Введение в дисциплину «Анализ и прогнозирование временных рядов методами искусственного интеллекта»*

Невольно изречешь: **o tempora, o mores! —**

Когда поразглядишь, какая в жизни горесть.

Н.А. Некрасов

* При подготовке слайдов лекций курса использованы материалы статей и докладов профессора Имонна Кеога, Калифорнийский университет в Риверсайде, США (Eamonn Keogh, University of California Riverside, USA), см. https://www.cs.ucr.edu/~eamonn/

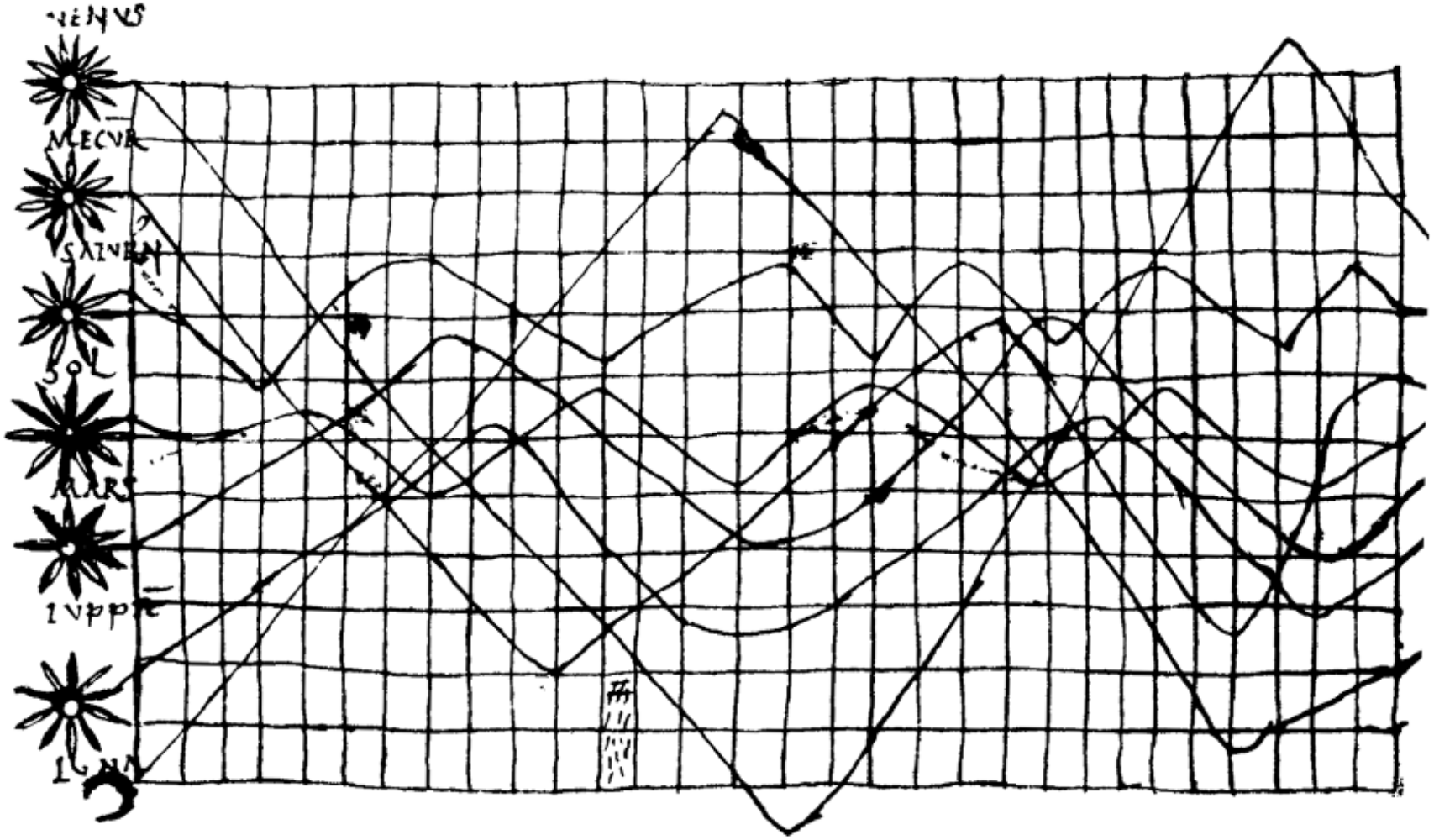
Содержание

- Временн*ы*е ряды в различных предметных областях
- Определения и нотация
- Основные задачи анализа временных рядов

Люди измеряют всевозможные вещи, изменяющиеся во времени

- ЭКГ, пульс, давление, калории
- Рождаемость
- Температура и влажность воздуха
- Расход электричества и воды
- Рейтинг популярности политиков
- Спортивная статистика
- Клики веб-страниц
- Курсы валют и акций
- ВВП и госдолг

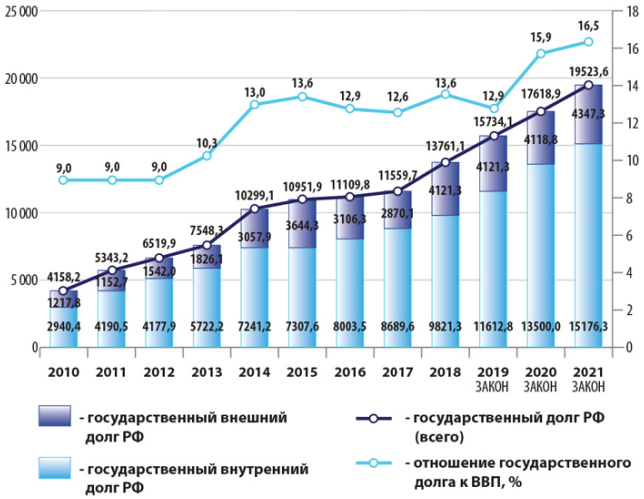
Временн*ы*е ряды всегда…



Временные ряды, показывающие наклоны планетных орбит, X в. (возможно, **наиболее старое изображение временных рядов**)

Tufte E. The Visual Display of Quantitative Information. Graphics Press, 2001. 200 p.

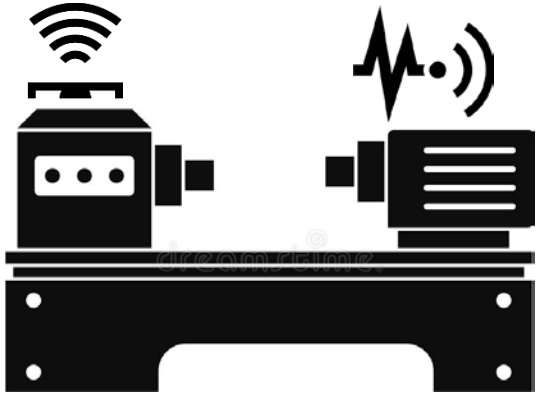
Временны*е* ряды везде…



Случайная выборка из 4000 изображений в 15 газетах из различных стран за 1974–1989 гг.: **более 75% изображений – это временные ряды**

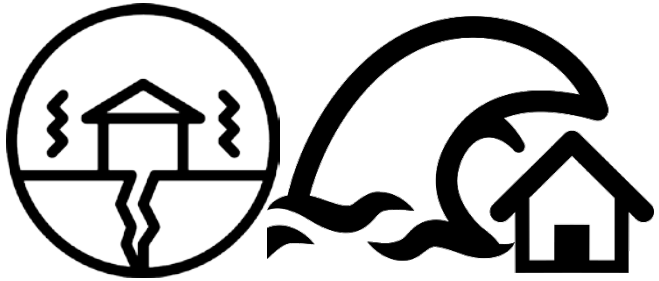
Tufte E. The Visual Display of Quantitative Information. Graphics Press, 2001. 200 p.

Временны*е* ряды всюду…

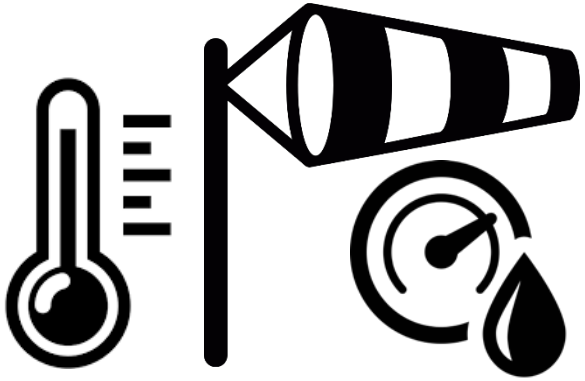


Умное производство, предиктивное ТО

Интернет вещей

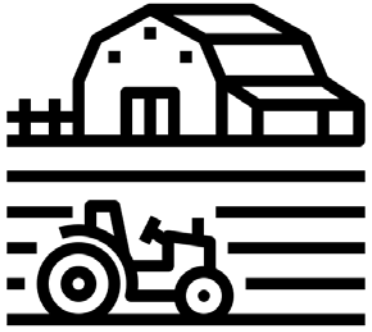


Предсказание природных катаклизмов



Прогноз погоды, моделирование климата

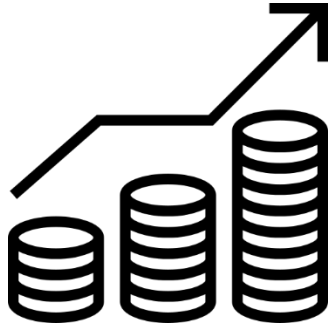
Персональная медицина



Сельское хоз-во, животноводство

Борьба с преступностью

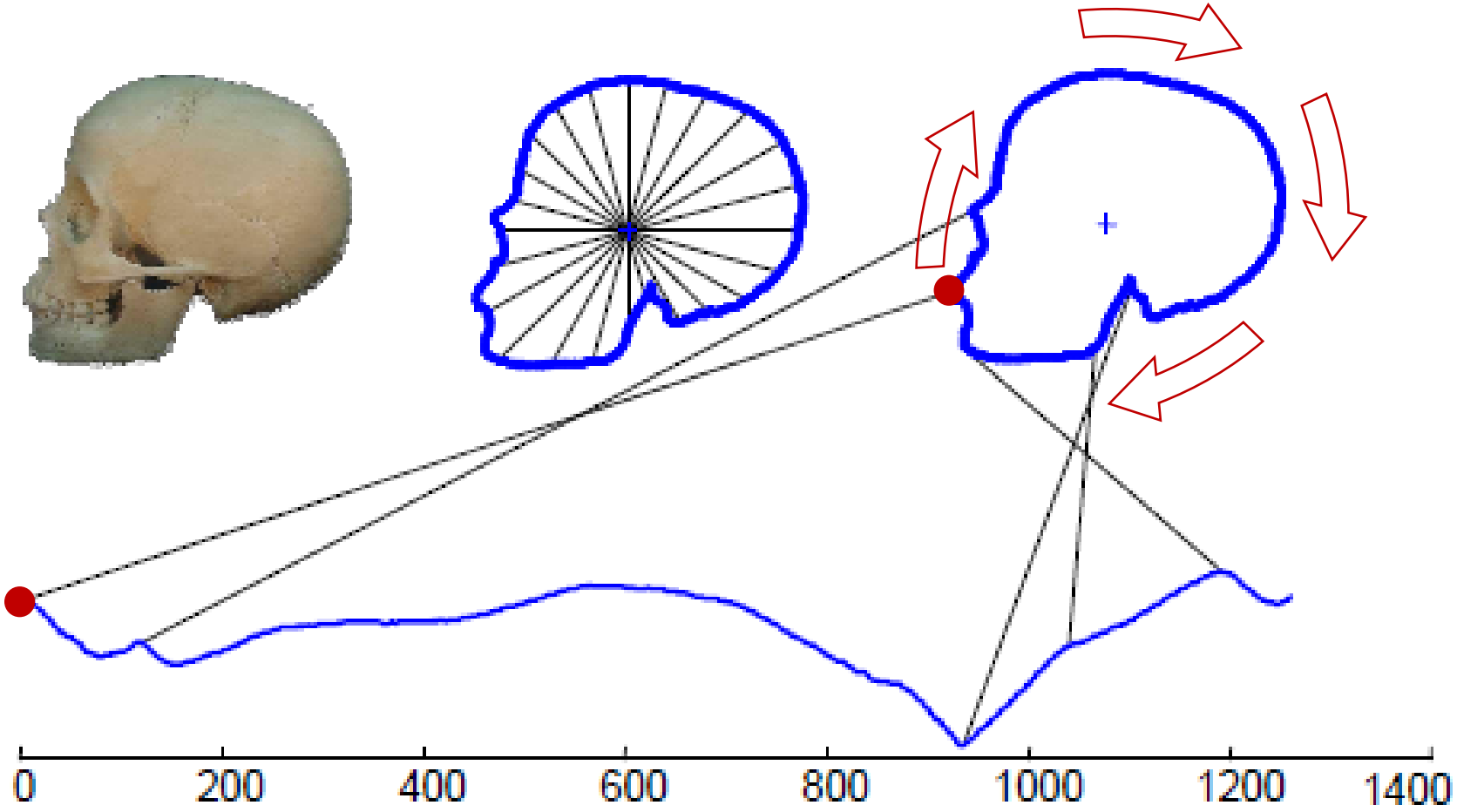
Био- и хемо-информатика



Экономика, бизнес, финансы

Системы электронного обучения

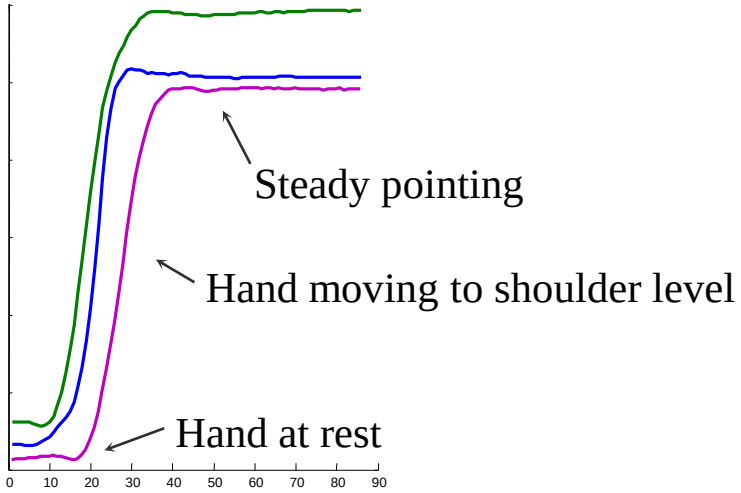
Изображение как временной ряд



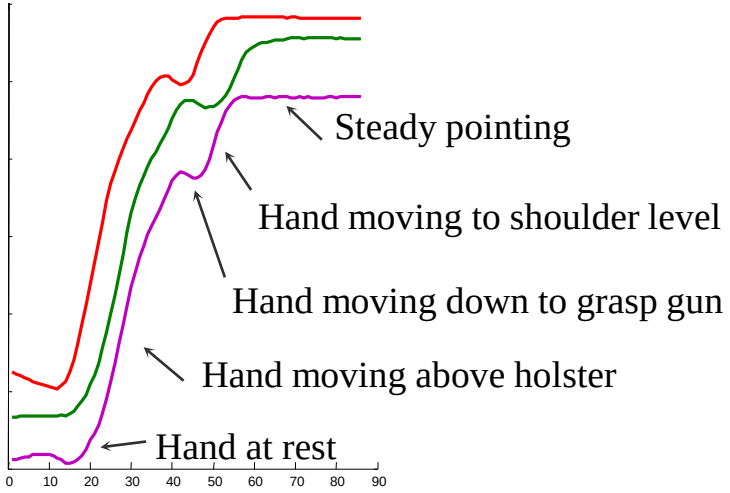
Keogh E. *et al.* LB_Keogh supports exact indexing of shapes under rotation invariance with arbitrary representations and distance measures. VLDB 2006. pp. 882-893. URL

Видео как временной ряд

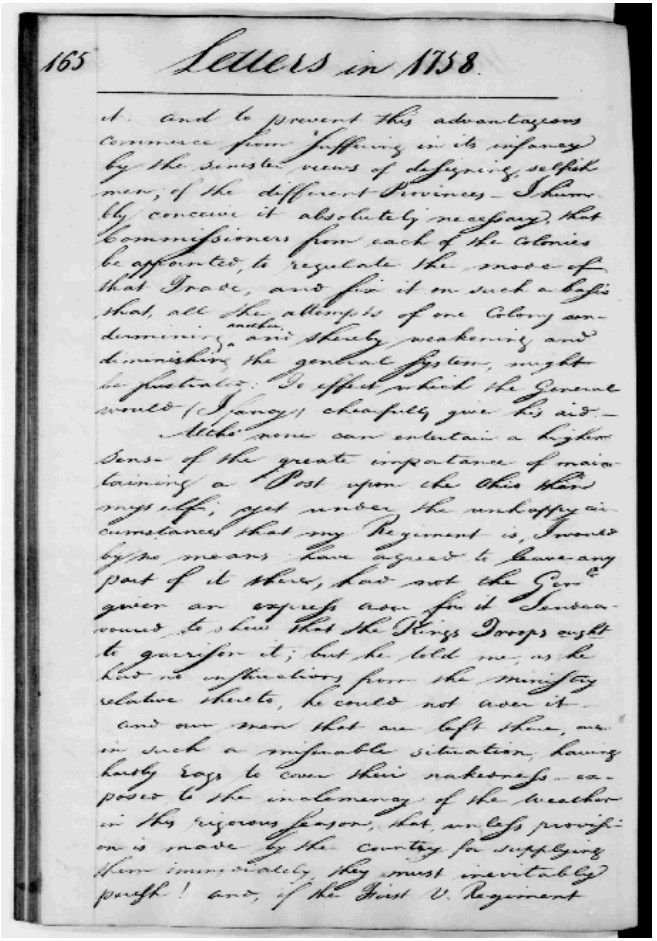
Point



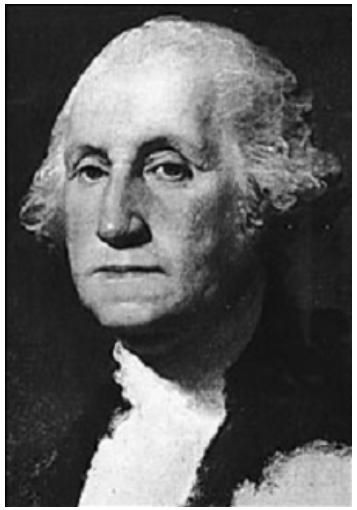
Gun-Draw



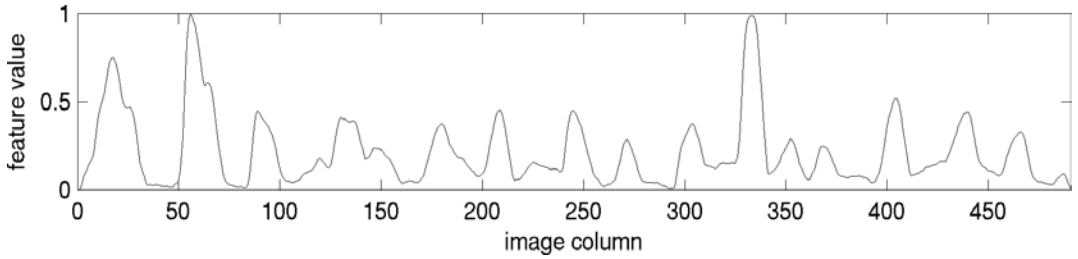
Рукописный текст как временной ряд



George Washington manuscript



George Washington
1732-1799

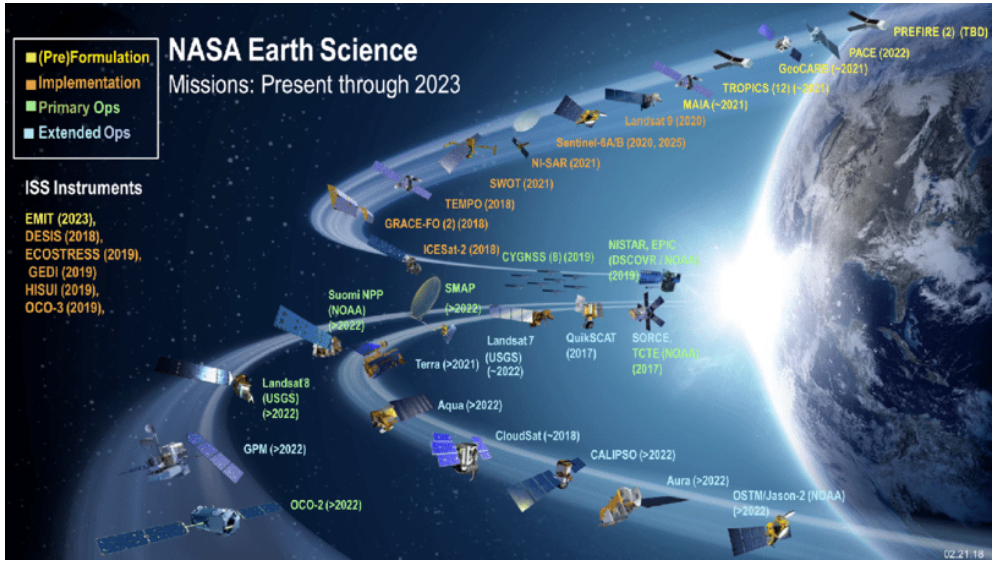


Почему временные ряды анализировать сложнее, чем другие данные

- Большая длина
- Субъективность схожести рядов (подпоследовательностей)
- Пропущенные значения
- Различные форматы данных и частоты снятия показаний, шумы

Большие временные ряды

AEMO (Australian Energy Market Operator) регистрирует выработку солнечной энергии (МВт) в Австралии каждые 4 с, начиная с 01.08.2019
https://zenodo.org/record/4656027

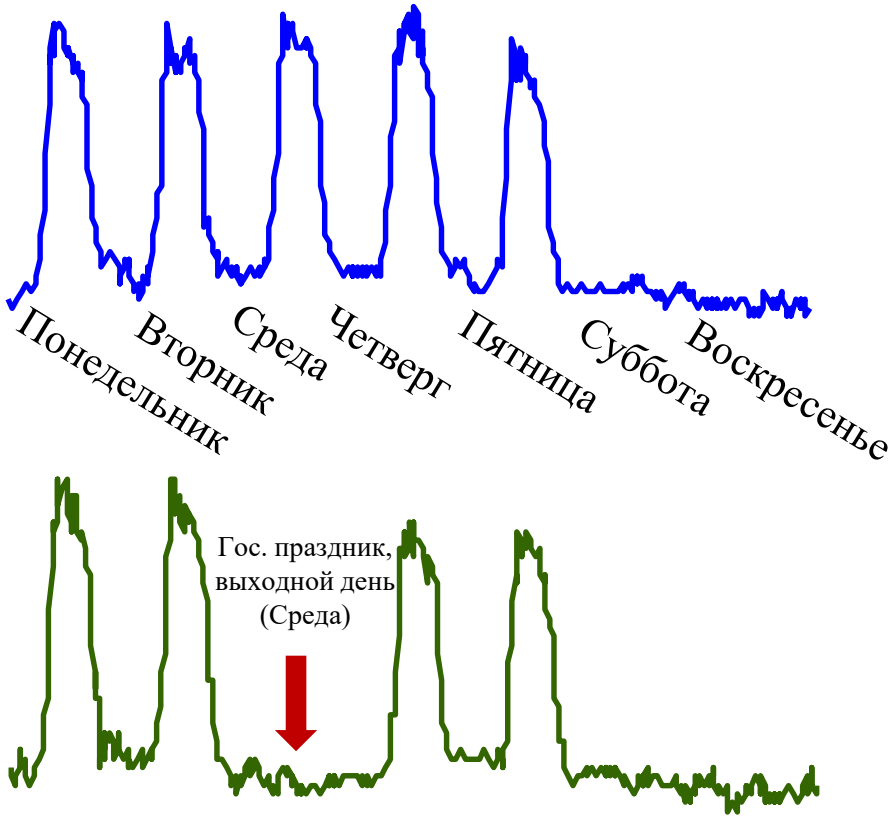


Размер NASA Space Shuttle Earth Observations Database – 40 Пб* (2020 г.), ожидаемый далее ежегодный прирост 50 Пб
https://www.nasa.gov/feature/goddard/2020/nasa-funds-projects-to-make-geosciences-data-more-accessible

* 1 Петабайт=10^{15} (квадриллион) байт
10^{15} ≈ к-во синапсов в головном мозге человека

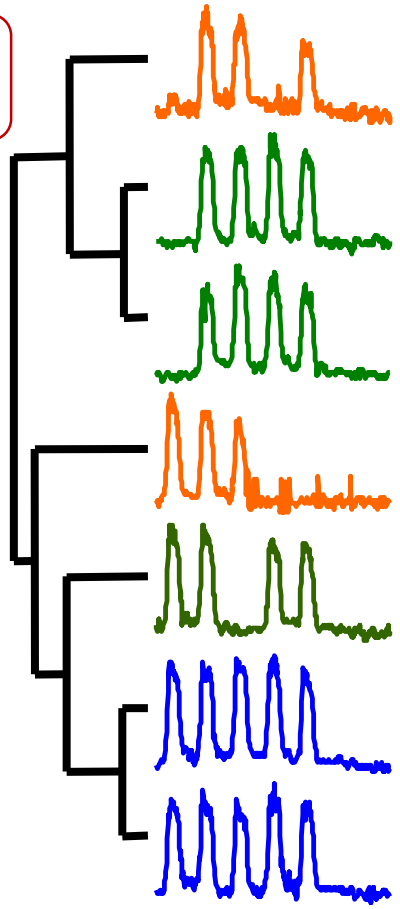
Схожесть рядов определяется задачей и предметной областью

Недельное энергопотребление вычислительного центра (Голландия, 1997)*



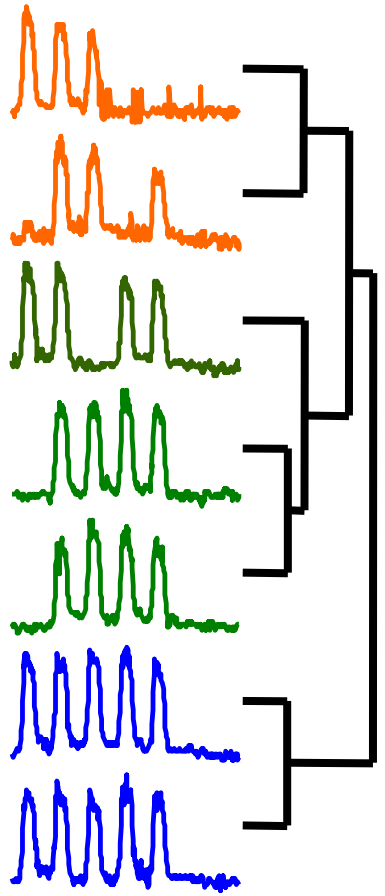
Евклидово расстояние

Время построения 1 с



Dynamic Time Warping

Время построения 3 час



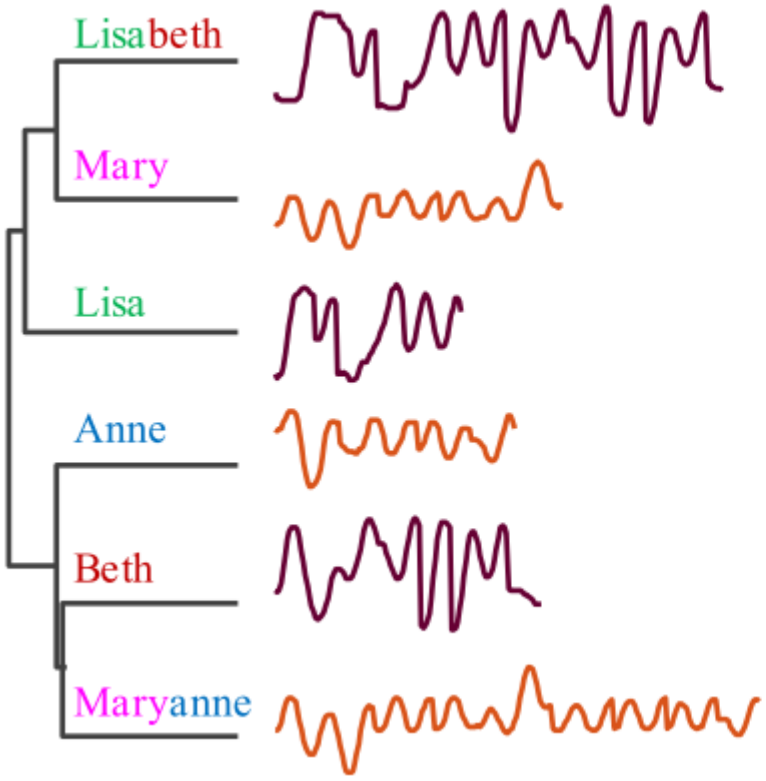
Количество рабочих дней в неделе:

3 4 5

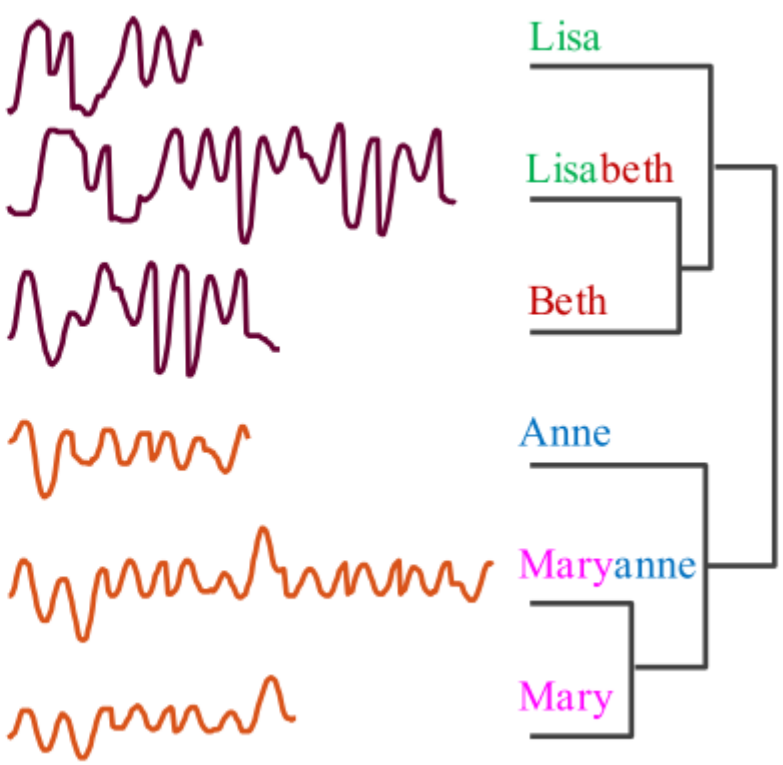
* van Wijk J.J., van Selow R.R. Cluster and calendar based visualization of time series data. INFOVIS 1999: 4-9. DOI: 10.1109/INFVIS.1999.801851

Схожесть рядов определяется задачей и предметной областью

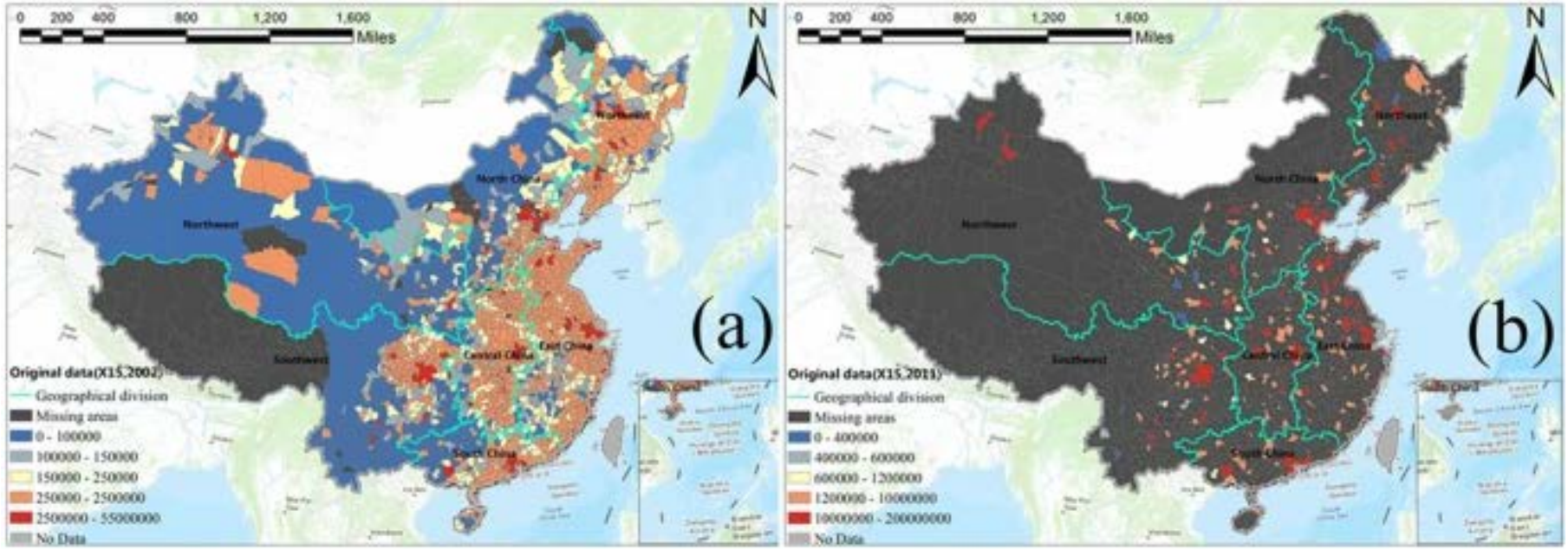
Евклидово расстояние



Расстояние MPdist



Пропущенные значения временных рядов



Доля провинций Китая, **не** предоставившие данные *по одному атрибуту* для гос. стат. отчета*

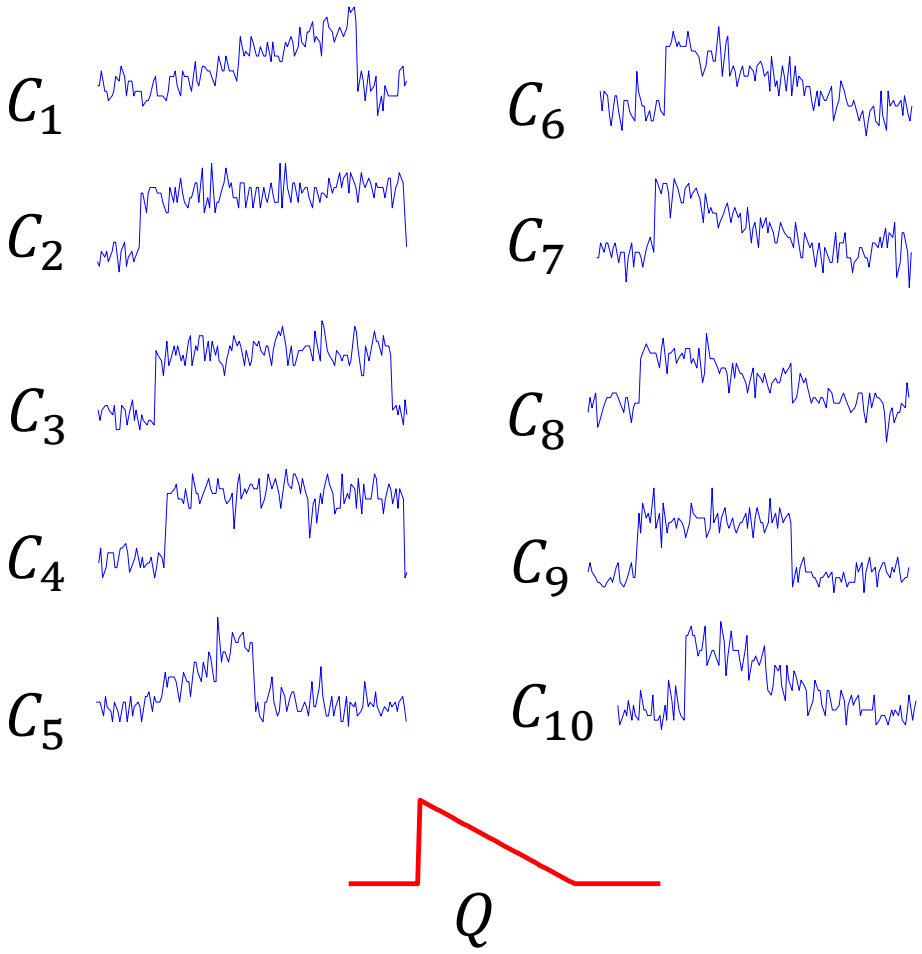
a) 2002: менее 15%
b) 2011: более 85%

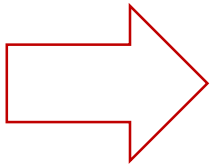
* Song C. *et al.* Estimating missing values in China's official socioeconomic statistics using progressive spatiotemporal Bayesian hierarchical modeling. Sci. Rep. 2018. Vol. 8, article 10055. DOI: 10.1038/s41598-018-28322-z

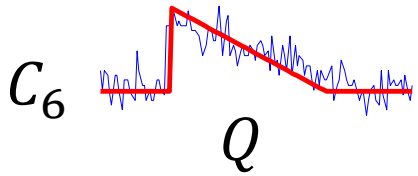
Базовые задачи анализа временных рядов

- Поиск по образцу
- Поиск аномалий
- Поиск шаблонов
- Восстановление пропущенных значений
- Прогноз
- Классификация
- Кластеризация

Поиск по образцу: случай нескольких временных рядов (whole matching)



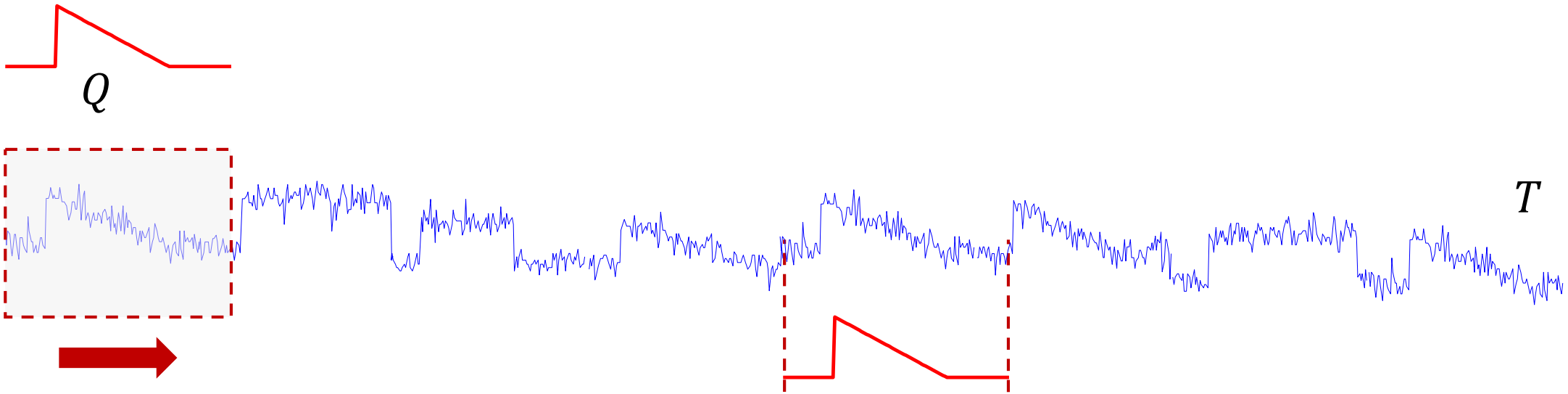




В заданном множестве рядов $C = \{C_1, \dots, C_n\}$ найти ряд $C_{\text{bestmatch}}$, наиболее похожий на заданный запрос Q:

$$\forall C_i \in C \;\; \text{Dist}(C_{\text{bestmatch}}, Q) \leq \text{Dist}(C, Q)$$

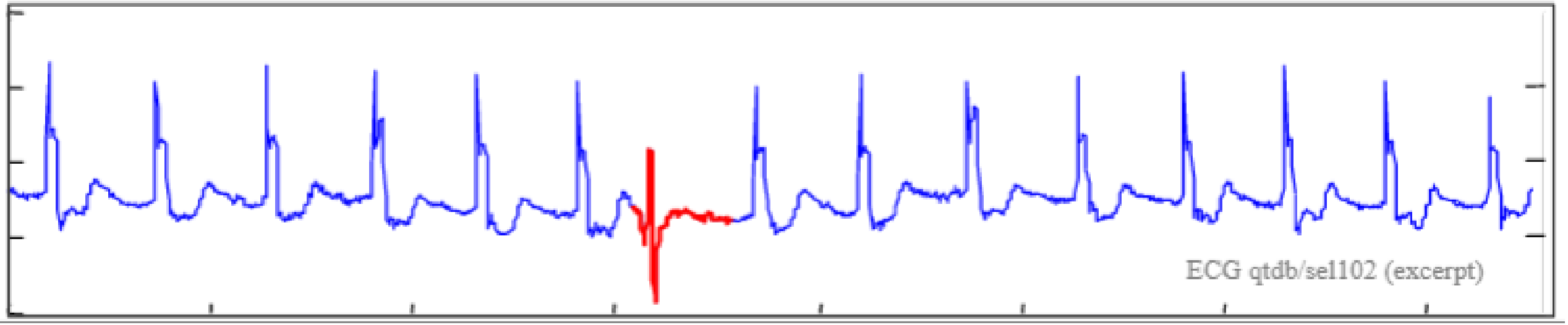
Поиск по образцу: случай подпоследовательностей временного ряда (subsequence matching)



В заданном ряде $T = \{C_1, \dots, C_n\}$ найти подпоследовательность $C_{\text{bestmatch}}$, наиболее похожую на заданный запрос Q:

$$\forall T_{i,m} \in S_T^m \;\; \text{Dist}(C_{\text{bestmatch}}, Q) \leq \text{Dist}(C, Q)$$

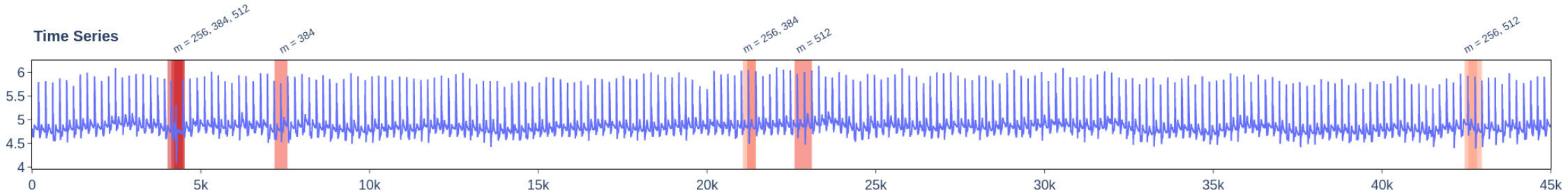
Поиск аномалий временного ряда



В заданном временном ряде найти подпоследовательность, наиболее непохожую на все остальные подпоследовательности ряда

Поиск аномалий

ЭКГ взрослого пациента



Прежде-временное сокращение желудочков

Эктопическое сердцебиение

Эктопическое сердцебиение

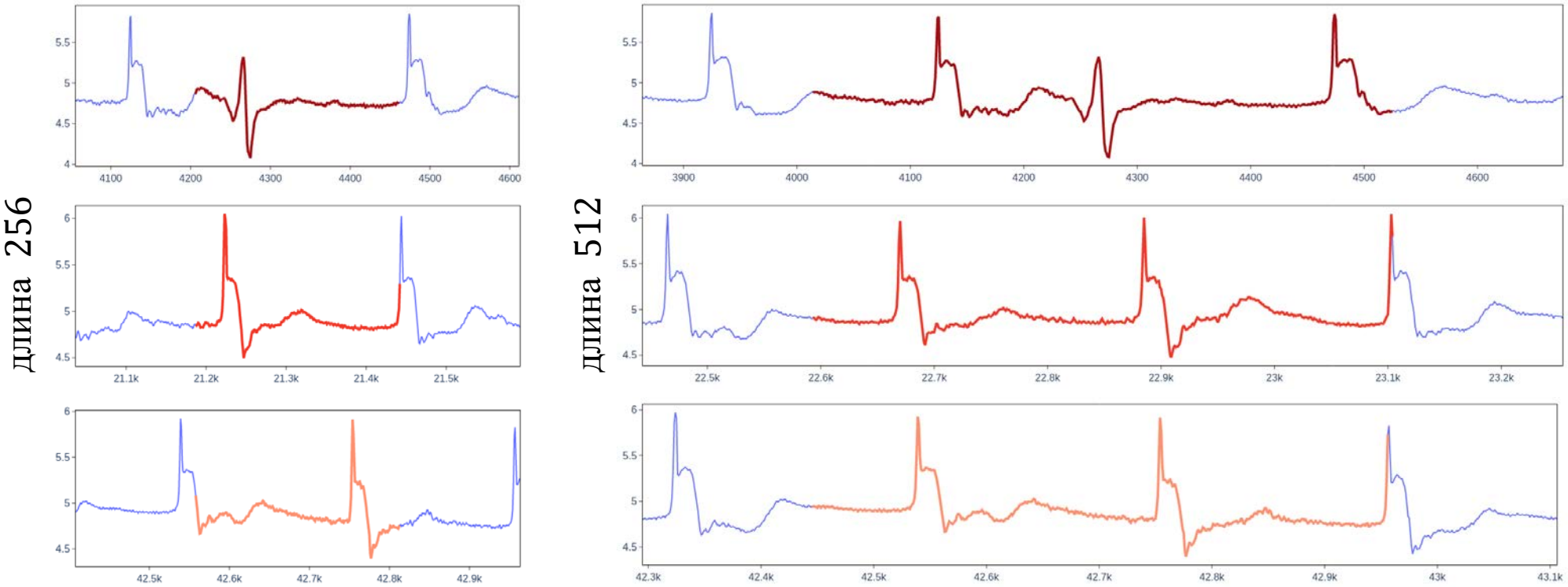
top-1

top-2

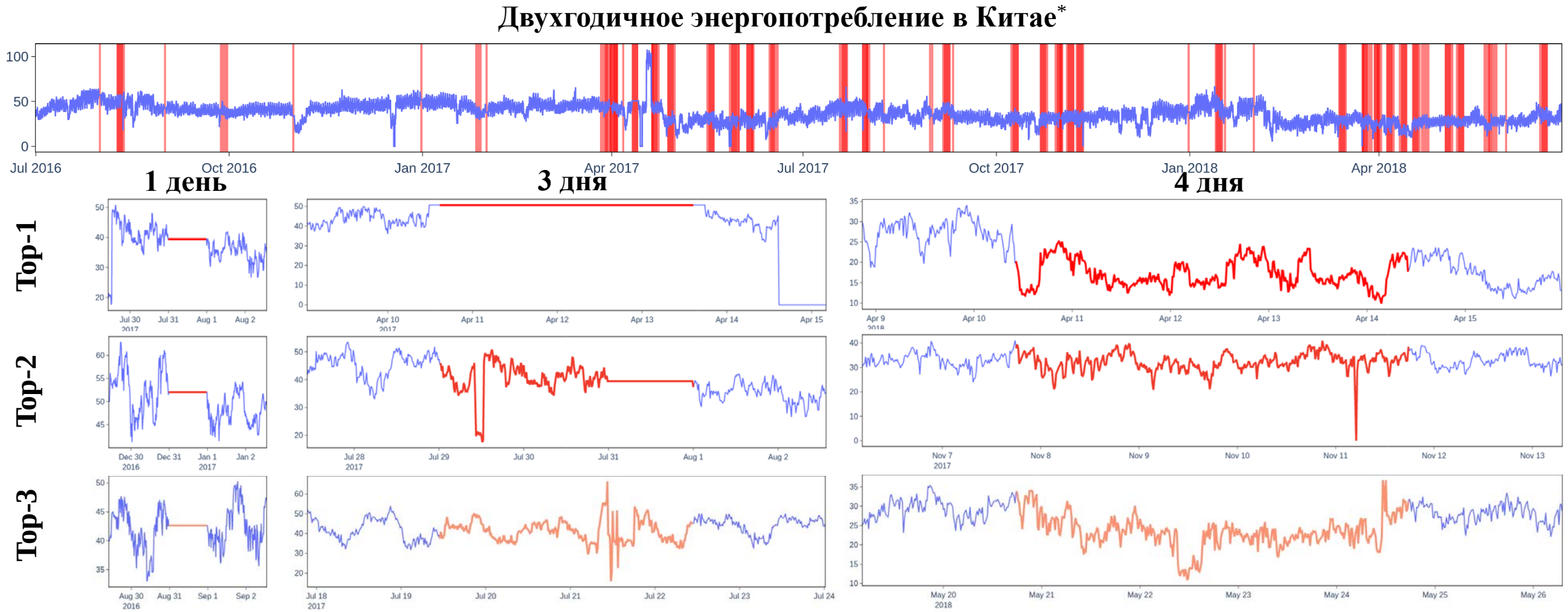
top-3

длина 256

длина 512

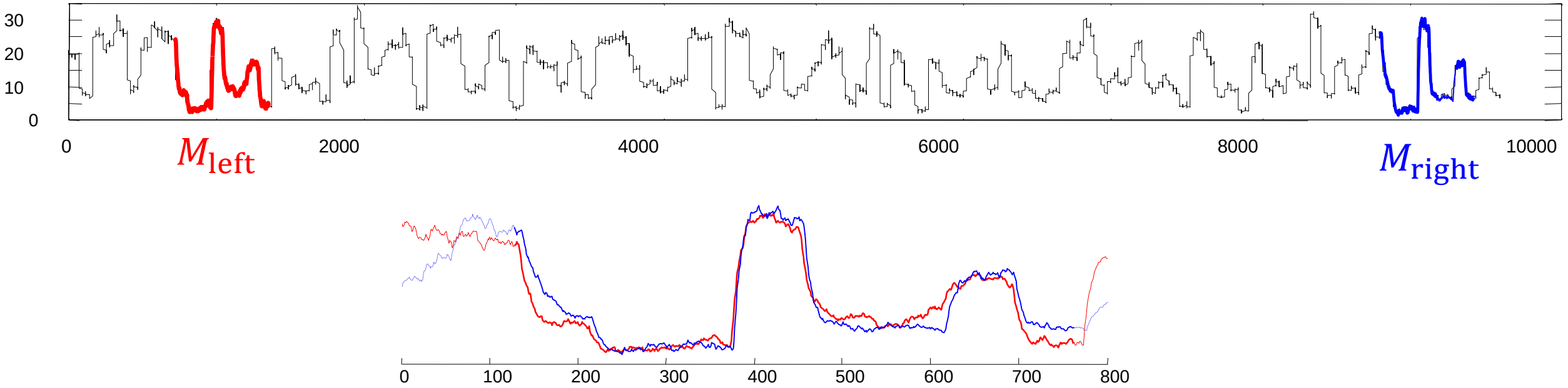


Поиск аномалий



* Zhou H. *et al.* Informer: beyond efficient transformer for long sequence time-series forecasting. AAAI 2021: 11106-11115. DOI: 10.1609/aaai.v35i12.17325.

Поиск шаблонов: мотивы (motifs)

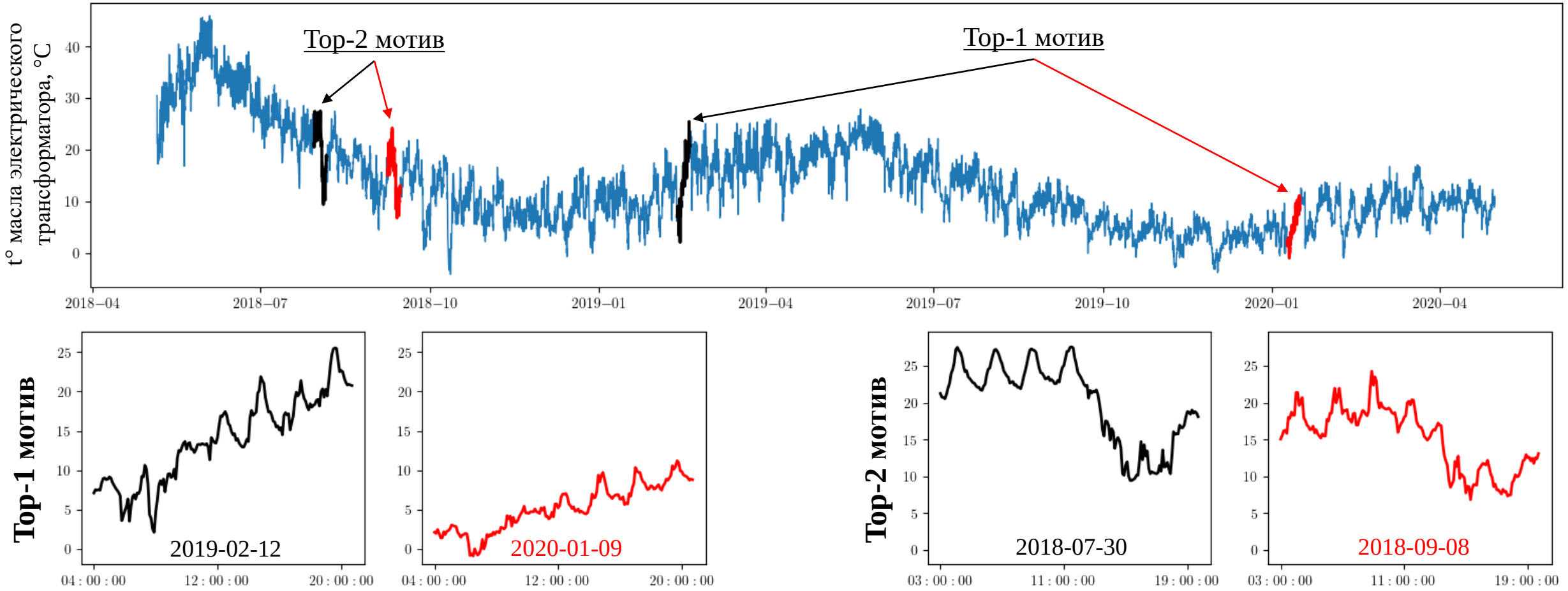


Пара непересекающихся подпоследовательностей ряда равной длины, наиболее похожих друг на друга:

$$\forall C_i, C_j \;\; \text{Dist}\left(M_{\text{left}}, M_{\text{right}}\right) \leq \text{Dist}(C_i, C_j)$$

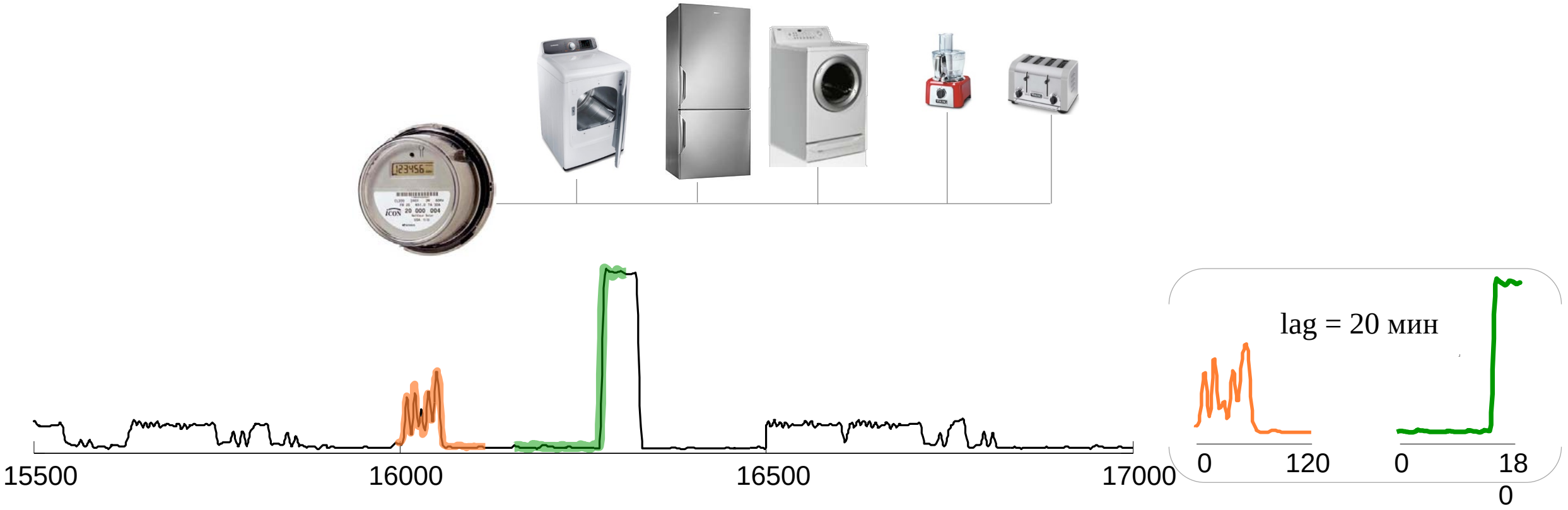
Поиск шаблонов: мотивы (motifs)

Двухгодичное энергопотребление в Китае*



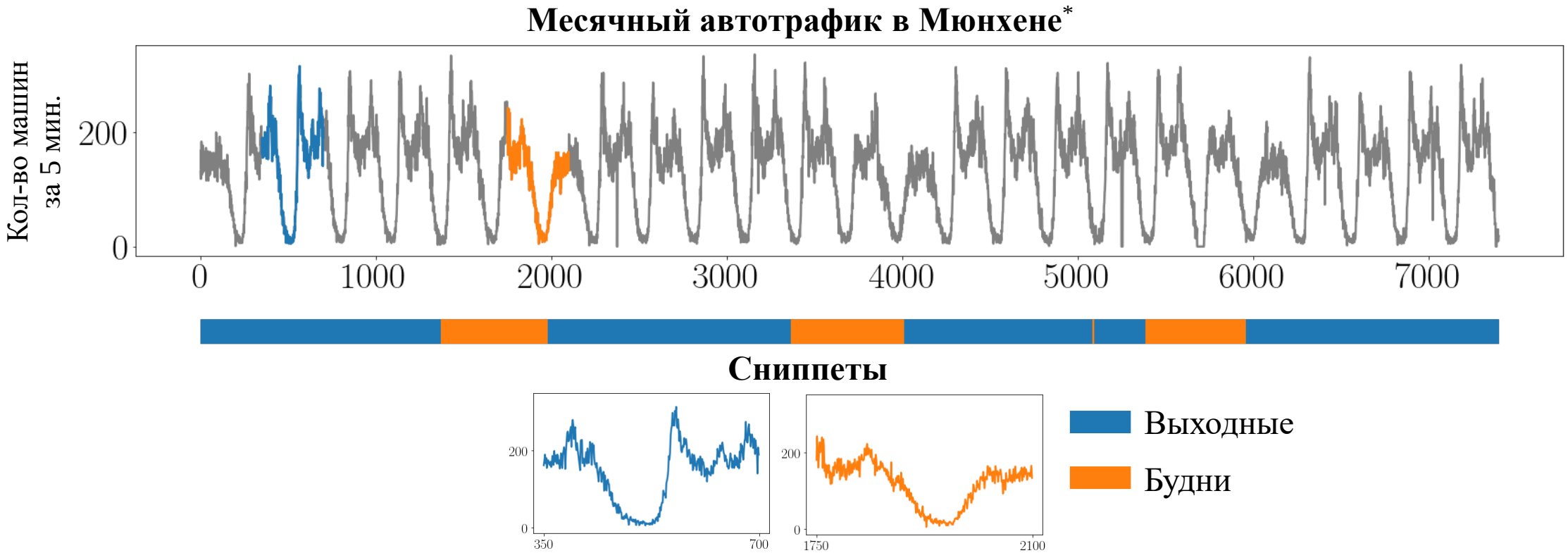
* Zhou H. *et al.* Informer: beyond efficient transformer for long sequence time-series forecasting. AAAI 2021: 11106-11115. DOI: 10.1609/aaai.v35i12.17325.

Поиск шаблонов: ассоциативные правила (association rules)



IF ***работает стиральная машина***
THEN не более чем через 20 мин. ***работает сушильная машина***

Поиск шаблонов: сниппеты (snippets)

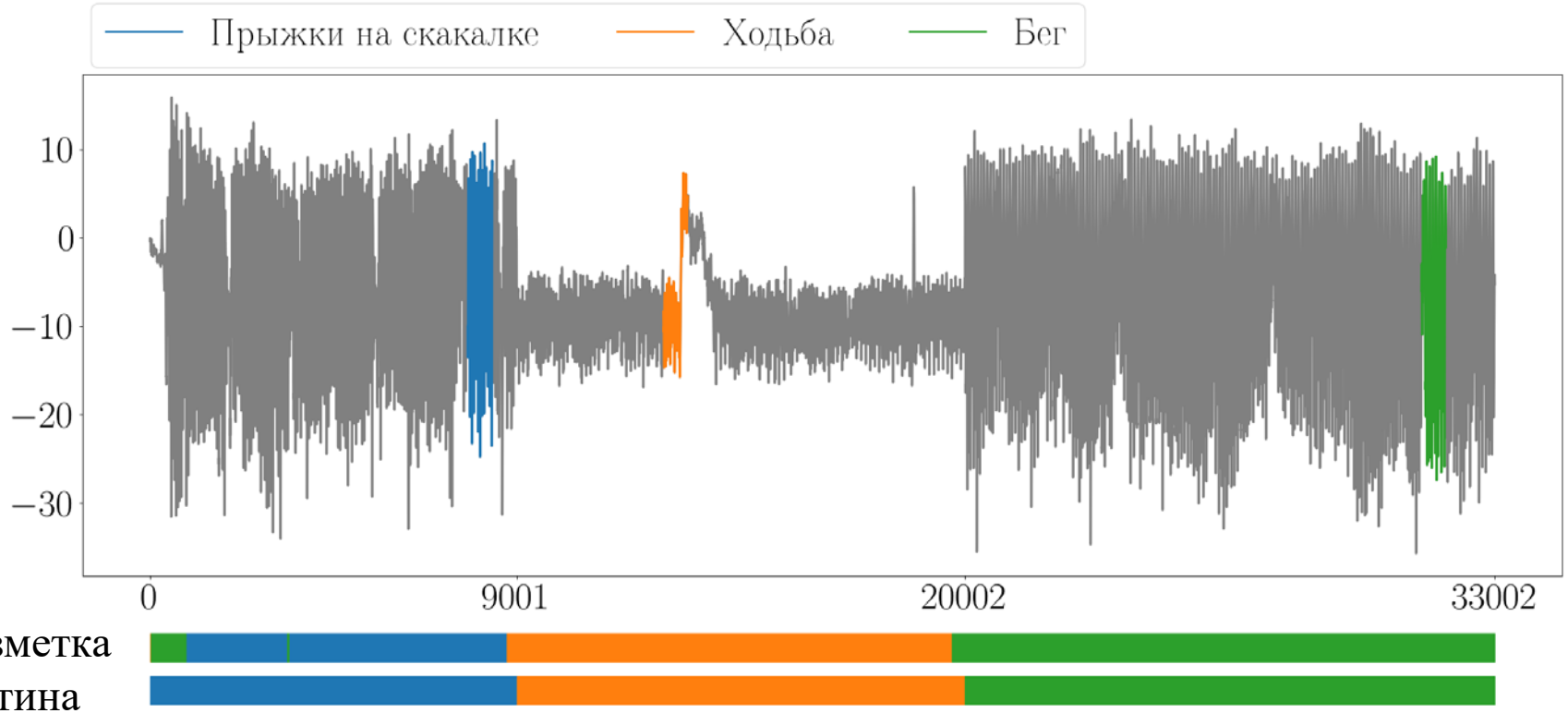


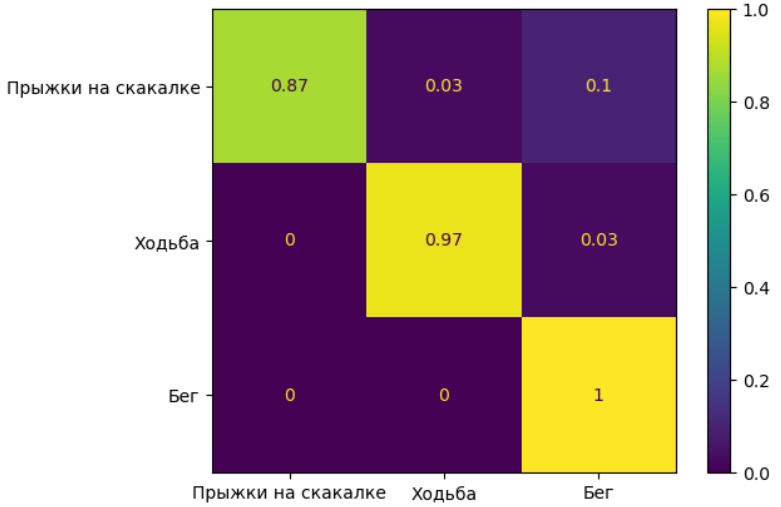
Множество подпоследовательностей ряда, выражающих типичные активности субъекта

* Public (anonymized) road traffic prediction datasets from Huawei Munich Research Center. URL: https://zenodo.org/record/3653880#.Y0zZi3ZBxPa

Поиск шаблонов: сниппеты

Показания носимого акселерометра



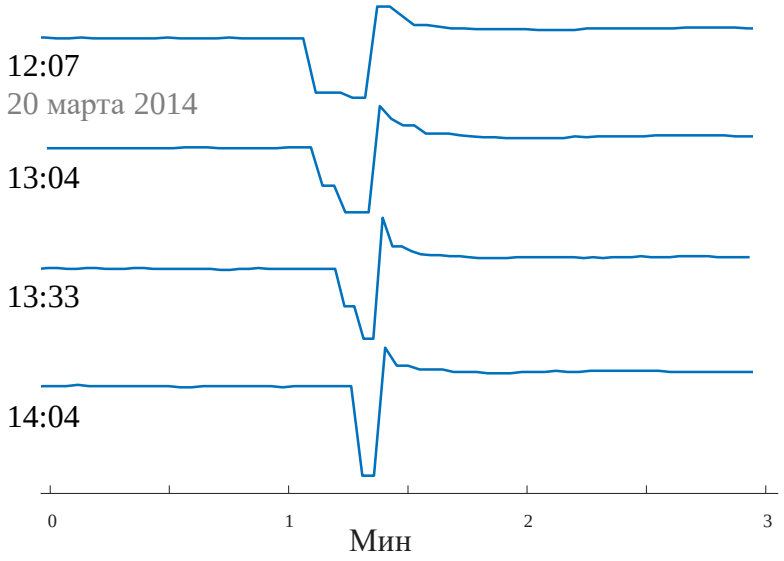


Активность	Precision	Recall	F1
Прыжки	1	0.87	0.93
Ходьба	0.98	0.97	0.97
Бег	0.77	1	0.87

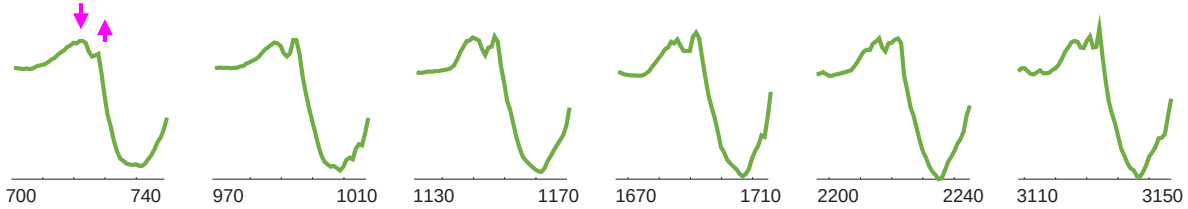
* Reiss A., Stricker D. Introducing a new benchmarked dataset for activity monitoring. ISWC 2012, Newcastle, UK, June 18-22, 2012. 108–109. IEEE (2012). doi: 10.1109/ISWC.2012.13

Поиск шаблонов: цепочки (chains)

Энергопотребление холодильника



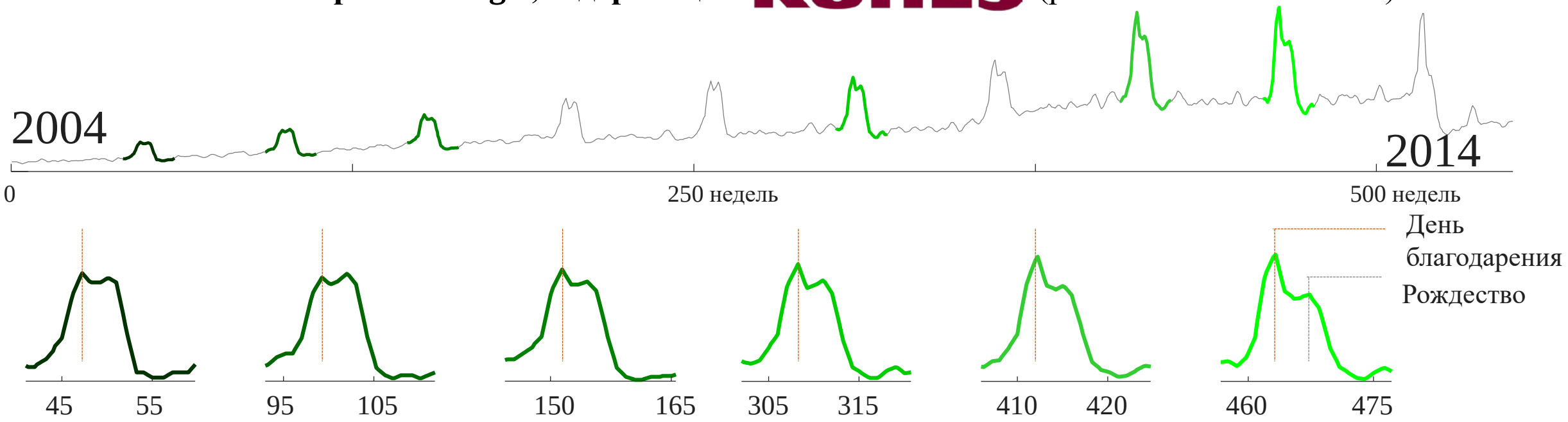
Запись датчика с левой икры спортсмена, когда он начал бег трусцой на беговой дорожке



Цепочка подпоследовательностей ряда, звенья которой отражают эволюцию некоего процесса

Поиск шаблонов: цепочки (chains)

Число запросов Google, содержащих KOHL'S (розничная сеть в США)



- **Рост важности Киберпонедельника** (понедельник после Дня благодарения): за 10 лет выпуклость меняется от плавной и занимающей больший период между Днем благодарения и Рождеством к резкой и сосредоточенной на Дне благодарения
- Термин введен в пресс-релизе “Киберпонедельник становится одним из крупнейших дней онлайн-покупок в году” 28 ноября 2005 г., дата которого совпадает с первым проблеском острого пика в цепочке

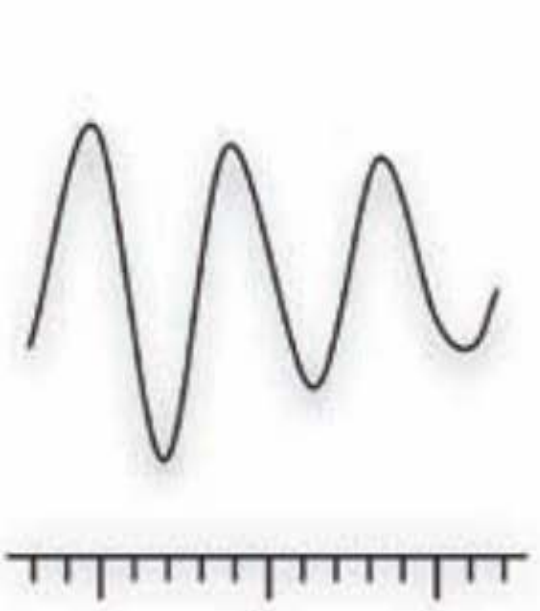
Восстановление пропущенных значений ряда (imputation/recovery)

Режим онлайн

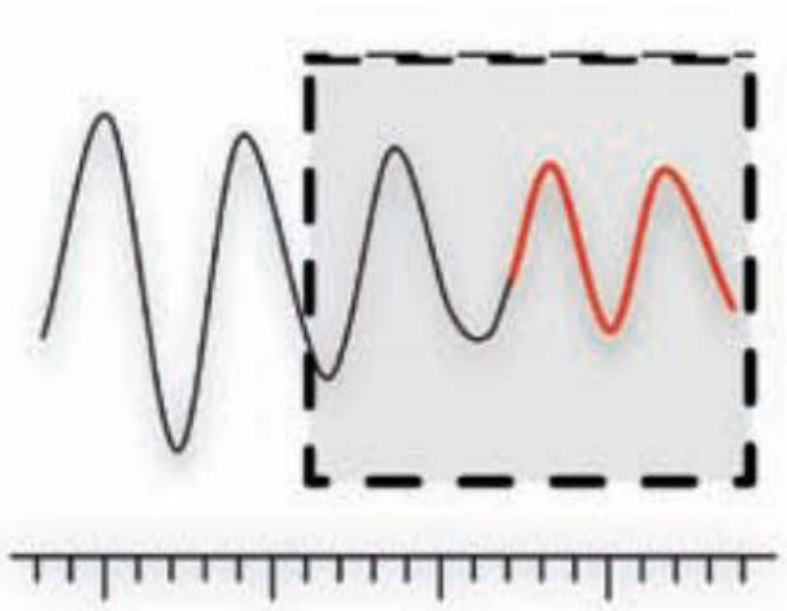
Режим офлайн

Синтез отсутствующих значений ряда

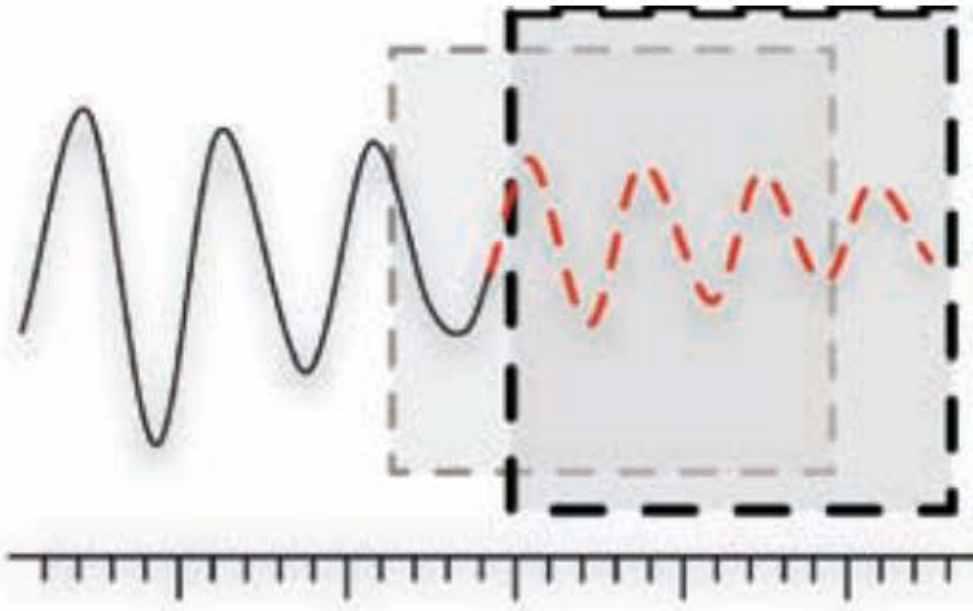
Прогнозирование временного ряда (forecast)



Исходный ряд
(периодическая структура,
поддающаяся прогнозу)



Прогноз точек данных
в пределах
окна прогнозирования



Долгосрочный прогноз:
использование более ранних прогнозных
значений в качестве входных данных прогноза

Синтез будущих значений ряда

Классификация временных рядов

Кластеризация временных рядов

Кластеризация подпоследовательностей ряда БЕССМЫСЛЕННА*

- Подпоследовательности одного временного ряда обычно сильно коррелируют между собой, что делает их неинформативными для кластеризации
- Подпоследовательности разных временных рядов обычно имеют различные характеристики и паттерны, что позволяет выделить более информативные признаки и получить осмысленный результат кластеризации
- Пример: мониторинг температуры в помещении
  - Если температура в помещении измеряется каждые 5 мин., то подпоследовательности измерений за последний час будут сильно коррелировать между собой, так как температура в помещении обычно меняется медленно и плавно
  - Кластеризация подпоследовательностей измерений за последний час не будет иметь смысла, так как они будут очень похожи друг на друга и не будут содержать достаточно информации для кластеризации
  - Для кластеризации нужно использовать подпоследовательности измерений за разные периоды времени (за последние сутки, неделю, месяц и др.)

* Keogh E., Lin J. Clustering of time-series subsequences is meaningless: implications for previous and future research. Knowl. Inf. Syst. 8(2). 2005. 154-177. DOI: 10.1007/s10115-004-0172-7

(Одномерный) временно́й ряд (univariate time series)

- Конечная последовательность хронологически упорядоченных вещественных значений

$$T = (t_1, \dots, t_n), \qquad t_i \in \mathbb{R}$$

- n – длина ряда, $|T| = n$

Многомерный временной ряд (multivariate time series)

- Состоит из логически связанных одномерных временных рядов (координат), синхронизированных по времени

$$\boldsymbol{T} = \left[T^{(1)}, \dots, T^{(d)}\right]^{\mathrm{T}}, \qquad d > 1,\ T^{(i)} = \left(t_1^{(i)}, \dots, t_n^{(i)}\right), \qquad t_k^{(i)} \in \mathbb{R}$$

Потоковый временной ряд (streaming time series)

- Бесконечная упорядоченная последовательность вещественных значений, которые поступают непрерывно одно за другим в режиме реального времени

$$T = (t_1, \dots, t_n, \dots), \ t_i \in \mathbb{R}$$

- Режим реального времени предполагает конечный период времени обработки данных, заданный для *конкретной предметной области*: **реальное время ≠ «очень быстро»**

Подпоследовательность (subsequence)

- Непрерывный промежуток временного ряда фиксированной длины

$$T_{i,m} = (t_i, \dots, t_{i+m-1}), \qquad m \ll n, \qquad 1 \le i \le n - m + 1$$

- Множество всех подпоследовательностей ряда, имеющих заданную длину

$$S_T^m, \qquad |S_T^m| = n - m + 1$$

Литература

1. Esling P., Agon C. Time-series Data Mining. ACM Comput. Surv. 2012. Vol. 45, No. 1. P. 12:1–12:34. https://doi.org/10.1145/2379776.2379788.
2. Fu T.C. A review on time series data mining. Eng. Appl. of AI. 2011. Vol. 24, No. 1. P. 164–181. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.09.007.