# Машинное обучение в гидрометеорологии

Михаил Криницкий
krinitsky.ma@phystech.edu

к.т.н.
Зав. лабораторией машинного обучения в науках о Земле МФТИ
с.н.с. Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова

# ОБЩАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБУЧЕНИЯ С УЧИТЕЛЕМ

## обучаем (тренируем) модель **на имеющихся данных**

### «Обучение»

**Объекты**

**признаки**

**объекты**

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -0.0685 | -0.0676 | -0.0643 | -0.0617 | -0.0550 | -0.0488 | -0.0365 |
| 2 | -0.0706 | -0.0726 | -0.0633 | -0.0579 | -0.0490 | -0.0390 | -0.0267 |
| 3 | -0.0691 | -0.0766 | -0.0676 | -0.0589 | -0.0484 | -0.0350 | -0.0172 |
| 4 | -0.0631 | -0.0719 | -0.0662 | -0.0557 | -0.0441 | -0.0317 | -0.0144 |
| 5 | -0.0500 | -0.0634 | -0.0603 | -0.0502 | -0.0384 | -0.0263 | -0.0115 |
| 6 | -0.0377 | -0.0491 | -0.0449 | -0.0352 | -0.0214 | -0.0062 | 0.0056 |
| 7 | -0.0375 | -0.0319 | -0.0235 | -0.0133 | 0.0012 | 0.0169 | 0.0282 |
| 8 | -0.0540 | -0.0310 | -0.0169 | 6.9177e-... | 0.0181 | 0.0339 | 0.0445 |
| 9 | -0.0725 | -0.0550 | -0.0158 | 0.0145 | 0.0323 | 0.0501 | 0.0641 |
| 10 | -0.0789 | -0.0844 | -0.0512 | -0.0010 | 0.0387 | 0.0612 | 0.0810 |
| 11 | -0.0803 | -0.0965 | -0.0789 | -0.0543 | -0.0036 | 0.0405 | 0.0685 |
| 12 | -0.0995 | -0.1248 | -0.1134 | -0.0950 | -0.0699 | -0.0281 | 0.0261 |
| 13 | -0.1026 | -0.1306 | -0.1283 | -0.1171 | -0.0982 | -0.0806 | -0.0412 |
| 14 | -0.0977 | -0.1284 | -0.1301 | -0.1188 | -0.1054 | -0.0932 | -0.0677 |
| 15 | -0.0840 | -0.1133 | -0.1138 | -0.1040 | -0.0895 | -0.0750 | -0.0511 |
| 16 | -0.0820 | -0.1089 | -0.1072 | -0.0967 | -0.0814 | -0.0669 | -0.0464 |
| 17 | -0.0655 | -0.0685 | -0.0617 | -0.0595 | -0.0549 | -0.0499 | -0.0396 |

**Целевая переменная**

| | 1 |
|---|---|
| 1 | -0.0685 |
| 2 | -0.0706 |
| 3 | -0.0691 |
| 4 | -0.0631 |
| 5 | -0.0500 |
| 6 | -0.0377 |
| 7 | -0.0375 |
| 8 | -0.0540 |
| 9 | -0.0725 |
| 10 | -0.0789 |
| 11 | -0.0803 |
| 12 | -0.0995 |
| 13 | -0.1026 |
| 14 | -0.0977 |
| 15 | -0.0840 |
| 16 | -0.0820 |
| 17 | -0.0655 |

**Модель - метод, структура, значения параметров**

$$\hat{y}_i = f(\vec{p}, x_i)$$

**Настройка параметров модели**

**НАСТРОЕННАЯ МОДЕЛЬ**

### Режим использования

**новые объекты**

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -0.0685 | -0.0676 | -0.0643 | -0.0617 | -0.0550 | -0.0488 | -0.0365 | -0.0235 | -0.0133 |
| 2 | -0.0706 | -0.0726 | -0.0633 | -0.0579 | -0.0490 | -0.0390 | -0.0267 | -0.0136 | -0.0044 |
| 3 | -0.0691 | -0.0766 | -0.0676 | -0.0589 | -0.0484 | -0.0350 | -0.0172 | -0.0038 | 0.0054 |
| 4 | -0.0631 | -0.0719 | -0.0662 | -0.0557 | -0.0441 | -0.0317 | -0.0144 | -0.0022 | 0.0084 |
| 5 | -0.0500 | -0.0634 | -0.0603 | -0.0502 | -0.0384 | -0.0263 | -0.0115 | 0.0020 | 0.0152 |
| 6 | -0.0377 | -0.0491 | -0.0449 | -0.0352 | -0.0214 | -0.0062 | 0.0056 | 0.0145 | 0.0238 |
| 7 | -0.0375 | -0.0319 | -0.0235 | -0.0133 | 0.0012 | 0.0169 | 0.0282 | 0.0355 | 0.0403 |

**НАСТРОЕННАЯ МОДЕЛЬ**

**Результат:
значения целевой
переменной**

# Пару слов о признаковом описании

…
Вечор, ты помнишь, вьюга злилась,
На мутном небе мгла носилась;
Луна, как бледное пятно,
Сквозь тучи мрачные желтела,
И ты печальная сидела —
А нынче... погляди в окно:

Под голубыми небесами
Великолепными коврами,
Блестя на солнце, снег лежит;
Прозрачный лес один чернеет,
И ель сквозь иней зеленеет,
И речка подо льдом блестит.
…

А.С. Пушкин, «Зимнее утро»

…
Буря мглою небо кроет,
Вихри снежные крутя;
То, как зверь, она завоет,
То заплачет, как дитя.
Выпьем, добрая подружка
Бедной юности моей,
Выпьем с горя; где же кружка?
Сердцу будет веселей.

А.С. Пушкин, «Зимний вечер»

…
Было так: Нева, как зверь, стонала,
Серые ломая гребешки,
Колыхались барки у причала,
И царапал стынущие щеки
Острый дождь, ложась, как плащ широкий,
Над гранитным логовом реки.
…

В. Рождественский, «Октябрьская погода»

# О признаковом описании событий (объектов) в геофизике

…
Вечор, ты помнишь, вьюга злилась,
На мутном небе мгла носилась;
Луна, как бледное пятно,
Сквозь тучи мрачные желтела,
И ты печальная сидела —
А нынче... погляди в окно:

Под голубыми небесами
Великолепными коврами,
Блестя на солнце, снег лежит;
Прозрачный лес один чернеет,
И ель сквозь иней зеленеет,
И речка подо льдом блестит.
…

А.С. Пушкин, «Зимнее утро»

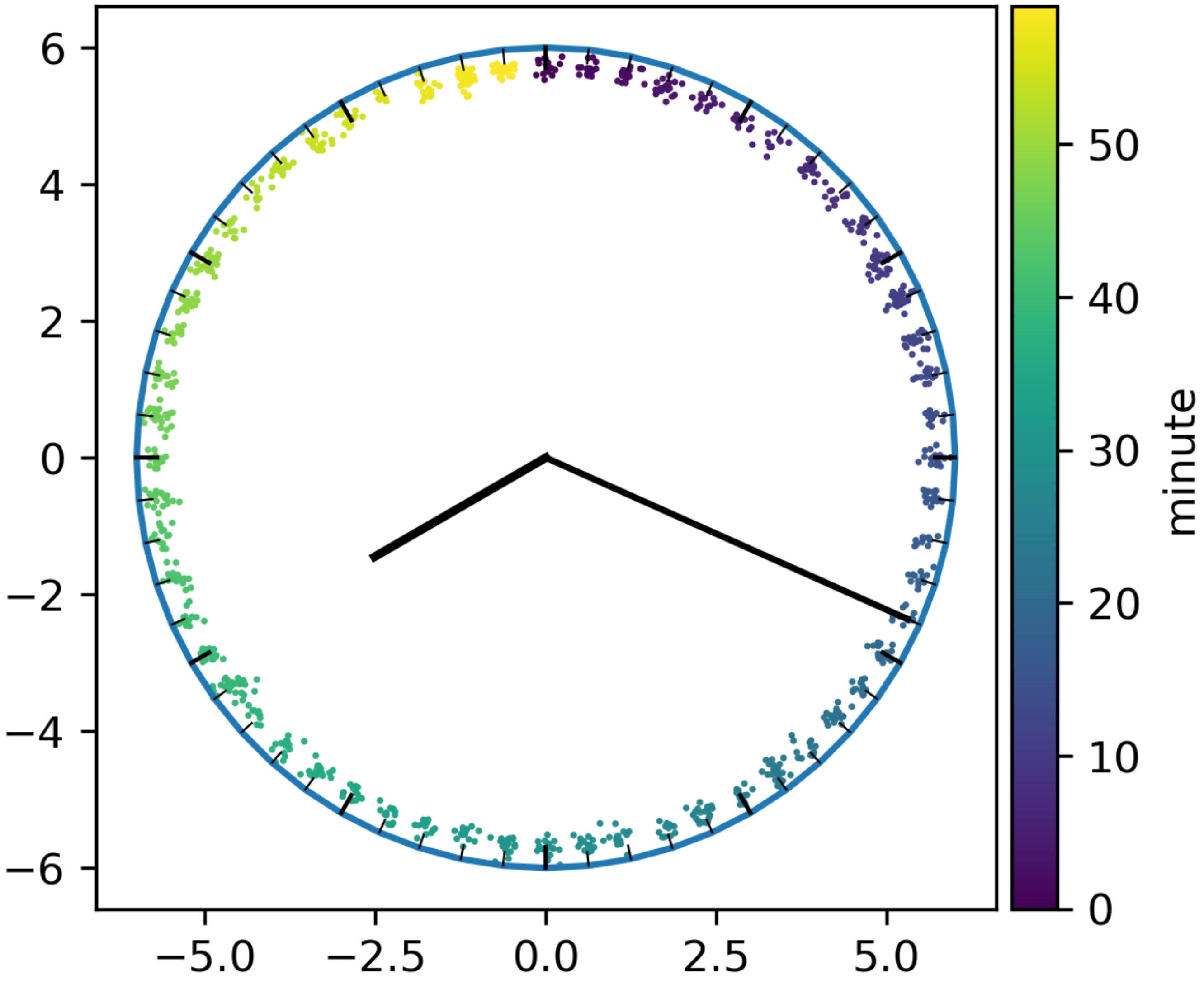
…
Буря мглою небо кроет,
Вихри снежные крутя;
То, как зверь, она завоет,
То заплачет, как дитя.
Выпьем, добрая подружка
Бедной юности моей,
Выпьем с горя; где же кружка?
Сердцу будет веселей.

А.С. Пушкин, «Зимний вечер»

…
Было так: Нева, как зверь, стонала,
Серые ломая гребешки,
Колыхались барки у причала,
И царапал стынущие щеки
Острый дождь, ложась, как плащ широкий,
Над гранитным логовом реки.
…

В. Рождественский, «Октябрьская погода»

# Решение задачи восстановления регрессии: ПРИМЕР

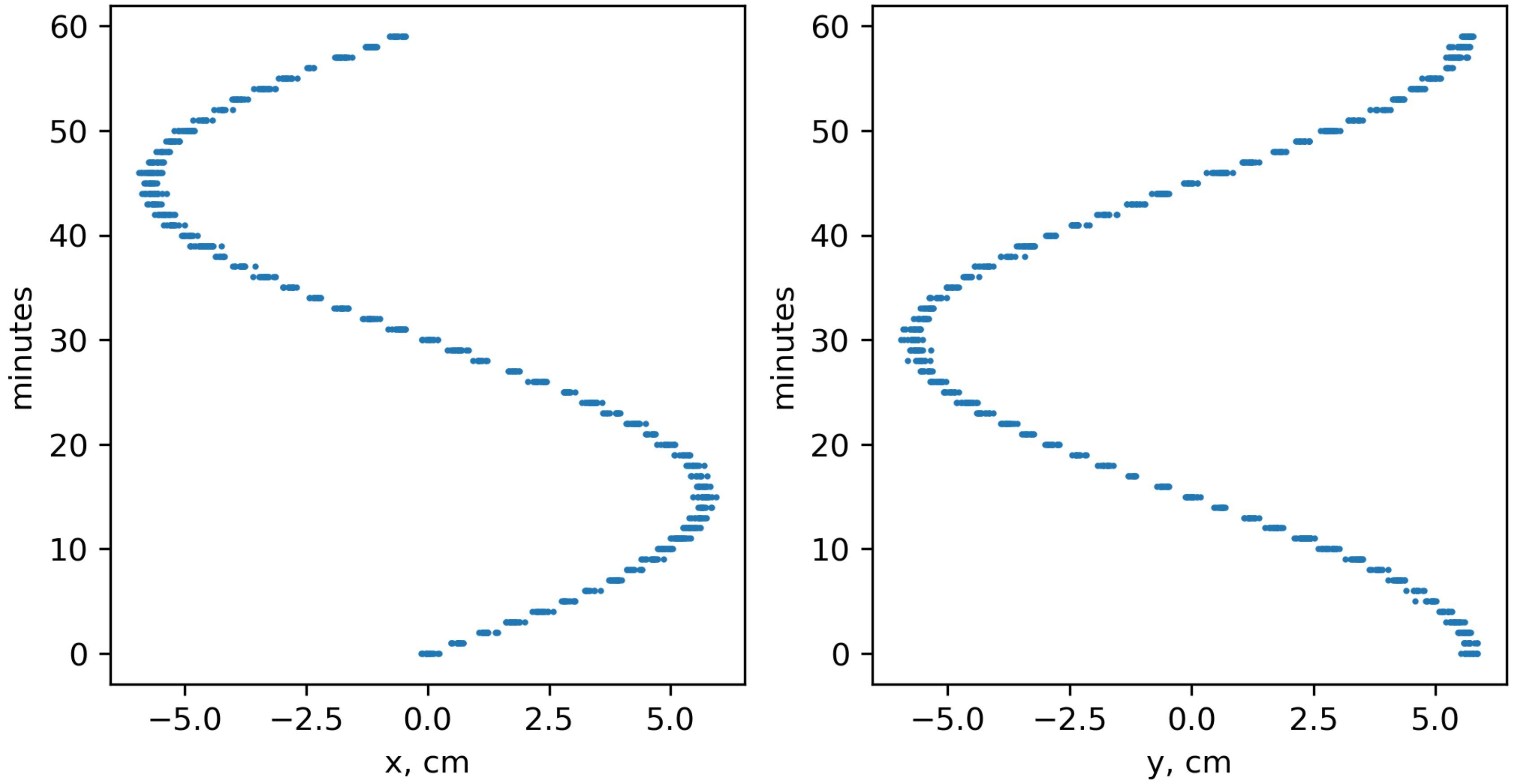



Синтетическая задача, “toy problem”

События $x_i$: наблюдения циферблата часов
Признаковое описание событий $\overrightarrow{x_i}$: координаты конца минутной стрелки
Целевая переменная $m_i$: минутная компонента времени

# Решение задачи восстановления регрессии: ПРИМЕР

Исследование данных: визуализация, поиск структуры



# Решение задачи восстановления регрессии: ПРИМЕР

Построение и настройка модели

Возьмем очень слабую модель

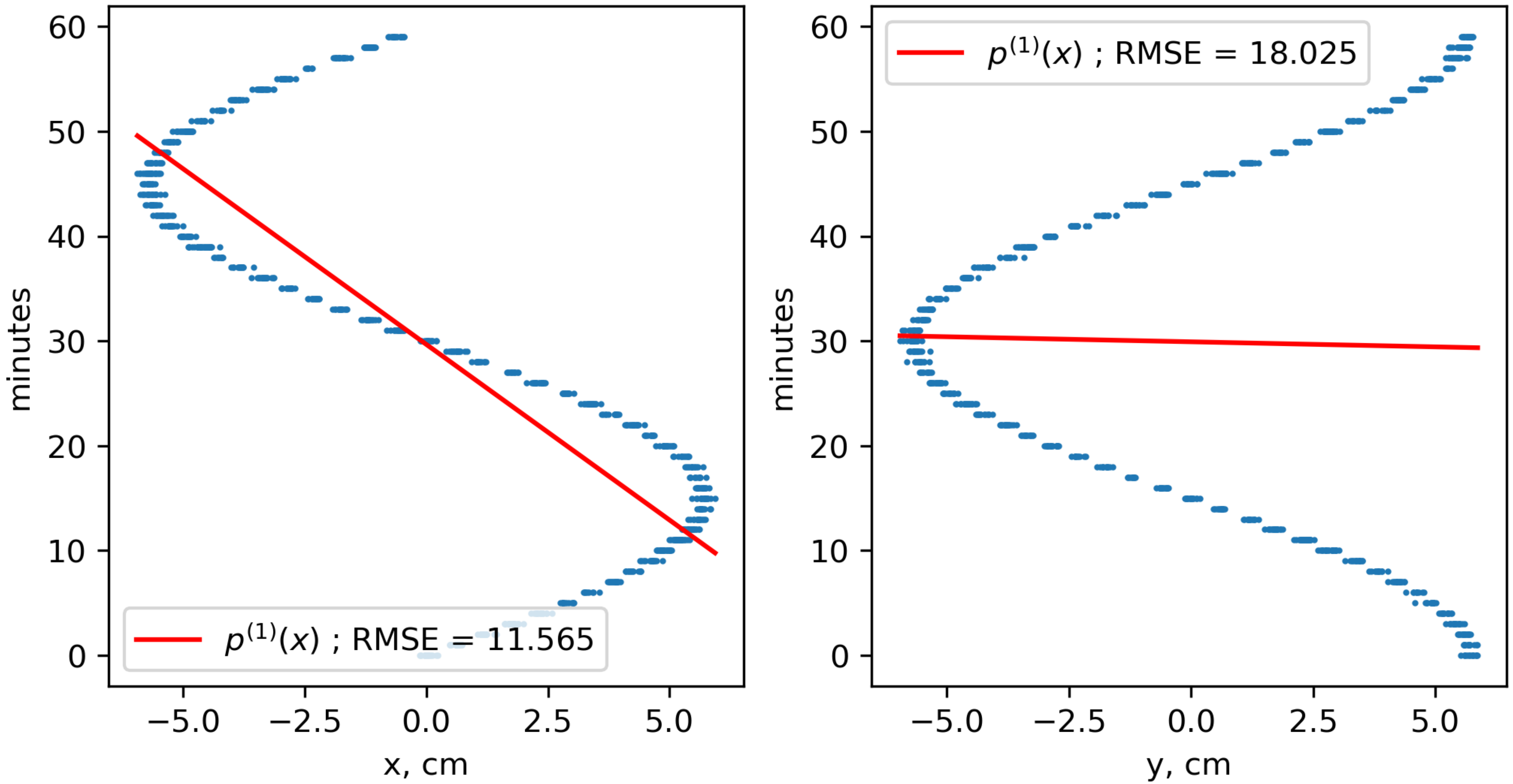
Модель в задаче восстановления регрессии: $\widehat{\boldsymbol{m}}_i = \boldsymbol{f}(\vec{\boldsymbol{p}}, \boldsymbol{x}_i) = \boldsymbol{k}\boldsymbol{x}_i + \boldsymbol{b}$

**Функция потерь:** $\mathcal{L}(\vec{\boldsymbol{p}}, \{\boldsymbol{x}_i\}, \{\boldsymbol{m}_i\}) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{f}(\vec{\boldsymbol{p}}, \boldsymbol{x}_i) - \boldsymbol{m}_i)^2$

**Решение (оценка параметров $\vec{\boldsymbol{p}}$):** $\overrightarrow{p^*} = \underset{\mathbb{P}}{\operatorname{argmin}}(\mathcal{L}(\vec{\boldsymbol{p}}, \{\boldsymbol{x}_i\}, \{\boldsymbol{m}_i\}))$

# Решение задачи восстановления регрессии: ПРИМЕР

Результаты модели



# Решение задачи восстановления регрессии: ПРИМЕР

Построение и настройка модели

Возьмем модель посильнее

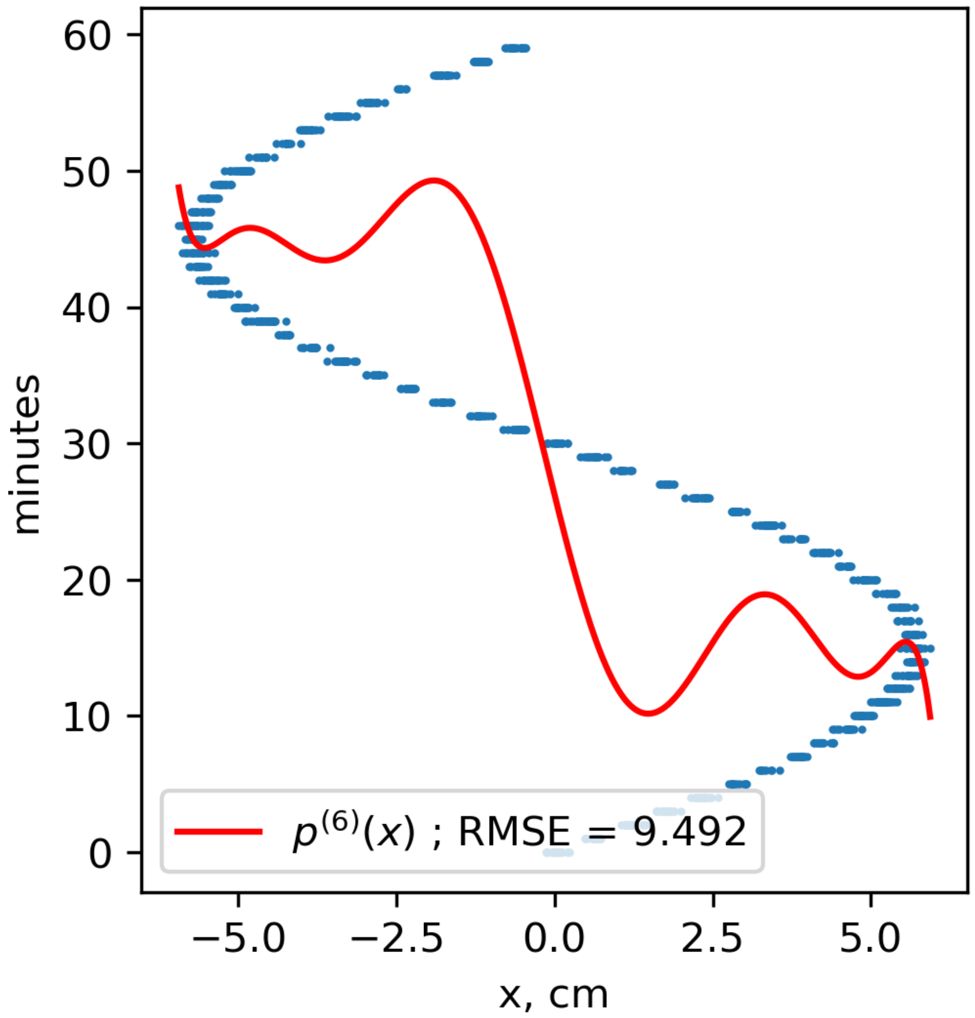
Модель в <u>задаче восстановления регрессии</u>: $\hat{\boldsymbol{m}}_i = \boldsymbol{f}(\vec{\boldsymbol{p}}, \boldsymbol{x}_i) = \boldsymbol{poly}^{(6)}(\boldsymbol{x}_i)$

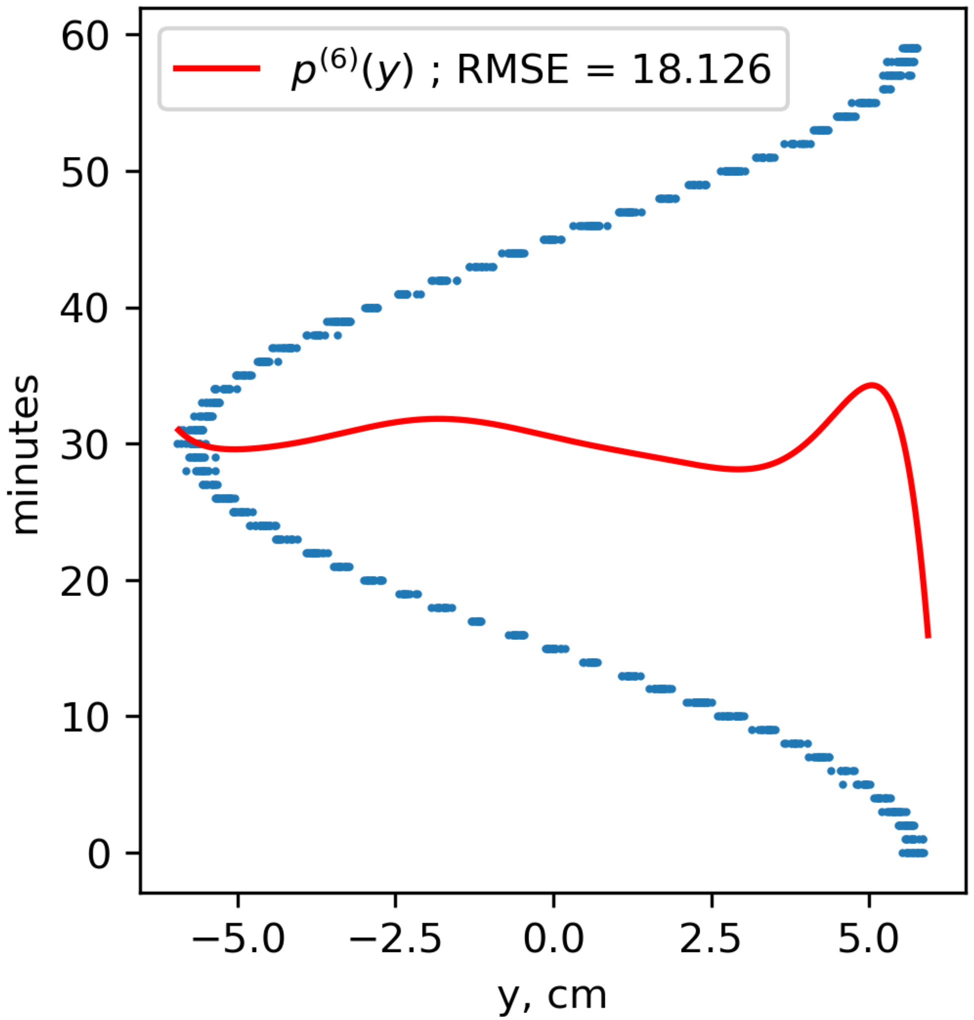
**Функция потерь:** $\mathcal{L}(\vec{\boldsymbol{p}}, \{\boldsymbol{x}_i\}, \{\boldsymbol{m}_i\}) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{f}(\vec{\boldsymbol{p}}, \boldsymbol{x}_i) - \boldsymbol{m}_i)^2$

**Решение (оценка параметров $\vec{\boldsymbol{p}}$):** $\overrightarrow{p^*} = \underset{\mathbb{P}}{\operatorname{argmin}}(\mathcal{L}(\vec{\boldsymbol{p}}, \{\boldsymbol{x}_i\}, \{\boldsymbol{m}_i\}))$

# Решение задачи восстановления регрессии: ПРИМЕР

Результаты модели



# Решение задачи восстановления регрессии: ПРИМЕР

Построение и настройка модели

Возьмем нейросеть

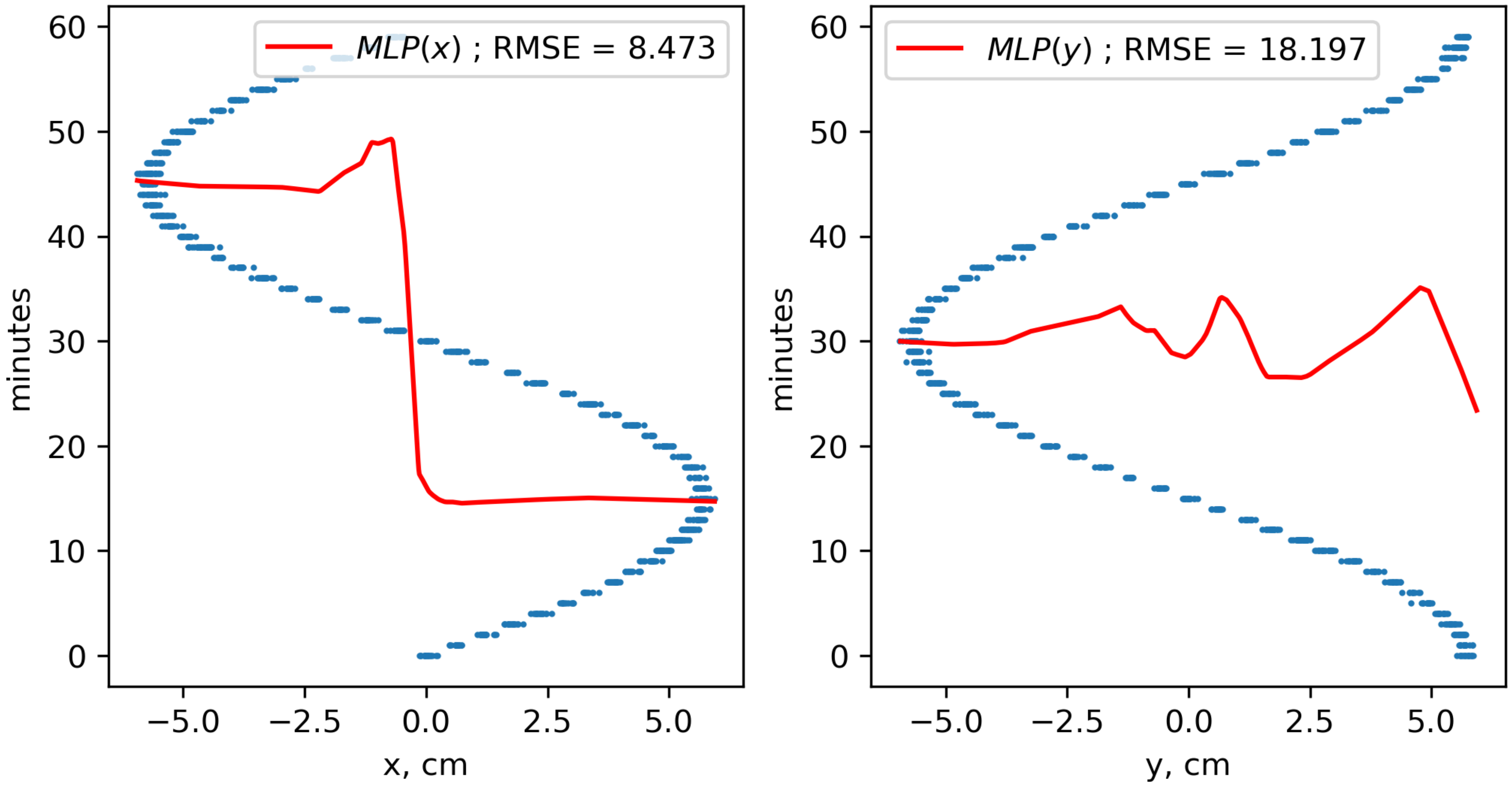
$$\hat{\boldsymbol{m}}_i = \boldsymbol{MLP}(\vec{\boldsymbol{p}}, \boldsymbol{x}_i)$$

$$\mathcal{L}(\vec{\boldsymbol{p}}, \{\boldsymbol{x}_i\}, \{\boldsymbol{m}_i\}) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{MLP}(\vec{\boldsymbol{p}}, \boldsymbol{x}_i) - \boldsymbol{m}_i)^2$$

$$\overrightarrow{p^*} = \underset{\mathbb{P}}{\operatorname{argmin}}(\mathcal{L}(\vec{\boldsymbol{p}}, \{\boldsymbol{x}_i\}, \{\boldsymbol{m}_i\}))$$

# Решение задачи восстановления регрессии: ПРИМЕР

Результаты модели



# Решение задачи восстановления регрессии: ПРИМЕР

## ЧТО ЖЕ ДЕЛАТЬ?

что-то не так с постановкой задачи? (не тот тип задачи? не та целевая переменная?)

что-то не так с признаковым описанием событий? (нерелевантное? неполное? шумное?)

что-то не так с разметкой? (шумная? некорректная? много? мало?)

что-то не так с моделью? (слишком простая? слишком сложная? не подходит для этой задачи?)

что-то не так с программным кодом?

что-то не так с исследователем?

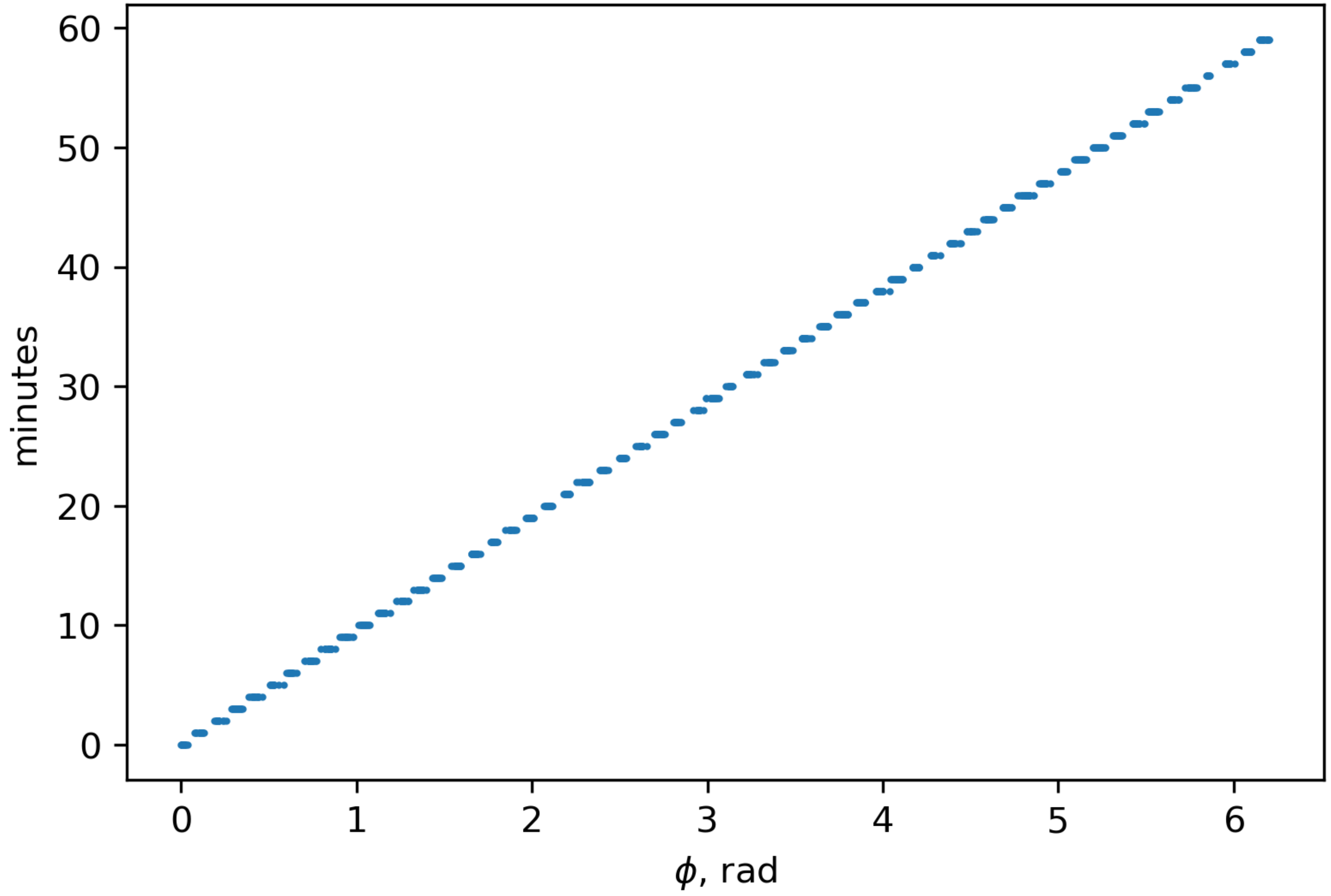
**МОЖЕТ, ПРОСТО НЕТ ЗАКОНОМЕРНОСТИ?**

# Решение задачи восстановления регрессии: ПРИМЕР

## изобретать (более информативные) признаки

Новое признаковое описание событий: $\vec{x_i}$ - угол отклонения минутной стрелки

$$x_i = \phi = \begin{cases} \arccos\left(\dfrac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}\right), \text{если } x \geq 0 \\ 2\pi - \arccos\left(\dfrac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}\right), \text{если } x < 0 \end{cases}$$



# Решение задачи восстановления регрессии: ПРИМЕР

Построение и настройка модели

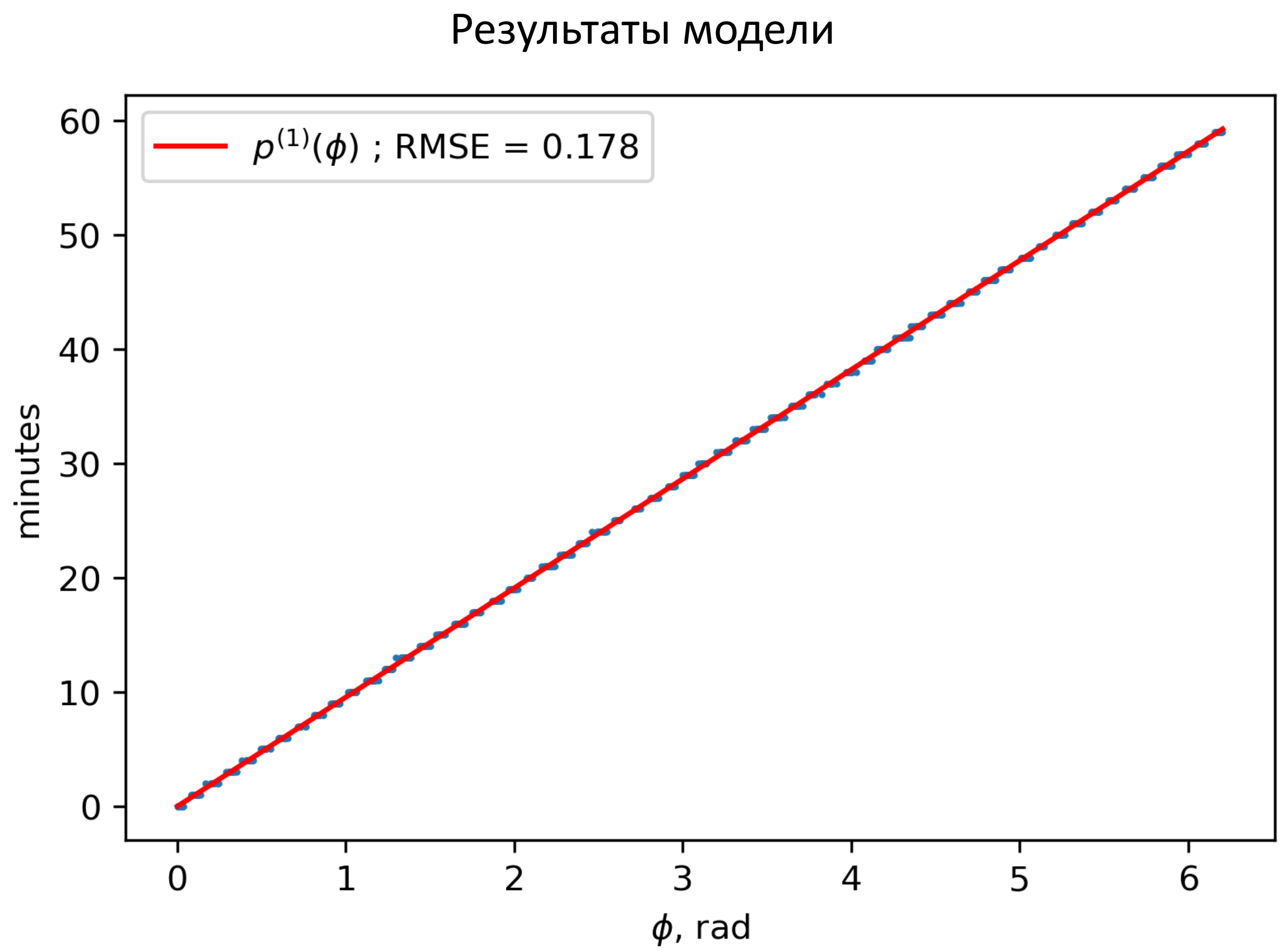
Возьмем очень слабую модель

Модель в задаче восстановления регрессии: $\widehat{\boldsymbol{m}}_i = \boldsymbol{f}(\vec{\boldsymbol{p}}, \boldsymbol{\phi}_i) = \boldsymbol{k}\boldsymbol{\phi}_i + \boldsymbol{b}$

**Функция потерь:** $\mathcal{L}(\vec{\boldsymbol{p}}, \{\boldsymbol{\phi}_i\}, \{\boldsymbol{m}_i\}) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{f}(\vec{\boldsymbol{p}}, \boldsymbol{\phi}_i) - \boldsymbol{m}_i)^2$

**Решение (оценка параметров $\vec{\boldsymbol{p}}$):** $\overrightarrow{p^*} = \underset{\mathbb{P}}{\operatorname{argmin}}(\mathcal{L}(\vec{\boldsymbol{p}}, \{\boldsymbol{\phi}_i\}, \{\boldsymbol{m}_i\}))$

# Решение задачи восстановления регрессии: ПРИМЕР



# Решение задачи восстановления регрессии: ПРИМЕР

## использовать (более) полную информацию о событиях

Новое признаковое описание событий: $\vec{\boldsymbol{x}_i}$ - **обе** координаты $x, y$ конца минутной стрелки

Возьмем нейросеть

$$\widehat{\boldsymbol{m}}_i = \boldsymbol{MLP}(\vec{\boldsymbol{p}}, \vec{\boldsymbol{x}_i})$$

$$\mathcal{L}(\vec{\boldsymbol{p}}, \{\vec{\boldsymbol{x}_i}\}, \{\boldsymbol{m}_i\}) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{MLP}(\vec{\boldsymbol{p}}, \vec{\boldsymbol{x}_i}) - \boldsymbol{m}_i)^2$$

$$\overrightarrow{p^*} = \underset{\mathbb{P}}{\operatorname{argmin}}(\mathcal{L}(\vec{\boldsymbol{p}}, \{\vec{\boldsymbol{x}_i}\}, \{\boldsymbol{m}_i\}))$$

Качество модели: $RMSE = 0.28m$