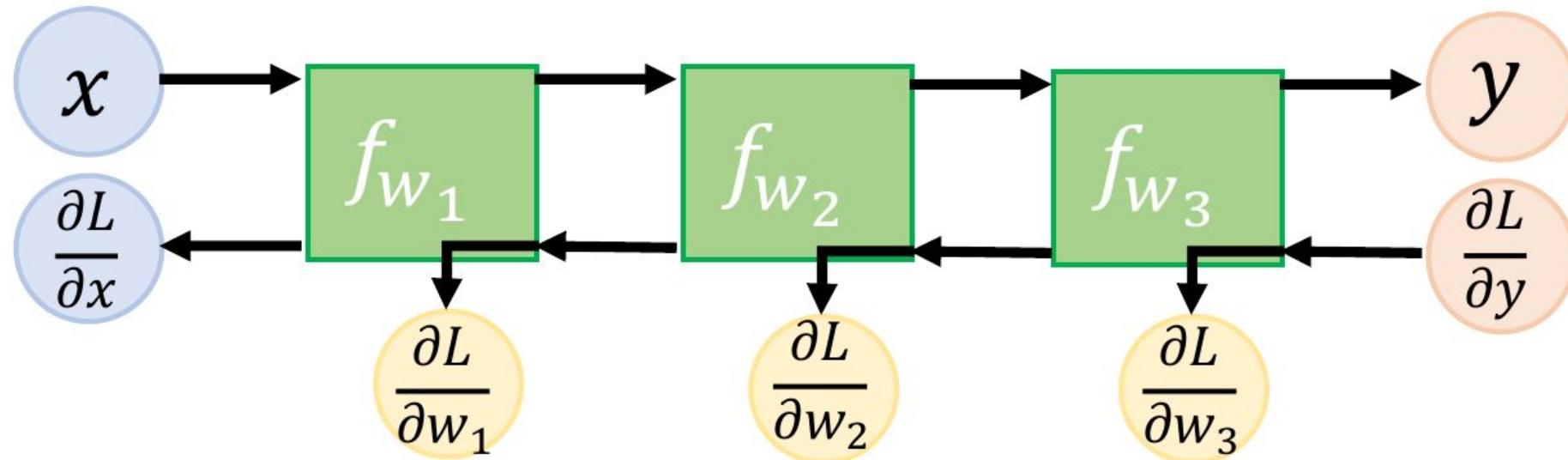
Back propagation



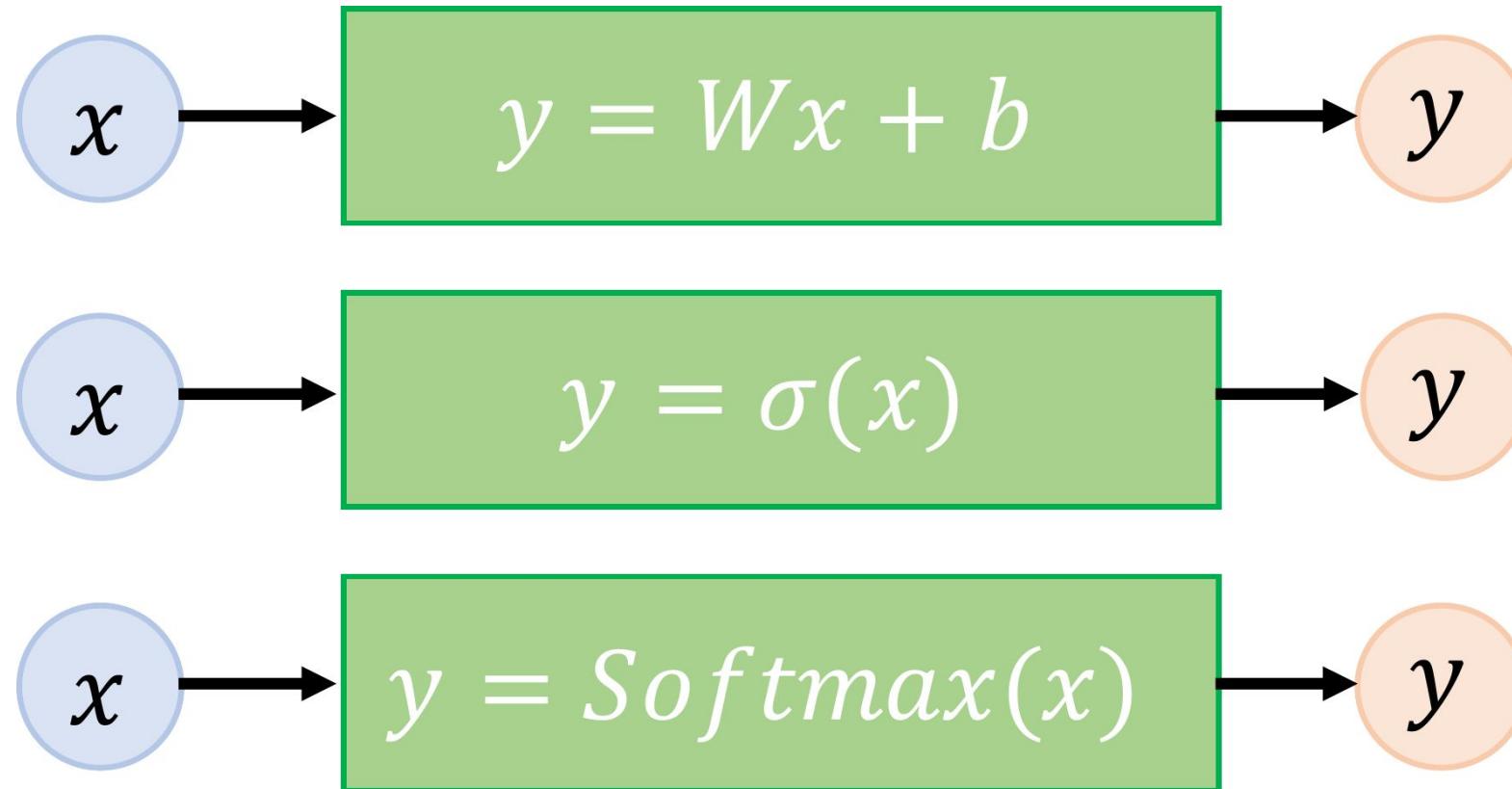
$$\frac{d\mathcal{L}}{dw} = \frac{d\mathcal{L}}{dy} \frac{dy}{dw}$$

$$\frac{d\mathcal{L}}{dx} = \frac{d\mathcal{L}}{dy} \frac{dy}{dx}$$

Back propagation



Building blocks



Gradient checking

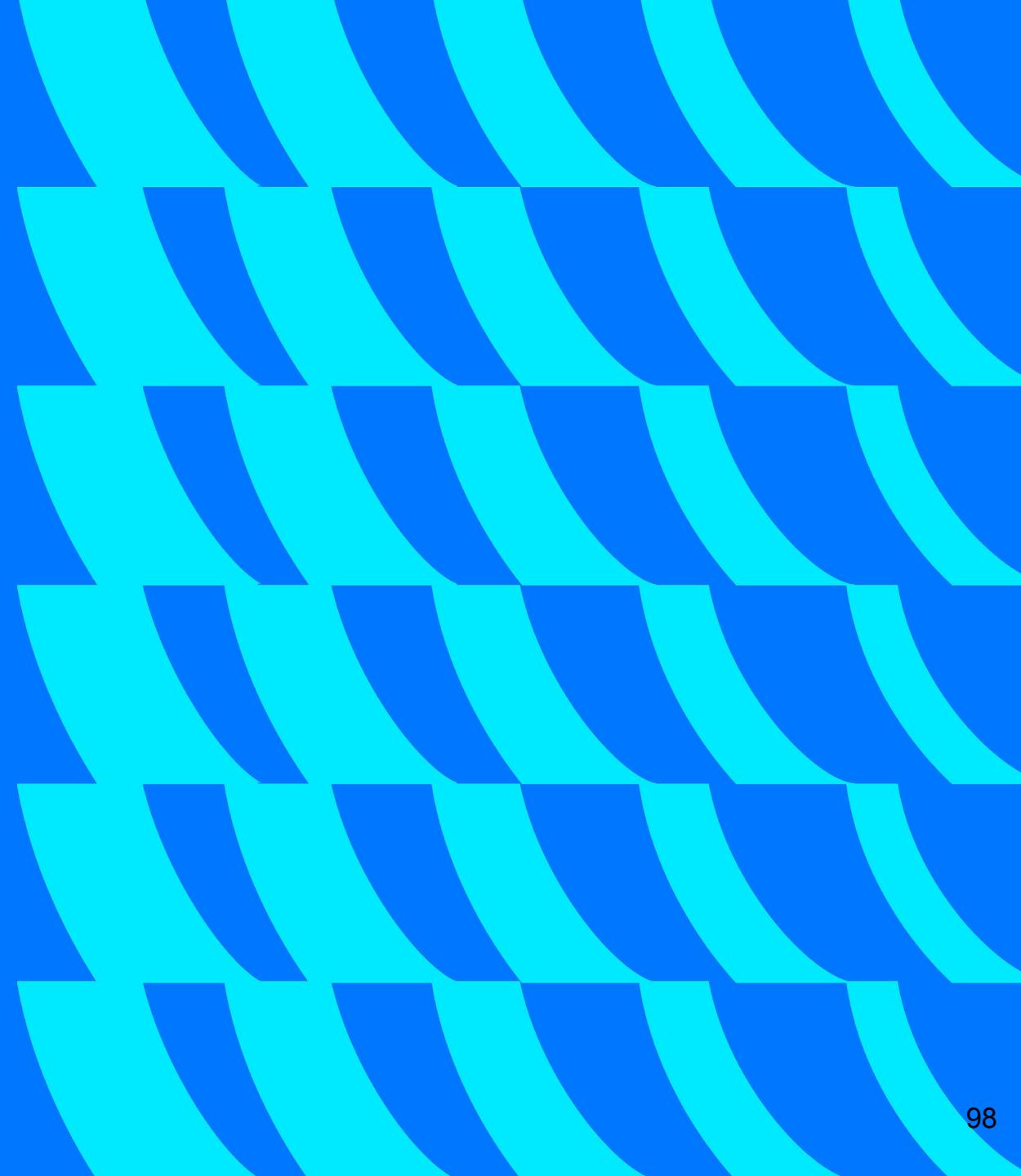
Можно проверить корректность реализации, сравнив:

1. Посчитанный градиент
2. Численный градиент:

$$\frac{d\mathcal{L}}{dw} \approx \frac{\mathcal{L}(w + \epsilon) - \mathcal{L}(w - \epsilon)}{2\epsilon}$$

Домашнее задание

• • • • •



Задание

Реализация Back propagation для MLP

```
class MLPRegressor:  
    def __init__(  
        self,  
        hidden_layer_sizes=(100,),  
        learning_rate=0.001,  
        max_iter=10,  
    ):  
        pass  
  
    def train(self, X, y):  
        pass  
  
    def predict(self, X):  
        pass
```



Спасибо
за внимание!