

Машинное обучение

Лекция 5

Метрики качества. Переобучение.

Многоклассовая классификация.

Михаил Гуцин

mhushchyn@hse.ru

НИУ ВШЭ, 2025



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На прошлой лекции

- ▶ Модель логистической регрессии:

$$\hat{y} = \sigma(Xw)$$

- ▶ Функция потерь log-loss:

$$L = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i \log(\hat{y}_i) + (1 - y_i) \log(1 - \hat{y}_i))$$

- ▶ Мы хотим минимизировать L :

$$L \rightarrow \min_w$$

- ▶ Градиентный спуск:

$$w^{(k+1)} = w^{(k)} - \eta \nabla L(w^{(k)})$$



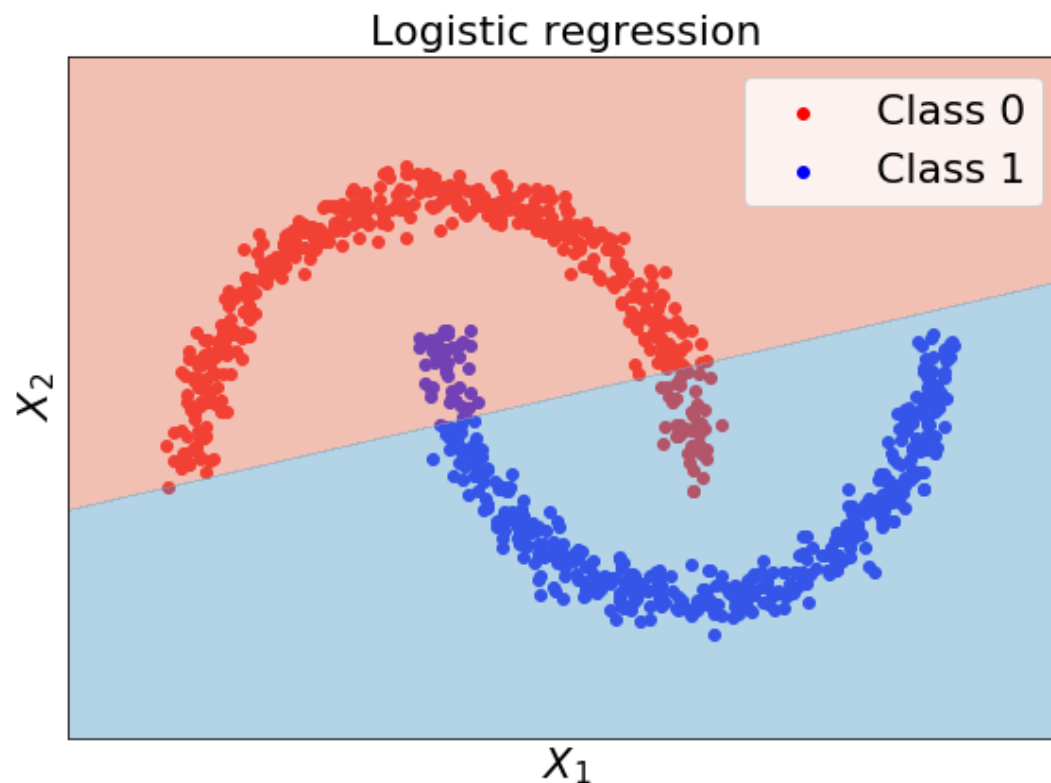
Метрики качества для классификации



Задача

Рассмотрим задачу бинарной классификации для некоторого набора данных.

Цель – **оценить качество классификатора**, определить как хорошо он разделяет объекты разных классов.



Матрица ошибок (confusion matrix)

- ▶ **TP** (True Positive) – правильно предсказанные **1**
- ▶ **FP** (False Positive) – предсказанные как **1**, но правильно **0** (ошибка 1го рода)
- ▶ **TN** (True Negative) – правильно предсказанные **0**
- ▶ **FN** (False Negative) – предсказанные как **0**, но правильно **1** (ошибка 2го рода)

ACTUAL VALUES

POSITIVE (1)

NEGATIVE (0)

PREDICTIVE VALUES

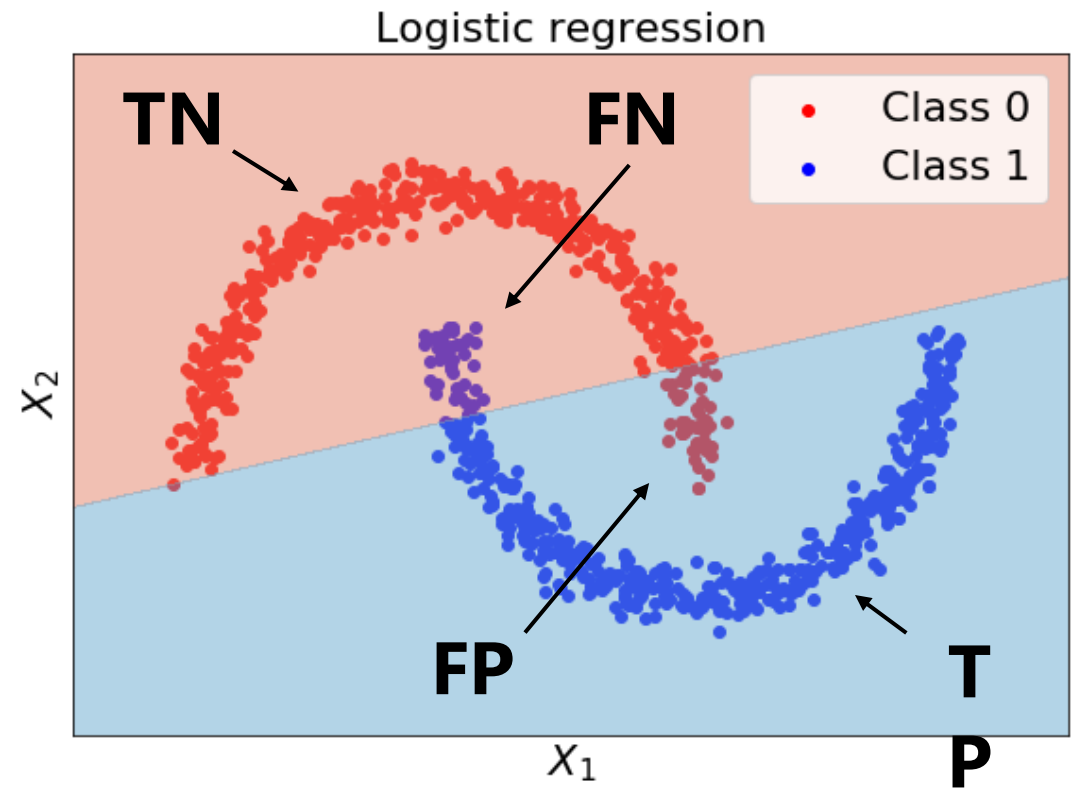
POSITIVE (1) NEGATIVE (0)

	POSITIVE (1)	NEGATIVE (0)
POSITIVE (1)	TP	FN
NEGATIVE (0)	FP	TN



Матрица ошибок (confusion matrix)

- ▶ **TP** (True Positive) – правильно предсказанные **1**
- ▶ **FP** (False Positive) – предсказанные как **1**, но правильно **0** (ошибка 1го рода)
- ▶ **TN** (True Negative) – правильно предсказанные **0**
- ▶ **FN** (False Negative) – предсказанные как **0**, но правильно **1** (ошибка 2го рода)



Матрица ошибок (confusion matrix)

- ▶ Все **1** (*Pos*):

$$Pos = TP + FN$$

- ▶ Все **0** (*Neg*):

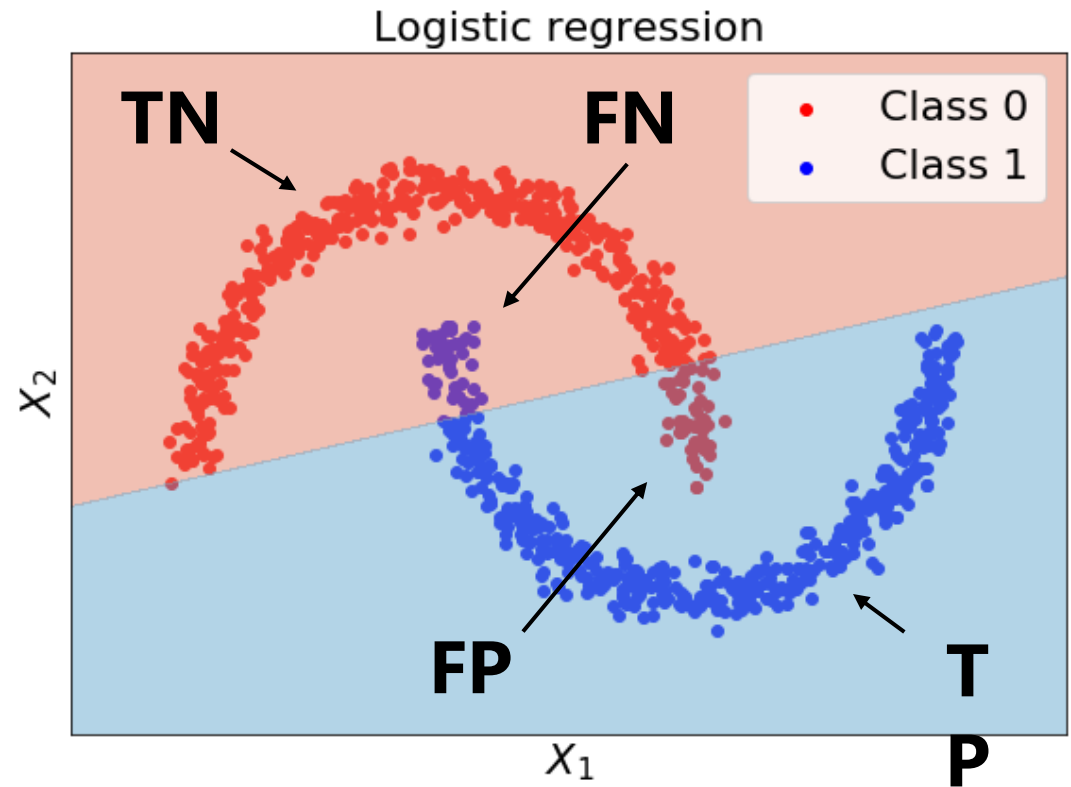
$$Neg = TN + FP$$

- ▶ Все прогнозы **1** (*PosPred*):

$$PosPred = TP + FP$$

- ▶ Все прогнозы **0** (*NegPred*):

$$NegPred = TN + FN$$



Доля правильных ответов (accuracy)

- ▶ Accuracy:

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + FN + TN + FP} = \frac{TP + TN}{Pos + Neg}$$

- ▶ Error rate:

$$\text{Error rate} = 1 - \text{Accuracy}$$

- ▶ Измеряет долю верных прогнозов во всех классах

Точность (precision)

- ▶ Precision:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} = \frac{TP}{PosPred}$$

- ▶ Показывает какая доля прогнозов **1** правильная

Пример: предсказали 100 объектов класса 1, но только 90 прогнозов верны.
Тогда точность = 0.9.

Полнота (recall)

- ▶ Recall:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} = \frac{TP}{Pos}$$

- ▶ Показывает какую долю настоящих **1** классификатор предсказал правильно.

Пример: в данных 50 объектов класса 1, классификатор правильно предсказал 40 этих объектов. Тогда полнота = 0.8.

F-мера

- ▶ F_1 -score:

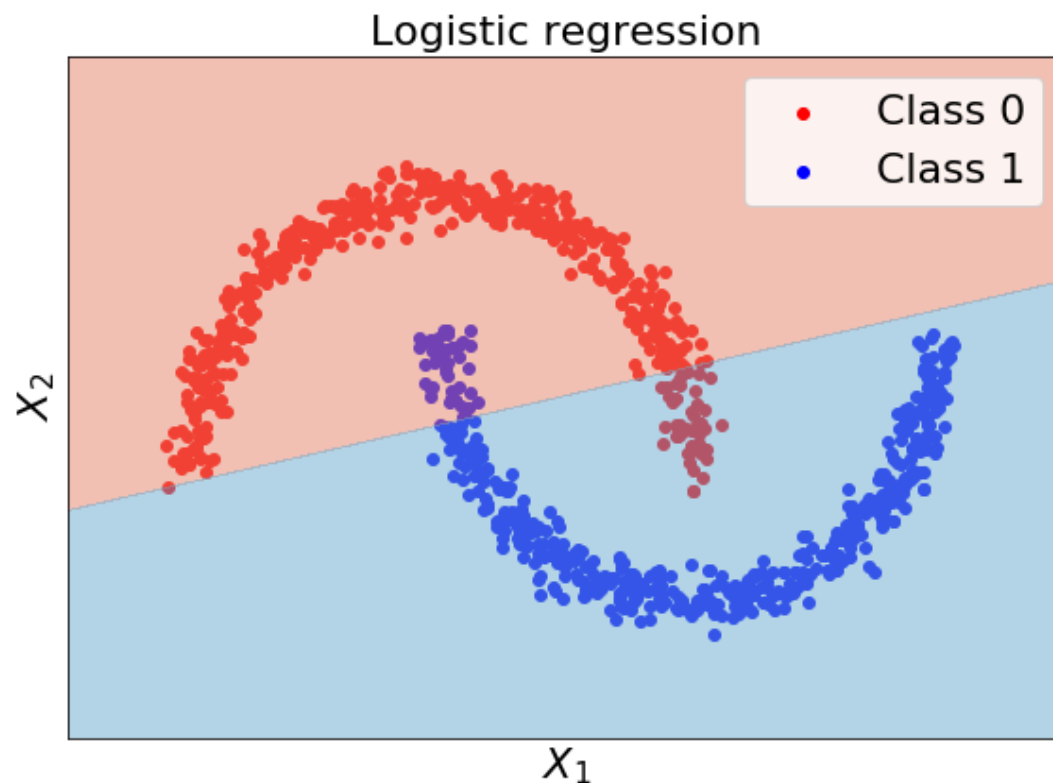
$$F_1 = \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

- ▶ Показывает среднее геометрическое точности и полноты

Пример

Metric	Value
Accuracy	0.89
Precision	0.89
Recall	0.89
F_1	0.89

- ▶ В этом простом симметричном примере все метрики равны
- ▶ Далее увидим другие примеры



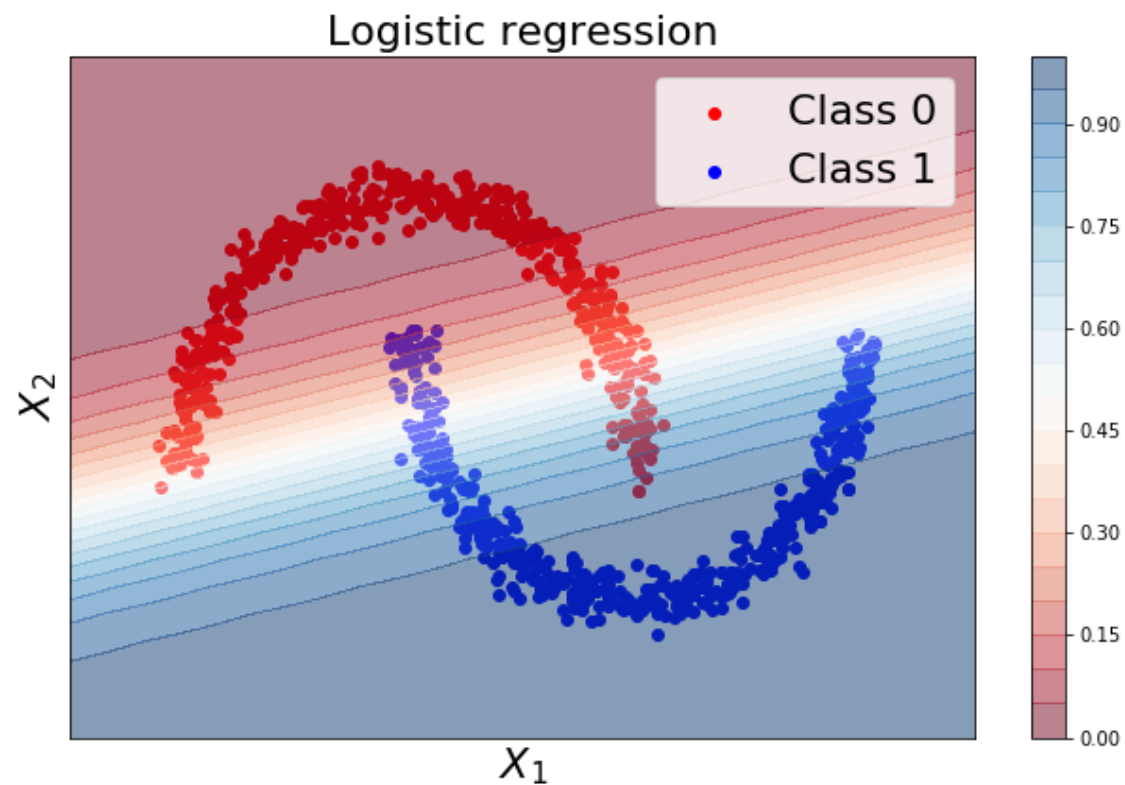
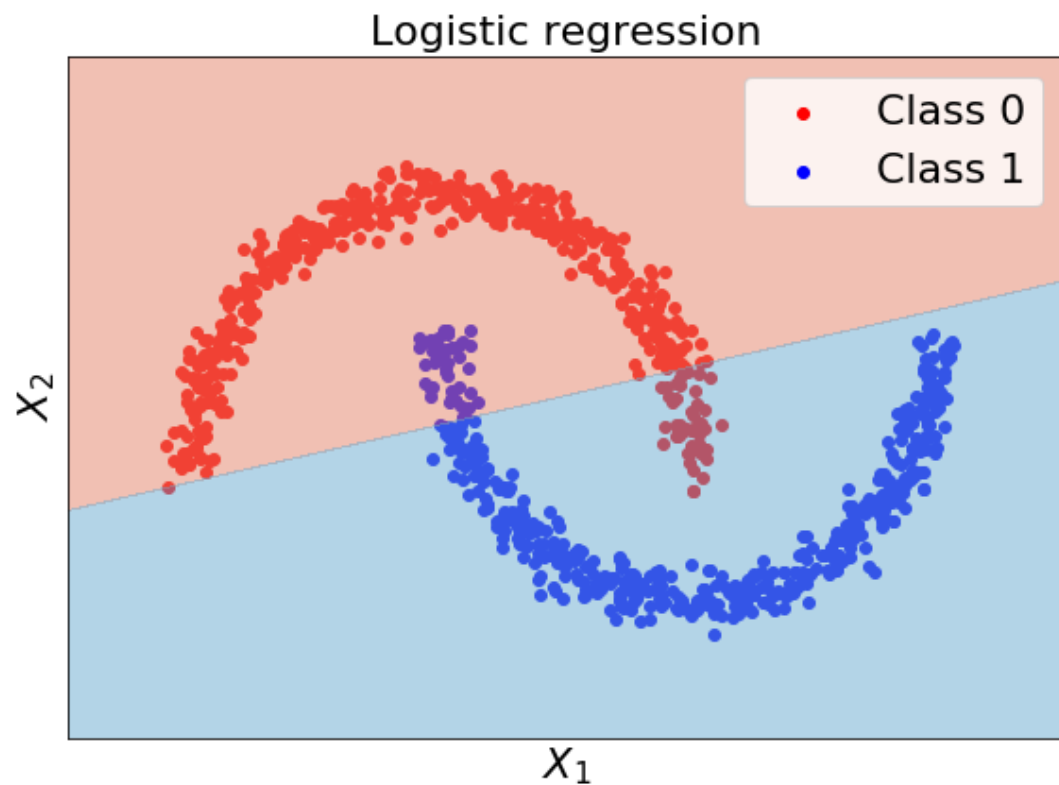
An aerial photograph of a dark, winding road that snakes through a dense, green forest. The road has several sharp turns, creating a complex, looping pattern. The surrounding trees are thick and vibrant green, contrasting with the dark asphalt of the road. The overall scene is captured from a high angle, looking down on the landscape.

ROC кривая

Метка класса vs вероятность класса

Прогноз **1** если $p \geq 0.5$
Прогноз **0** если $p < 0.5$

Вероятность класса **1** p :



ROC кривая

- ▶ ROC (Receiver operating characteristic) кривая – зависимость **$TPR(\mu)$** от **$FPR(\mu)$** для разных пороговых значений μ вероятности p

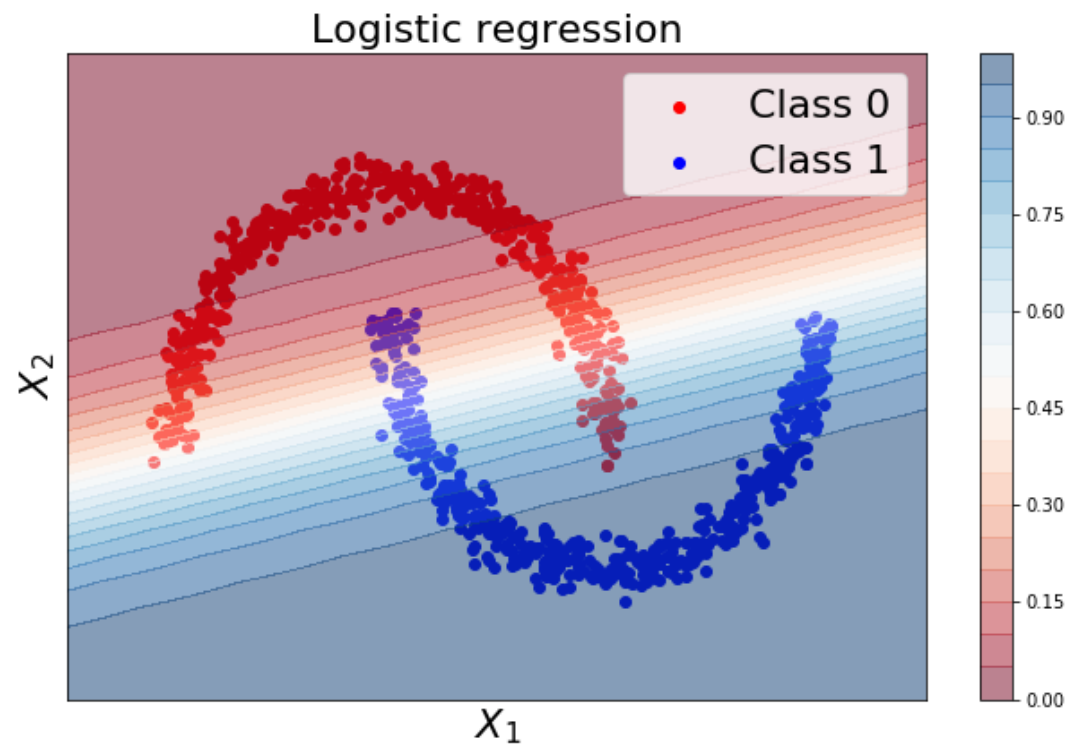
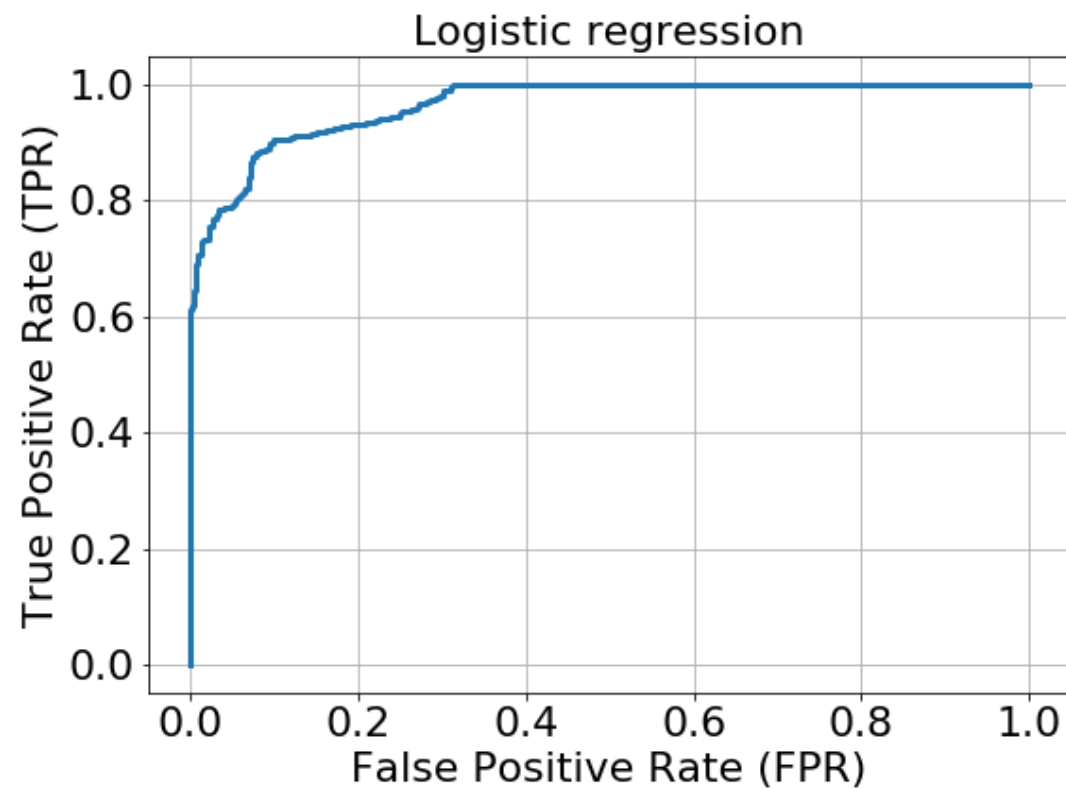
- ▶ $TPR(\mu)$ (True Positive Rate):

$$TPR(\mu) = \frac{1}{Pos} \sum_{i \in Pos} I[p_i \geq \mu] = \frac{TP(\mu)}{Pos}$$

- ▶ $FPR(\mu)$ (False Positive Rate):

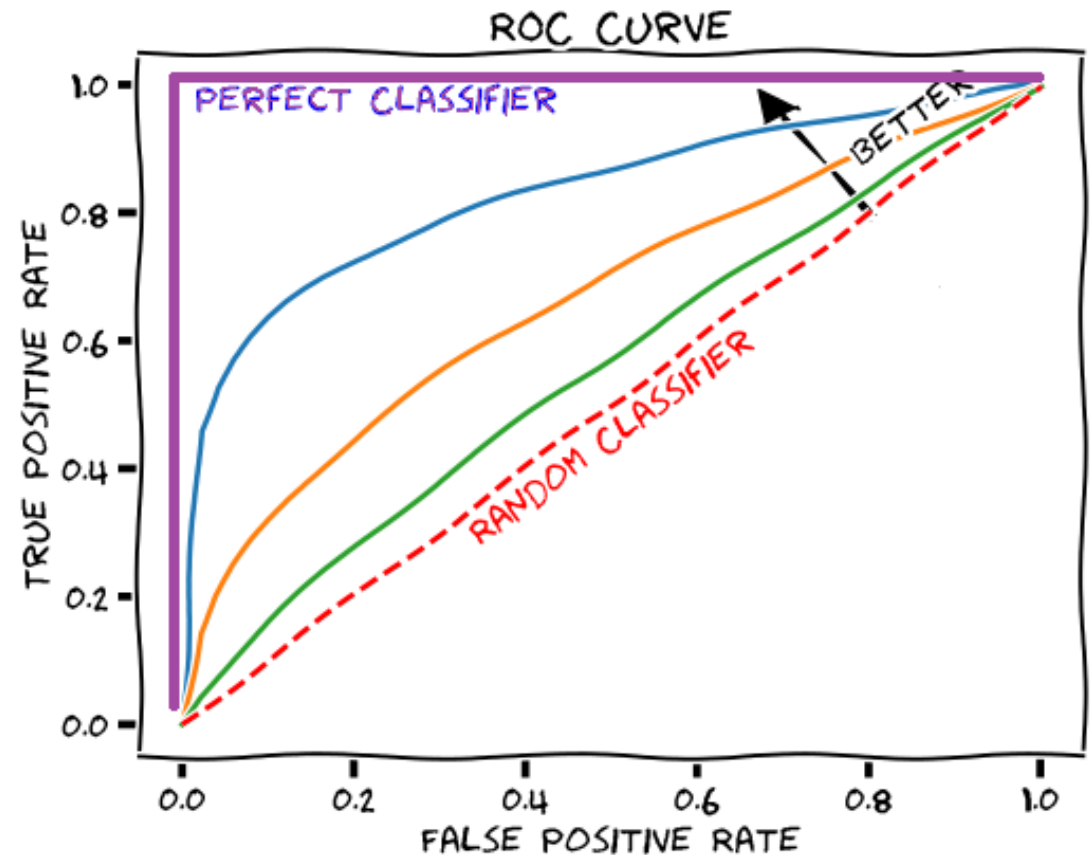
$$FPR(\mu) = \frac{1}{Neg} \sum_{i \in Neg} I[p_i \geq \mu] = \frac{FP(\mu)}{Neg}$$

ROC кривая



ROC AUC

- ▶ Можно сравнивать классификаторы с помощью площади под ROC кривой (ROC AUC)
- ▶ $\text{ROC AUC} \in [0, 1]$
- ▶ $\text{ROC AUC} = 0.5$ – случайные прогнозы
- ▶ $\text{ROC AUC} = 1$ – идеальный классификатор
- ▶ $\text{ROC AUC} = 0$ – тоже идеальный классификатор, но с противоположными ответами 😊



Img: <https://glassboxmedicine.com/2019/02/23/measuring-performance-auc-auoc/>

Индекс Джини

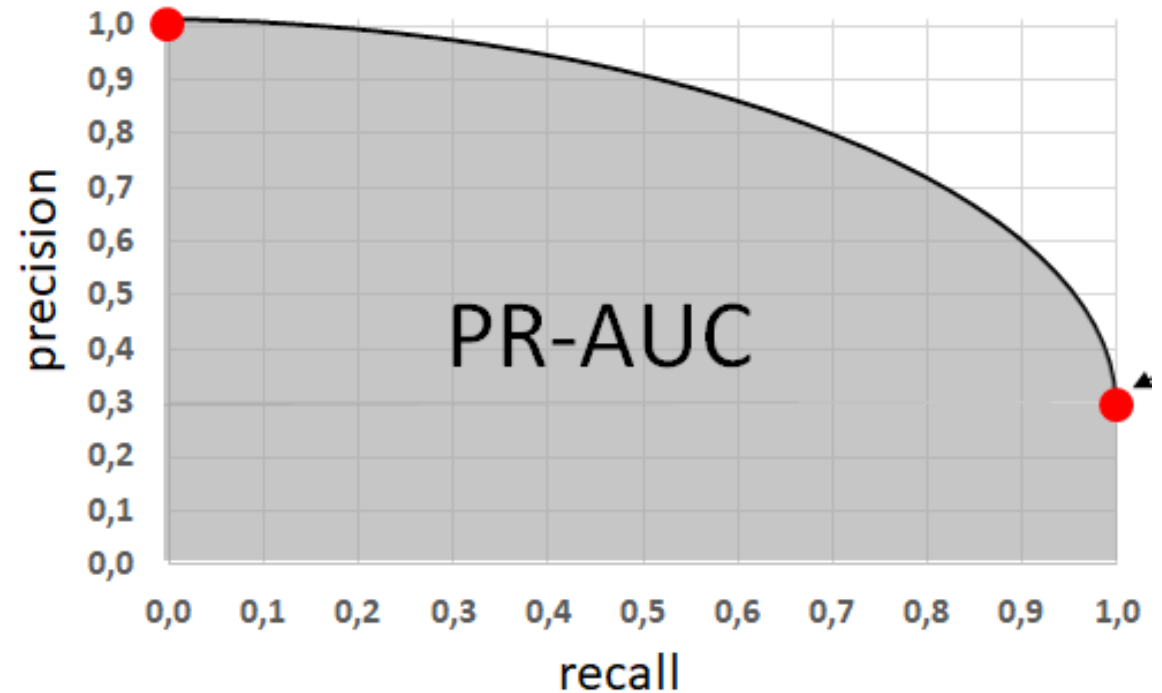
- ▶ Gini:

$$Gini = 2 (ROC AUC) - 1$$

- ▶ Измеряется в диапазоне от 0 до 1

Precision-Recall кривая

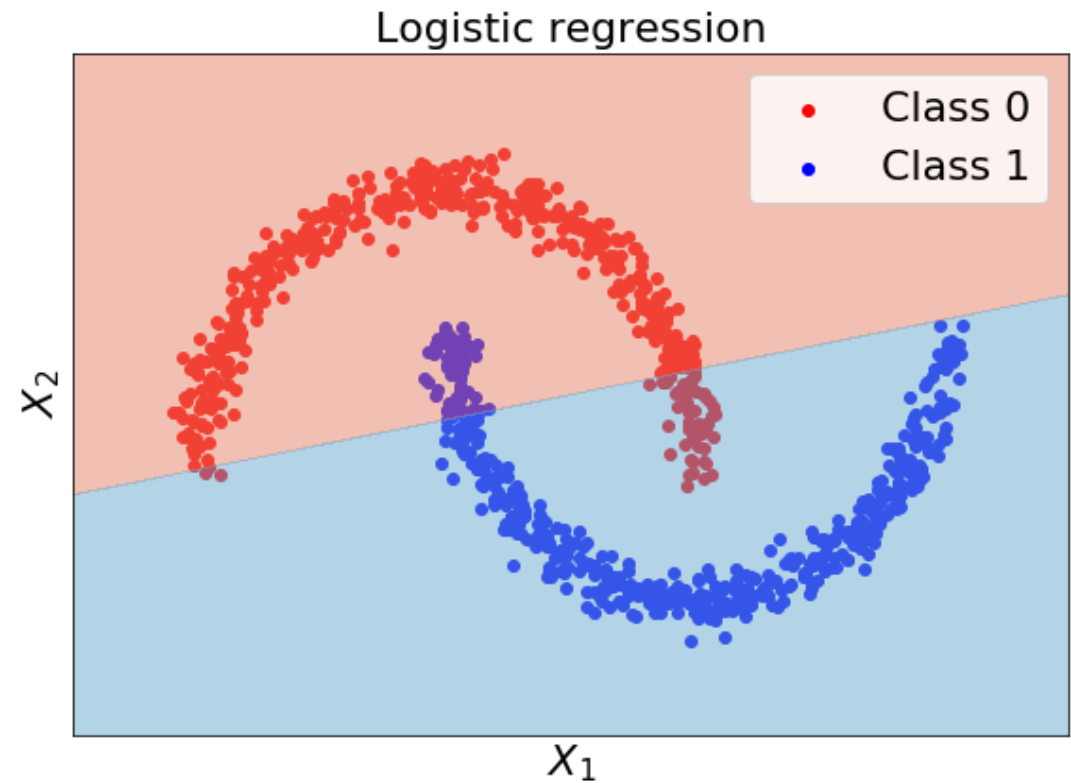
- ▶ По аналогии с ROC кривой, можно построить Precision-Recall (PR) кривую
- ▶ PR – зависимость **Precision(μ)** от **Recall(μ)** для разных пороговых значений μ вероятности p



Демонстрация

Metric	1:1	1:10	10:1
Accuracy	0.89		
Precision	0.89		
Recall	0.89		
F_1	0.89		
ROC AUC	0.97		

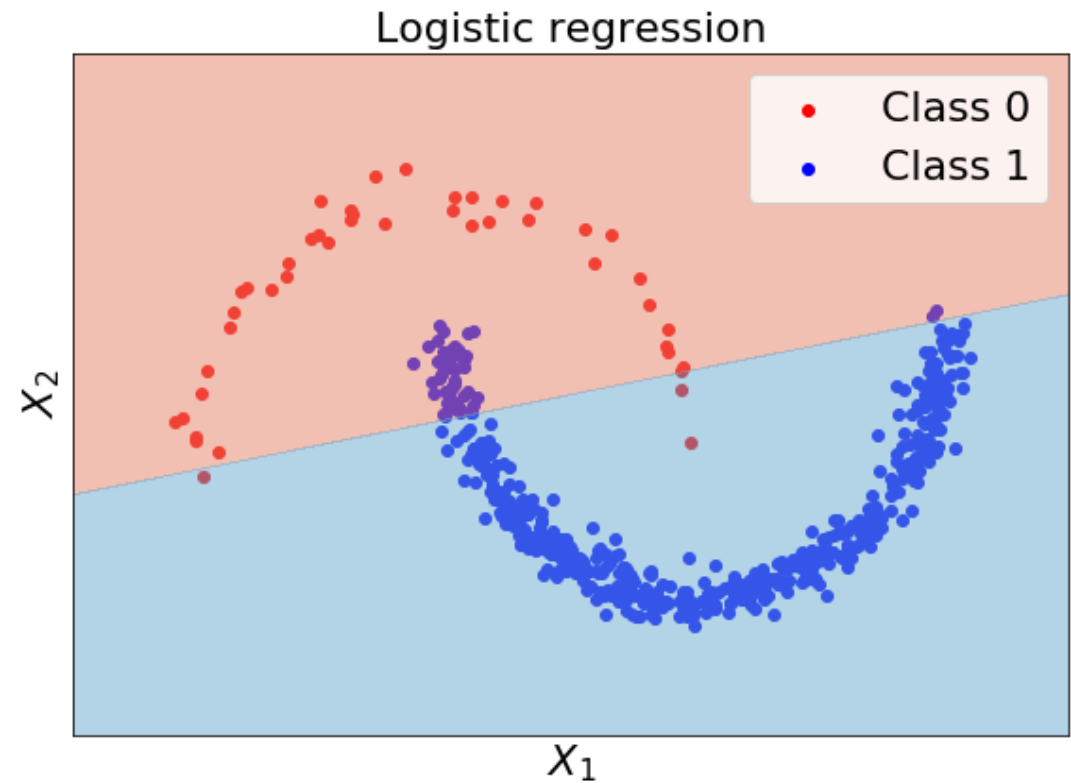
- ▶ Обучили модель на сбалансированной выборке
- ▶ **Фиксируем модель** и будем менять баланс классов



Демонстрация

Metric	1:1	1:10	10:1
Accuracy	0.89	0.89	
Precision	0.89	0.99	
Recall	0.89	0.89	
F_1	0.89	0.94	
ROC AUC	0.97	0.97	

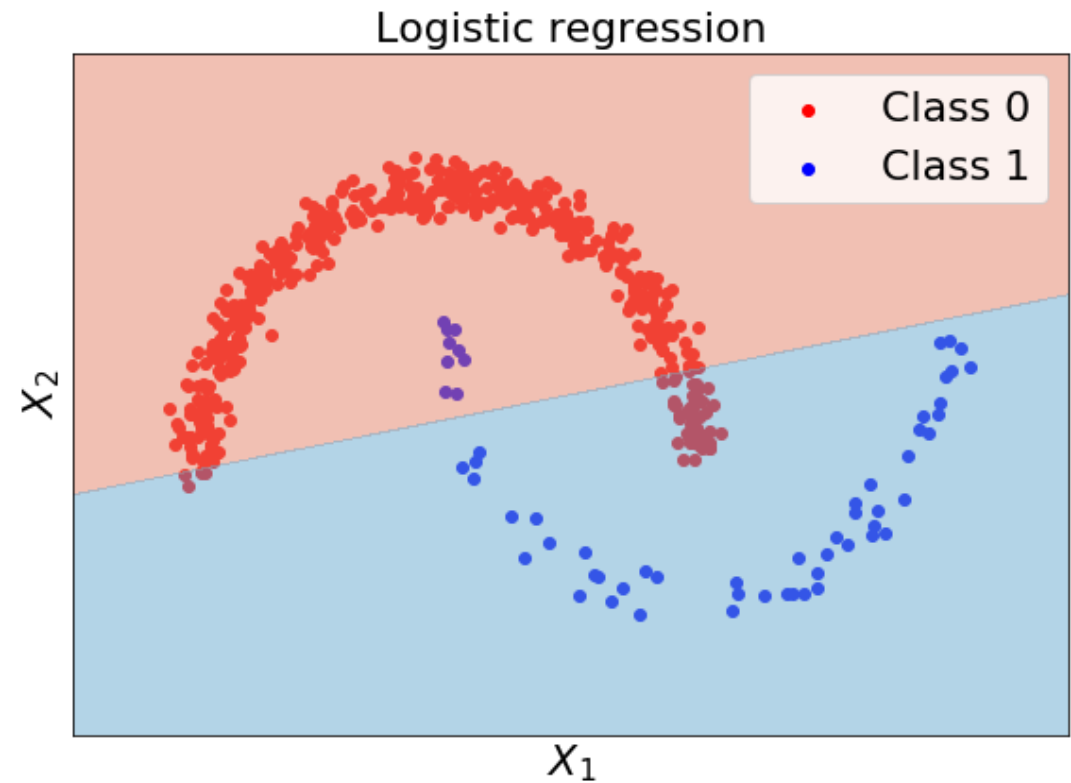
- ▶ Значения некоторых метрик меняются при смене баланса классов



Демонстрация

Metric	1:1	1:10	10:1
Accuracy	0.89	0.89	0.89
Precision	0.89	0.99	0.47
Recall	0.89	0.89	0.89
F_1	0.89	0.94	0.61
ROC AUC	0.97	0.97	0.97

- ▶ **Recall** и **ROC AUC** устойчивы к дисбалансу классов
- ▶ Для **Accuracy** это не выполняется в общем случае





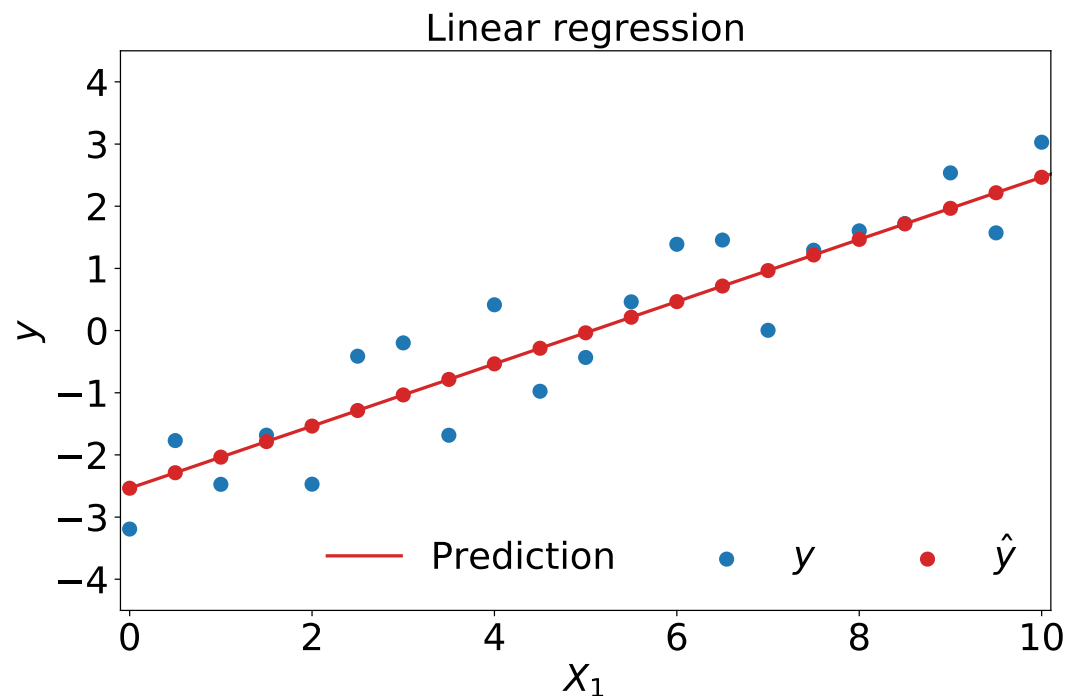
Метрики качества для регрессии

Задача

Пусть даны X , y и линейная модель:

$$\hat{y} = Xw$$

Цель – измерить **качество модели**,
определить насколько близки
прогнозы \hat{y} к реальным значениям y .



Популярные метрики качества

- ▶ Root Mean Squared Error (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}$$

- ▶ Mean Absolute Error (MAE):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i|$$

- ▶ Трудно определить хорошую модель: $RMSE = 1$ выражает разное качество моделей при $\bar{y} = 100$ and $\bar{y} = 1$

Другие метрики качества #1

- ▶ Mean Absolute Percentage Error (MAPE):

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right|$$

- ▶ Измеряем относительную ошибку модели
- ▶ Легко интерпретировать
- ▶ Чувствительна к масштабу y

Другие метрики качества #2

- ▶ Relative Squared Error (RSE):

$$RSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

- ▶ Relative Absolute Error (RAE):

$$RAE = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|}{\sum_{i=1}^N |y_i - \bar{y}|}$$

- ▶ Робастны (мене чувствительны) к масштабу y

Other quality metrics #3

- ▶ Root Mean Squared Logarithmic Error (RMSLE):

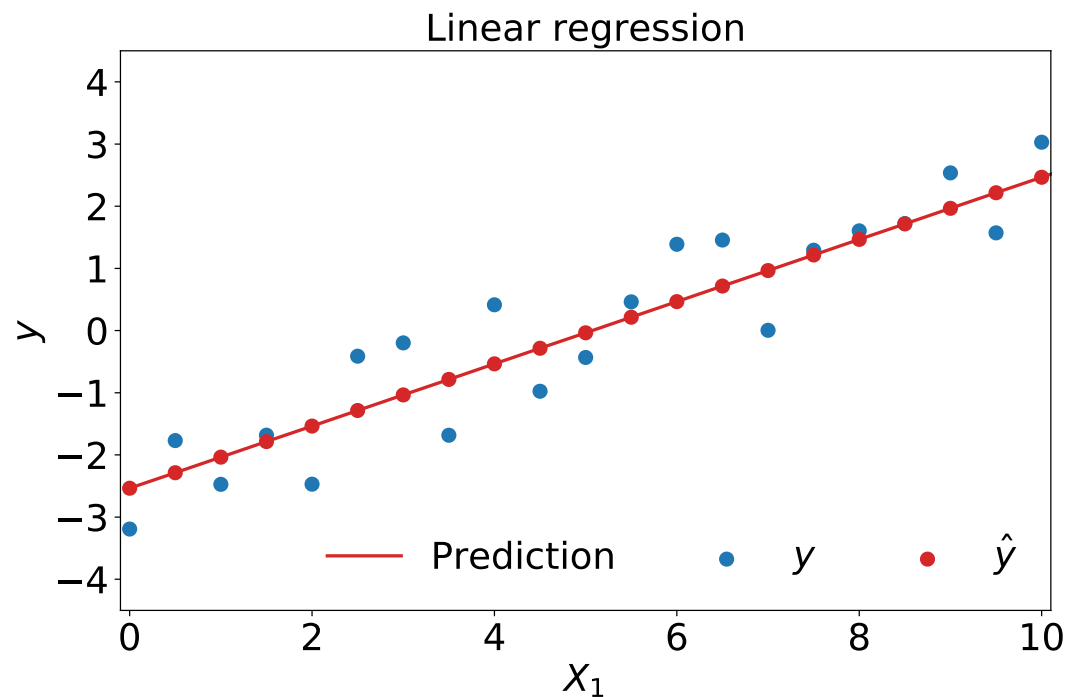
$$RMSLE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\log(y_i + 1) - \log(\hat{y}_i + 1))^2}$$

- ▶ Отличный выбор, когда y_i меняется на несколько порядков: $y_i \in [0, 10^6]$

Пример

Metric	No outliers
RMSE	0.67
MAE	0.59
MAPE, %	1035
RSE	0.39
RAE	0.40

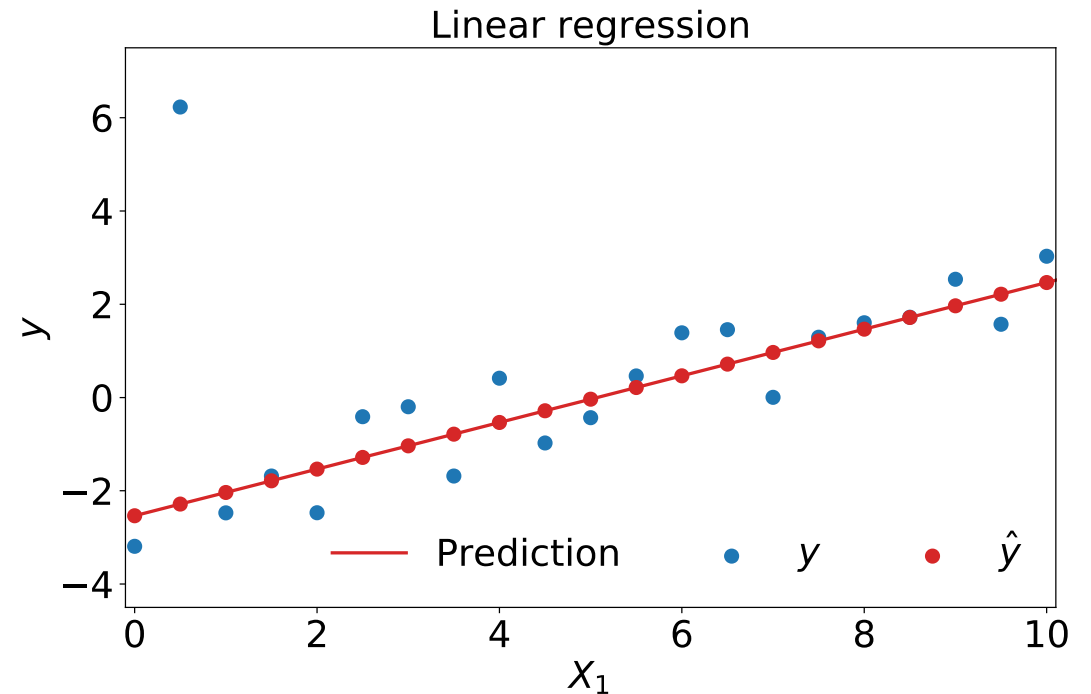
MAPE ведет себя плохо, потому что y и y_i близки к 0



Demonstration

Metric	No outliers	With outlier
RMSE	0.67	1.93
MAE	0.59	0.96
MAPE, %	1035	1040
RSE	0.39	0.92
RAE	0.40	0.58

- ▶ Выбросы могут сместить метрики
- ▶ MAE и RAE более робастны

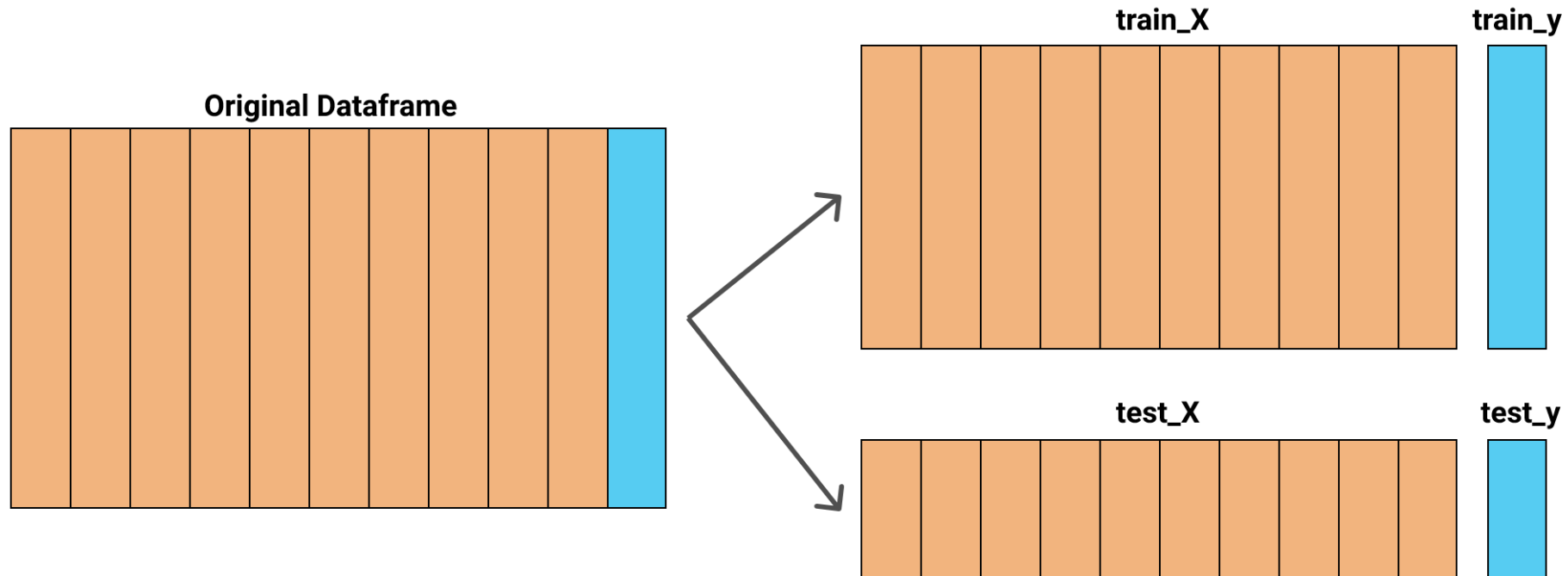




Переобучение

Обучение и тест

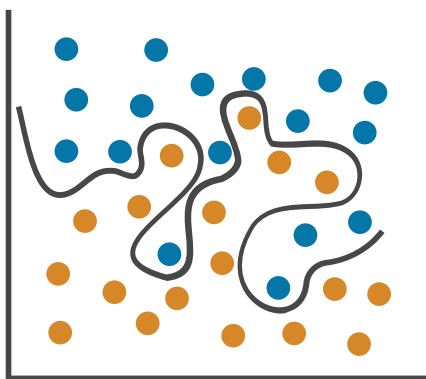
- ▶ **Обучающая выборка (train):** для обучения модели
- ▶ **Тестовая (отложенная) выборка (test):** для измерения качества модели



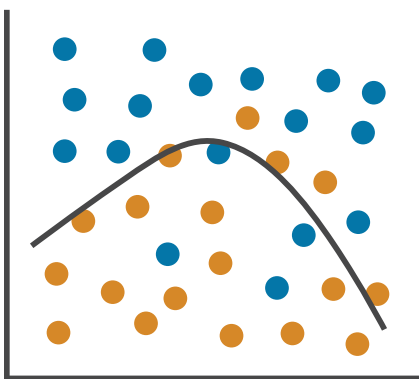
Переобучение

Classification

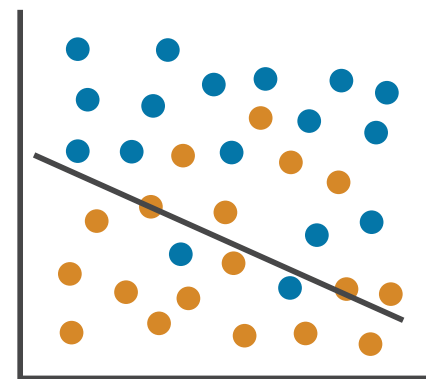
Overfitting



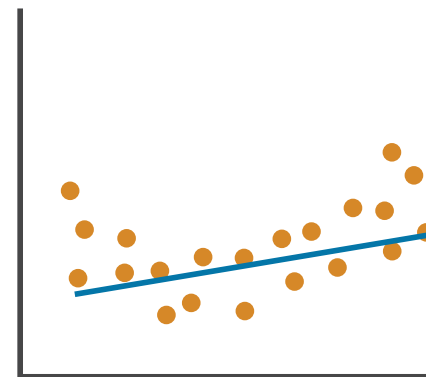
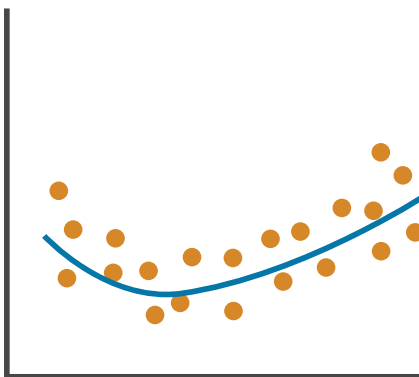
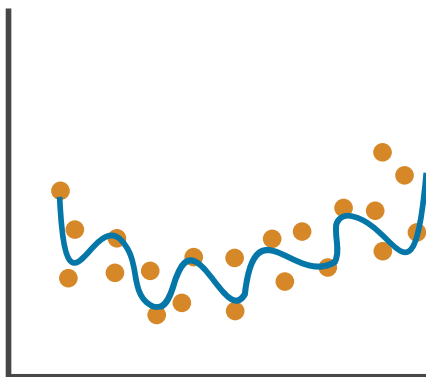
Right Fit



Underfitting

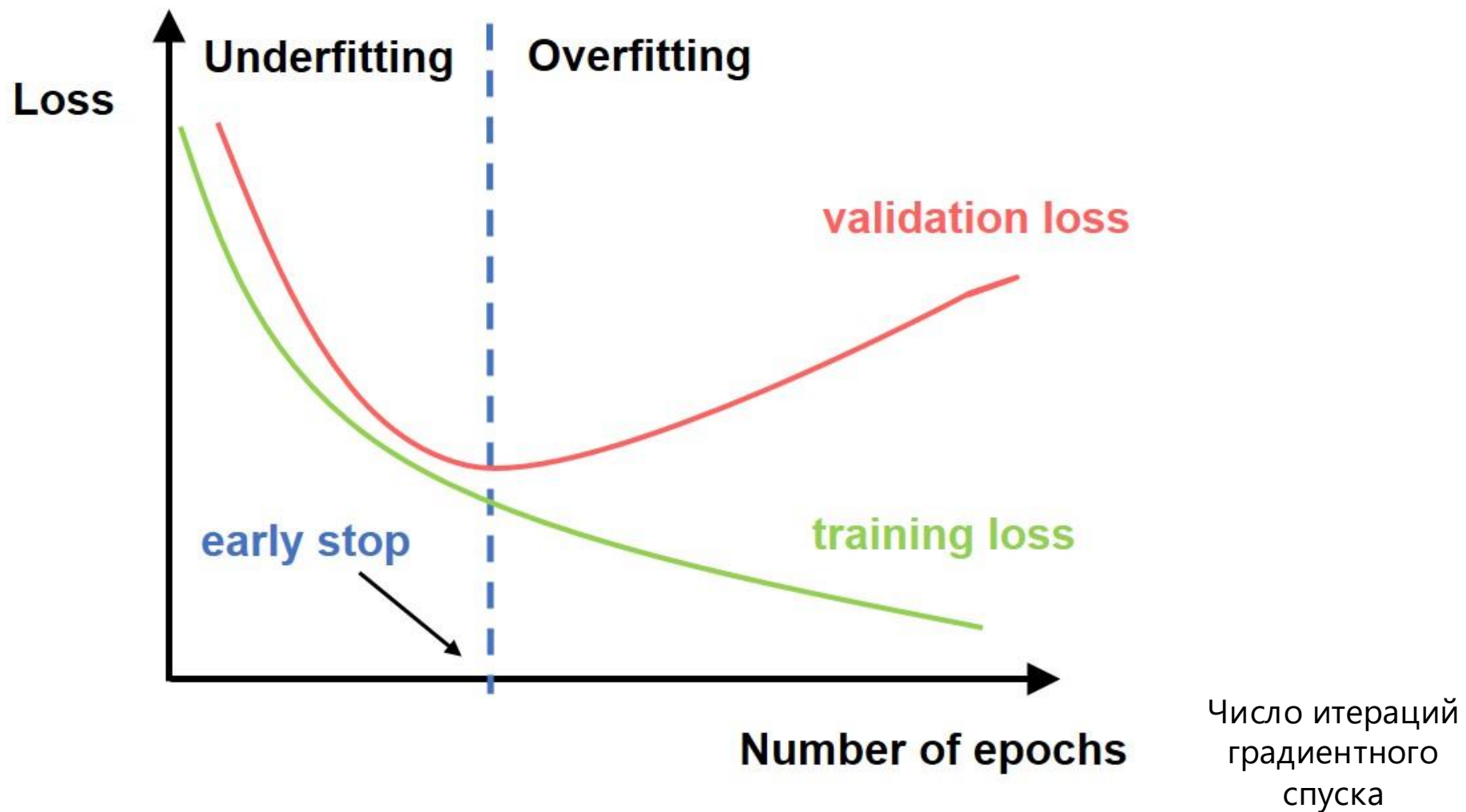


Regression



Источник: <https://www.mathworks.com/discovery/overfitting.html>

Кривая обучения

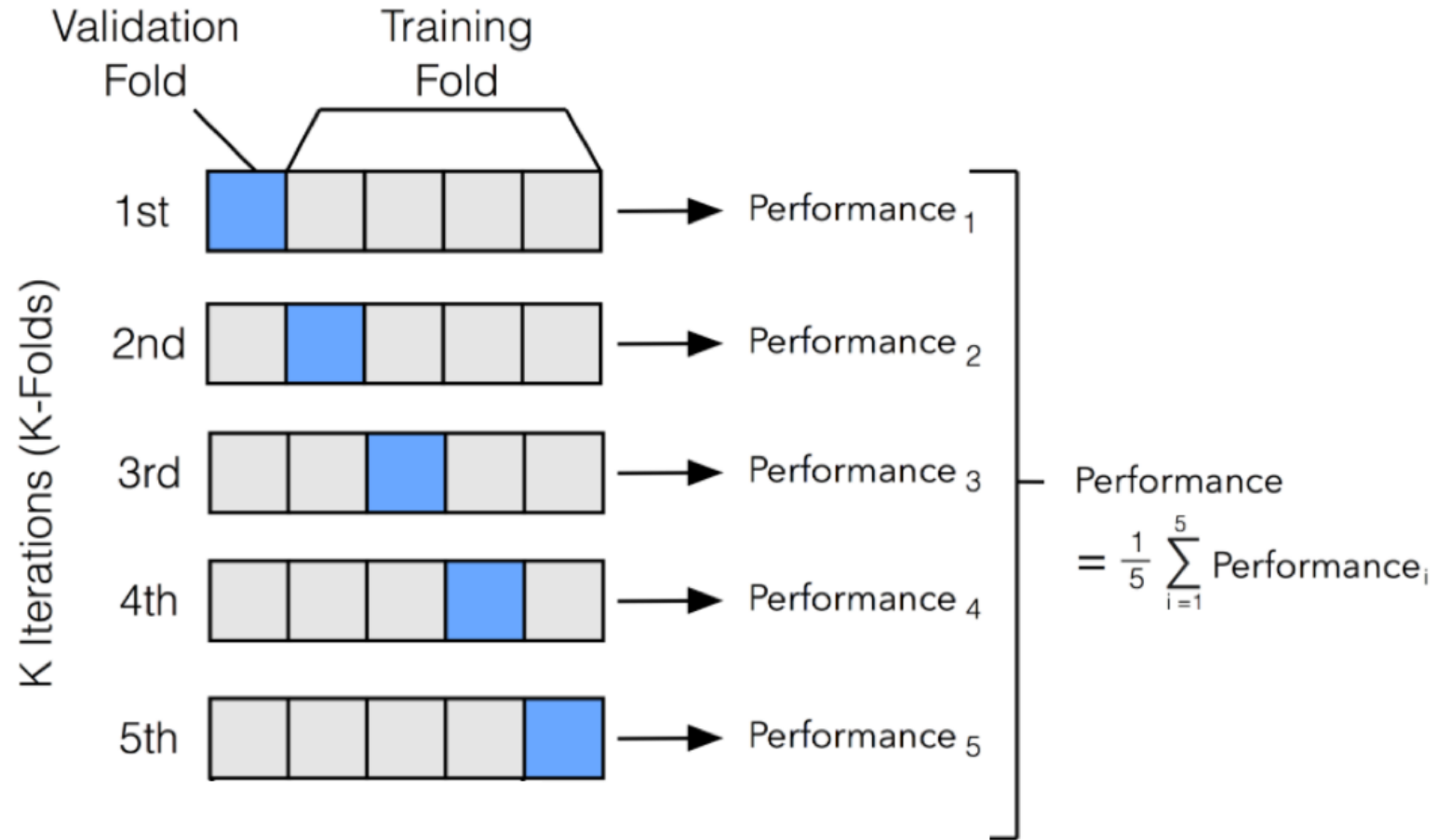


Источник: <https://datahacker.rs/018-pytorch-popular-techniques-to-prevent-the-overfitting-in-a-neural-networks/>

Регуляризация

- ▶ Линейная и логистическая регрессии
 - L_1 -регуляризация
 - L_2 -регуляризация
- ▶ KNN
 - Число соседей

K-Fold кросс-валидация



Кросс-валидация (cross-validation)

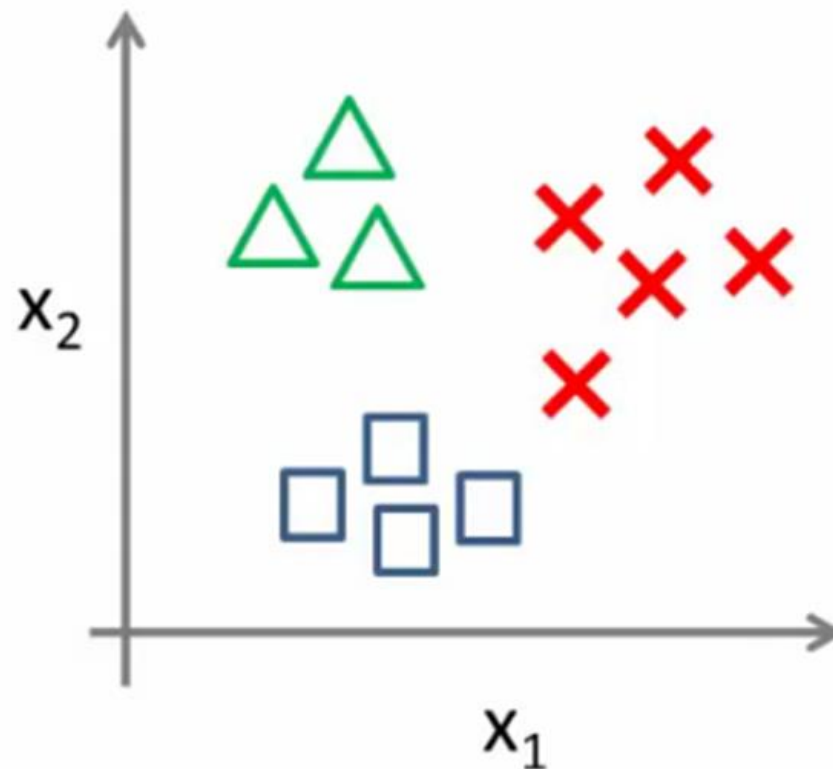
- ▶ Используется для измерения качества моделей в машинном обучении
- ▶ Отложенная выборка (train / test):
 - Делим всю выборку на две подвыборки в пропорции 70:30
 - Большая часть данных не используется для обучения (хуже качество модели)
- ▶ K-Fold кросс-валидация
 - K берем порядка 10
 - Больше данных участвует в обучении отдельной модели
 - Проверяем качество на всех данных
 - Более точная оценка качества

Многоклассовая классификация

Задача

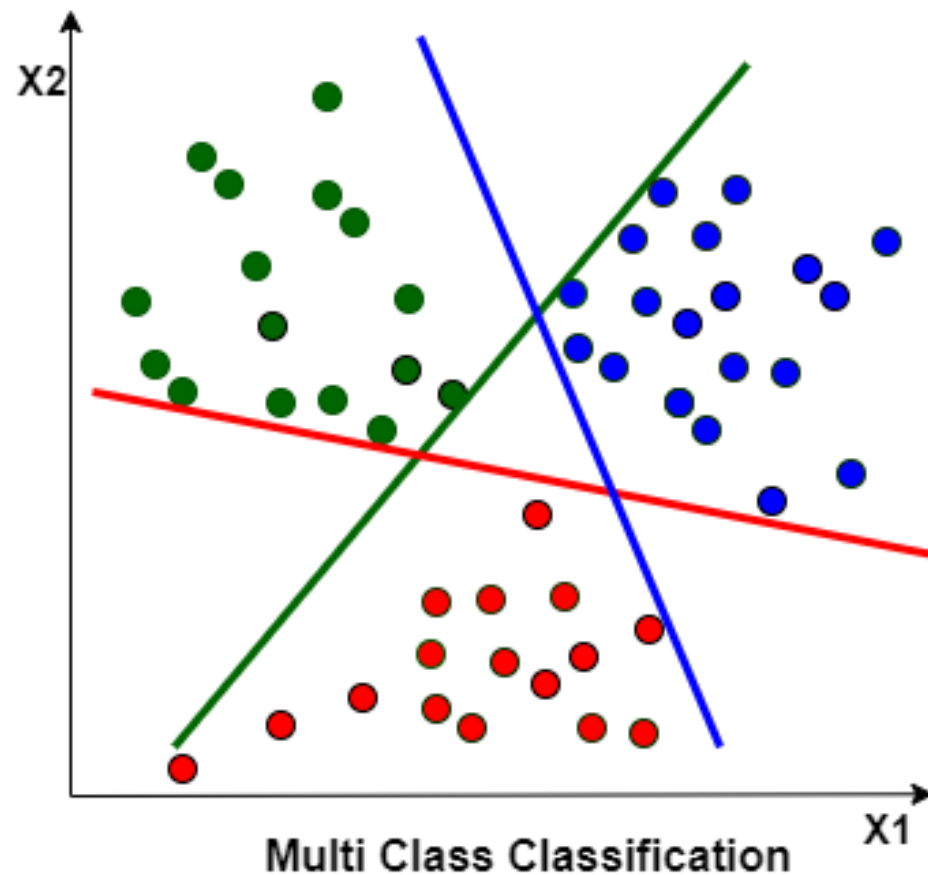
- ▶ Разделить объекты между **несколькими** классами.
- ▶ Многие классификаторы поддерживают несколько классов.
- ▶ Но не все ☹
- ▶ Как **разложить** эту задачу на несколько задач бинарной классификации?

Multi-class classification:



Один против всех (one-vs-all)

- ▶ Пусть дано **K** классов
- ▶ Для **каждого** класса обучаем свой бинарный классификатор **отделять объекты этого класса от всех остальных**
- ▶ Всего обучаем **K** таких классификаторов



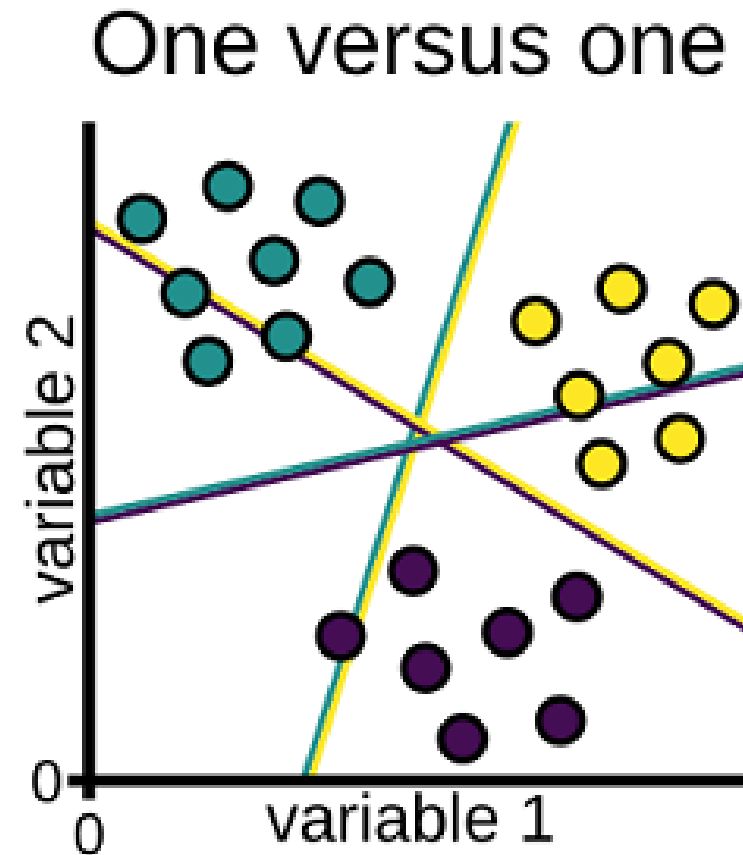
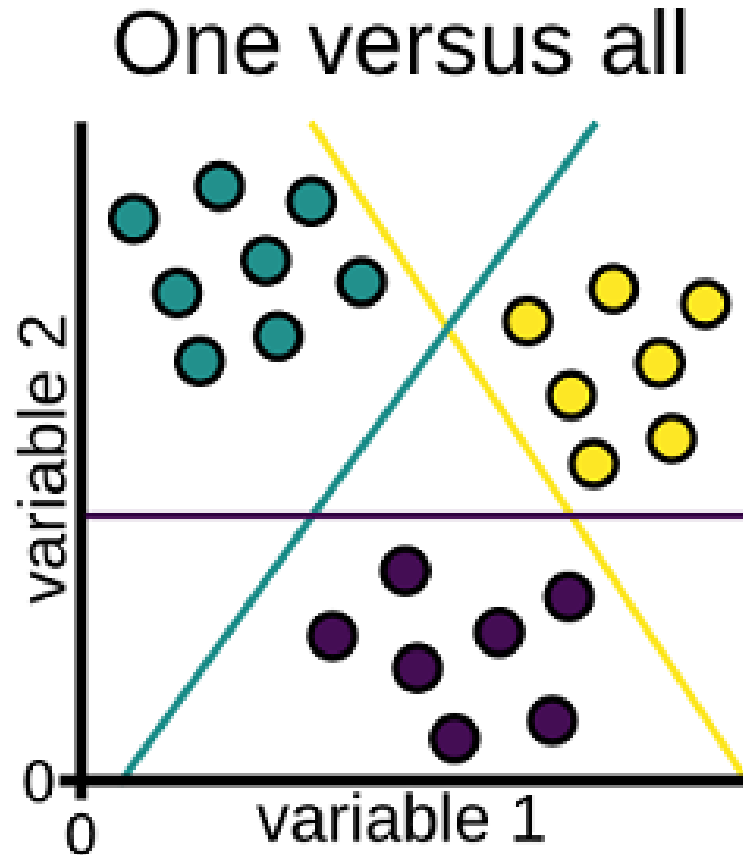
Один против всех (one-vs-all)

- ▶ Пусть есть K обученных классификаторов: $\hat{p}_1(x), \hat{p}_2(x), \dots, \hat{p}_K(x)$
- ▶ Пусть дан объект x_i , для которого делаем прогноз:
 - Получаем K прогнозов: $\hat{p}_1(x_i), \hat{p}_2(x_i), \dots, \hat{p}_K(x_i)$
 - Находим класс с максимальным прогнозом:

$$\hat{y}(x_i) = \arg \max_{k \in \{1, \dots, K\}} \hat{p}_k(x_i)$$

- Здесь $\hat{p}_k(x_i)$ – прогноз “вероятности” положительного (k -го) класса;
- $\hat{y}(x_i)$ - итоговый прогноз метки класса (одного из K)

Один против одного (one-vs-one)



Один против одного (one-vs-one)

- ▶ Для каждой пары классов i, j обучаем свой бинарный классификатор $\hat{y}_{ij}(x)$
- ▶ Пусть дан объект x_t , для которого делаем прогноз:

$$\hat{y}(x_t) = \arg \max_{k \in \{1, \dots, K\}} \sum_{i=1}^K \sum_{j \neq i} [\hat{y}_{ij}(x_t) = k]$$

- ▶ Т.е. выбираем класс, за который наберется больше всего голосов

(Дополнительно)
Логистическая регрессия
на K классов

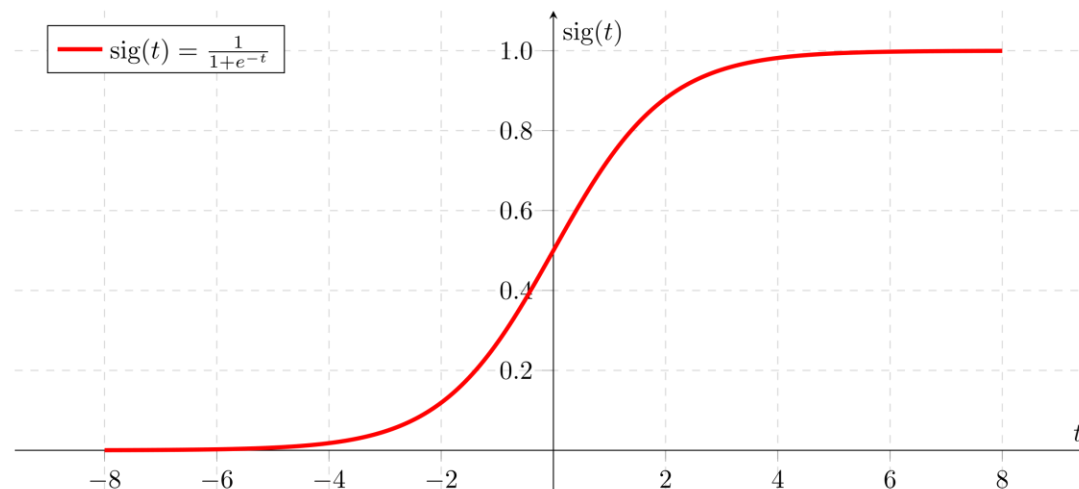
Логистическая регрессия на 2 класса

- ▶ Вероятность класса 1:

$$p(y = \mathbf{1}|x_i) = \sigma(x_i^T w) = \hat{y}_i$$

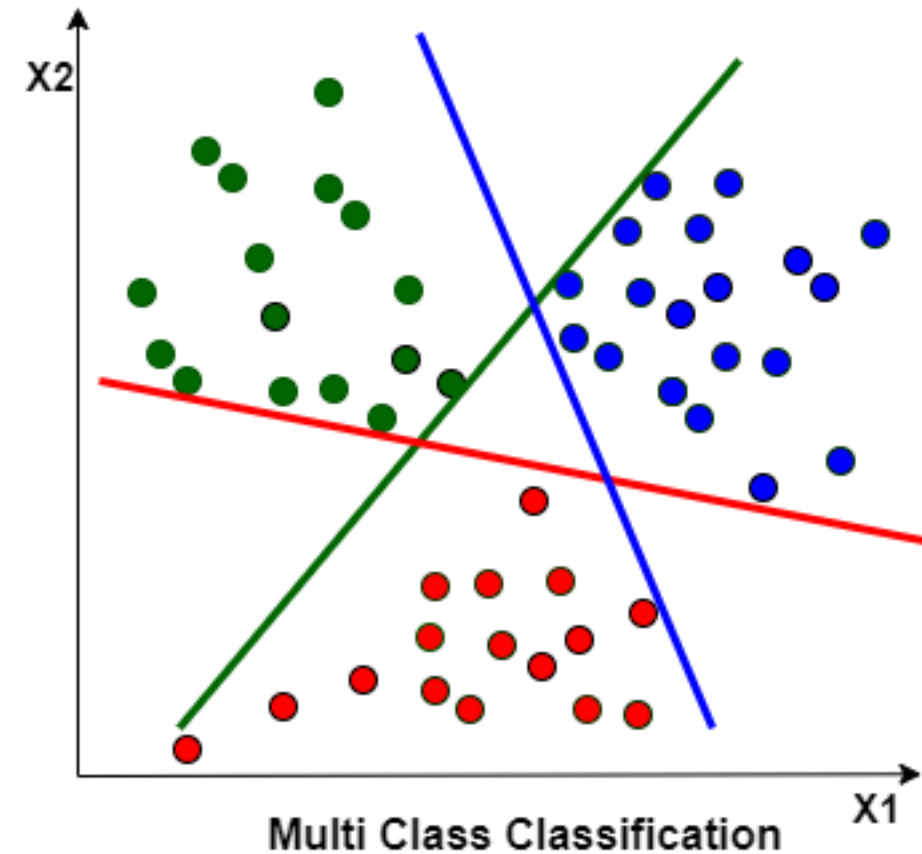
- ▶ Вероятность класса 0:

$$p(y = \mathbf{0}|x_i) = 1 - \sigma(x_i^T w)$$



Логистическая регрессия на K классов

- ▶ Строим **K** **один против всех** моделей:
 - Класс 1 против всех: $z_{i1} = x_i^T w_1$
 - Класс 2 против всех: $z_{i2} = x_i^T w_2$
 - Класс 3 против всех: $z_{i3} = x_i^T w_3$
 - Класс K против всех: $z_{iK} = x_i^T w_K$
- ▶ Получаем **K** векторов весов для обучения



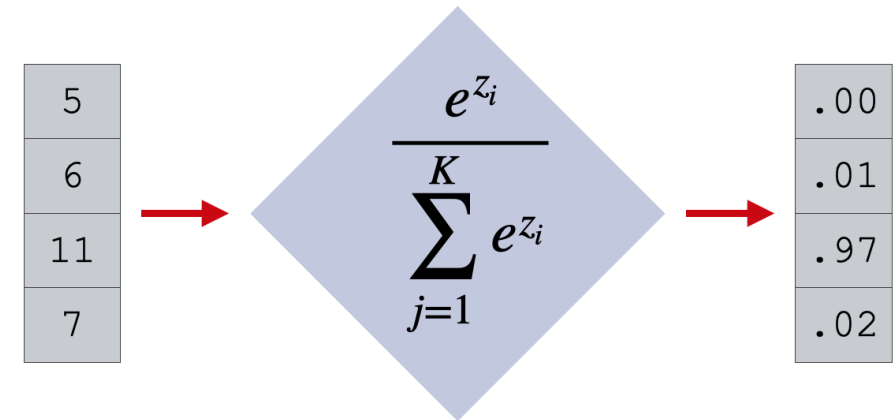
Логистическая регрессия на K классов

- SoftMax – многомерный вариант сигмоиды:

$$\hat{y}_{i1} = p(y = \mathbf{1} | x_i) = \frac{e^{z_{i1}}}{\sum_{k=1}^K e^{z_{ik}}}$$

$$\hat{y}_{i2} = p(y = \mathbf{2} | x_i) = \frac{e^{z_{i2}}}{\sum_{k=1}^K e^{z_{ik}}}$$

$$\hat{y}_{iK} = p(y = \mathbf{K} | x_i) = \frac{e^{z_{iK}}}{\sum_{k=1}^K e^{z_{ik}}}$$




Логарифм правдоподобия для K классов

- ▶ Правдоподобие:

$$\text{Likelihood} = - \prod_{i=1}^n p(y = 1|x_i)^{[y_i=1]} p(y = 2|x_i)^{[y_i=2]} \dots p(y = K|x_i)^{[y_i=k]}$$

- ▶ Логарифм правдоподобия (функция потерь):

$$L = - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K [y_i = k] \log(\hat{y}_{ik}) \rightarrow \min_{w_1, \dots, w_K}$$

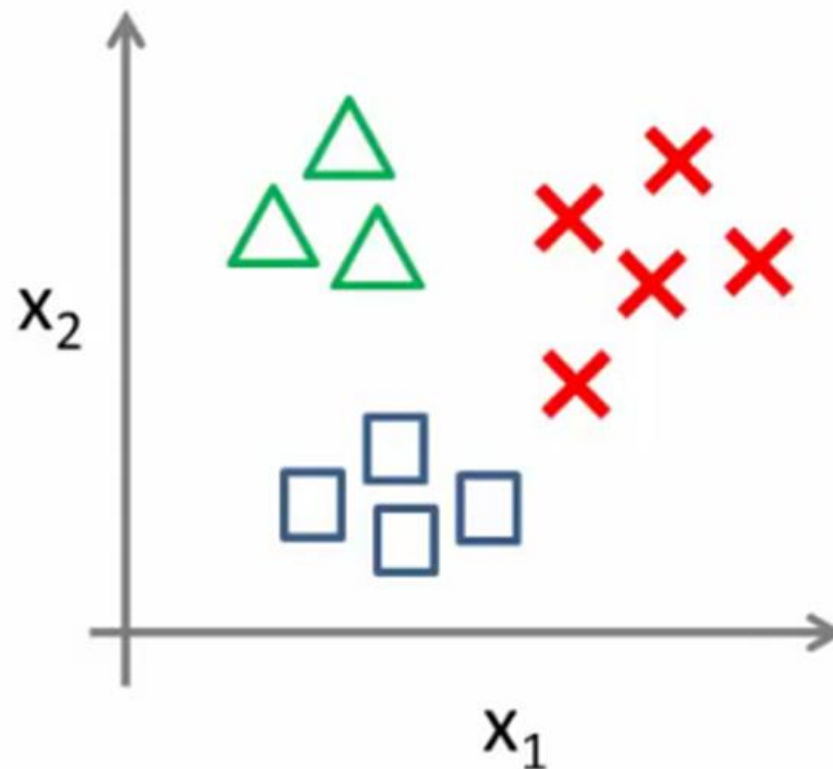
The background is a vibrant, abstract composition. It features several large, organic shapes in shades of purple, olive green, and teal. These shapes are decorated with various patterns: some have a fine dot pattern, others have wavy lines, and one has a cross-hatch pattern. There are also smaller, solid-colored shapes and scattered wavy lines in white and black. The overall style is modern and artistic.

Метрики качества для мультикласса

Задача

- ▶ Мы знаем как считать метрики для **двух** классов.
- ▶ Что делать в случае K классов?

Multi-class classification:



Микро-усреднение

- ▶ Пусть дано K классов
- ▶ Рассмотрим K один против всех задач
- ▶ Для каждой задачи считаем TP_k, FP_k, FN_k, TN_k
- ▶ Усредняем эти характеристики по всем классам:

$$\overline{TP} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K TP_k$$

- ▶ Используем их для подсчета метрик качества:

$$Precision = \frac{\overline{TP}}{\overline{TP} + \overline{FP}}$$

Макро-усреднение

- ▶ Пусть дано K классов
- ▶ Рассмотрим K один против всех задач
- ▶ Для каждой задачи считаем TP_k, FP_k, FN_k, TN_k
- ▶ Используем их для подсчета метрик качества:

$$Precision_k = \frac{TP_k}{TP_k + FP_k}$$

- ▶ Усредняем эти метрики качества по всем классам:

$$\overline{Precision} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K Precision_k$$












Пересекающиеся классы

Классификация с пересекающимися классами

Multi-Class

Multi-Label

C = 3	Samples			Samples		
  						
	Labels (t)			Labels (t)		
	[0 0 1]	[1 0 0]	[0 1 0]	[1 0 1]	[0 1 0]	[1 1 1]

Независимая классификация (one-vs-all)

- ▶ Пусть есть K обученных классификаторов: $\hat{p}_1(x), \hat{p}_2(x), \dots, \hat{p}_K(x)$
- ▶ Пусть дан объект x_i , для которого делаем прогноз:
 - Получаем K прогнозов: $\hat{p}_1(x_i), \hat{p}_2(x_i), \dots, \hat{p}_K(x_i)$
 - Тогда вектор прогнозов:

$$\hat{y}(x_i) = \begin{pmatrix} [\hat{p}_1(x_i) > \tau] \\ [\hat{p}_2(x_i) > \tau] \\ \dots \\ [\hat{p}_K(x_i) > \tau] \end{pmatrix}$$

- Можно взять порог $\tau = 0.5$
- Здесь $\hat{p}_k(x_i)$ – прогноз “вероятности” положительного (k -го) класса;
- $\hat{y}(x_i)$ - итоговый прогноз метки класса (несколько из K)

Независимая классификация

- ▶ Самое простое решение задачи **multi-label classification**
- ▶ Не учитывает связи между классами

Заключение



Вопросы

- ▶ Что такое точность, полнота и F-мера?
- ▶ Что такое AUC-ROC? Опишите алгоритм построения ROC-кривой.
- ▶ В чем состоят преимущества и недостатки использования метрик Mean squared error (MSE) и Mean absolute error (MAE) в задаче регрессии? Запишите формулу метрики Mean absolute percentage error (MAPE).
- ▶ Что такое переобучение и недообучение? Как отличить переобучение от недообучения?
- ▶ Что такое кросс-валидация и для чего она используется? Чем применение кросс-валидации лучше, чем разбиение выборки на обучение и контроль?
- ▶ В чём заключается подход с независимой классификацией в задаче классификации с пересекающимися классами (multilabel classification)?
- ▶ Что такое микро- и макро-усреднение при оценивании качества многоклассовой классификации?