

Высшая Школа Системного Инжиниринга МФТИ

# Искусственный интеллект и машинное обучение

*Воронцов Константин Вячеславович*

д.ф.-м.н., профессор РАН,  
руководитель лаборатории Машинного интеллекта МФТИ

[k.v.vorontsov@phystech.edu](mailto:k.v.vorontsov@phystech.edu)

# Докладчик: *Воронцов Константин Вячеславович*

http://www.MachineLearning.ru/wiki?title=User:Vokov

Участник:Vokov

Файл Правка Вид Избранное Сервис Справка

https--arxiv.org-pdf-1405... Коллекция веб-фрагм...

Vokov моя страница обсуждения настройки список наблюдения мой вклад завершение сеанса

участник обсуждение править история удалить переименовать защитить не следить

## Участник:Vokov

**Воронцов Константин Вячеславович**  
профессор РАН, д.ф.-м.н.  
Зав. отделом «Интеллектуальные системы» Вычислительного центра ФИЦ ИУ РАН.  
Зав. лабораторией **машинного интеллекта** МФТИ.  
Проф. каф. «Интеллектуальные системы» ФУПМ МФТИ.  
Доц. каф. «Математические методы прогнозирования» ВМК МГУ.  
Преподаватель Школы анализа данных Яндекс.  
Зам. директора по науке ЗАО «Форексис», [www.forecsys.ru](http://www.forecsys.ru).



Один из идеологов и Администраторов ресурса **MachineLearning.RU**.

Прочие подробности — на подстранице [Curriculum vitae](#).

**Мне можно написать письмо.**

- Профиль ORCID = 0000-0002-4244-4270
- Профиль SCOPUS ID = 6507982932
- Профиль WoS ResearcherID = G-7857-2014
- Профиль Google Scholar
- Профиль DBLP

**Содержание** [убрать]

- Учебные материалы
  - Курсы лекций
  - Рекомендации для студентов и аспирантов
- Выступления на конференциях и семинарах
- Научные интересы
  - Анализ текстов и информационный поиск
  - Диагностика заболеваний по ЭКГ
  - Теория обобщающей способности
  - Комбинаторная (перестановочная) статистика
  - Прогнозирование объёмов продаж
  - Другие проекты и семинары
- Публикации
- Софт
- Аспиранты и студенты
  - Бакалаврские диссертации
  - Магистерские диссертации
  - Дипломные работы
  - Кандидатские диссертации
- Ссылки

# Искусственный интеллект и машинное обучение

## 1. Задачи, возможности и ограничения машинного обучения

- Бум искусственного интеллекта и нейронных сетей
- Постановки задач и терминология машинного обучения
- Примеры задач машинного обучения

## 2. Методология машинного обучения

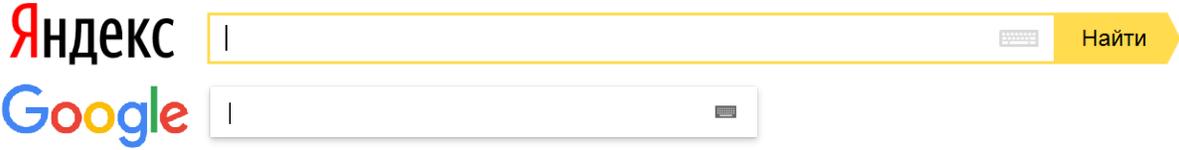
- Особенности данных и прикладных постановок задач
- Промышленное решение задач машинного обучения
- Типология задач машинного обучения
- Перспективные направления машинного обучения

«Четвёртая технологическая революция строится на вездесущем и мобильном Интернете, *искусственном интеллекте* и *машинном обучении*» (2016)

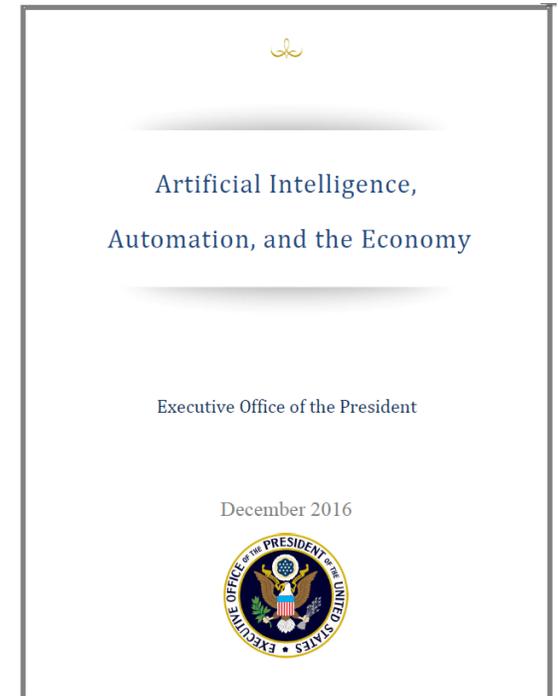
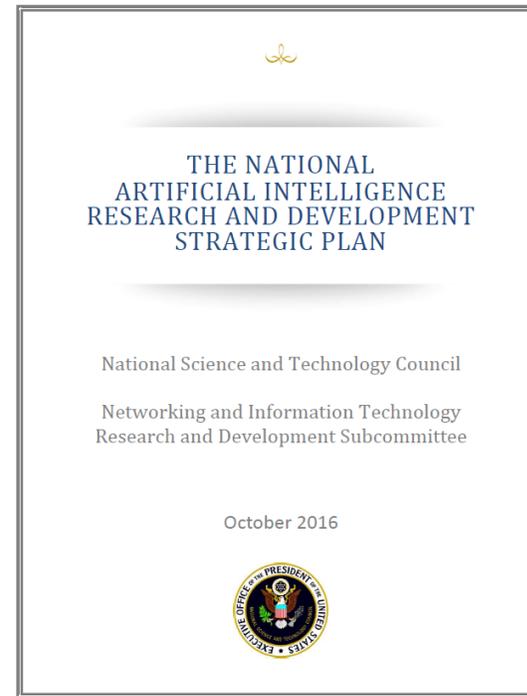
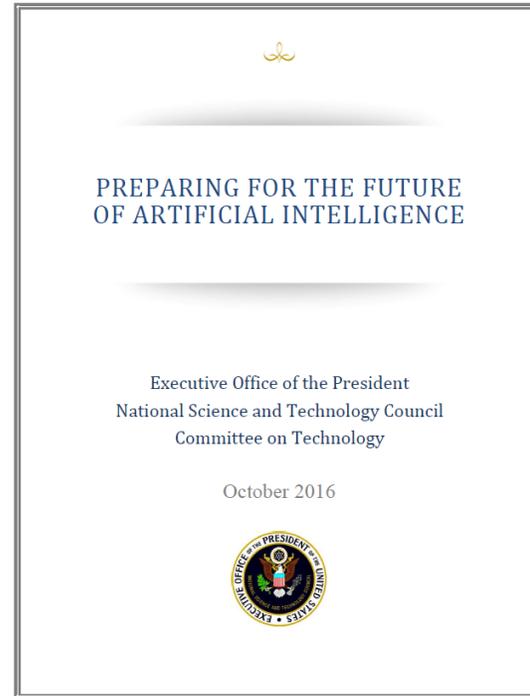
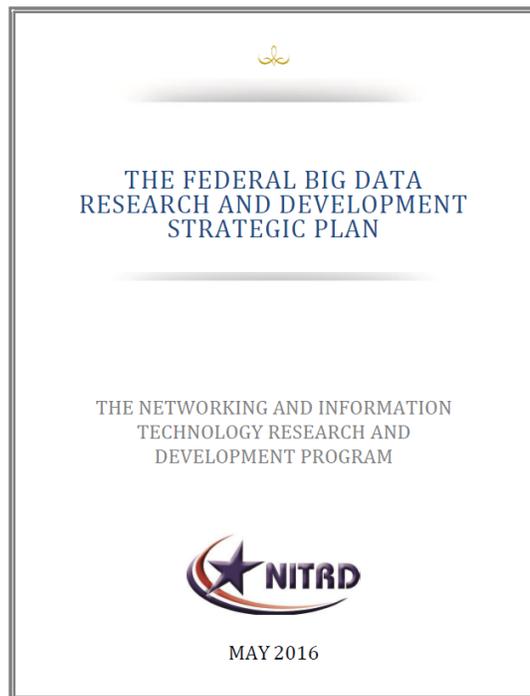
Клаус Мартин Шваб,  
президент Всемирного  
экономического форума



# Технологии ИИ, которые меняют мир



# Отчёты Белого дома США, май-октябрь 2016



«Nations with the strongest presence in AI R&D will establish leading positions in the automation of the future»

## Основные выгоды ИИ

- **Сокращение издержек и повышение производительности труда**
- Автоматизация банковских и финансовых услуг (FinTech)
- Автоматизация юридических услуг (LegalTech)
- Автоматизация посреднической деятельности, распределённая экономика
- Роботизация производств, автономный транспорт
- Оптимизация логистики и цепей поставок
- Оптимизация энергетических и транспортных сетей
- Сенсорные сети, мониторинг сельского хозяйства
- Персональная медицина, улучшение клинических практик
- Персональные образовательные траектории, социальная инженерия
- Автономные системы вооружений

## Некоторые из 23 рекомендаций

- #1. Организации должны активно развивать партнёрство с научными коллективами для эффективного использования данных.
- #2. В приоритетном порядке развивать стандарты *открытых данных* для привлечения научного сообщества к решению задач.
- #8. Инвестировать в разработку систем автоматического управления воздушным трафиком.
- #11. Вести постоянный мониторинг развития ИИ в других странах.
- #13. Приоритетно поддерживать фундаментальные и долгосрочные исследования в области искусственного интеллекта.
- #14. Развивать образовательные программы по ИИ и курсы повышения квалификации для прикладных специалистов.
- #20. Развивать международную кооперацию по ИИ.
- #22. Учитывать взаимовлияние ИИ и кибербезопасности.

# Бум искусственного интеллекта

**1997:** IBM Deep Blue обыграл чемпиона мира по шахматам

**2005:** Беспилотный автомобиль: DARPA Grand Challenge

**2006:** Google Translate – статистический машинный перевод

**2011:** 40 лет DARPA CALO привели к созданию Apple Siri

**2011:** IBM Watson победил в ТВ-игре «Jeopardy!»

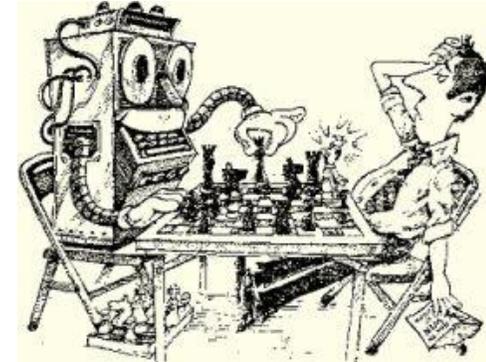
**2011–2018:** ImageNet: 25% → 2,5% ошибок против 5% у людей

**2015:** Фонд OpenAI в \$1 млрд. Илона Маска и Сэма Альтмана

**2016:** DeepMind, OpenAI: динамическое обучение играм Atari

**2016:** Google DeepMind обыграл чемпиона мира по игре го

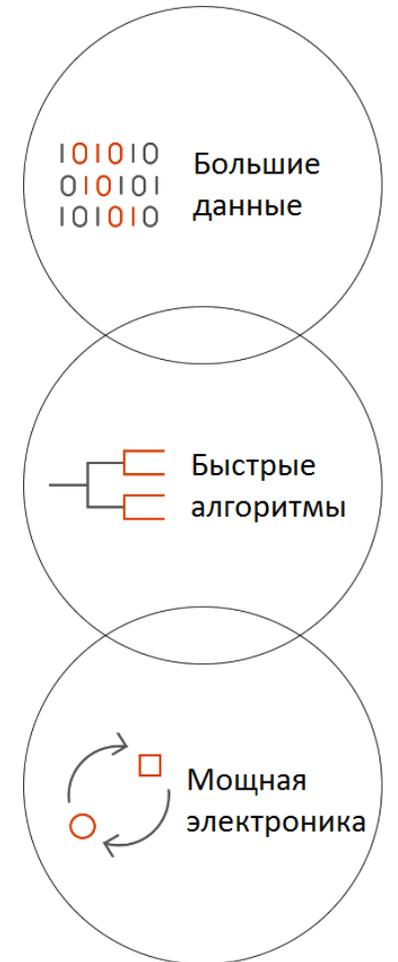
**2017:** OpenAI обыграл чемпиона мира по компьютерной игре Dota 2



# Три предпосылки этого бума

– три перехода количества в качество:

- Повсеместное применение компьютерных технологий  
→ *накопление больших выборок данных  
в частности, ImageNet*
- Развитие математических методов и алгоритмов  
→ *накопление критической массы опыта  
в частности, Deep Neural Networks*
- Достижения микроэлектроники  
→ *рост вычислительных мощностей по закону Мура  
в частности, GPU*



# Глубокие нейронные сети обеспечили прорыв в компьютерном зрении

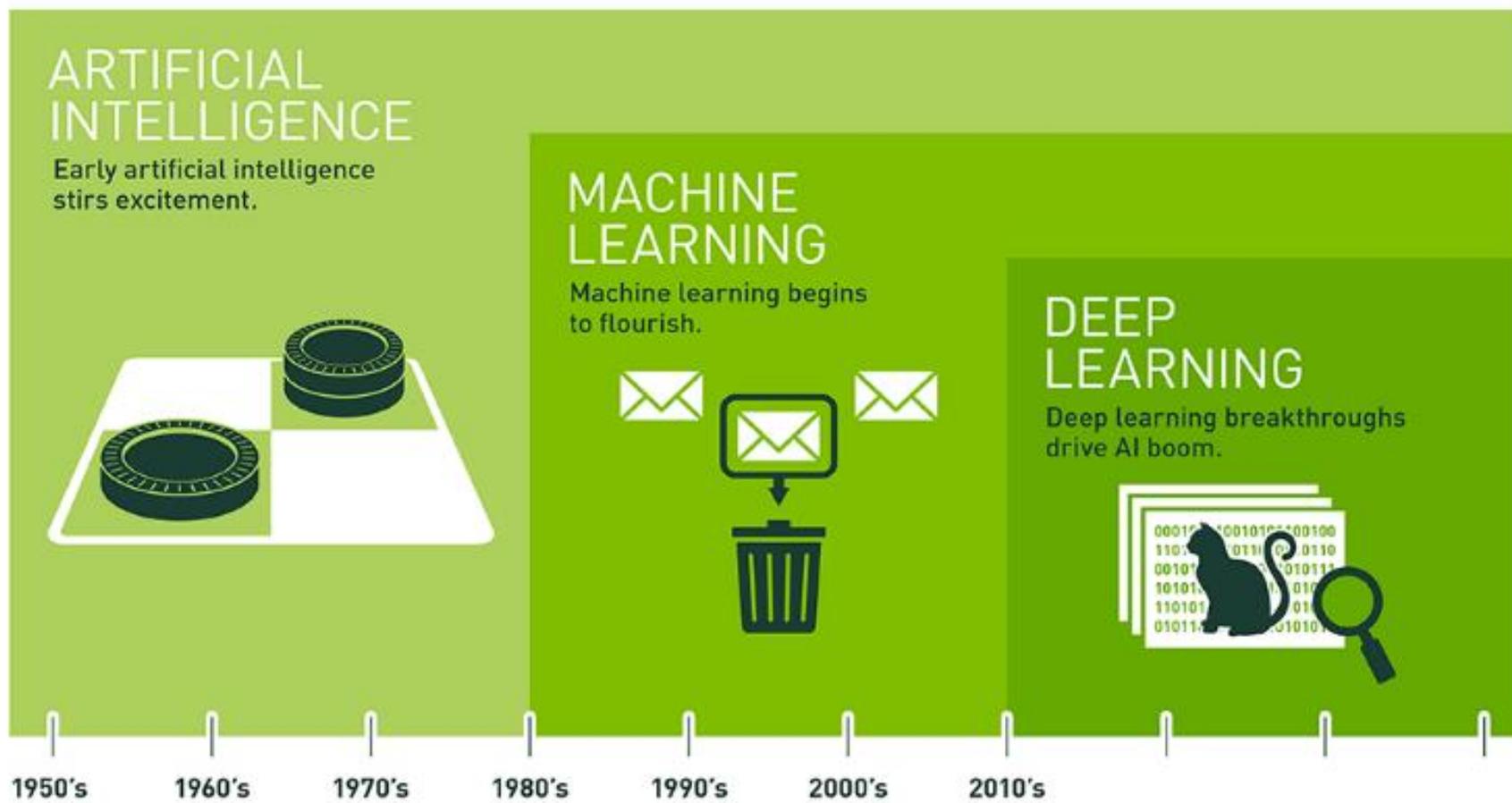
**ImageNet:** открытая выборка 15М размеченных изображений



**Google:** Распознавание кадров с котами на видео из Youtube



# Эволюция искусственного интеллекта



*Глубокое обучение  
– одна из новейших  
технологий  
машинного  
обучения*

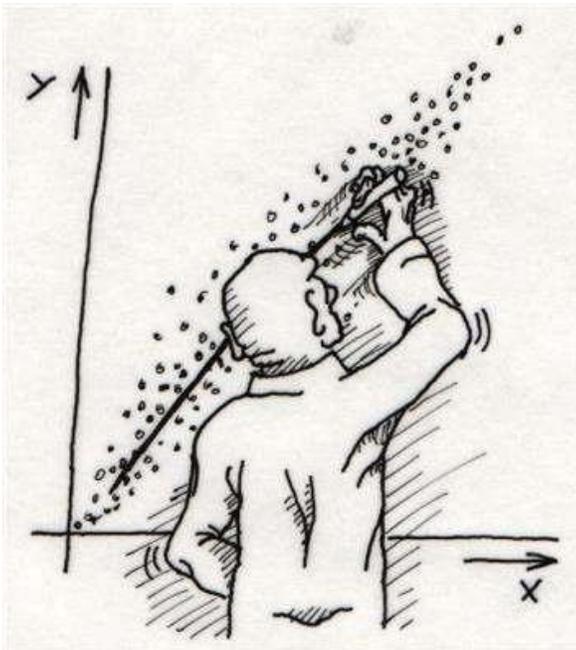
Since an early flush of optimism in the 1950s, smaller subsets of artificial intelligence – first machine learning, then deep learning, a subset of machine learning – have created ever larger disruptions.

# Машинное обучение, большие данные «и много других страшных слов»

- Статистический анализ данных (Statistical Data Analysis)
- Искусственный интеллект (Artificial Intelligence) 1955
- Распознавание образов (Pattern Recognition)
- Машинное обучение (Machine Learning) 1959
- Статистическое обучение (Statistical Learning)
- Интеллектуальный анализ данных (Data Mining) 1989
- Машинный интеллект (Machine Intelligence) 2000
- Бизнес-аналитика (Business Intelligence, Business Analytics)
- Предсказательная аналитика (Predictive Analytics) 2007
- Большие данные (Big Data) 2008
- Аналитика больших данных (Big Data Analytics)
- Наука о данных (Data Science) 2011

# Машинное обучение (Machine Learning, ML)

- одна из ключевых информационных технологий будущего
- наиболее успешное направление *искусственного интеллекта*, вытеснившее экспертные системы и инженерию знаний
- проведение функции через заданные точки в сложно устроенных пространствах
- математическое моделирование в условиях, когда знаний мало, данных много
- тысячи различных методов и алгоритмов
- около 100 000 научных публикаций в год



# Задача машинного обучения с учителем

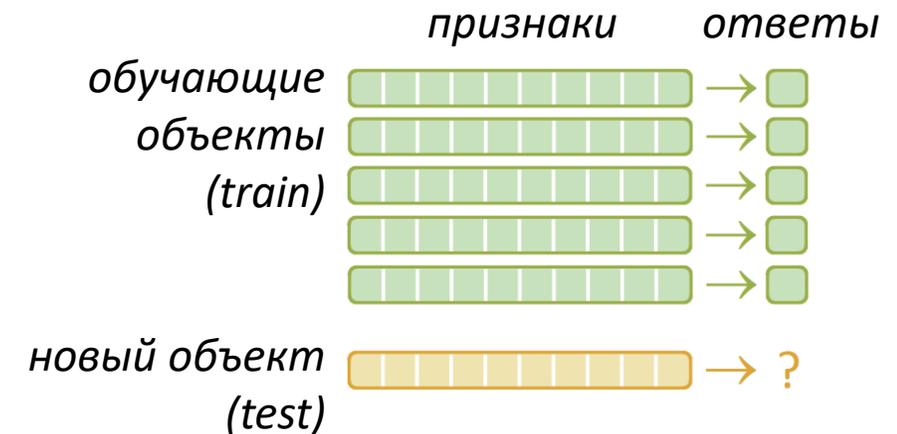
## Этап №1 – обучение с учителем

- **На входе:**  
*данные* – выборка прецедентов «*объект* → *ответ*»,  
каждый объект описывается набором *признаков*
- **На выходе:**  
модель, предсказывающая ответ по объекту

Если нет данных,  
то нет  
и машинного  
обучения

## Этап №2 – применение

- **На входе:**  
*данные* – новый объект
- **На выходе:**  
предсказание ответа на новом объекте



# Примеры задач машинного обучения

- **Медицинская диагностика:**

**объект** – данные о пациенте на текущий момент

**ответ** – диагноз / лечение / риск исхода



- **Поиск месторождений полезных ископаемых:**

**объект** – данные о геологии района

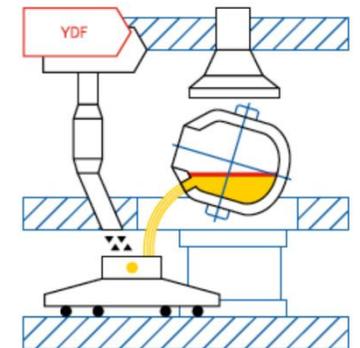
**ответ** – есть/нет месторождение



- **Управление технологическими процессами:**

**объект** – данные о сырье и управляющих параметрах

**ответ** – количество/качество полезного продукта



# Примеры задач машинного обучения

- **Кредитный скоринг:**

**объект** – данные о заёмщике

**ответ** – решение по кредиту & вероятность дефолта



- **Предсказание оттока клиентов:**

**объект** – данные о клиенте на момент времени  $t$

**ответ** – уйдёт ли клиент к моменту времени  $t + \Delta$



- **Прогнозирование объёмов продаж:**

**объект** – данные о продажах на момент времени  $t$

**ответ** – объём спроса в интервале от  $t$  до  $t + \Delta$



# Примеры задач машинного обучения

- **Информационный поиск в Интернете:**

**объект** – данные о паре «запрос и документ»

**ответ** – оценка релевантности документа запросу



- **Продажа рекламы в Интернете:**

**объект** – данные о тройке «пользователь, страница, баннер»

**ответ** – оценка вероятности клика

- **Рекомендательные системы в Интернете / TV:**

**объект** – данные о паре «пользователь, товар / фильм»

**ответ** – оценка вероятности покупки / просмотра



# Примеры задач ML в LegalTech

- **Информационный поиск:**  
**объект** – текст иска, акта или вопрос на естественном языке  
**ответ** – ранжированный список релевантных НПА и/или схожих дел
- **Предсказание результатов судебных процессов:**  
**объект** – описание дела по существу, документы, хронология событий  
**ответ** – вероятность выиграть дело
- **Рекомендательный сервис:**  
**объект** – пара «описание дела, профиль юриста / юр.фирмы»  
**ответ** – список консультантов, ранжированный по релевантности
- **Автоматическая генерация ответов на вопросы:**  
**объект** – текст вопроса на естественном языке  
**ответ** – текст ответа, включая ссылки или цитаты НПА

# Примеры задач с не векторными данными

- **Статистический машинный перевод:**

**объект** – предложение на естественном языке

**ответ** – его перевод на другой язык

- **Перевод речи в текст:**

**объект** – аудиозапись речи человека

**ответ** – текстовая запись речи

- **Компьютерное зрение:**

**объект** – динамика сцены в видеопоследовательности

**ответ** – решение (объехать, остановиться, игнорировать)

*Прогресс в этих  
областях связан с  
«большими данными»  
(англ. «Big Data»)*

*...очень важное уточнение:*

***с аккуратными  
большими данными***

# Схема решения задач обучения с учителем

$X: (x_i, y_i), i = 1..m$  — обучающая выборка пар объект–ответ

$x_i = (x_{i1}, \dots, x_{in})$  — вектор признаков объекта  $x_i$

$\mathcal{L}(a(x_i), y_i)$  — функция потерь алгоритма  $a$  на объекте  $x_i$

$Q(a, X) = \sum_{i=1}^m \mathcal{L}(a(x_i), y_i)$  — функционал эмпирического риска

$Q(a, X) \rightarrow \min_a$  — метод минимизации эмпирического риска

$X': (x'_i, y'_i), i = 1..k$  — тестовая выборка пар объект–ответ

$Q(a(X), X')$  — hold-out, измерение качества предсказаний

# Искусственный интеллект и машинное обучение

## 1. Задачи, возможности и ограничения машинного интеллекта

- Бум искусственного интеллекта и нейронных сетей
- Постановки задач и терминология машинного обучения
- Примеры задач машинного обучения

## 2. Методология машинного обучения

- Особенности данных и прикладных постановок задач
- Промышленное решение задач машинного обучения
- Типология задач машинного обучения
- Перспективные направления машинного обучения

# Особенности реальных данных

## В реальных приложениях данные бывают ...

- разнородные (признаки измерены в разных шкалах)
- неполные (признаки измерены не все, имеются пропуски)
- неточные (признаки измерены с погрешностями)
- противоречивые (объекты одинаковые, ответы разные)
- избыточные (сверхбольшие, не помещаются в память)
- недостаточные (объектов меньше, чем признаков)
- неструктурированные (нет признаков описаний)
- «грязные» (ошибочные, грубо не соответствующие истине)

*со всем этим  
можно  
работать*



*но только не  
с грязными  
данными!*



# Риски реальных проектов

## **Проблема №1: некомпетентный исполнитель**

- не готов погружаться в предметную область
- не готов аргументировать необходимость изменения постановки задачи
- не способен построить адекватную модель за отведённое время

## **Проблема №2: некомпетентный заказчик**

- ждёт чуда от искусственного интеллекта и больших данных
- не в состоянии оценить реальную сложность задачи
- не имеет численных критериев качества (KPI) для оптимизации
- не заботится о чистоте данных
- не готов пилотировать новые технологии

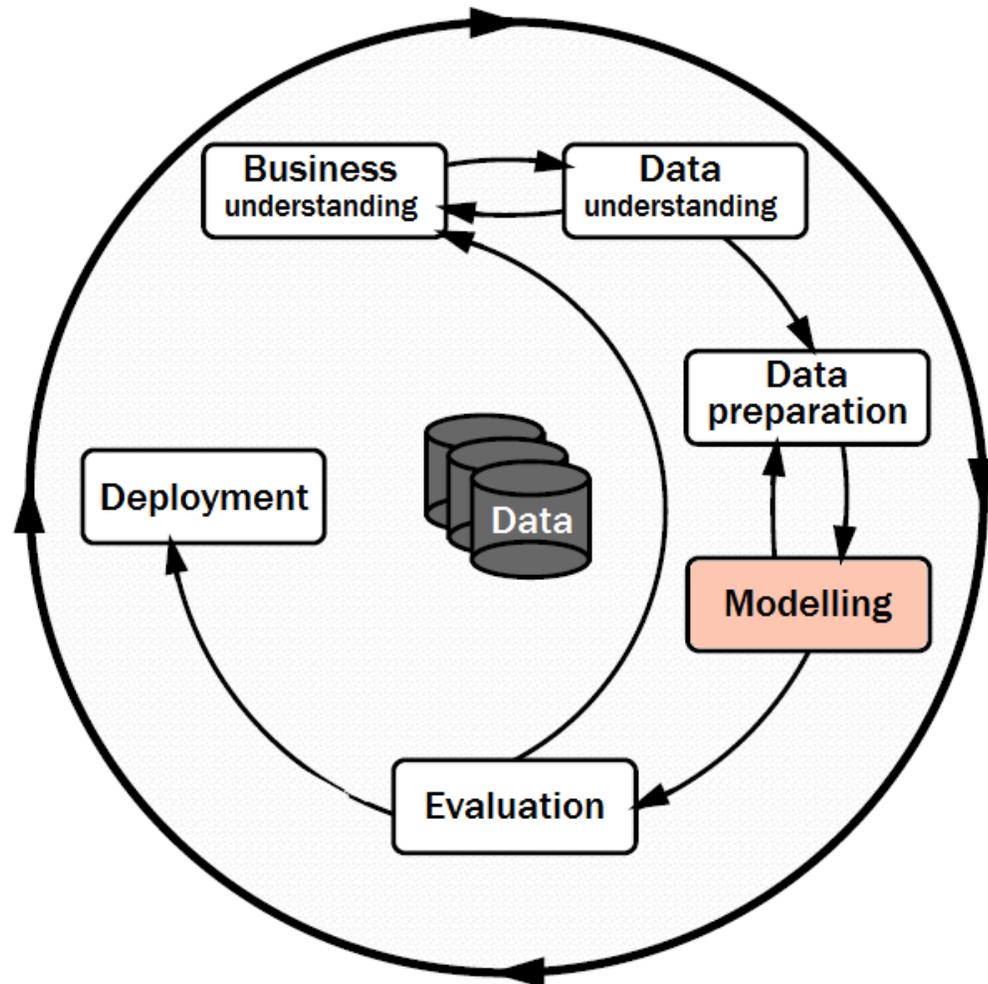
## **Выходы:**

- цифровая трансформация бизнес-процессов
- введение контроля качества данных
- налаживание коммуникации, командная работа исполнителя и заказчика
- конкурсы на открытых данных

*Для внедрения  
искусственного  
интеллекта  
приходится  
напрягать  
естественный*

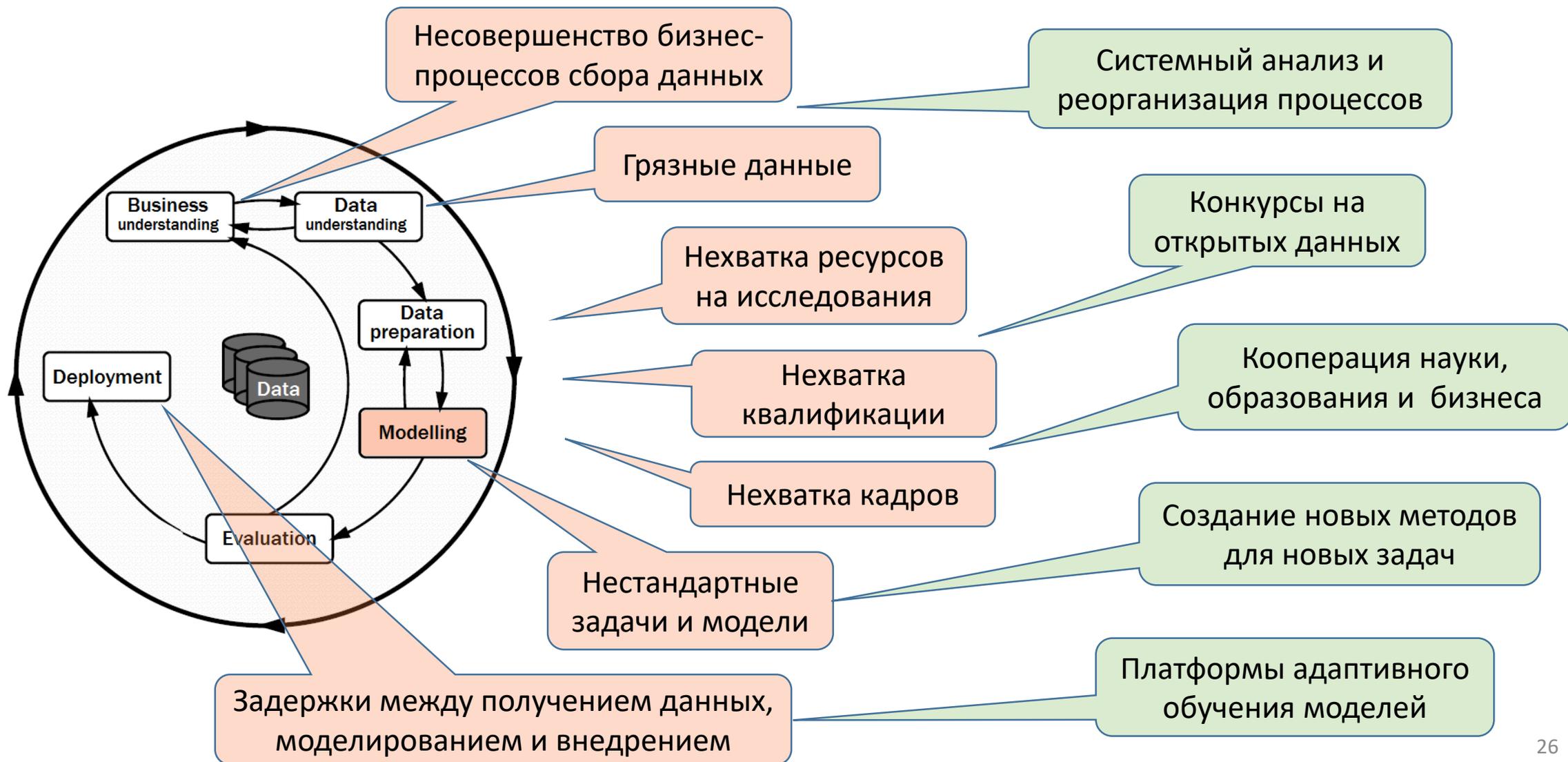
# Этапы решения задач ML/DS/AI

CRISP-DM: Cross Industry Standard Process for Data Mining (1999)



- понимание бизнес-задач
- понимание данных
- предобработка данных
- инженерия признаков
- построение моделей
- оптимизация параметров
- контроль переобучения
- (кросс-)валидация решения
- внедрение и эксплуатация

# Факторы риска и точки приложения силы



# Кооперация бизнеса, науки и образования

**Проблемы:** • различия в целях • «некомпетентность» • дефицит доверия

## **Опыт кафедры «Интеллектуальные системы» МФТИ**

- Практикум В.В.Стрижова (страница на [www.MachineLearning.ru](http://www.MachineLearning.ru)) более 700 индивидуальных студенческих проектов за 12 лет
- Начало сотрудничества – пилотный проект в рамках практикума (ограничение: старт пилота два раза в год, февраль и сентябрь)

## **Шаги долгосрочного сотрудничества**

- НИР/ОКР для университетской лаборатории
- формирование постоянной проектной группы, стажерская программа
- формирование образовательных курсов/модулей по решенным задачам
- открытие собственной лаборатории или кафедры
- тесная кооперация с собственным исследовательским отделом

# Открытые данные

## Выгоды открытых данных

- *для государства:* новые сервисы, кооперация бизнеса и науки
- *для индустрии:* бенчмаркинг, стандартизация, популяризация
- *для компаний:* подбор исполнителей, сокращение издержек и рисков
- *для университетов:* интеграция практических задач в учебный процесс
- *для исследователей:* проверка новых теорий и технологий в деле
- *для студентов:* получение опыта, наработка портфолио

## Конкурсы анализа данных

- [www.NetflixPrize.com](http://www.NetflixPrize.com) (2006-2009) – первый крупный конкурс, \$1 млн.
- [www.kaggle.com](http://www.kaggle.com) – наиболее известная в мире платформа
- [DataRing.ru](http://DataRing.ru) – отечественная конкурсная платформа

# Рынок труда в области анализа данных

## ***Инженер по данным (Data Engineer)***

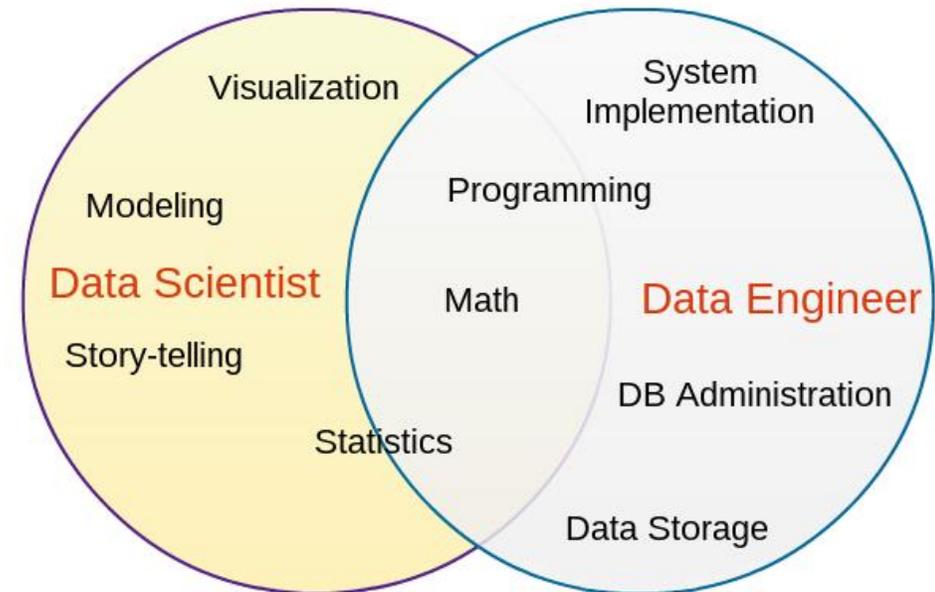
- Понимает бизнес-процессы, порождающие данные
- Работает с данными в различных форматах
- Визуализирует, понимает, очищает, готовит данные

## ***Исследователь данных (Data Scientist)***

- Моделирует, строит признаки (feature engineering)
- Выбирает модели и методы, оценивает решения
- Ходит по кругу CRISP-DM

## ***Менеджер проектов по анализу данных***

- Организует бизнес-процессы сбора и очистки данных
- Видит бизнес задачи и формализует их в терминах «Дано-Найти-Критерий»
- Организует открытые конкурсы и пилотные проекты
- Адекватно оценивает сложность задач и трудозатраты



# Домашнее задание

- Какую задачу Вы бы хотели решить с помощью ML|AI?
- Сформулируйте задачу в виде «дано, найти, критерий»
- Хватает ли данных? Как обеспечить качество данных?
- Есть ли готовые решения (платформы, инструменты)?
- Возможно ли сделать конкурс на открытых данных?
- Возможно ли вычистить конфиденциальные данные?
- Возможно ли встроить активное обучение в бизнес-процесс?

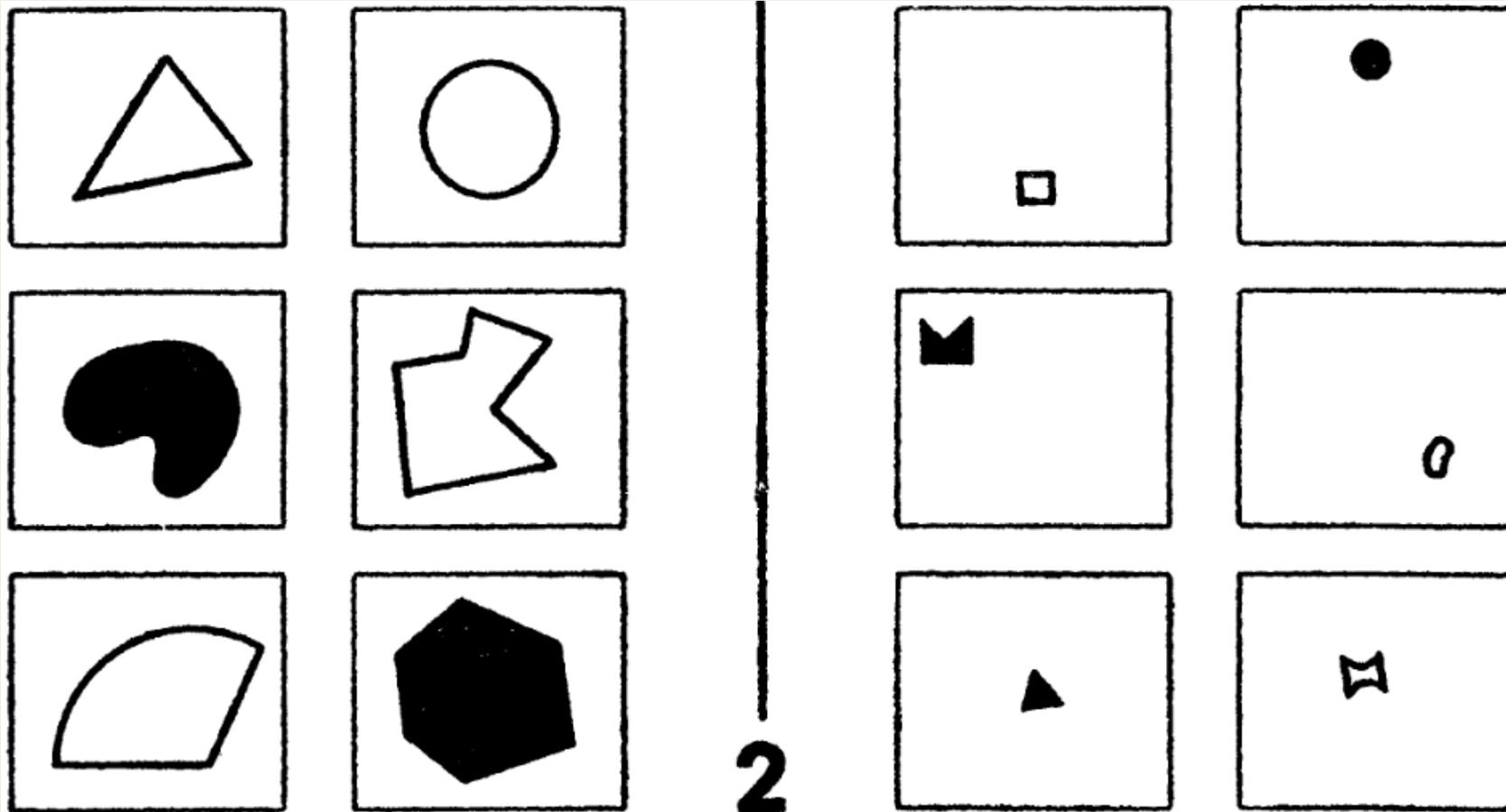
Поиграем в обучение по прецедентам

Представим себя на месте  
искусственного интеллекта...

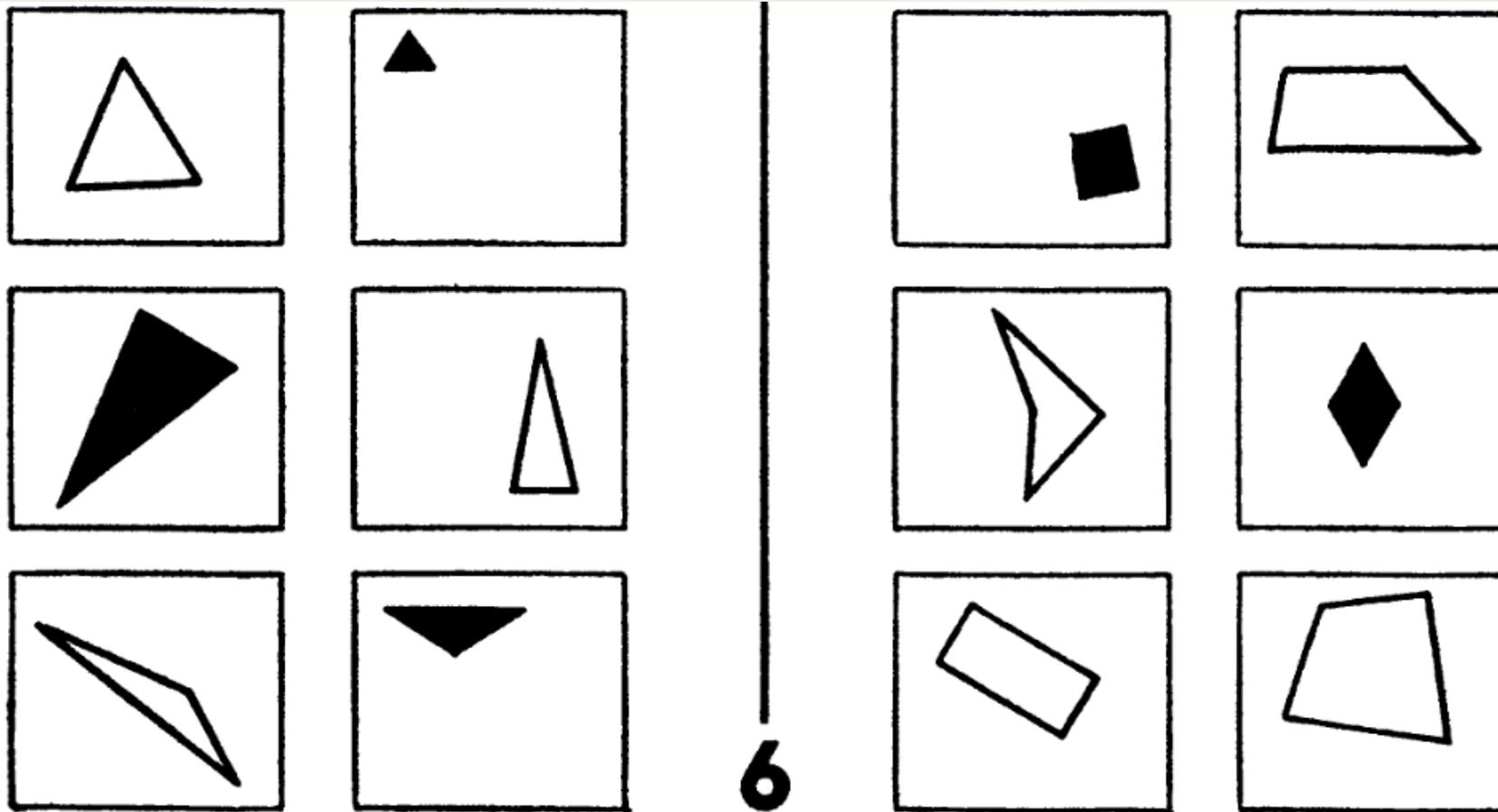
---

*М.М.Бонгард. Проблема узнавания. М.: Наука, 1967.*

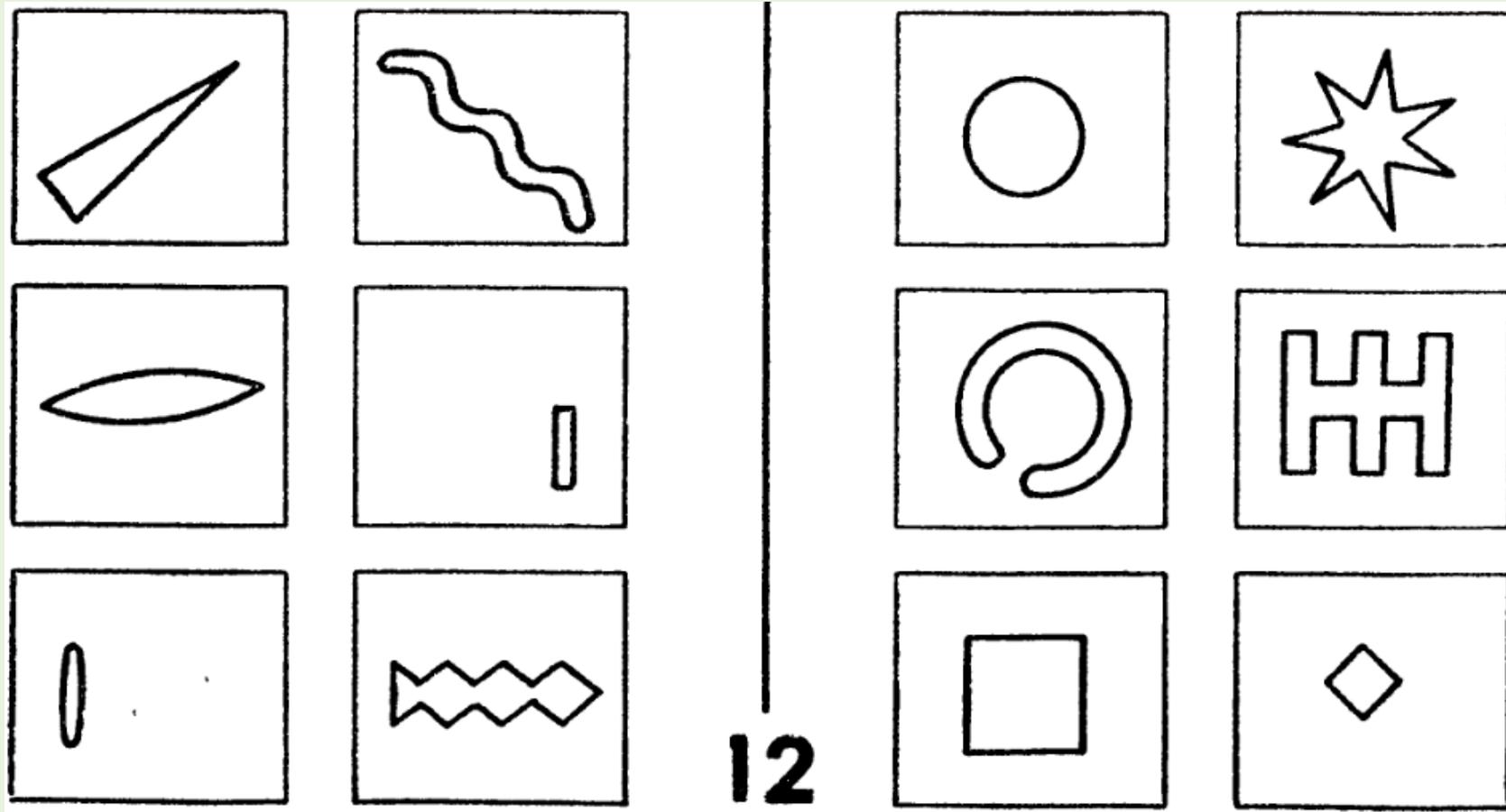
Тесты Бонгарда (1967). Требуется найти правило классификации.  
Обучающая выборка: по 6 объектов каждого из двух классов.



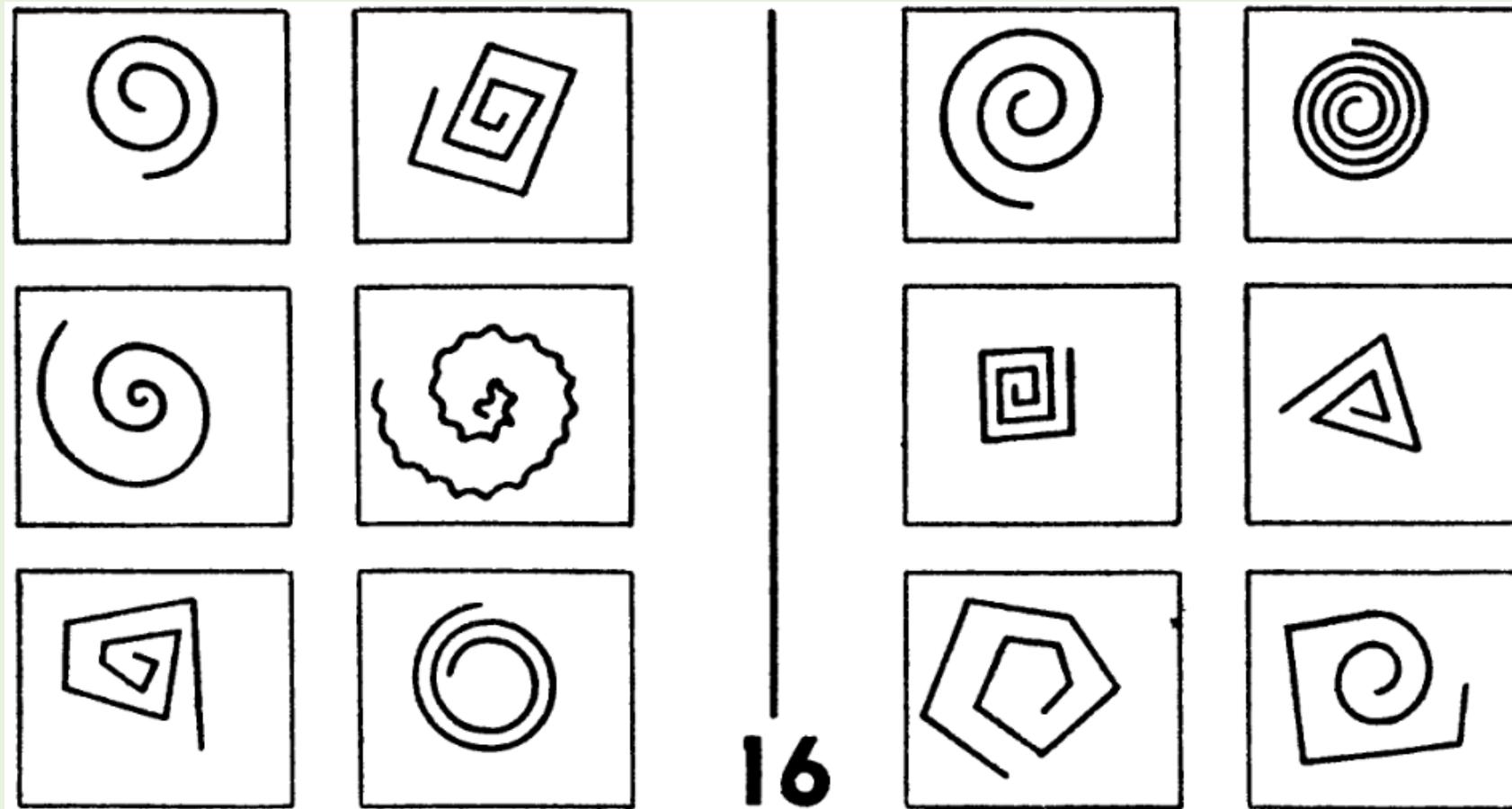
Что даёт нам уверенность, что мы нашли верное правило?  
1. Точность классификации известных примеров



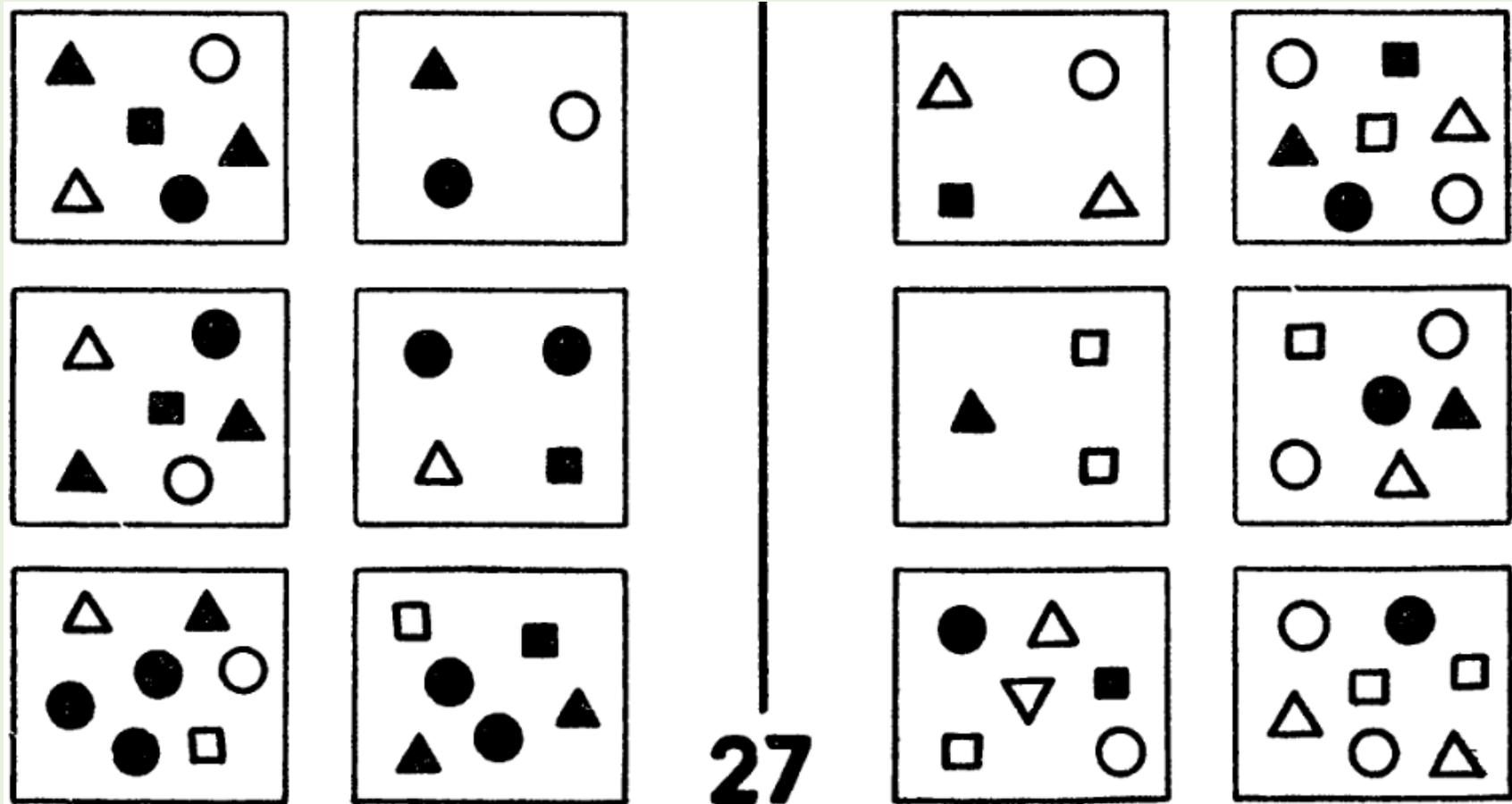
Что ещё даёт нам уверенность, что мы нашли верное правило?  
2. Простота и общность правила (модели).



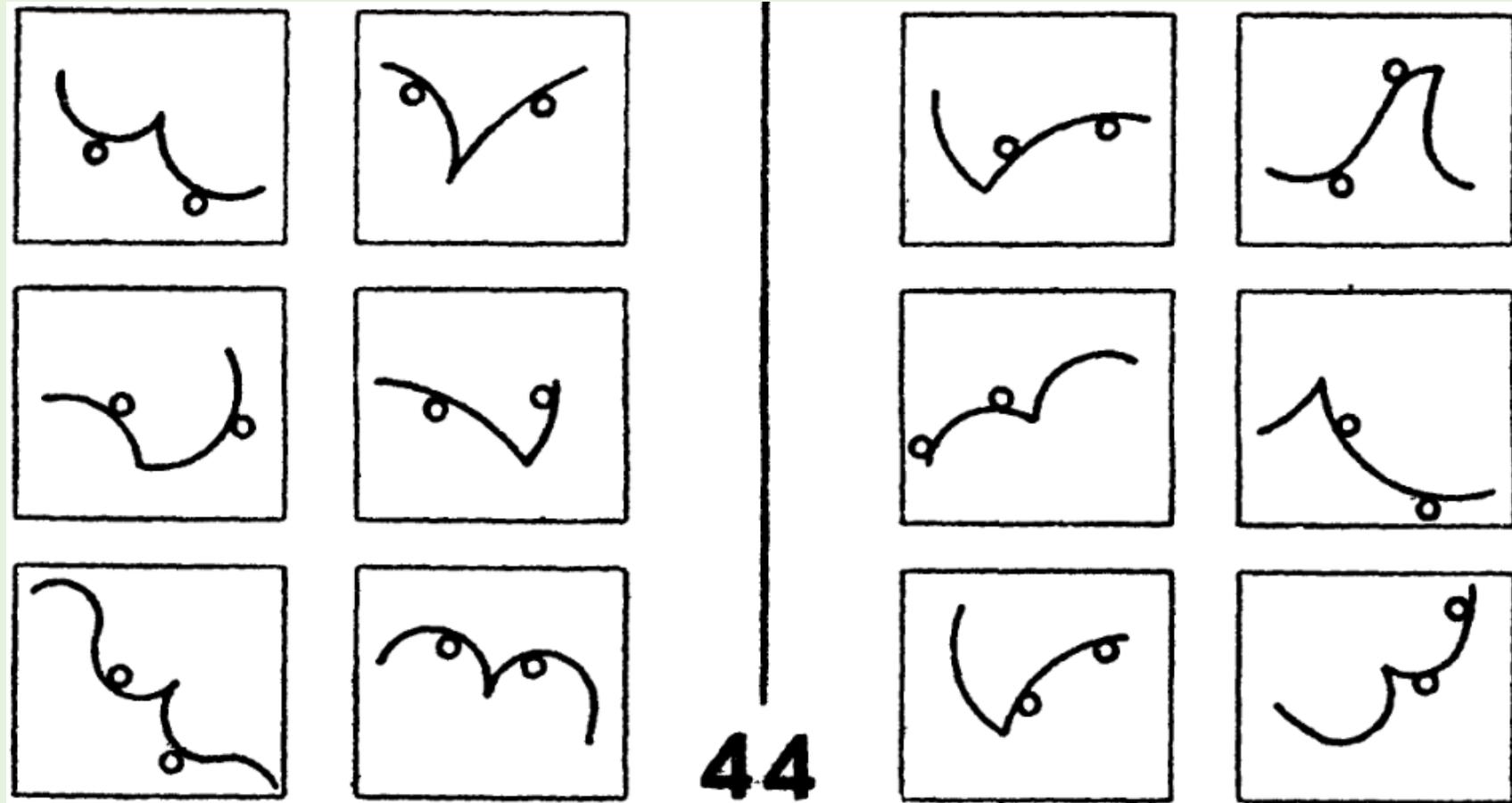
Мы решаем эти задачи почти мгновенно.  
Чем мы пользуемся? Почему они сложны для компьютера?



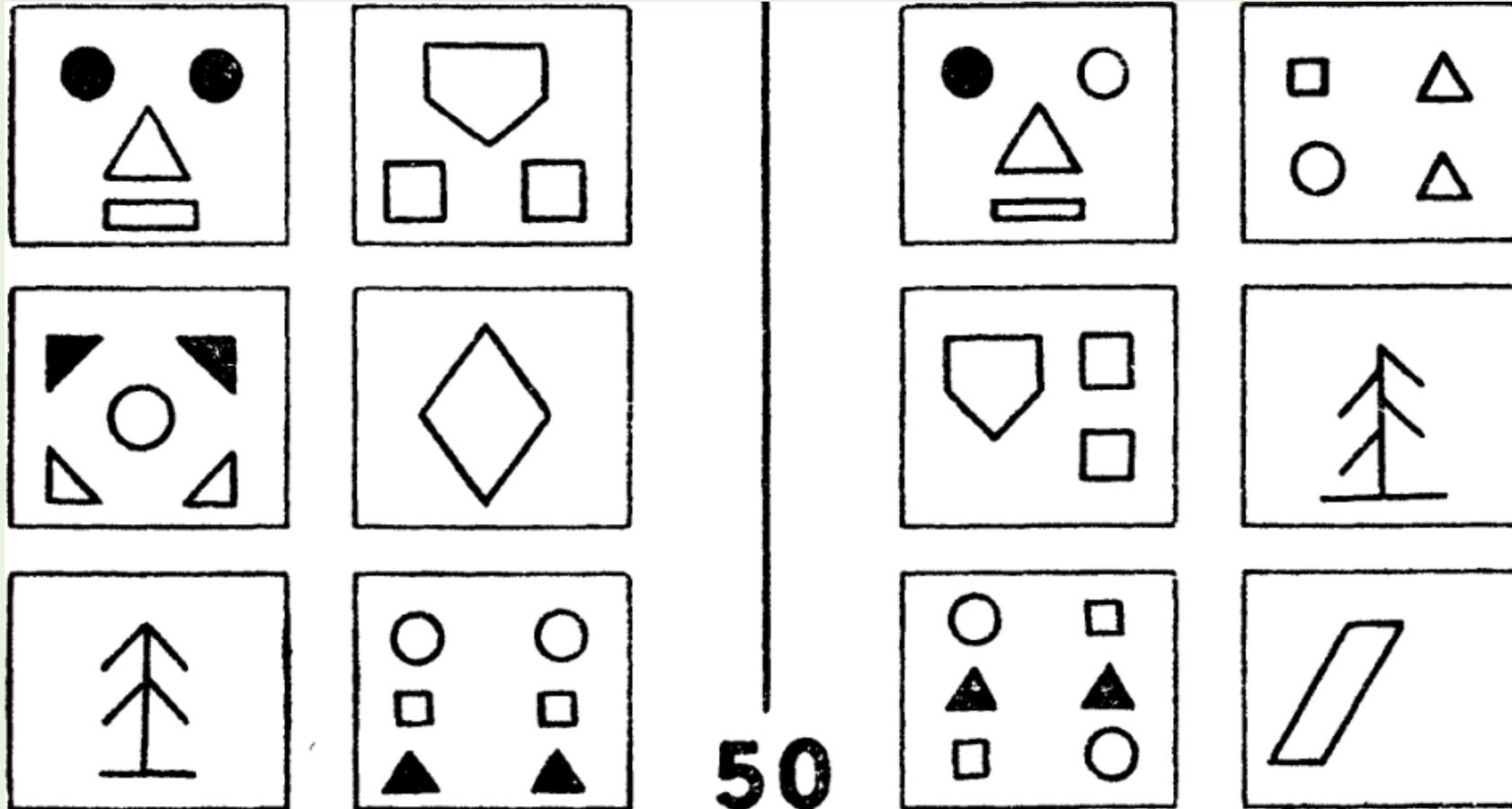
Нужно ли закладывать знания предметной области в явном виде?  
Или возможно выработать все нужные понятия на примерах?



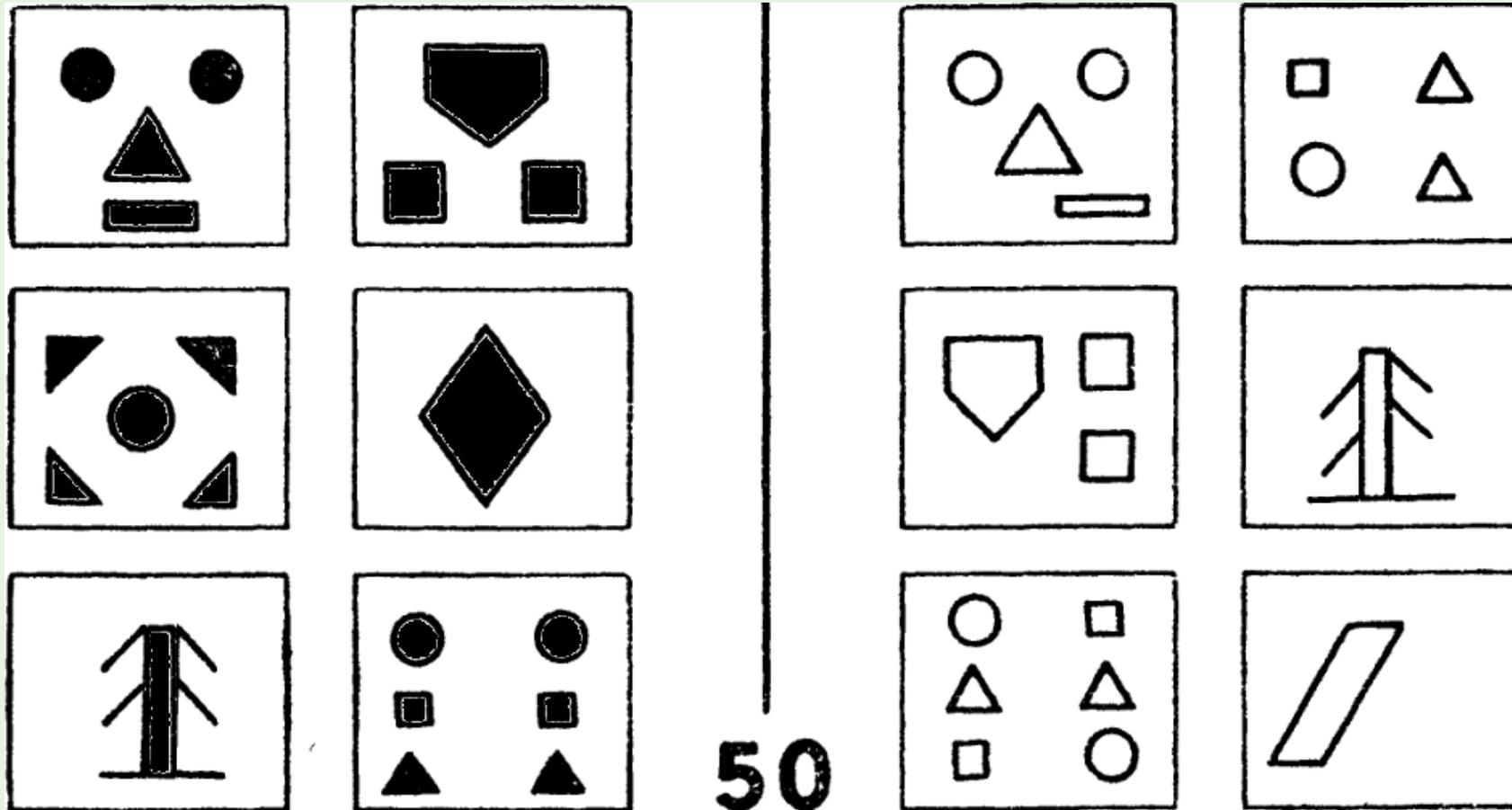
Как вычислять полезные признаки по сложным сырым данным?  
Возможно ли поручить перебор признаков и моделей машине?



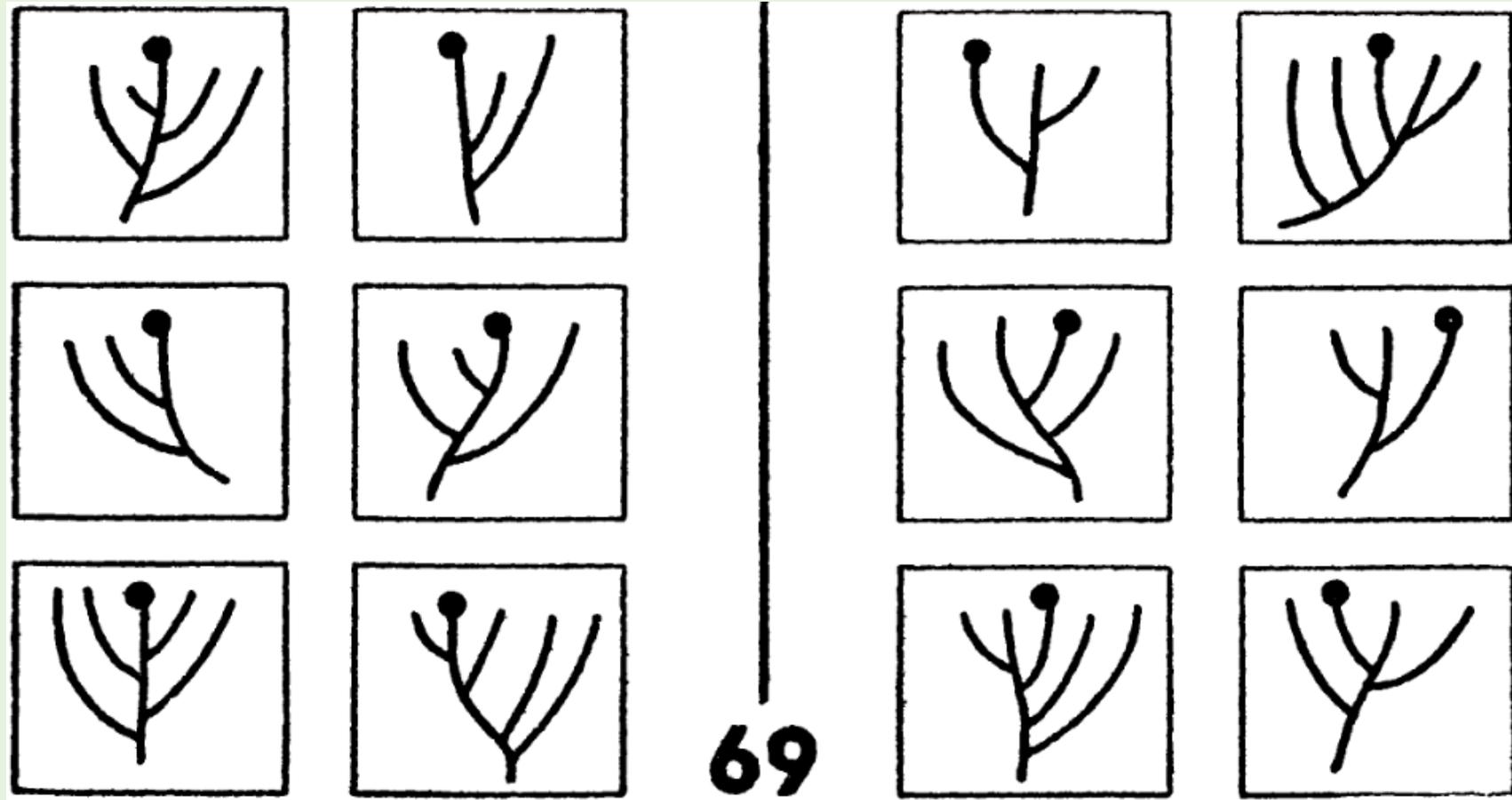
Каков риск выбрать по данным неверное правило, *предвзвездок*?  
Как этот риск зависит от числа примеров и сложности правил?



Что делать, если к выборке подходят сразу несколько правил?  
А что если подходящих правил (моделей) бесконечно много?



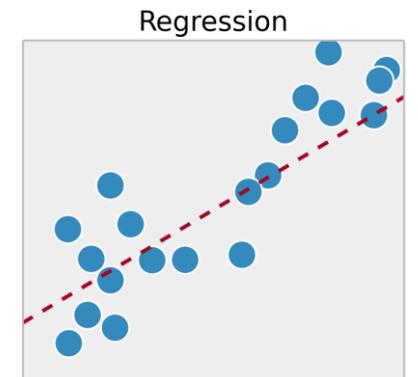
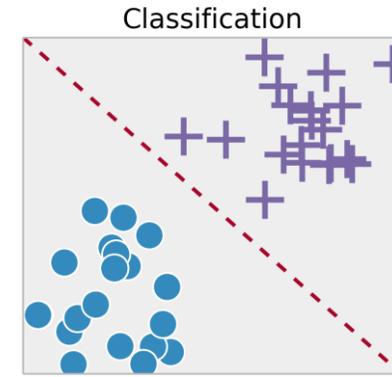
Эти вопросы составляют основу машинного обучения сегодня.  
М.М.Бонгард поставил все эти проблемы в середине 60-х!



# Типология задач машинного обучения

## Обучение с учителем (supervised learning)

- классификация (classification)
- регрессия (regression)
- ранжирование (learning to rank)
- прогнозирование (forecasting)

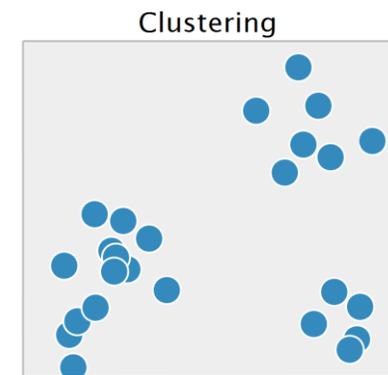


## Обучение без учителя (unsupervised learning)

- кластеризация (clustering)
- поиск ассоциативных правил (association rule learning)
- восстановление плотности (density estimation)
- одноклассовая классификация (anomaly detection)

## Частичное обучение (semi-supervised learning)

- обучение с положительными примерами (PU-learning)



# Типология задач машинного обучения

## **Предварительная обработка (data preparation)**

- извлечение признаков (feature extraction)
- отбор признаков (feature selection)
- восстановление пропусков (missing values)
- обнаружение выбросов (outlier detection)
- уменьшение шума (noise reduction)

## **Обучение представлений (representation learning)**

- обучение признаков (feature learning)
- обучение многообразий (manifold learning)
- анализ главных компонент (principal component analysis)
- матричные и тензорные разложения (matrix and tensor factorization)

# Типология задач машинного обучения

## **Динамическое обучение (online/incremental learning)**

- Обучение с подкреплением (reinforcement learning)
- Активное обучение (active learning)

## **Новые и активно развивающиеся направления**

- Обучение глубоких сетей (deep learning)
- Состязательное обучение (adversarial learning)
- Привилегированное обучение (learning with privileged information)
- Обучение выявлению связей (relational learning)
- Обучение с переносом опыта (transfer learning)
- Мета-обучение (meta-learning)

# Основные школы машинного обучения

- *Символизм* – поиск логических закономерностей
- *Коннекционизм* – обучаемые нейронные сети
- *Эволюционизм* – адаптивная оптимизация сложных моделей
- *Байесионизм* – оценивание распределений над параметрами
- *Аналогизм* – «близким объектам близкие ответы»
- + *Композиционизм* – кооперация моделей

Педро Домингос. «Верховный алгоритм». 2016.

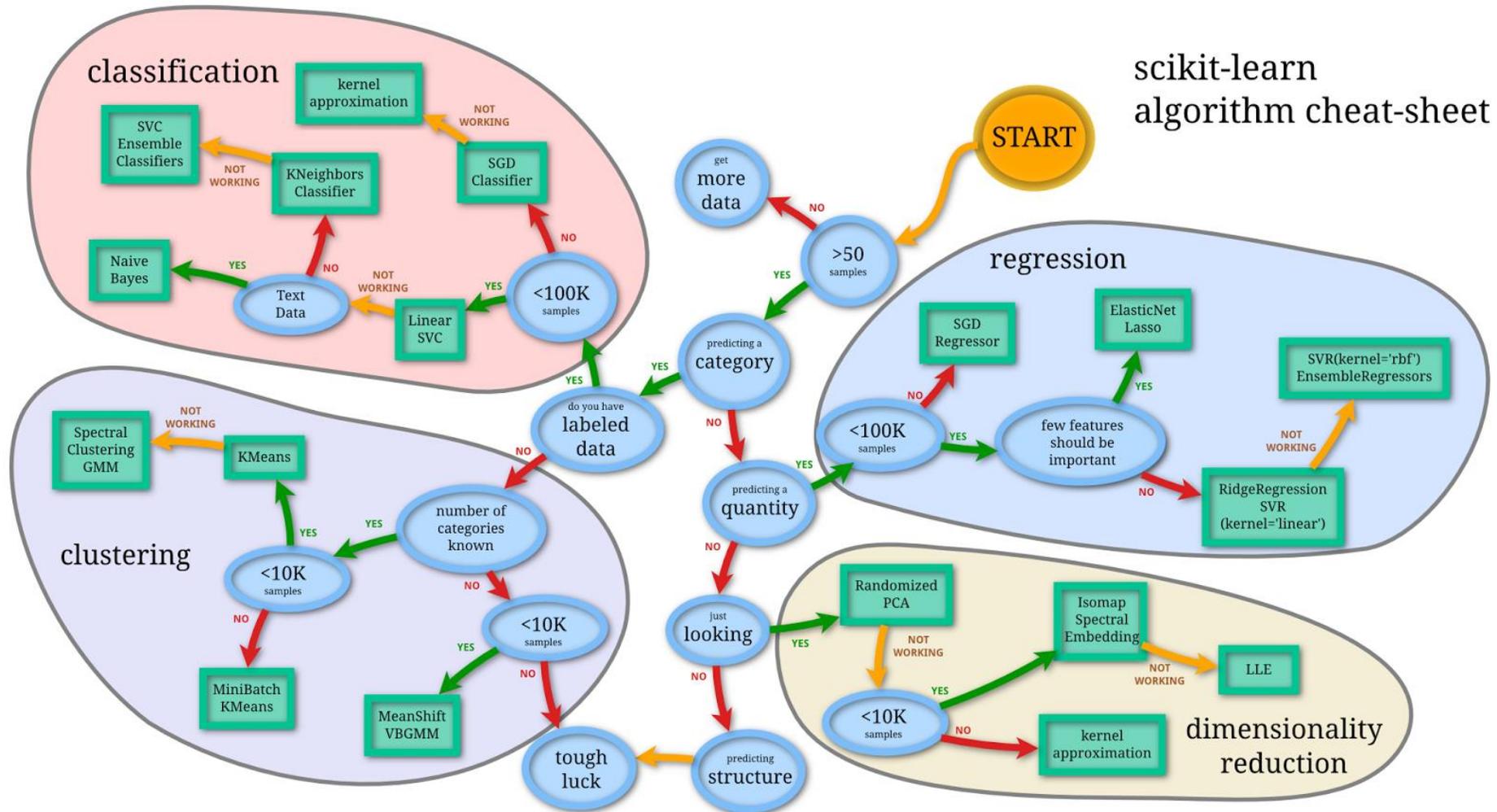


# Отличия машинного обучения от классического моделирования

- Обилие данных компенсирует недостаток предметных знаний
  - Вместо узких моделей – универсальные аппроксиматоры
  - Нет строгих теорий, но нет и сомнительных модельных гипотез
  - Не все модели машинного обучения – «чёрные ящики»
- 
- **Нет чётких различий! Граница размыта!**

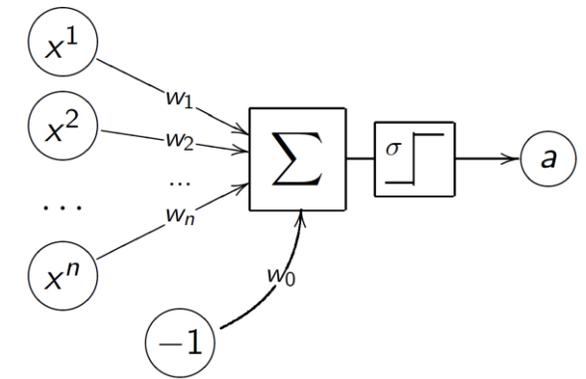
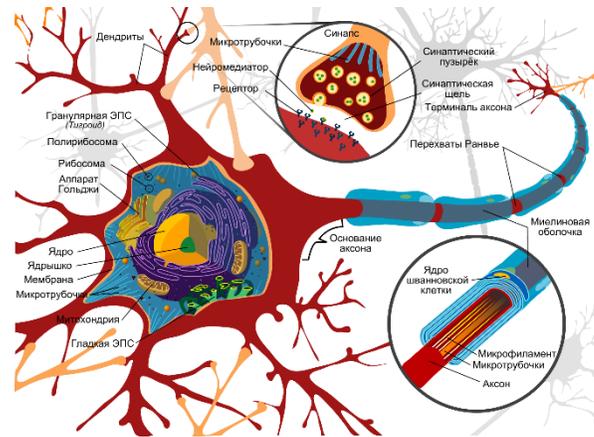
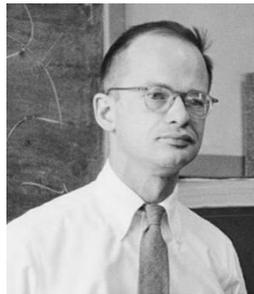
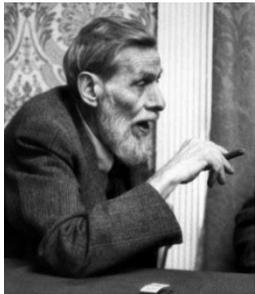
*Машинное обучение  
— разновидность  
математического  
моделирования*

# Задачи и методы машинного обучения



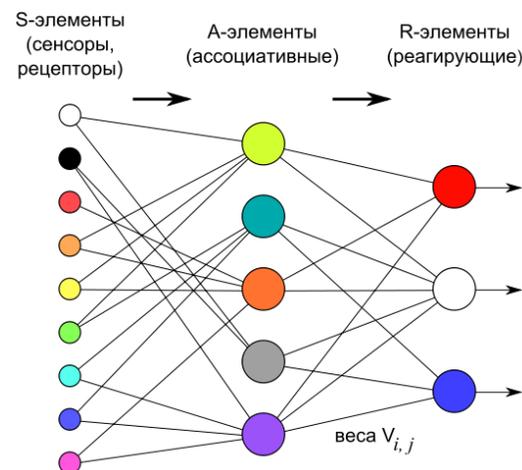
# Что такое «искусственные нейронные сети»

Математическая модель нейрона  
(МакКаллок и Питтс, 1943)

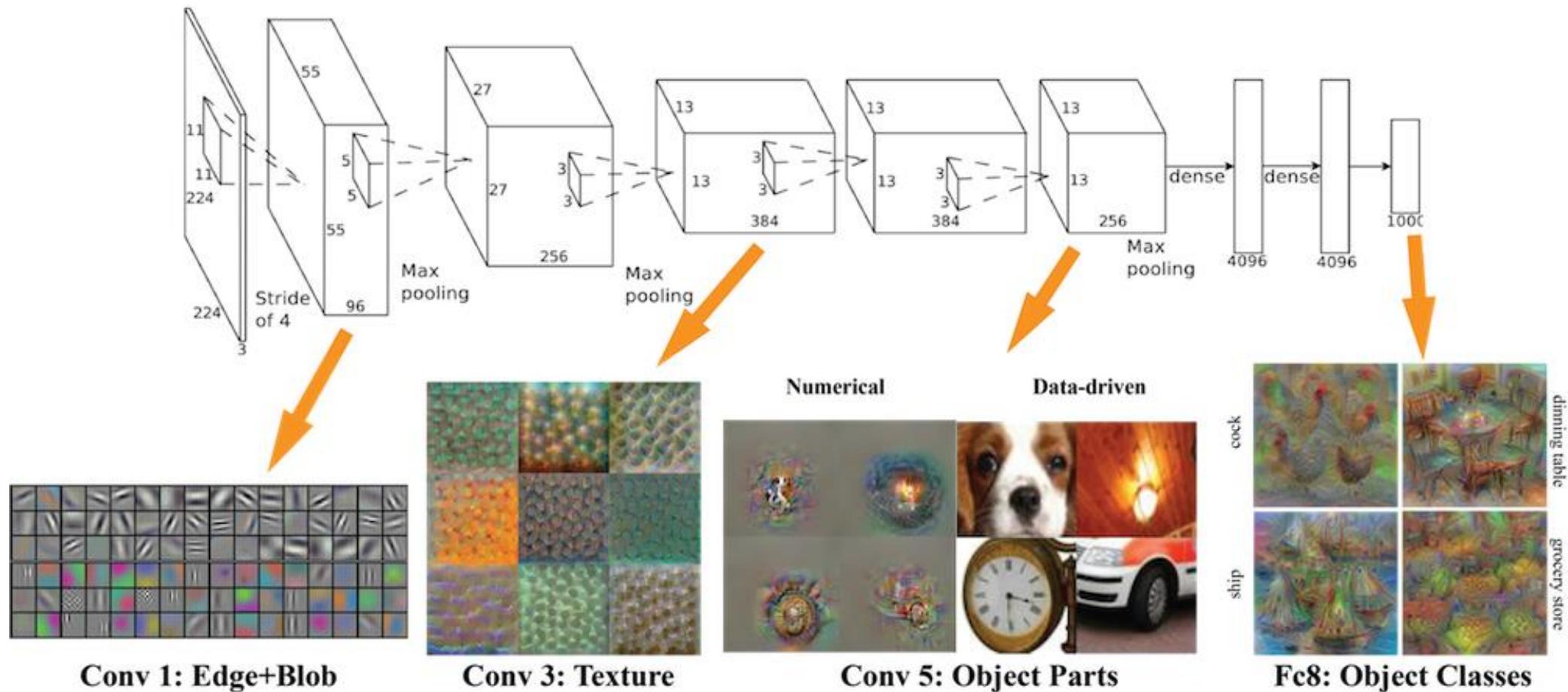


$$a(x, w) = \sigma \left( \sum_{j=1}^n w_j x^j - w_0 \right)$$

Первый нейрокомпьютер Mark-1  
(Фрэнк Розенблатт, 1960)



# Что такое «глубокие нейронные сети»

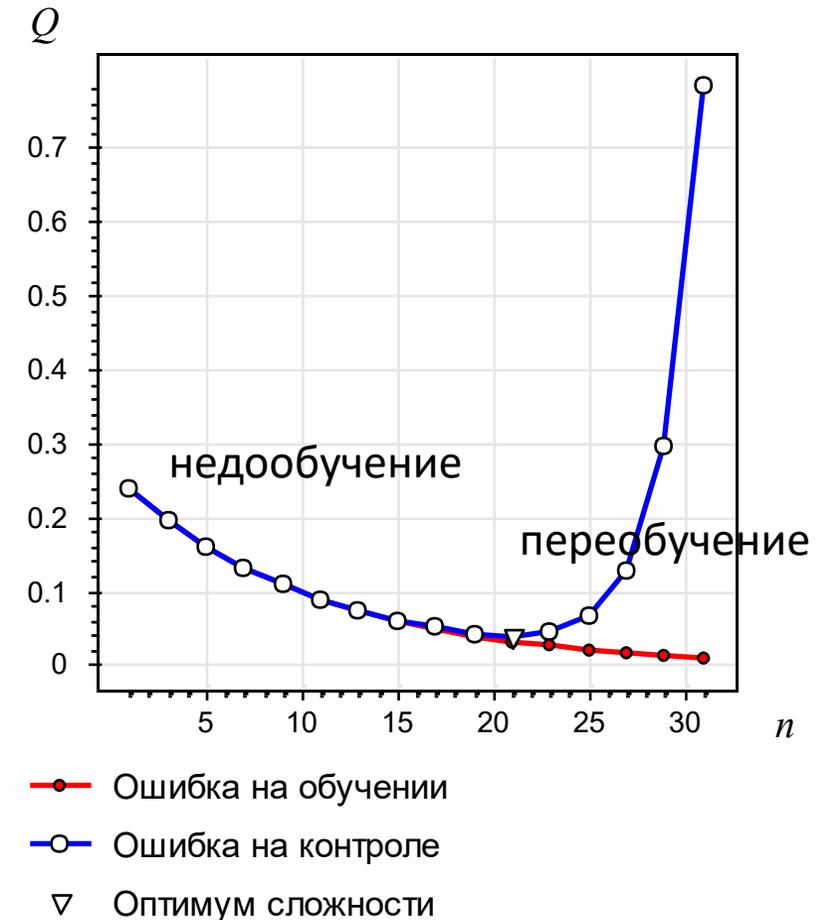


# Оценивание моделей

- **Внутренние критерии:**  
для оптимизации параметров модели
- **Внешние критерии:**  
для оценивания обобщающей способности и контроля *переобучения*

Часто используемые внешние критерии:

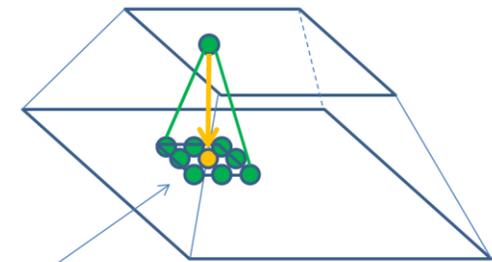
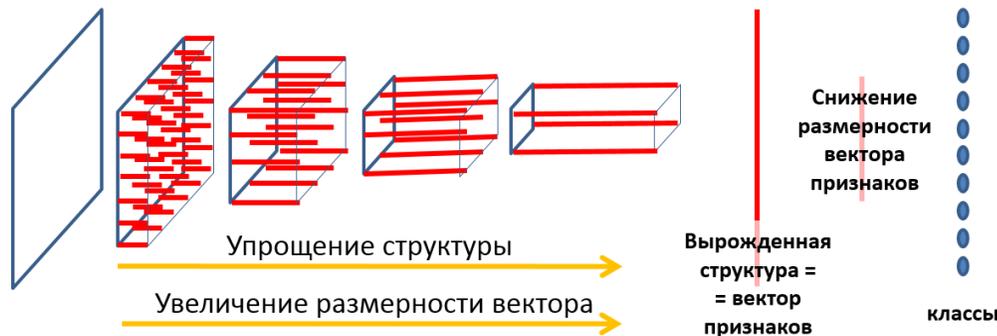
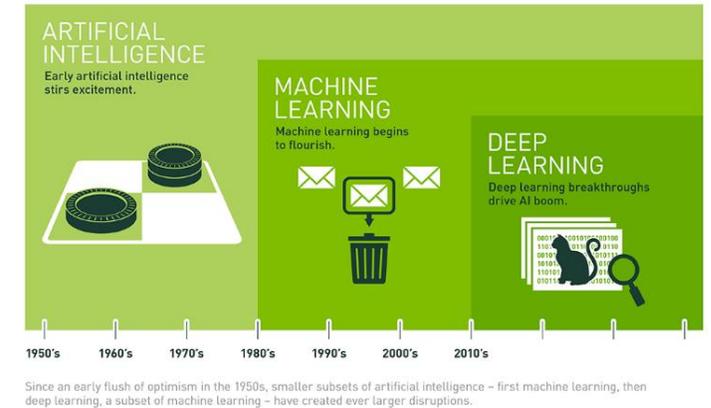
- hold-out
- (q-fold) cross-validation, leave-one-out
- out-of-sample, out-of-time



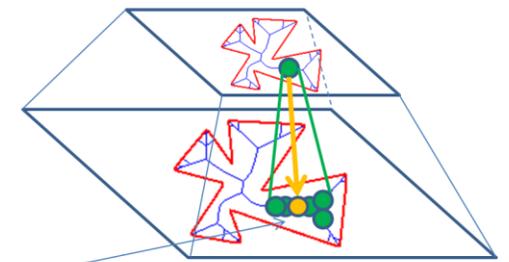
# Новые методы: вытеснит ли DL всё остальное машинное обучение?

*Глубокие сети* – это инструмент автоматизации извлечения признаков (Feature Extraction).

Ближайшее будущее: свёрточные сети обобщаются на любые данные с локальными структурами.



Прямоугольное окно заданного размера с центром в заданной точке + операция свёртки по окну



Локальная окрестность, определяемая для любой вершины графа + операция свёртки по окрестности

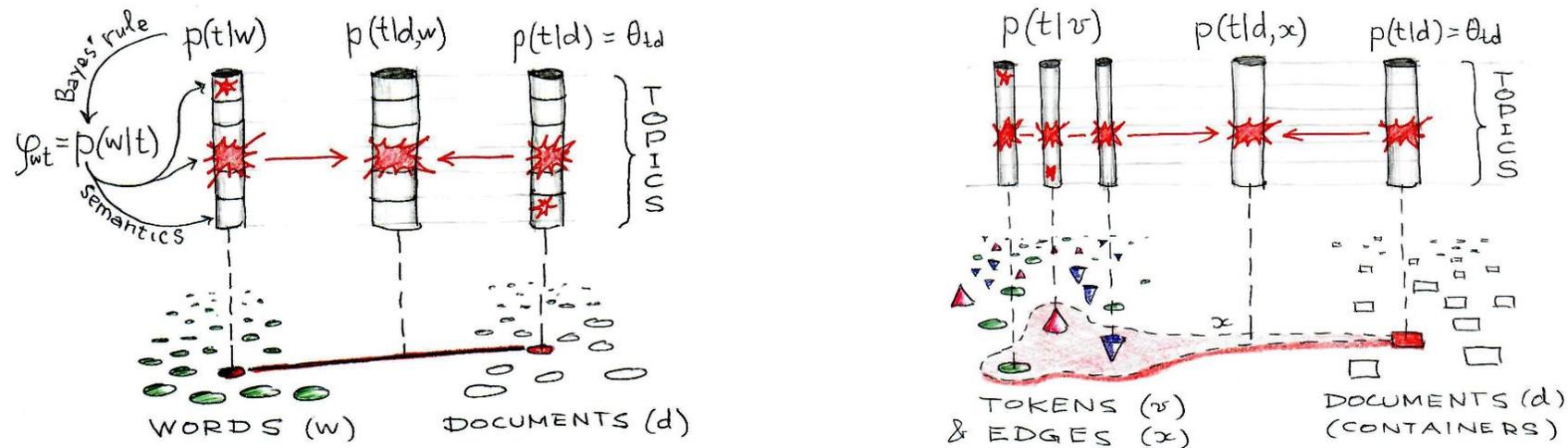
Визильтер Ю.В., Горбацевич В.С. Структурно-функциональный анализ и синтез глубоких конволюционных нейронных сетей. ММРО-2017.

# Новые методы: векторизация сложных данных

*Сложные данные:* тексты, изображения, графы, гиперграфы, транзакции

**Векторные представления объектов** по наблюдаемым взаимодействиям:

- *неинтерпретируемые:* word2vec, doc2vec, node2vec, graph2vec, prod2vec, StarSpace,...
- *интерпретируемые:* тематические модели (Topic Modeling)



Воронцов К.В. Вероятностное тематическое моделирование: обзор моделей и аддитивная регуляризация. [www.MachineLearning.ru](http://www.MachineLearning.ru). 2018.

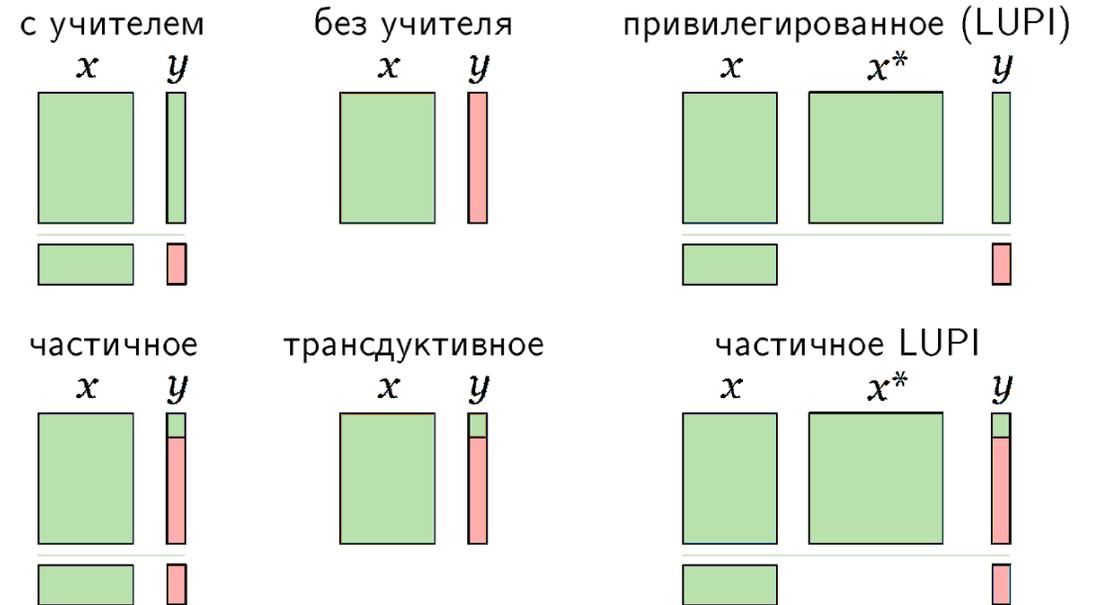
# Новые методы: обучение с привилегированной информацией

## Естественная модель обучения с учителем:

*LUPI – Learning Using Privileged Information*

учитель даёт не только правильные ответы, но и объяснения

- На стадии обучения учитель сообщает важную информацию  $x^*$  об объектах обучения
- Но на стадии тестирования этой информации не будет



# Новые методы: платформы адаптивного обучения

## **Обычная схема решения задач DS|ML|AI:**

- Забираем данные из промышленной системы (долго!)
- Строим модели, экспериментируем в удобной для нас среде
- Переносим модели обратно в пром (долго!)

## **Будущее – за онлайн-машинным обучением:**

- Предобработка данных и дообучение моделей – налету
- Валидация моделей по совокупности критериев
- Адаптивная селекция и композиция моделей
- Работа аналитика – мониторинг, визуализация и доработка моделей

# Рекомендуемая литература

- *Домингос П.* Верховный алгоритм. 2016.
- *Коэльо Л. П., Ричарт В.* Построение систем машинного обучения на языке Python. 2016.
- *Мерков А. Б.* Распознавание образов. Введение в методы статистического обучения. 2011.
- *Мерков А. Б.* Распознавание образов. Построение и обучение вероятностных моделей. 2014.
- *Бенджио И., Гудфеллоу Я., Курвилль А.* Глубокое обучение. ДМК-Пресс, 2018.
- *Николенко С., Кадурын А., Архангельская Е.* Глубокое обучение. Питер, 2018.
- *Воронцов К. В.* Лекции по машинному обучению. [www.MachineLearning.ru](http://www.MachineLearning.ru), 2004-2018.
- *Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.* The Elements of Statistical Learning. Springer, 2014.
- *Bishop C. M.* Pattern Recognition and Machine Learning. - Springer, 2006.