Прогностика на основе ИИ в мониторинге:

задачи и методы, мифы и компромиссы

Докладчик: к.т.н., доц. Алексей Незнанов

Senior Data Scientist, компания «Шлюмберже»

старший научный сотрудник МЛ ИССА ФКН НИУ ВШЭ

2023-10-19

О докладчике

- Алексей Андреевич Незнанов
  - К.т.н., доцент
  - Член *IEEE*, РАИИ и НБМЗ
  - *Senior Data Scientist* в компании «Шлюмберже»
  - Старший научный сотрудник международной лаборатории интеллектуальных систем и структурного анализа ФКН НИУ ВШЭ (http://cs.hse.ru/ai/issa)
  - Консультант «маленького гида по большим данным» на Постнауке (http://postnauka.ru/author/a_neznanov)
  - Автор учебника, учебных пособий, 11 авторских курсов и более 65 научных публикаций

Motivation

- Мониторинг – это временные ряды событий и сенсоров:
  - Анализ подобных временных рядов – составляющая любых систем мониторинга
    - Режимы работы
    - Предвестники событий
    - Пропущенные значения и их восстановление
    - …
- Мы наблюдаем тектонический сдвиг в методах и инструментах
  - За счёт чего стал возможным этот сдвиг?
  - Можно ли надеяться на практичность современных подходов и методов?
  - Насколько упростились подготовка данных и интерпретация результатов?
  - И чего ожидать в дальнейшем?

«Пререквизиты» любого анализа данных

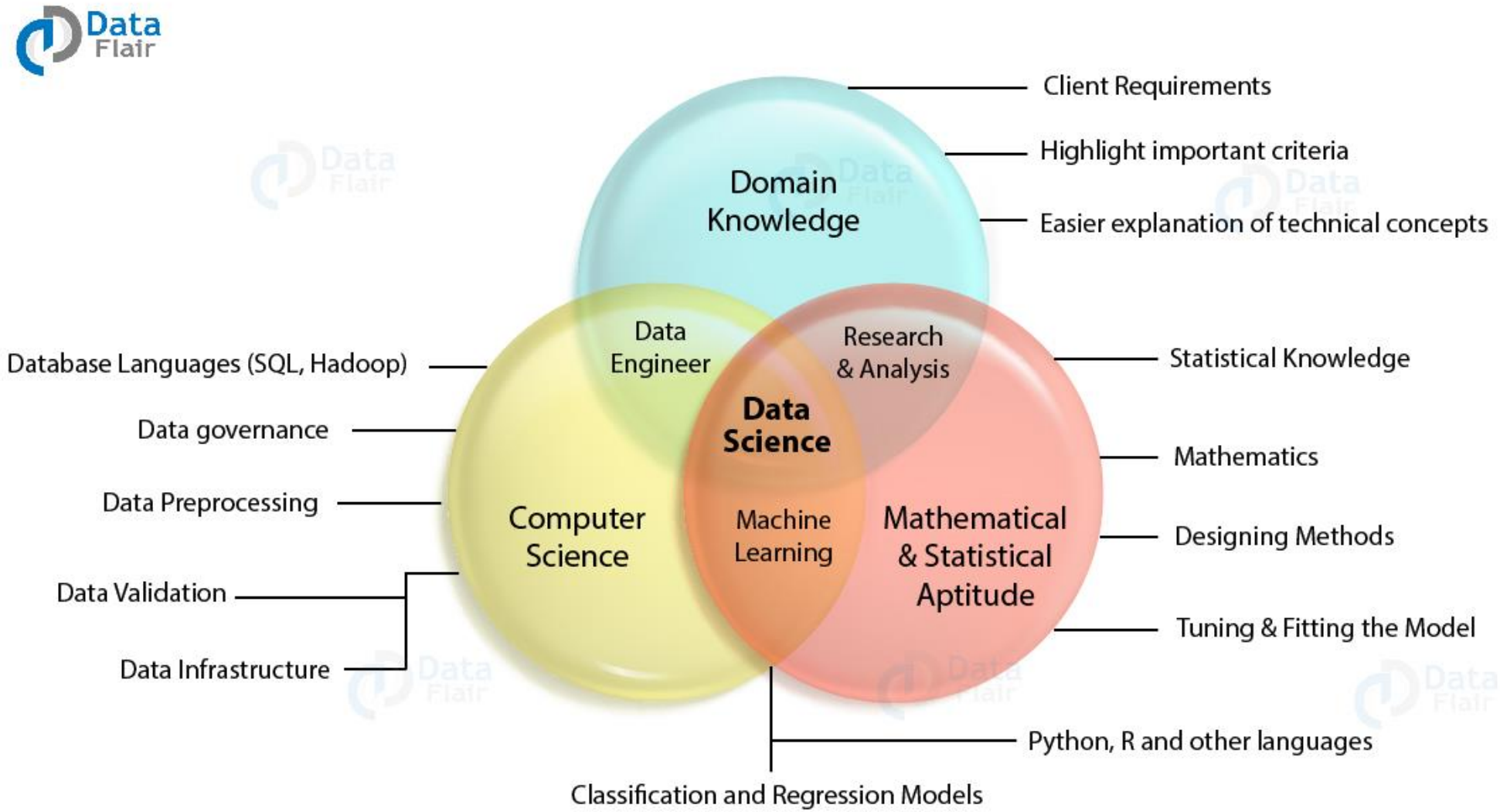
«Мусор на входе – мусор на выходе»
(“*Garbage in – garbage out*”)

- Качество данных определяет качество интеллектуальных методов анализа данных
  - ☑ Особенно при использовании **комплексных процедур анализа** и **машинного обучения**

- Управление данными
  - Управление мастер-данными (*MDM*) и управление качеством данных (*DQM*)

- Хоть чуть-чуть работы со «знанием»
  - Базовая онтология предметной области и интерпретация результатов анализа
  - Связь с мастер-данными
  - Подходы к гармонизации данных:
    - Идентификация, дедупликация, онтологизация, актуализация, версионирование, …

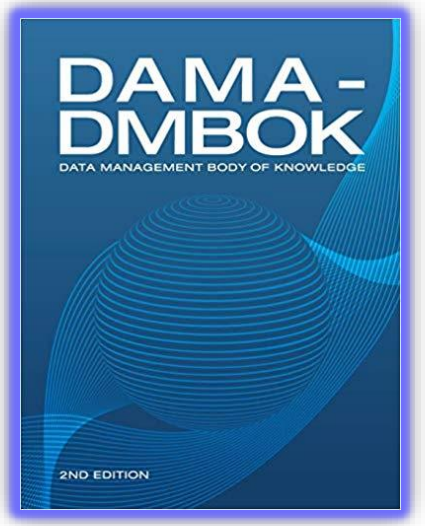
Области знания и компетенции

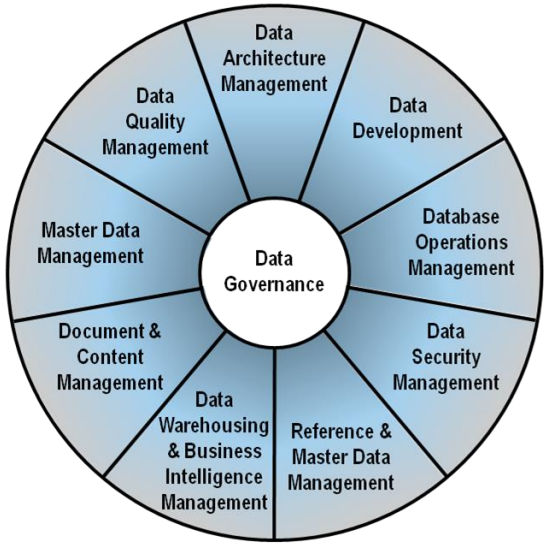


© 2019, data-flair (http://data-flair.training/blogs/what-is-data-science/)

Управление данными

- *DAMA-DMBOK: Data Management Body of Knowledge. 2nd ed. Technics Publications*, 2017. 590 *p*.
  - Свод знаний (*BoK*)! Готовится третье издание
  - *DAMA International* (http://dama.org/content/body-knowledge)





10 Data Management Functions

7 Elements

Временные ряды (ВР)

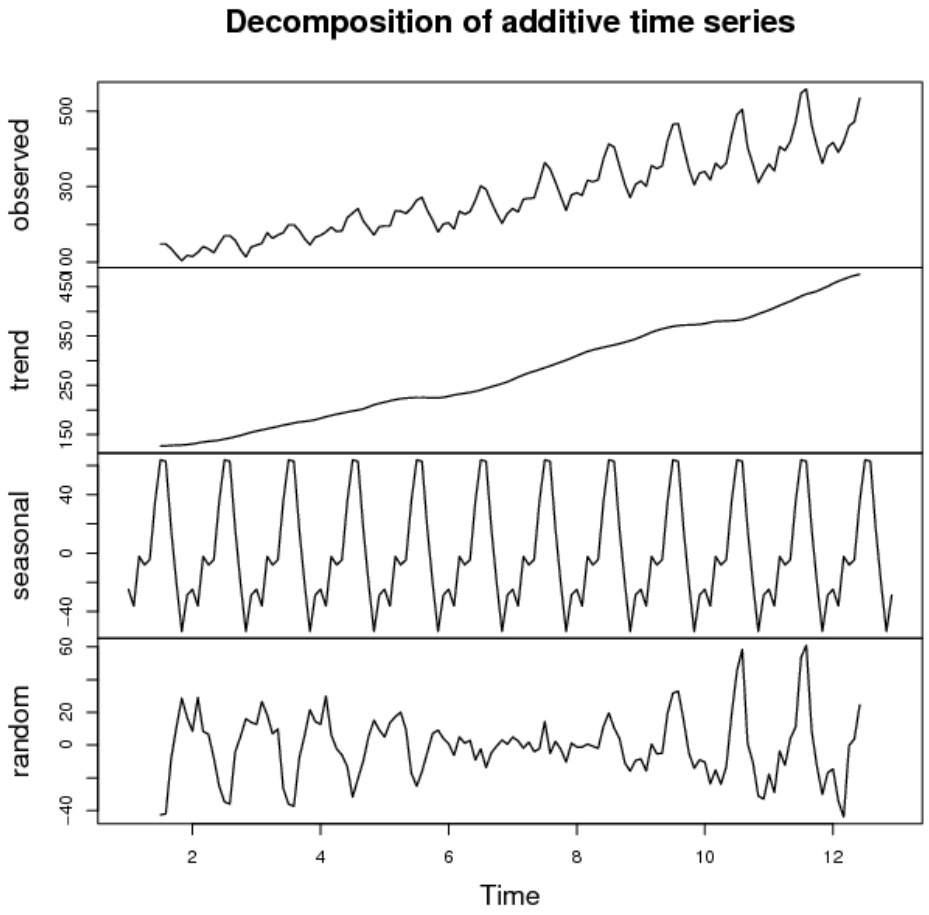
- ✓ Что это такое?
- ✓ Что в них интересного?
- ✓ Какие задачи ставятся?
- ✓ В чём сложность анализа?

Базовые источники

- The Complete Guide to Time Series Analysis and Forecasting (http://towardsdatascience.com/the-complete-guide-to-time-series-analysis-and-forecasting-70d476bfe775)
  - Базовые принципы и иллюстрации
- Time Series Analysis Articles (http://www.quantstart.com/articles/topic/time-series-analysis/)
- С самого начала до ARIMA и GARCH (но финансовые приложения)
- Hyndman R.J., Athanasopoulos G. Forecasting: Principles and Practice (http://otexts.com/fpp3/)
  - Один из лучших учебников с примерами на *R*

Как обычно думают о ВР

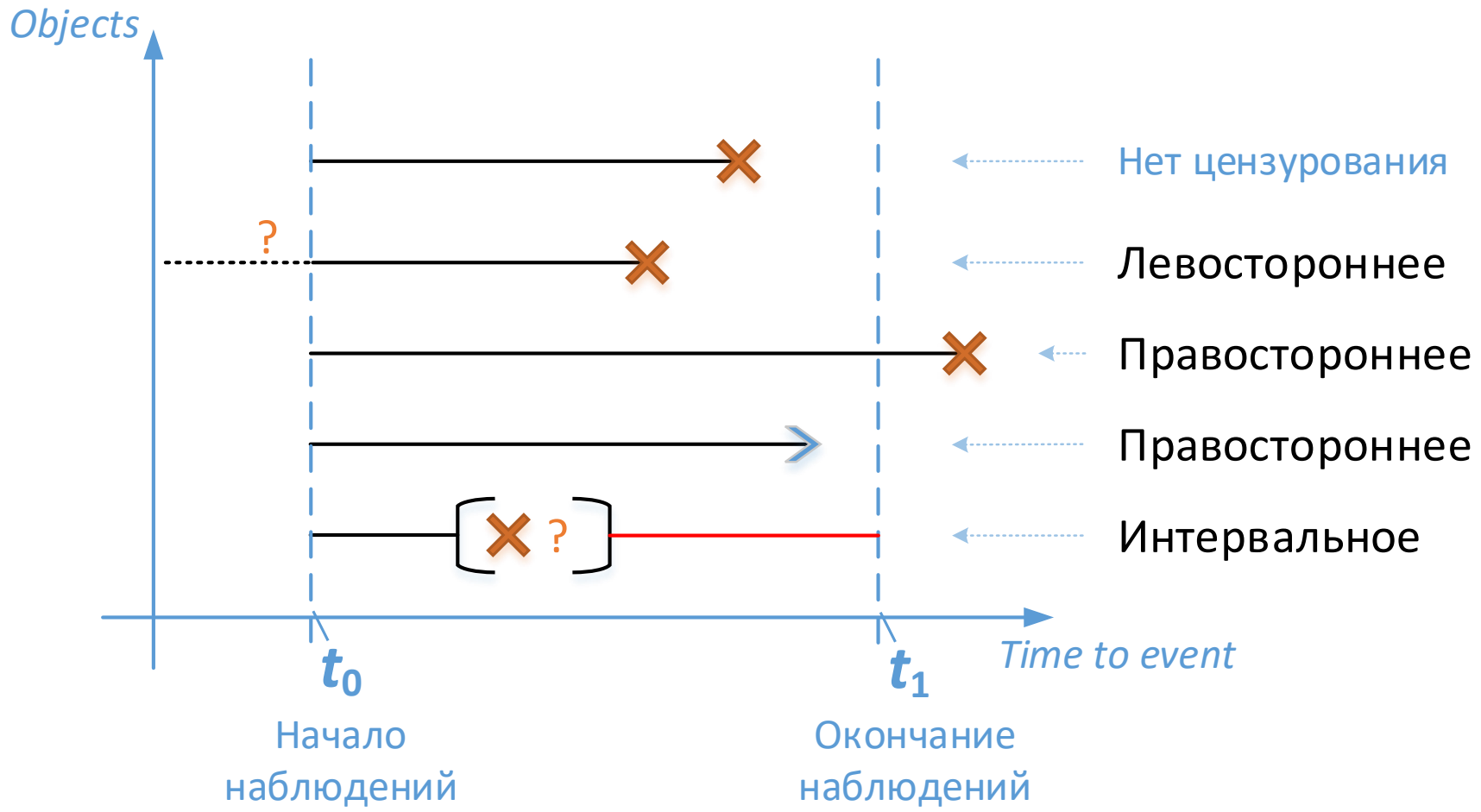
- Исходные данные, привязанные к отметкам времени
- Интересные свойства
  - Скользящее среднее
  - Сглаживание
  - Тренд
  - Сезонность
  - Автокорреляция
  - Периодические изменения
  - Запаздывание
  - …



А как на практике?

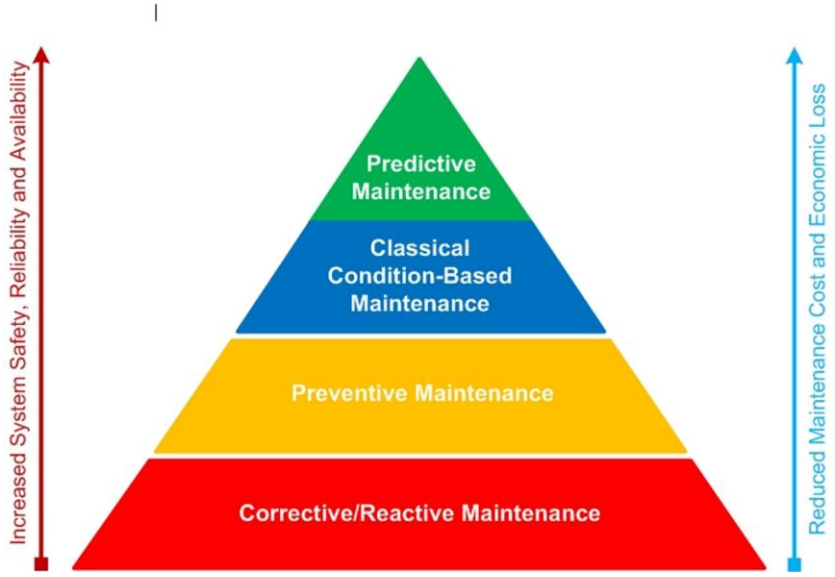
- Временные ряды обычно:
  - Многомерные
    - Несколько параметров
  - Нерегулярные
    - Произвольные отметки времени
  - С цензурированными данными
    - Куски известных временных рядов не совпадают с жизненным циклом объектов
  - Пропуски
    - Часть данных неизвестна
  - Нечёткость
    - Данные введены и сохранены с погрешностью

Иллюстрация цензурирования ВР



Прогностика

- *PHM – Prognostics and Health Management*
  - Но есть и другое популярное сокращение:
    - *PHM – Proportional Hazard Model* в анализе выживаемости
- Особенности
  - Оборудование [*equipment*] и сенсоры [*sensors*]
  - Остановки [*stops*] и отказы [*breakdowns*]
  - Принятие решений на основе данных
    - Данные – история работы оборудования

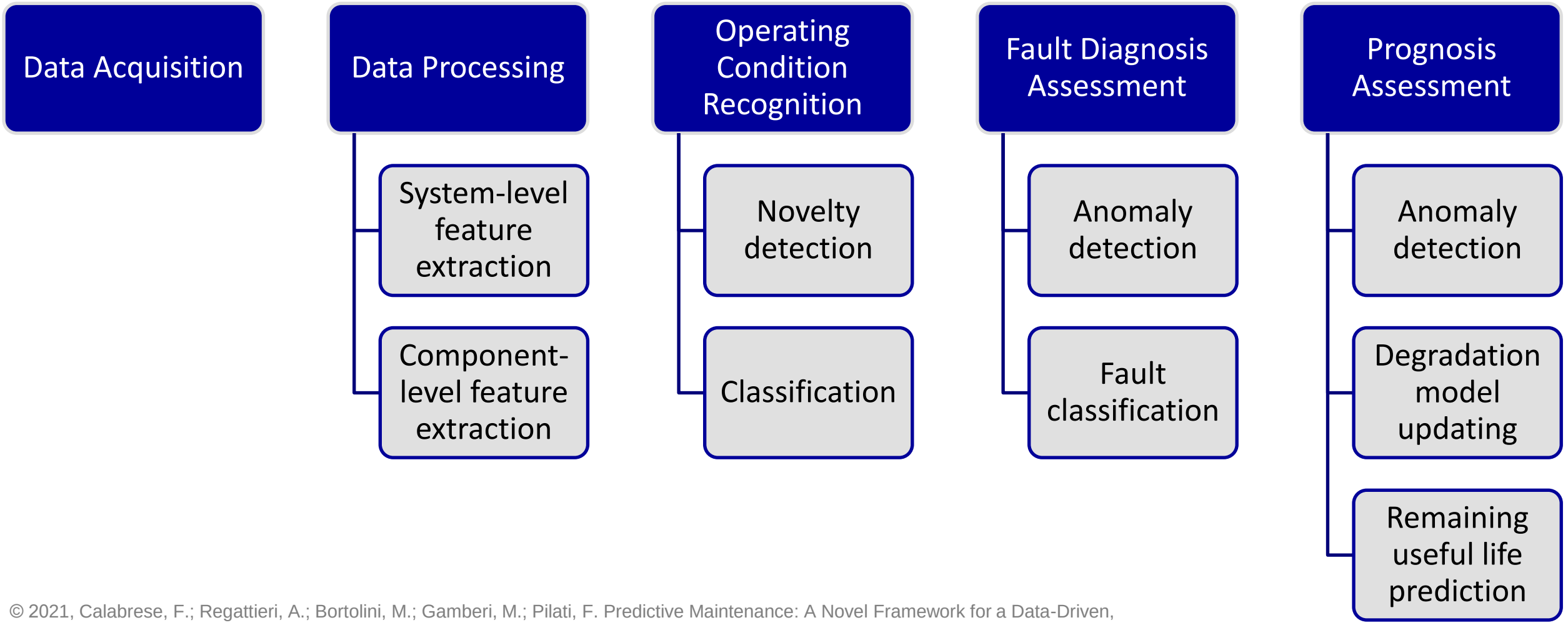


- Свежий альманах для понимания области:
  - *Maintenance Management – Current Challenges, New Developments, and Future Directions*, 2023 (http://www.intechopen.com/books/11528)

Многообразие задач в прогностике

- **Прогнозирование** ВР как такового [*forecasting*]
- **Классификация**/кластеризация ВР [*classification/clastering*]
- Обнаружение **аномалий** ВР [*anomaly detection*]
- Обнаружение **изменений в поведении** ВР [*change points detection*]
  - Крупная подобласть *Data Drift*
- Обнаружение **предвестников** событий [*precursors*]
  - Основа «раннего предупреждения», см. *Early warning system* (*EWS*)
- **Восстановление** значений ВР [*imputation*]
- Оценка **горизонта** прогнозирования [*horizon assessment*]
- …

Пример классификации подзадач



Тезисы

- С середины 2010-х годов произошёл тектонический сдвиг, причём не только в математике, но и в инструментах
- Многие новые методы и их реализации достойны внедрения
  - Для многих подзадач – сплошное машинное обучение
  - Далее раскроем
- Однако не стоит забывать о компромиссах
  - Качество/скорость
  - Качество/стоимость
- Также не стоит забывать о **качестве данных** и особенностях хранения
- В любом случае нужны адекватные ***ETL*-процедуры** и предобработка

Методы

- ✓ Подходы
- ✓ Пути развития
- ✓ Вехи
- ✓ Интересные примеры

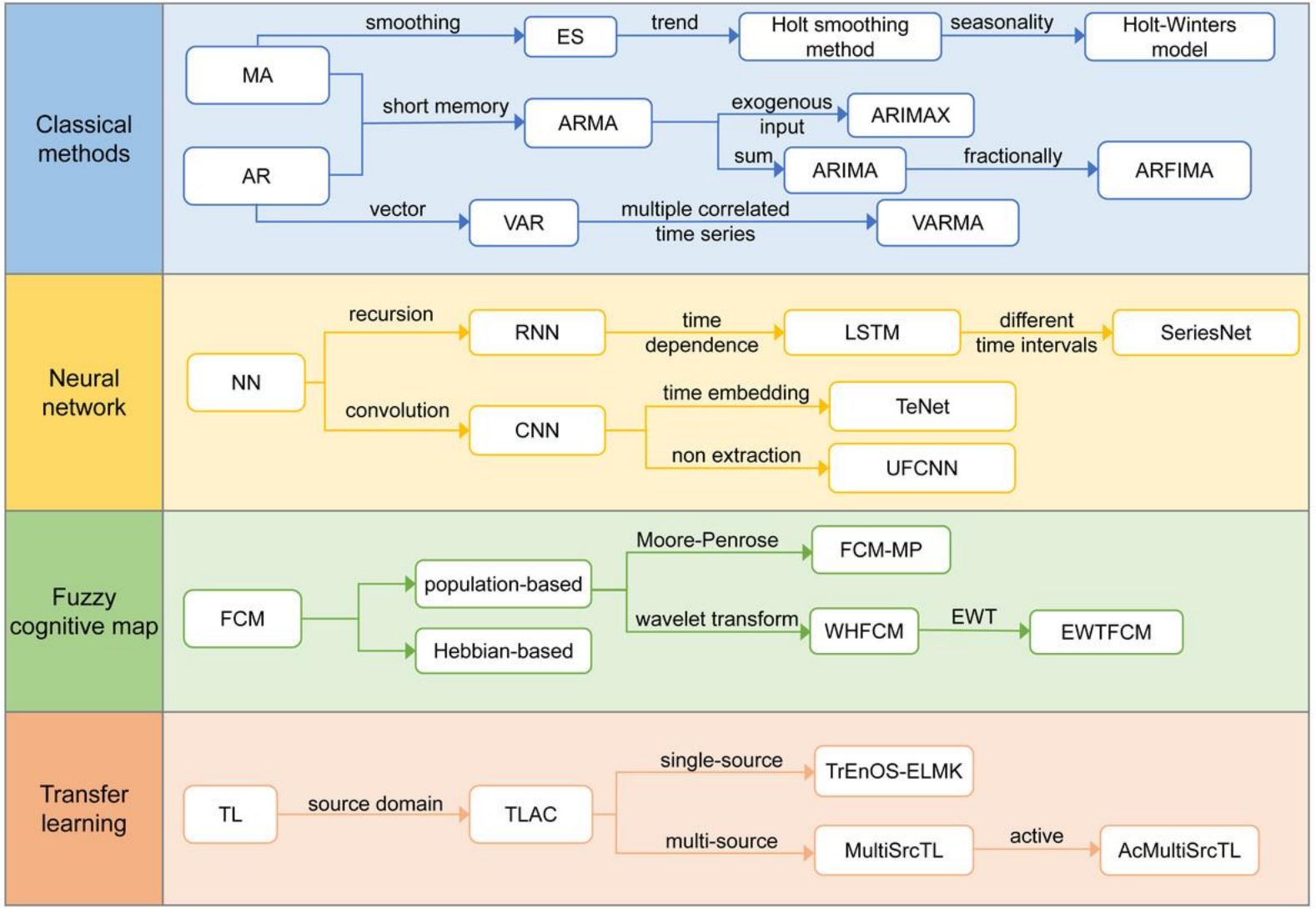
Современное представление о задачах

- Time Traveling with Data Science
  - Focusing on Change Point Detection in Time Series Analysis (Part 2) (http://www.iese.fraunhofer.de/blog/change-point-detection/)

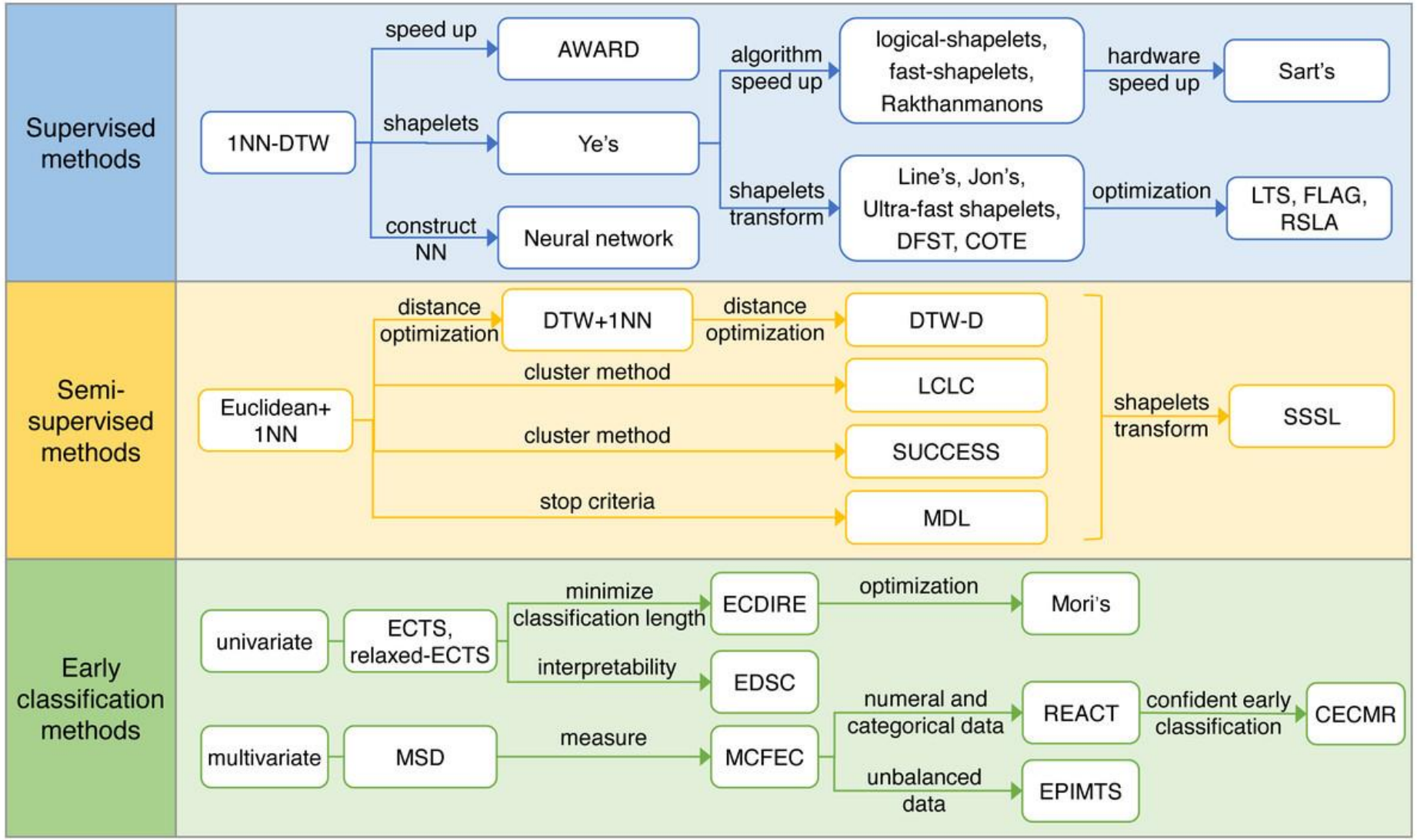
Многообразие подходов и методов

- Tong Y, Liu J, Yu L, Zhang L, Sun L, Li W, Ning X, Xu J, Qin H, Cai Q. 2022. Technology investigation on time series **classification** and **prediction**. PeerJ Computer Science 8:e982 (http://peerj.com/articles/cs-982/)

Развитие подходов к прогнозированию



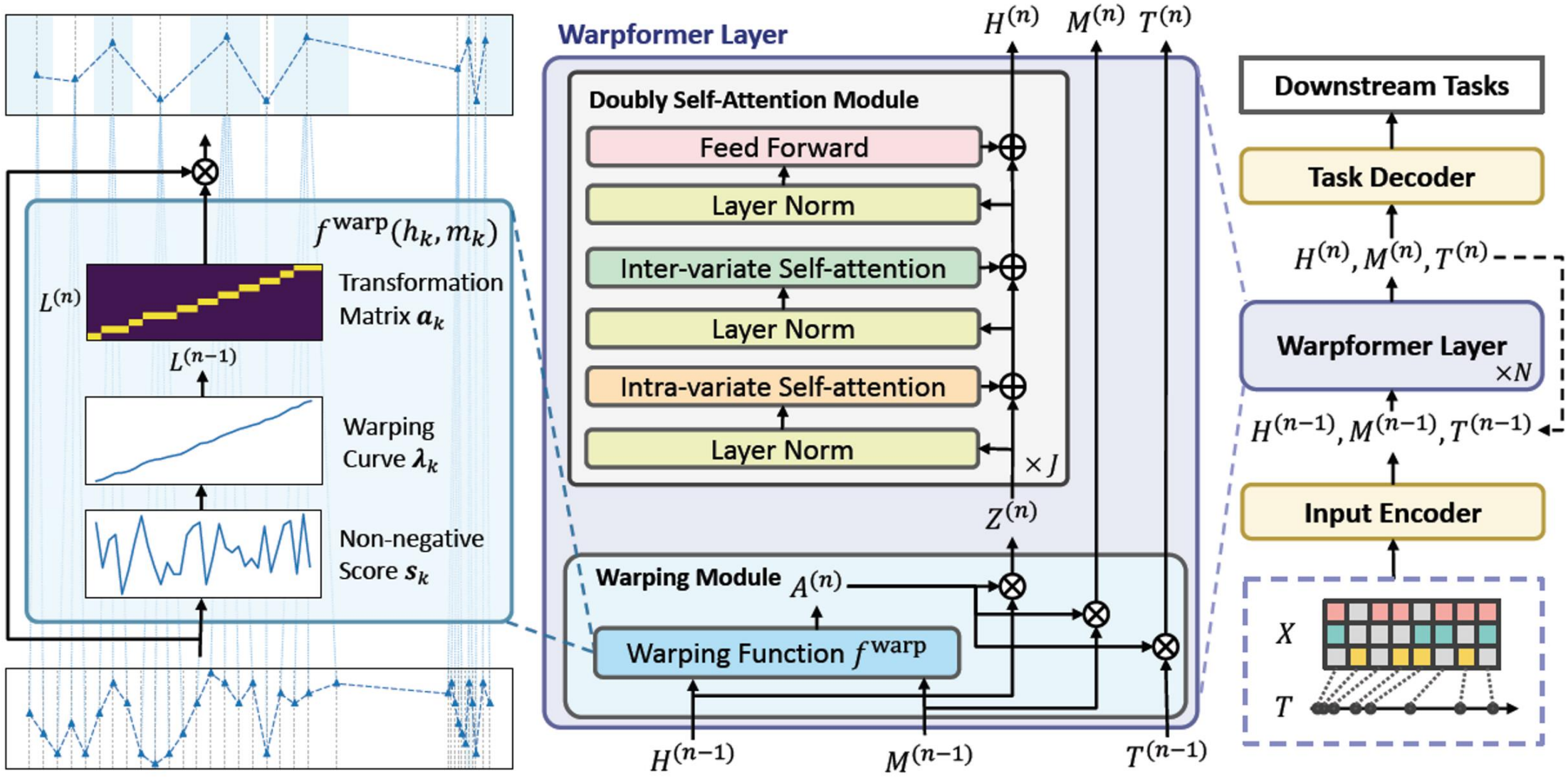
Развитие подходов к классификации



Работа с нерегулярными ВР

- Достачтоно полный, но уже устаревший обзор:
  - *Narayan Shukla, Satya; Marlin, Benjamin M. A Survey on Principles, Models and Methods for Learning from **Irregularly Sampled Time Series**. eprint arXiv*:2012.00168, 2020 (http://arxiv.org/abs/2012.00168)
- Пример последних достижений:
  - *Zhang, Jiawen; Zheng, Shun; Cao, Wei; Bian, Jiang; Li, Jia. **Warpformer**: A Multi-scale Modeling Approach for Irregular Clinical Time Series. eprint arXiv*:2306.09368, 2023 (https://arxiv.org/abs/2306.09368)

Архитектура нейромодели *Warpformer*

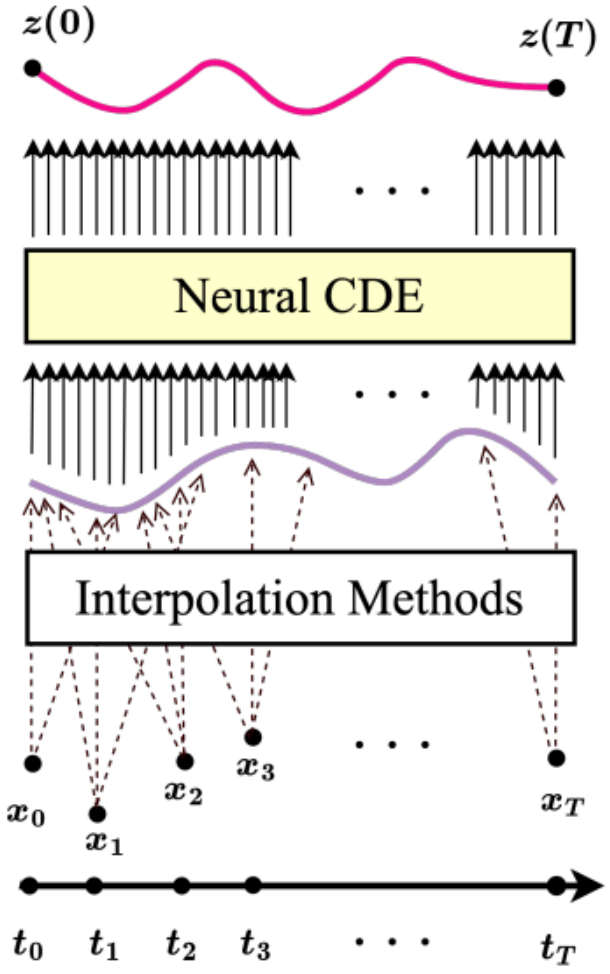


«Стандарт» в предсказании аномалий

- От случайных лесов [*RF*] до длинной краткосрочной памяти [*LSTM*]
- Пример:
  - Xu X., Zhao H., Liu H., Sun H. **LSTM-GAN-XGBOOST** Based Anomaly Detection Algorithm for Time Series Data. 2020 11th International Conference on Prognostics and System Health Management (PHM-2020 Jinan), Jinan, 2020, pp. 334-339

Свежие достижения в предсказании аномалий

- *Precursor-of-Anomaly (PoA) Detection*
  - *Jhin, Sheo Yon ; Lee, Jaehoon ; Park, Noseong.*
    Precursor-of-Anomaly Detection for Irregular Time Series.
    eprint arXiv:2306.15489, 2023. (http://arxiv.org/abs/2306.15489)
  - Репозиторий (http://github.com/sheoyon-jhin/PAD)
- С чем сравниваем?
  - *LSTM, LSTM-VAE, USAD*
- Что предлагаем?
  - *Neural controlled differential equations* (*NCDEs*) +
  - *Multi-task learning* (*MTL*)



Систематизация достижений ИИ для ВР

- *AI for Time Series (**AI4TS**) Papers, Tutorials, and Surveys* (http://github.com/qingsongedu/awesome-AI-for-time-series-papers)
  - Подборка журналов:
    - *CACM, PIEEE, TPAMI, TKDE, TNNLS, TITS, TIST, SPM, JMLR, JAIR, CSUR, DMKD, KAIS, IJF, arXiv(selected), etc.*
  - Подборка материалов конференций:
    - *Machine Learning: NeurIPS, ICML, ICLR*
    - *Data Mining: KDD*
    - *Artificial Intelligence: AAAI, IJCAI*
    - *Data Management: SIGMOD, VLDB, ICDE*
    - *Misc (selected): WWW, AISTAT, CIKM, ICDM, WSDM, SIGIR, ICASSP, CVPR, ICCV, etc.*

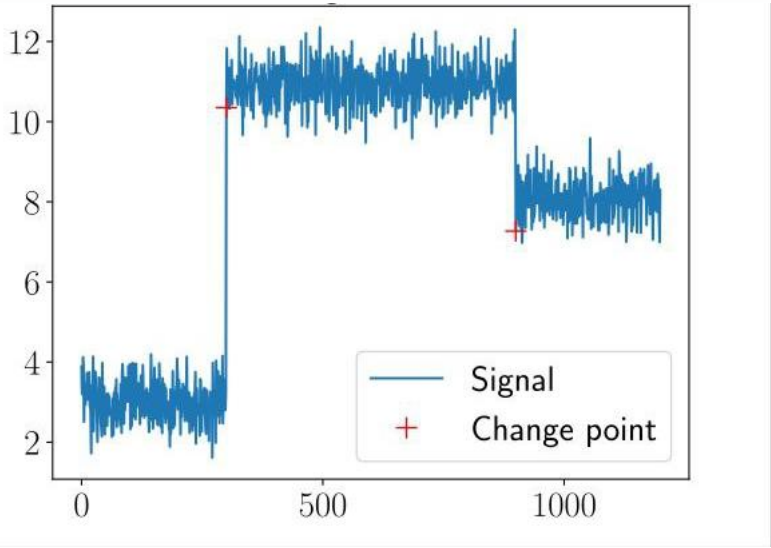
Обнаружение изменения поведения ВР

- *Truong C., Oudre L., Vayatis N.* ***Selective review of offline change point detection methods****. Signal Processing*, 167:107299, 2020.

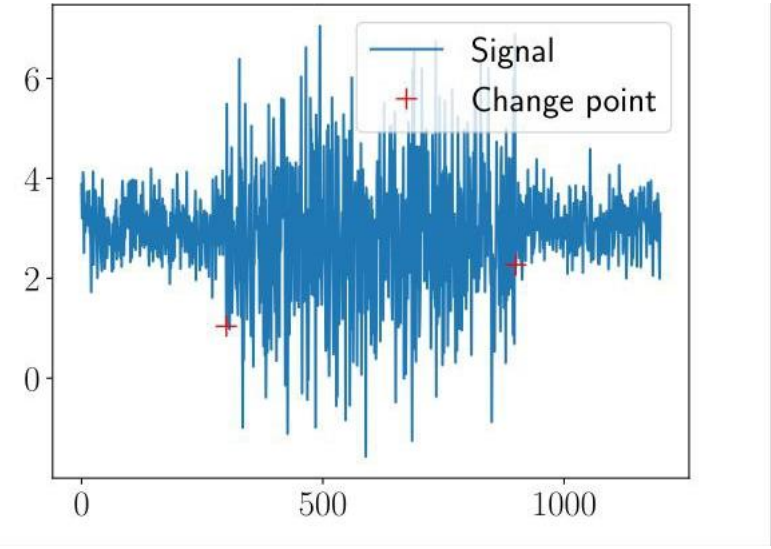
- Базовые библиотеки:
  - ***ruptures*** *– a Python library for off-line change point detection* (http://github.com/deepcharles/ruptures/)
  - ***stumpy*** *– a powerful and scalable Python library for time-series segments similarity analysis* (http://github.com/TDAmeritrade/stumpy/)
  - …

Что может меняться в ВР (2)

- Тренд/среднее значение [*mean*]
  - Сдвиг

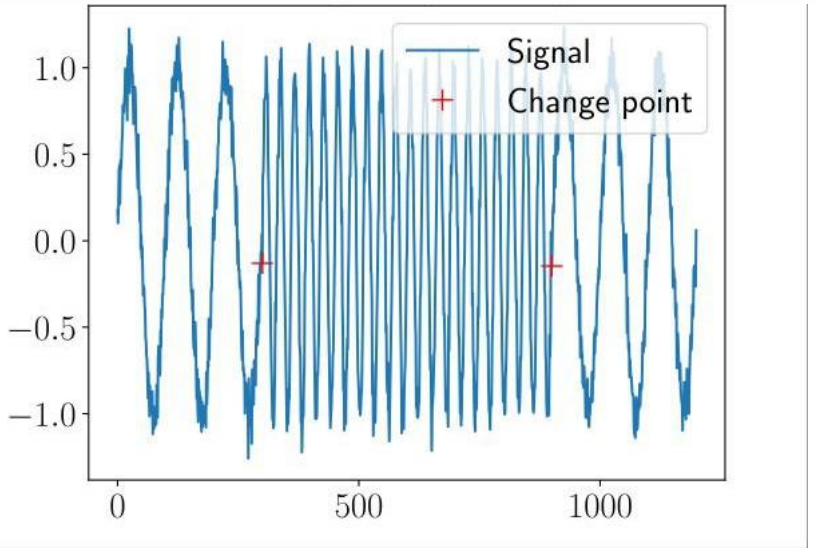


- Разброс/дисперсия [*variance*]
  - Разбалансировка

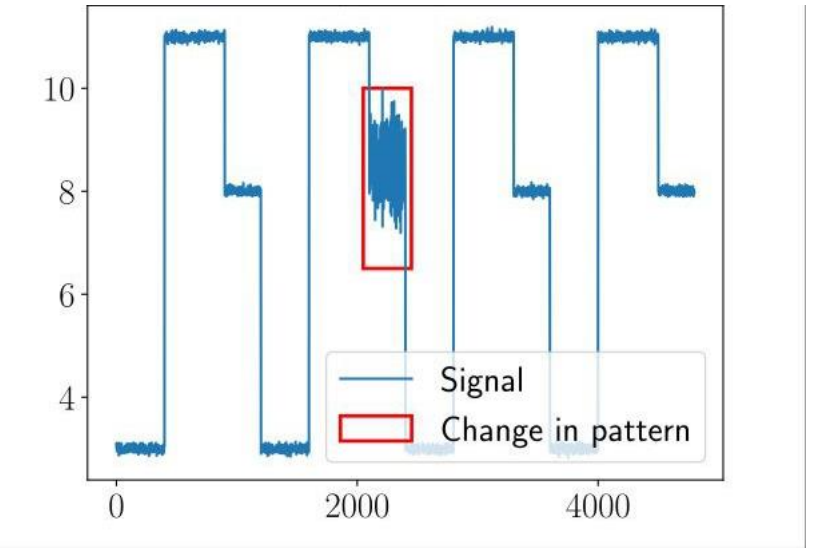


Что может меняться в ВР (1)

- Периодичность/частота [*periodicity*]
  - Наполненность



- Шаблон [*pattern*]
  - Повторяющиеся/«выдающиеся» особенности поведения



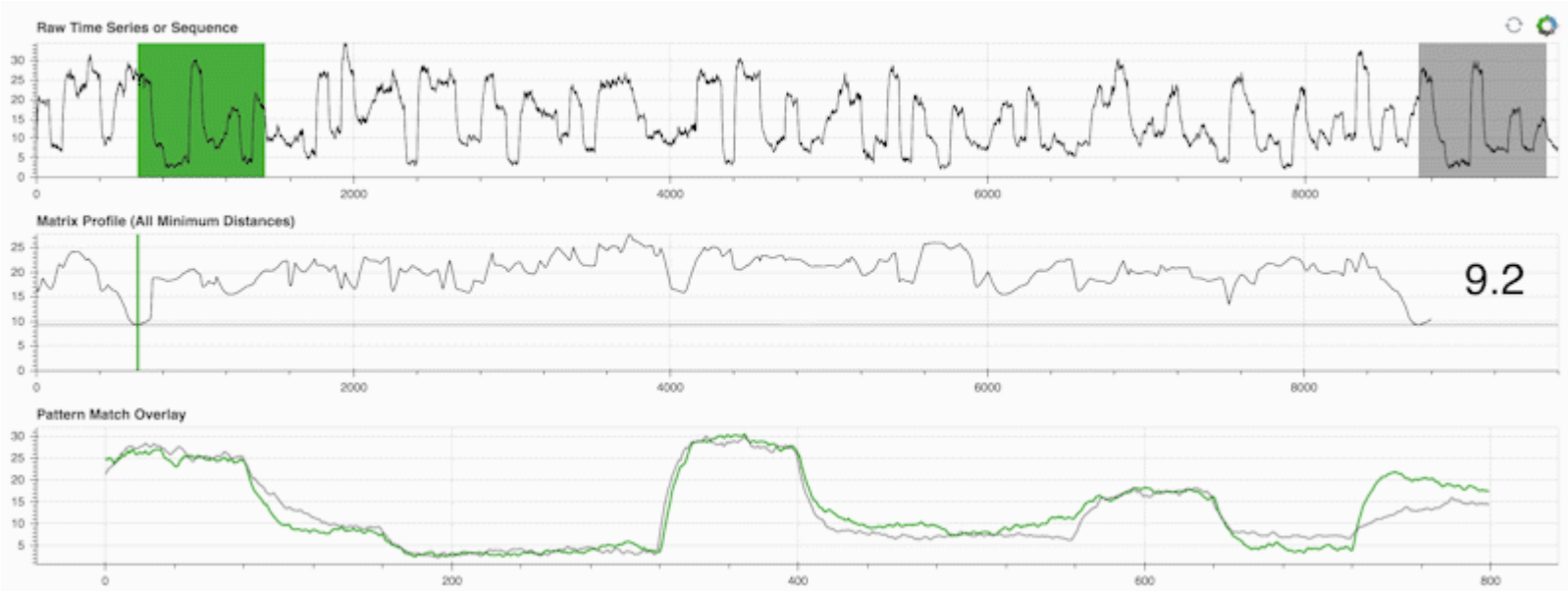
Матричные профили

- *Matrix Profile* (*MP*) – символ одной из «практичных революций»
  - *The UCR Matrix Profile Page* (https://www.cs.ucr.edu/~eamonn/MatrixProfile.html)

- 2016 год
  - *Matrix Profile **I**: All Pairs Similarity Joins for Time Series: A Unifying View that Includes Motifs, Discords and Shapelets. Chin-Chia Michael Yeh, Yan Zhu, Liudmila Ulanova, Nurjahan Begum, Yifei Ding, Hoang Anh Dau, Diego Furtado Silva, Abdullah Mueen, Eamonn Keogh. IEEE ICDM* 2016.
- Настоящее время
  - *Matrix Profile **XXVIII**: Discovering Multi-Dimensional Time Series Anomalies with K of N Anomaly Detection.Sadaf Tafazoli and Eamonn Keogh. SIAM SDM* 2023

Наиболее популярная реализация *MP*

- **Stumpy** (http://github.com/TDAmeritrade/stumpy)
  - Универсальная реализация
  - Но не самая эффективная для частных задач!
    - Matrix profile understanding (http://stumpy.readthedocs.io/en/latest/Tutorial_The_Matrix_Profile.html)



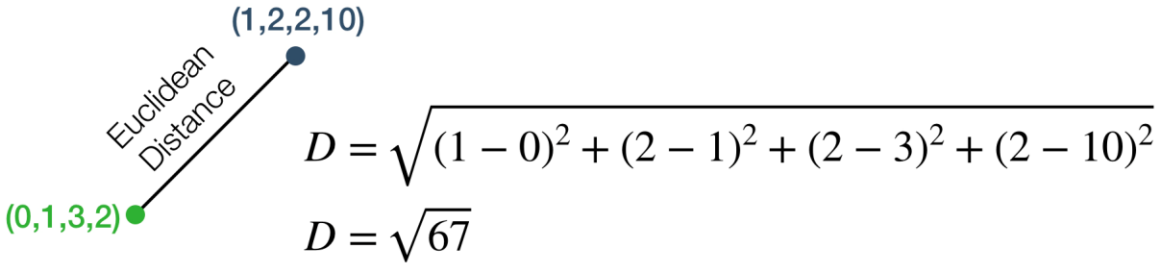
А как начать использовать?

- Хорошее введение – *Mueen A., Keogh E. Time Series Data Mining Using the Matrix Profile: A Unifying View of Motif Discovery, Anomaly Detection, Segmentation, Classification, Clustering and Similarity Joins*. 2017 (http://www.cs.ucr.edu/~eamonn/Matrix_Profile_Tutorial_Part1.pdf)

Пример вычисления простейшего *MP*

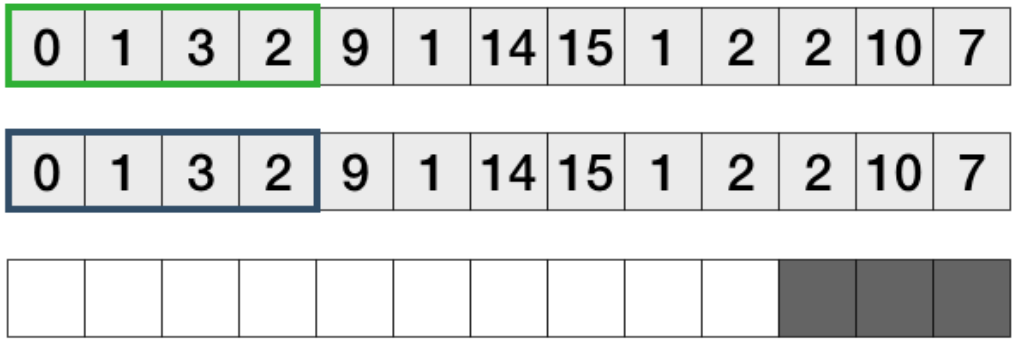
- Сходство частей BP можно считать по-разному…
  - Евклидово расстояние между окнами как простейший пример

Euclidean Distance



#Back2School

Pairwise Euclidean Distance



#DistanceProfile

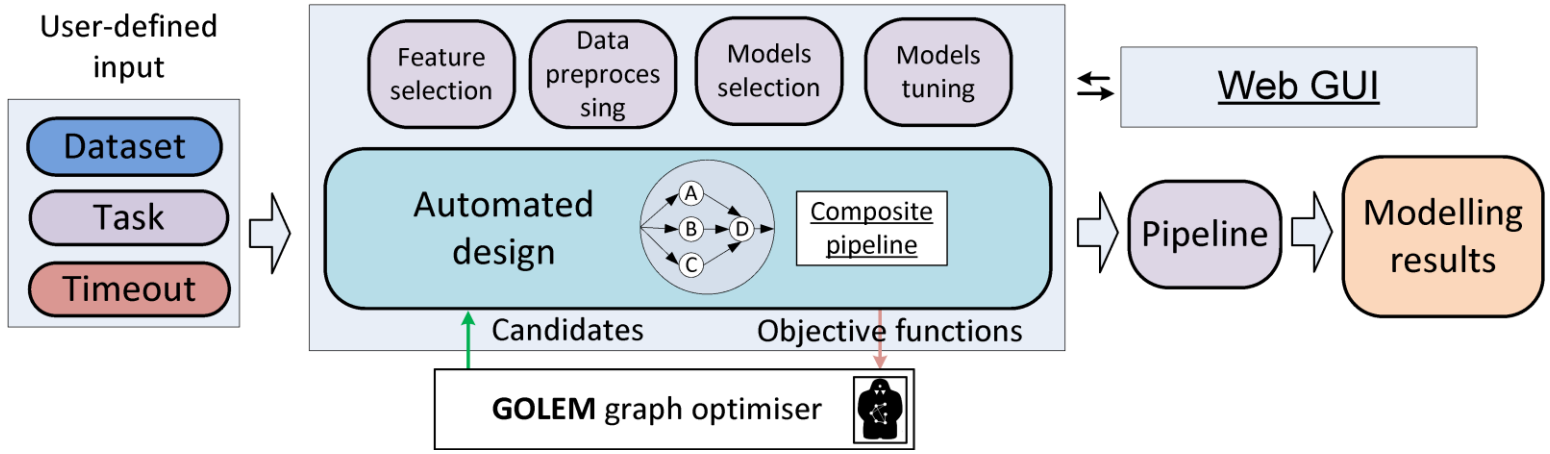
ВР с пропусками данных

- Восстановление пропусков и работа на данных с пропусками – важнейшее направление исследований с точки зрения практически
- ***PyPOTS**: a Python toolbox for data mining on Partially-Observed Time Series* (http://github.com/WenjieDu/PyPOTS/)

- ***SAITS**: Self-Attention-based Imputation for Time Series*, 2023 (http://github.com/WenjieDu/SAITS)

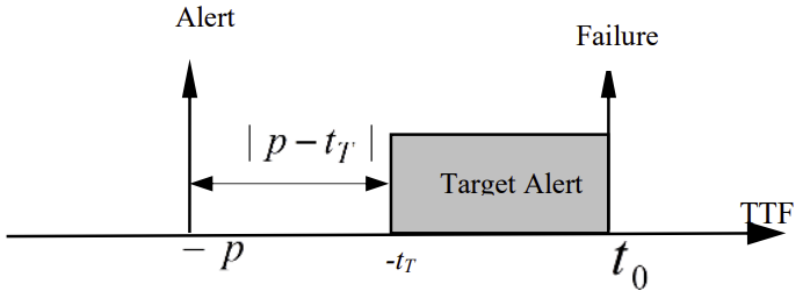
Прогнозирование – FEDOT

- ***FEDOT*** – российская библиотека *AutoML* для ВР на основе генетических алгоритмов
  - *FEDOT is an open-source framework for automated modeling and machine learning (AutoML) problems* (https://github.com/aimclub/FEDOT)
  - *Time series forecasting with FEDOT. Guide* (http://github.com/ITMO-NSS-team/fedot-examples/blob/main/notebooks/latest/3_intro_ts_forecasting.ipynb)



А приложения напрямую к PHM?

- Отстаём!
  - Но активно работаем…
- Пример уже классической попытки:
  - *Ducoffe, M., Haloui, I., Sen Gupta, J.* ***Anomaly Detection on Time Series With Wasserstein Gan Applied to PHM****. IJPHM Special Issue on PHM Applications of Deep Learning & Emerging Analytics, International Journal of Prognostics and Health Management*, 10(4), 2019.
- Как оценить результат?
  - *Yang, C.; Zou, Y.; Liu, J.; Mulligan, K.R.* ***Predictive model evaluation for PHM****. International Journal of Prognostics and Health Management*, 5(2), 2014



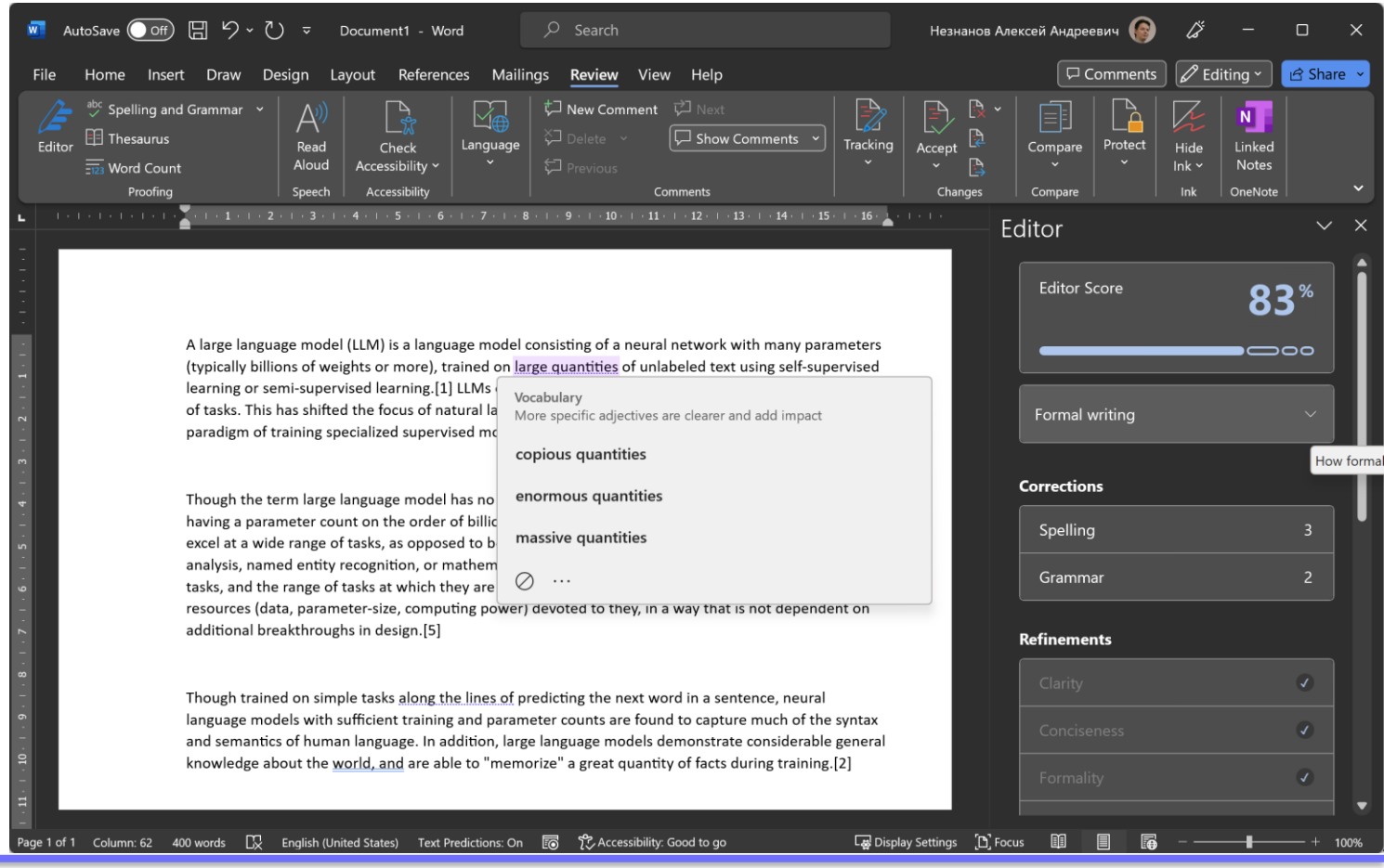
Большие языковые модели

- ***LLM*** *– Large Language Model*
  - *Microsoft + OpenAI* (*ChatGPT*, …) ***vs*** *Google + DeepMind* (*Bard*, …) ***vs*** *Meta** (*LLaMA*, …)
    - Хотя там все уже сменили партнёров и перекупили друг друга…
  - Многочисленные попытки внедрения
  - Дообучение и интеграция с корпоративными информационными системами
  - Обсуждения «разумности»!
  - Объединение с онтологиями и логическим выводом

* Организация, деятельность которой запрещена на территории Российской Федерации

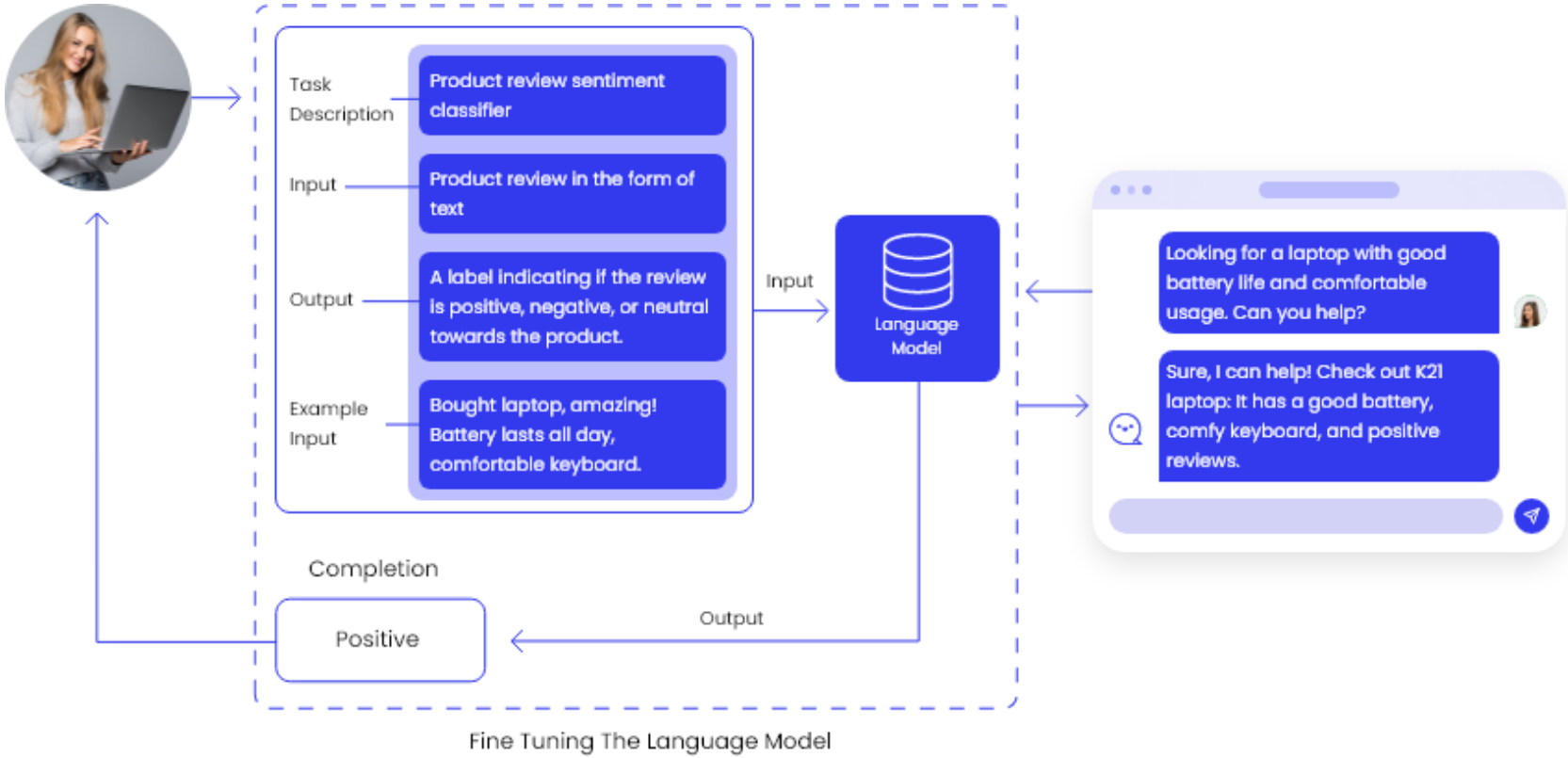
С текстами более-менее понятно

- Очевидные приложения в написании, редактировании, стилизации текстов
  - См. *Microsoft Office 365*:



Мультимодальные модели и промты

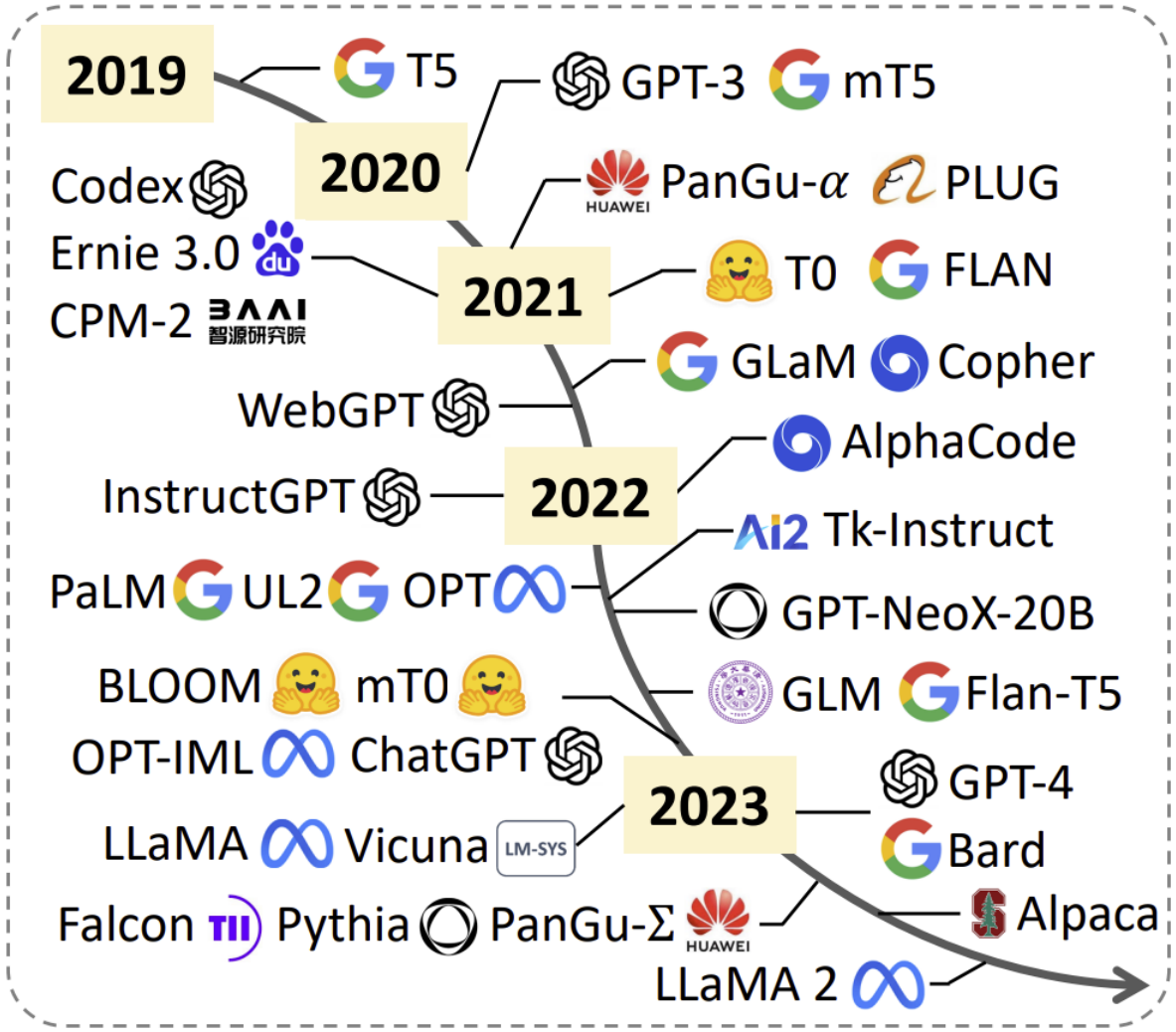
- Промт-инжиниринг [*prompt engineering*]
  - Новая область
  - Сразу несколько профессий
  - *Prompt Engineering Guide* (http://www.promptingguide.ai)

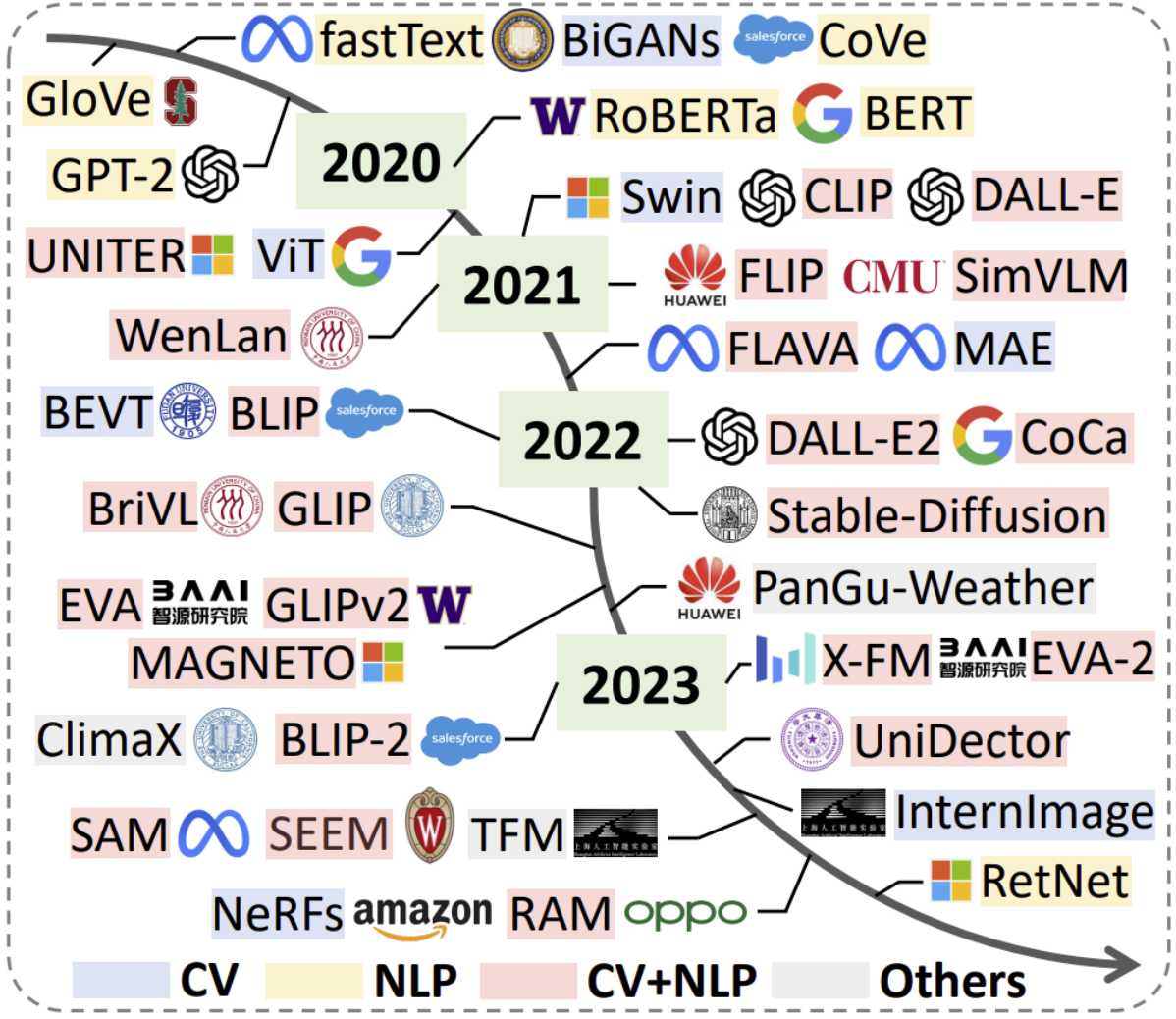


LLM для анализа BP и темпоральных данных?

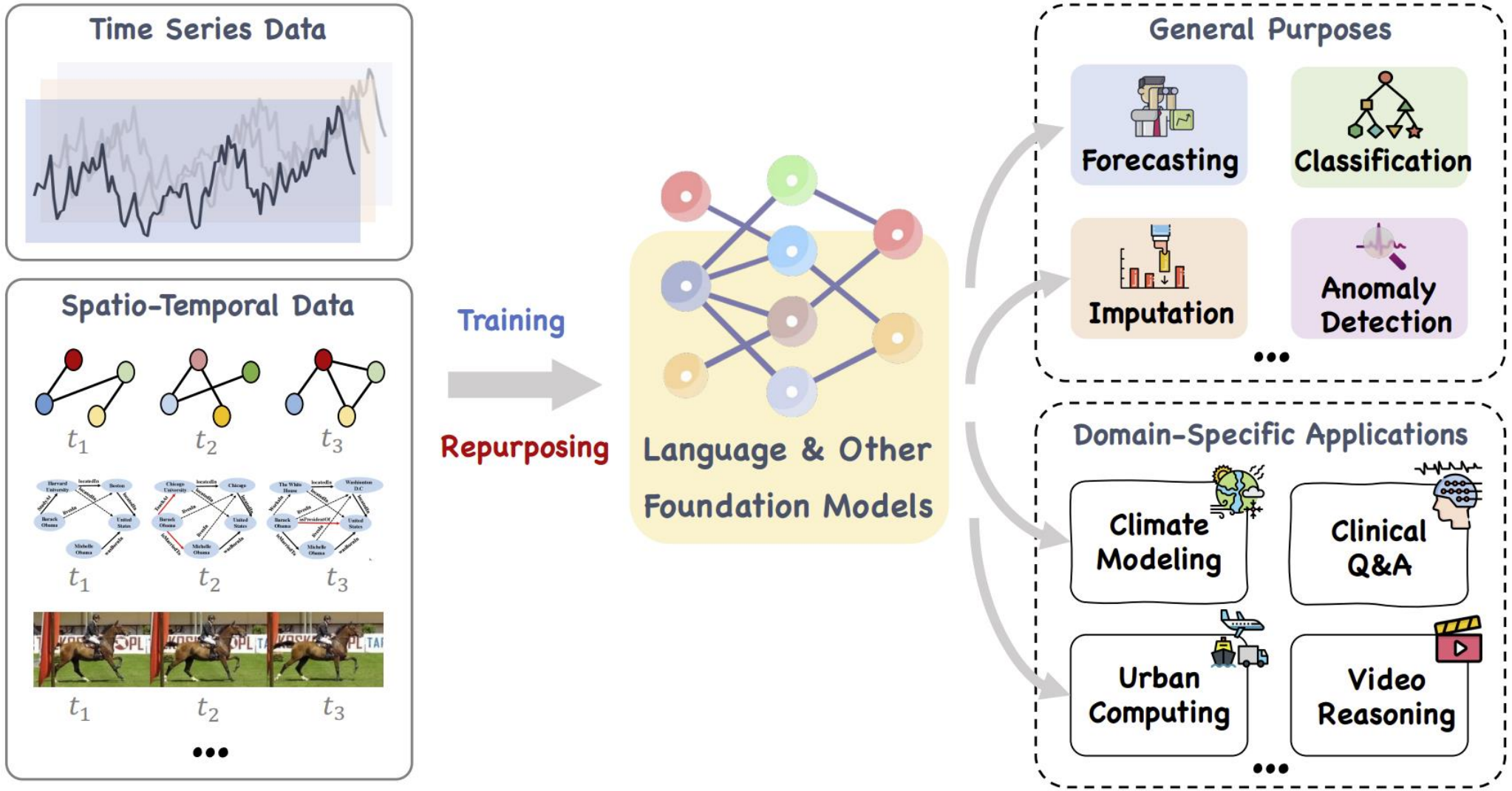
- *Large (Language) Models and Foundation Models (LLM, LM, FM) for Time Series and Spatio-Temporal Data* (http://github.com/qingsongedu/awesome-timeseries-spatiotemporal-lm-llm)
  - Исследуются также и пространственно-временные данные
    - *Domain models including spatio-temporal graphs* (*STG*), *temporal knowledge graphs* (*TKG*)
  - Кроме *LLM* интересны *pre-trained foundation models* (*PFM*)
    - Не знаю ни одного короткого адекватного перевода ☹
    - «Базовая модель» – совсем плохо…

Иллюстративные *LLM* и их изводы

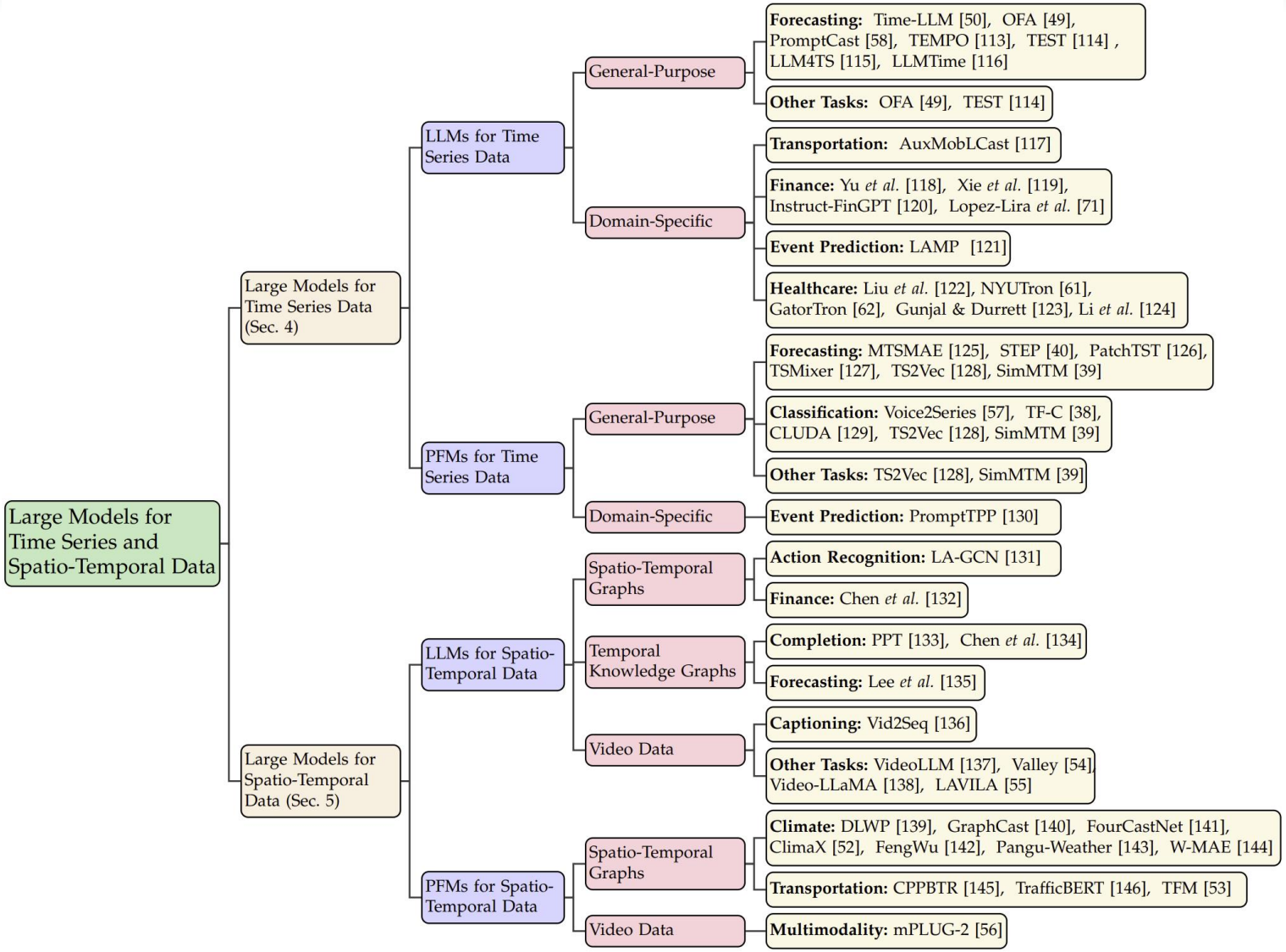




Трактовка темпоральных данных в *LLM*



Таксономия больших моделей



Практичность *LLM*

- Если вдруг подойдёт готовый инструмент – замечательно
- А если нет?
  - Обучение *LLM* с нуля очень дорого
    - Оценка одного прогона обучения *ChatGPT* в 2023 году > 50 млн долларов, в 2024 году прогнозируют > 1 млрд долларов
  - Можно взять чужую модель и дообучить
    - Очень популярное направление исследований
    - Но предсказать эффект внедрения очень тяжело…
- Но даже попробовать сложно – нужна трансдисциплинарная команда

DDDM meets PHM

- ✓ *DDDM – Data-driven Decision Management* (*and Making*)
- ✓ Решения, основанные на данных (и знаниях!)
- ✓ Суть подхода
- ✓ Инструменты

Data-driven approach в целом

- Подход на основе данных
  - По другому не бывает! Но теперь у нас «цифровизация»...
  - На самом деле уже в 2010 году в США *DDDM* использовало ~30% производств
    - *Brynjolfsson E., Mcelheran K. The Rapid Adoption of Data-Driven Decision-Making // American Economic Review*, 106(5), 2016, 133-139.
- Хайп и мода
  - Данные уже давно – важный **актив организации** («новая нефть»)
  - Но **уровень использования данных** при принятии решений до сих пор остаётся **неудовлетворительным**
    - По различным опросам, так считают около **70-80% руководителей**
    - По другим опросам, примерно **40% бизнес-инициатив** проваливаются из-за плохого качества данных при принятии ключевых решений
  - Появился даже специальный термин “*data-driven disaster*”!

Data-driven Decision Management (DDDM)

- Управление принятием решений на основе данных
  - *Your Quick-Start Guide to Data-Driven Decision Making* (http://www.smartsheet.com/data-driven-decision-making-management)
  - *Weigert T. Data-Driven Decision Making: An Adoption Framework. MIT*, 2017 (http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/111450)
  - *Garofalo J. What Drives Executives to Adopt Data Driven Decision Making*? 2017 (http://www.idg.com/blog/what-drives-executives-to-adopt-data-driven-decision-making/)
  - *Crosby P. How to Implement Data-Driven Decision Making in Your Organization*. 2019 (http://theuncommonleague.com/blog/data-driven-decision-making)
- Когда получается?
  - Нормально работает ИТ-отдел (ведь нужно обрабатывать данные)
  - Много образованных сотрудников (ведь нужно думать)
  - Филиальная сеть (возникает дополнительная потребность в агрегации данных)
  - Есть кому внедрять *DDD* (очевидно)

DDDM – Процесс

- *Workflow* в зависимости от методологии
  - Стандартные «цепочки обработки» [*pipeline*]
- *Experiment Design* (*DoE*) как основа любой методологии
  - Статистика!
- Связь наиболее популярных методологий с доступными инструментами
  - Какие бывают с «затыки»?
  - Насколько они неожиданны?
  - Как решение проблем влияло на понимание/применение методологии?

- **Мониторинг становится частью *DDDM!***

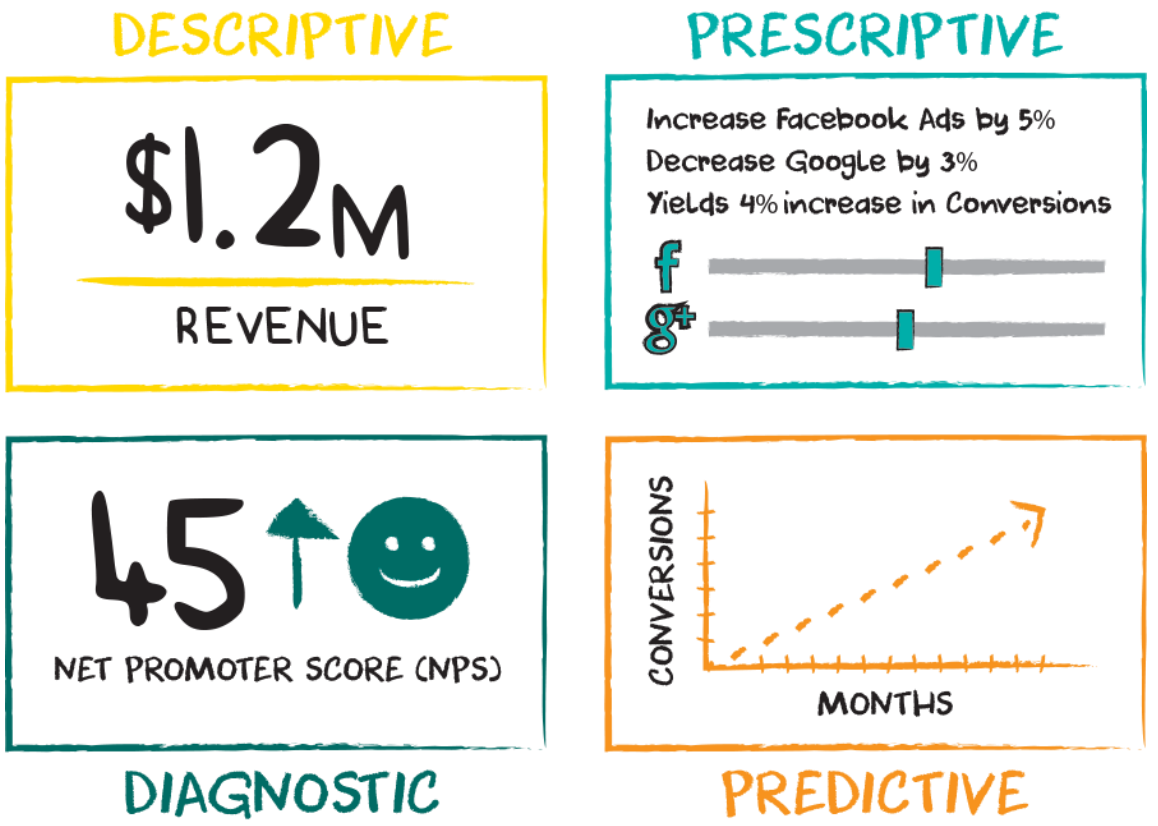
DDDM – Отдача

- Любое системное внедрение *DDDM* позволяет получить кумулятивный эффект:
  - Рост качества данных
  - Оптимизация затрат на аналитические платформы и сервисы
  - Повышение качества оперативного управления
  - Перевод большого числа источников данных из «серой» зоны в «белую»
  - Упрощения доступа к историческим данным
  - Уточнение политик безопасности

- Любое внедрение **Искусственного Интеллекта** (ИИ) – это **на 50% *DDDM***!
  - В основном из-за принципа “*Garbage In – Garbage Out*” и нормальных условий для машинного обучения

DDDM – Основные виды отчётов

- Описательные (эксплораторные)
  - Текущая ситуация
- Диагностические (мониторинговые)
  - Отслеживание изменений
- Предсказывающие (предиктивные)
  - Предсказание изменений
- Предписывающие (прескриптивные)
  - Выявление причин изменений и их взаимосвязи
- Комбинированные



Инфраструктурные инструменты прогностики

- ✓ Хранилища данных
- ✓ Как дополнять/изменять
- ✓ Интеграция инструментов
- ✓ Визуализация

Популярные СУБД для ВР

- *DB-Engines Ranking of Time Series DBMS*
  (http://db-engines.com/en/ranking/time+series+dbms)

Rank Oct 2023	Rank Sep 2023	Rank Oct 2022	DBMS	Database Model	Score Oct 2023	Score Sep 2023	Score Oct 2022
1.	1.	1.	InfluxDB	Time Series, Multi-model	29.74	-1.53	+0.16
2.	2.	2.	Kdb	Multi-model	8.39	-0.56	+0.71
3.	3.	↑ 4.	Prometheus	Time Series	7.28	-0.34	+0.97
4.	↑ 5.	↑ 5.	TimescaleDB	Time Series, Multi-model	5.38	-0.02	+0.19
5.	↓ 4.	↓ 3.	Graphite	Time Series	5.23	-0.22	-1.50
6.	6.	↑ 9.	DolphinDB	Time Series, Multi-model	3.94	-0.11	+1.92
7.	7.	↓ 6.	Apache Druid	Multi-model	3.10	-0.10	+0.56
8.	8.	↓ 7.	RRDtool	Time Series	3.06	-0.08	+0.53
9.	9.	↑ 13.	TDengine	Time Series, Multi-model	2.87	+0.25	+1.29
10.	10.	10.	QuestDB	Time Series, Multi-model	2.16	-0.23	+0.41
11.	↑ 12.	↓ 8.	OpenTSDB	Time Series	2.00	-0.11	-0.50
12.	↓ 11.	12.	GridDB	Time Series, Multi-model	1.96	-0.21	+0.32
13.	13.	↓ 11.	Fauna	Multi-model	1.89	+0.20	+0.19
14.	14.	↑ 17.	VictoriaMetrics	Time Series	1.28	-0.08	+0.37
15.	↑ 16.	↑ 19.	M3DB	Time Series	1.26	+0.19	+0.48
16.	↑ 18.	↑ 20.	Apache IoTDB	Time Series	1.18	+0.20	+0.53
17.	↓ 15.	↓ 14.	Amazon Timestream	Time Series	1.14	+0.02	-0.16
18.	↓ 17.	↓ 16.	eXtremeDB	Multi-model	0.93	-0.09	+0.02
19.	19.	↓ 18.	KairosDB	Time Series	0.90	-0.04	+0.05
20.	↑ 21.	↓ 15.	CrateDB	Multi-model	0.86	+0.05	-0.27

Актуальные открытые хранилища данных

- **Timescale**
  - Postgres for time-series data (http://www.timescale.com)

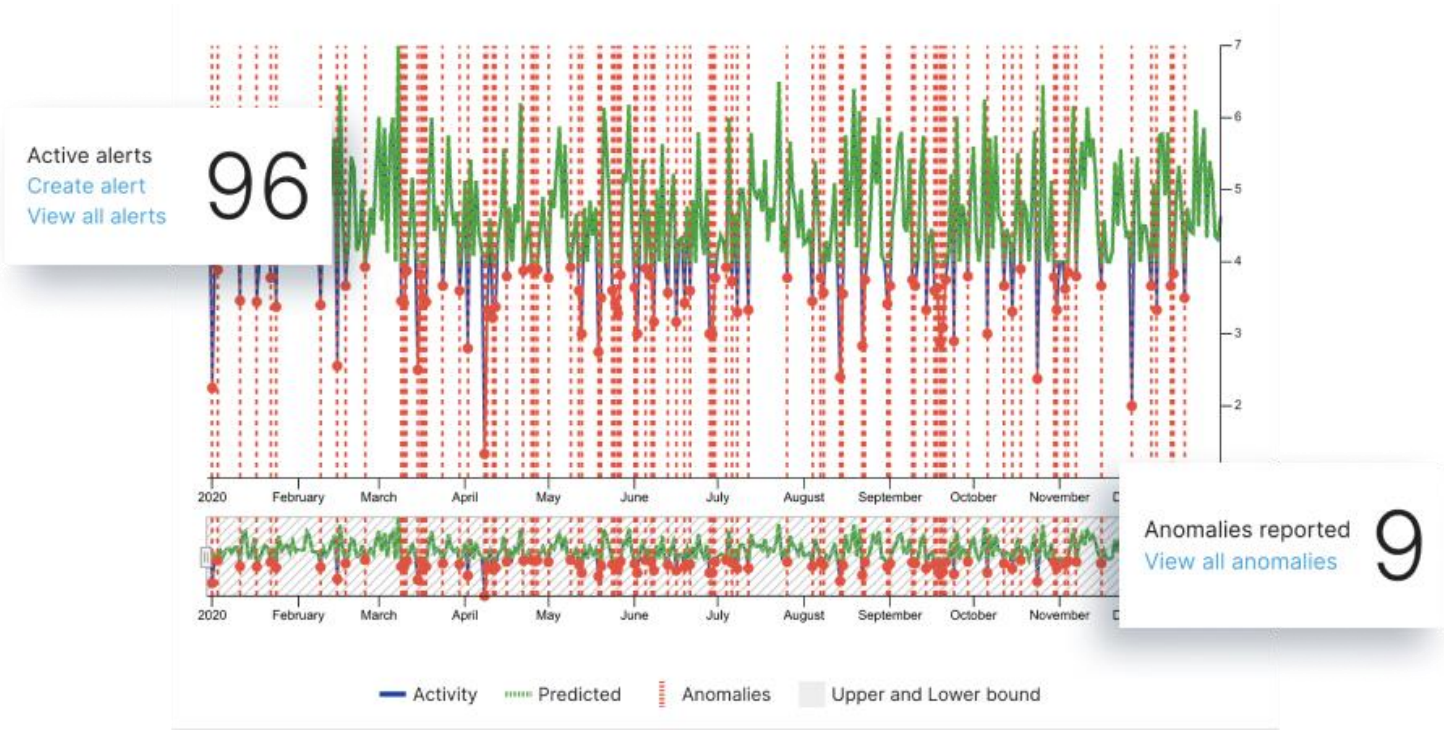
- InfluxData **InfluxDB**
  - Time series data with a single, purpose-built database (http://www.influxdata.com)

- **OpenTSDB**
  - The Scalable Time Series Database (http://opentsdb.net)

- Apache **Pinot™**
  - Realtime distributed OLAP datastore (http://pinot.apache.org)
    - Timestamp Index (http://docs.pinot.apache.org/basics/indexing/timestamp-index)

Мониторинг в реальном времени

- ***ThirdEye*** *– an integrated tool for realtime monitoring of time series and interactive root-cause analysis* (http://github.com/startreedata/thirdeye)
  - Надстройка к Pinot



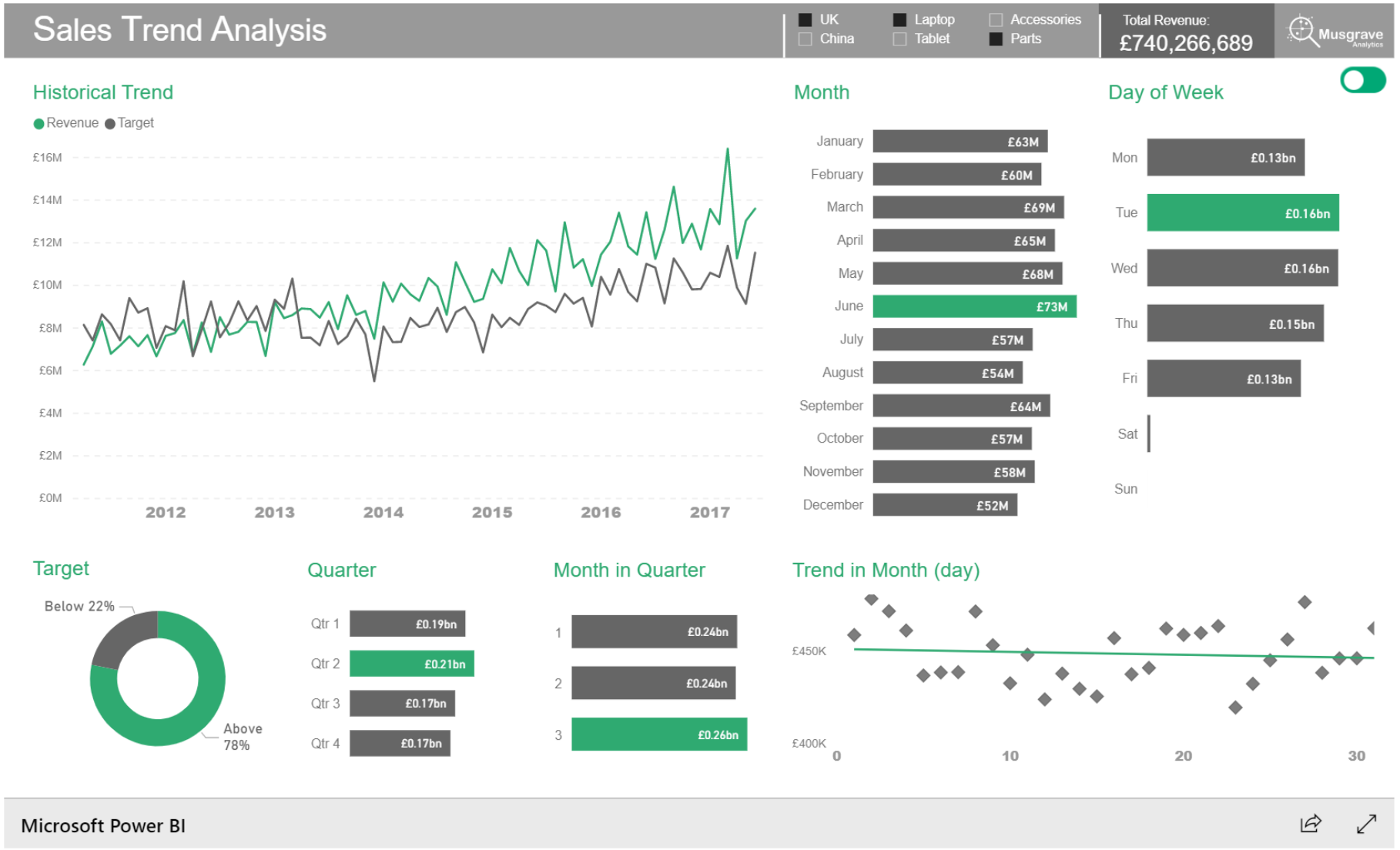
Доработка методов анализа BP

- Основные языки наук о данных и их библиотеки
- Инструментарий *Python* + *SciKit*
  - *Time Series for scikit-learn People (Part I): Where's the X Matrix?* (http://www.ethanrosenthal.com/2018/01/28/time-series-for-scikit-learn-people-part1/)
  - *Time Series for scikit-learn People (Part II): Autoregressive Forecasting Pipelines* (http://www.ethanrosenthal.com/2018/03/22/time-series-for-scikit-learn-people-part2/)
- Инструментарий *R*
  - *Using R for Time Series Analysis* (http://a-little-book-of-r-for-time-series.readthedocs.io/en/latest/src/timeseries.html)

Маленькие или большие данные?

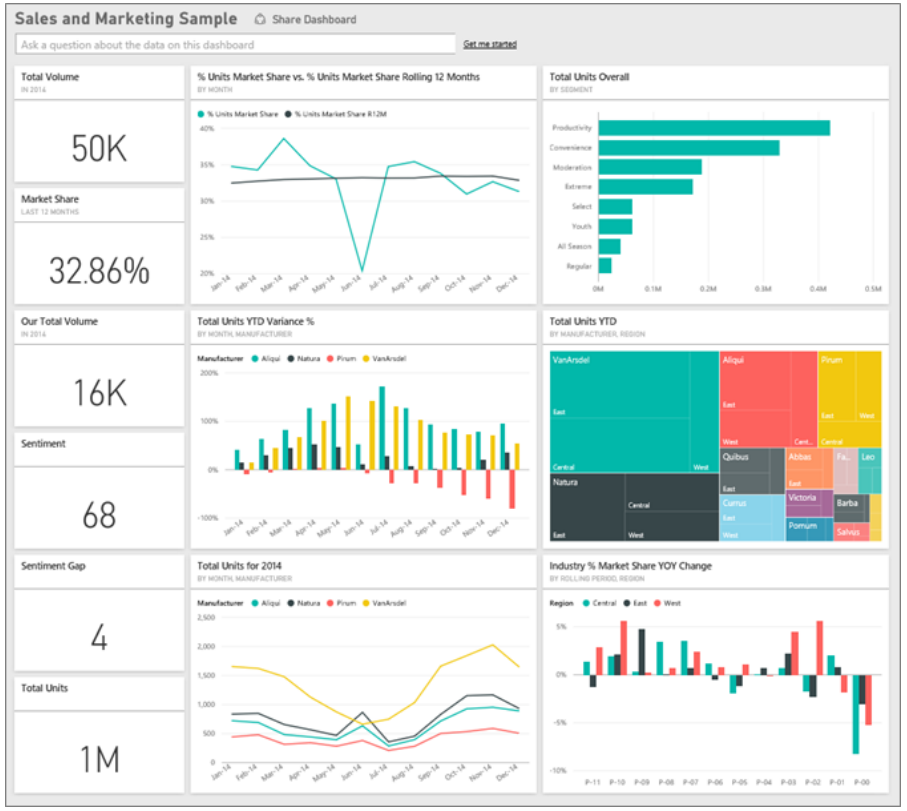
- Большие данные позволяют получить новые знания из-за повышения детализации
  - Но всегда ли это надо?
- Но многие реальные задачи анализа событий прекрасно решаются в *Microsoft Excel / Power BI* на собственном ноутбуке
  - Анализ полумиллиона отзывов клиентов финансовых организаций – *Analyzing half a million consumer complaints* (http://chandoo.org/wp/analyzing-consumer-complaints-1/)
  - Примеры анализа продаж – *Sales Trend Analysis Dashboard* (http://www.musgraveanalytics.com/sales-trend-analysis-dashboard)
    - По опыту, при очищенных данных такой отчёт делается с нуля примерно за полдня

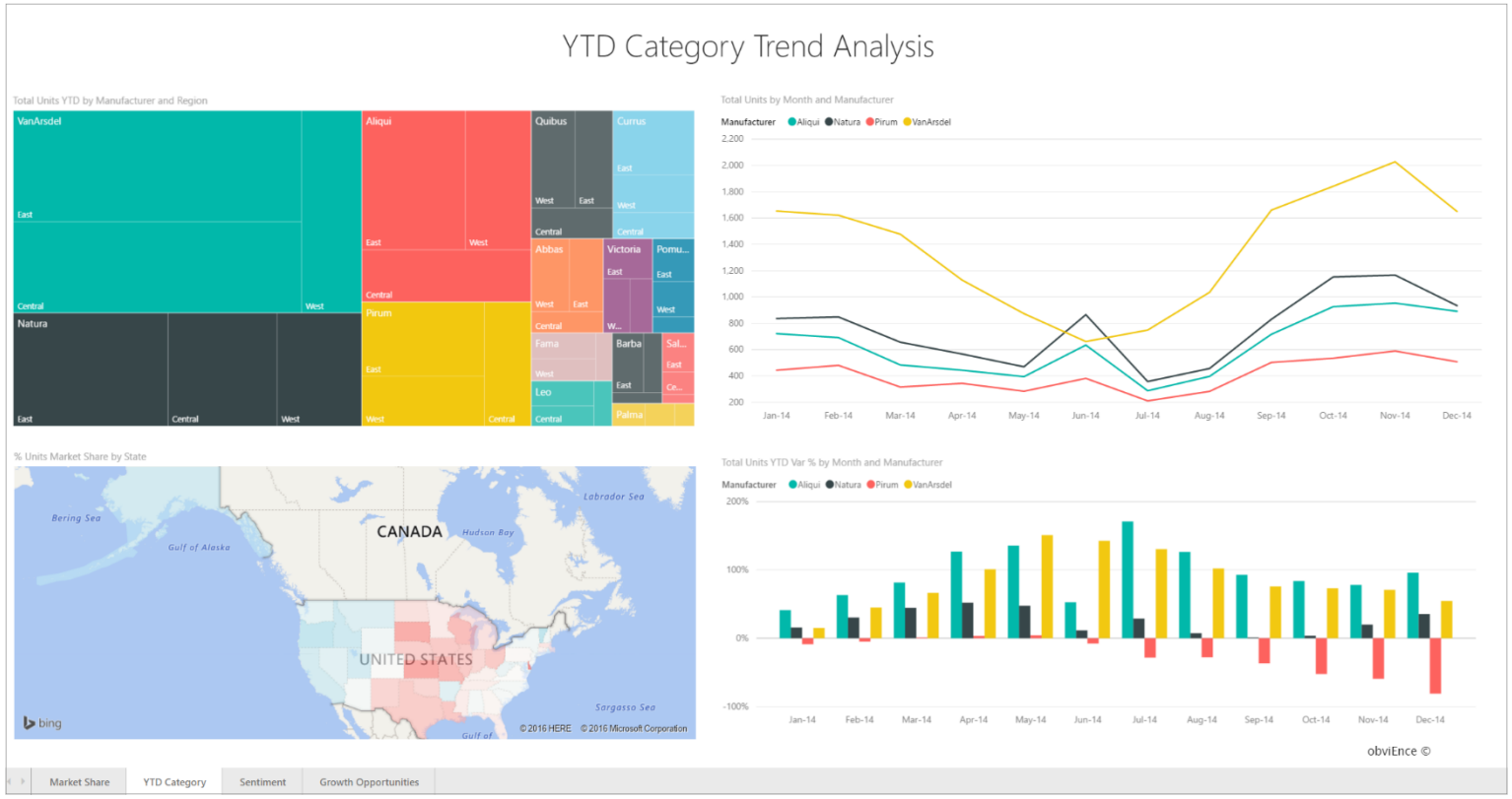
Пример: *Sales Trend Analysis Dashboard*



Пример от самой *Microsoft* (+ *obviEnce*)

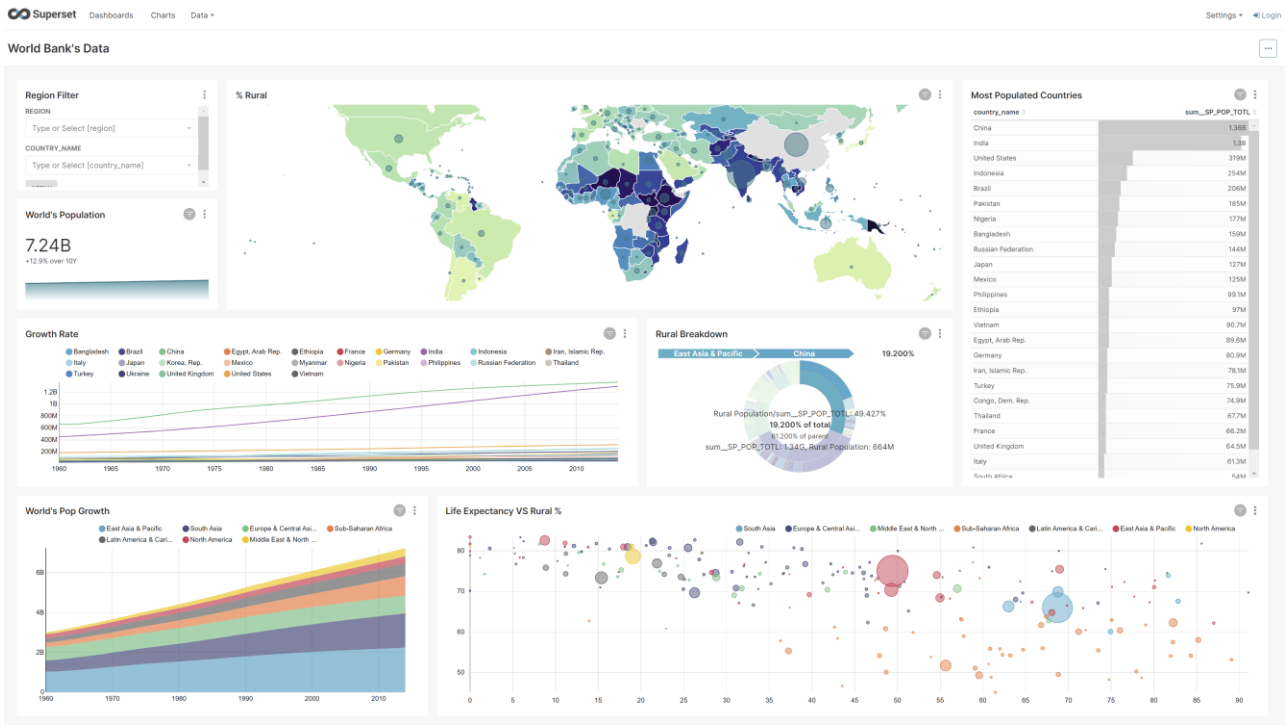
- *Sales and Marketing sample for Power BI: Take a tour* (http://docs.microsoft.com/en-us/power-bi/create-reports/sample-sales-and-marketing)

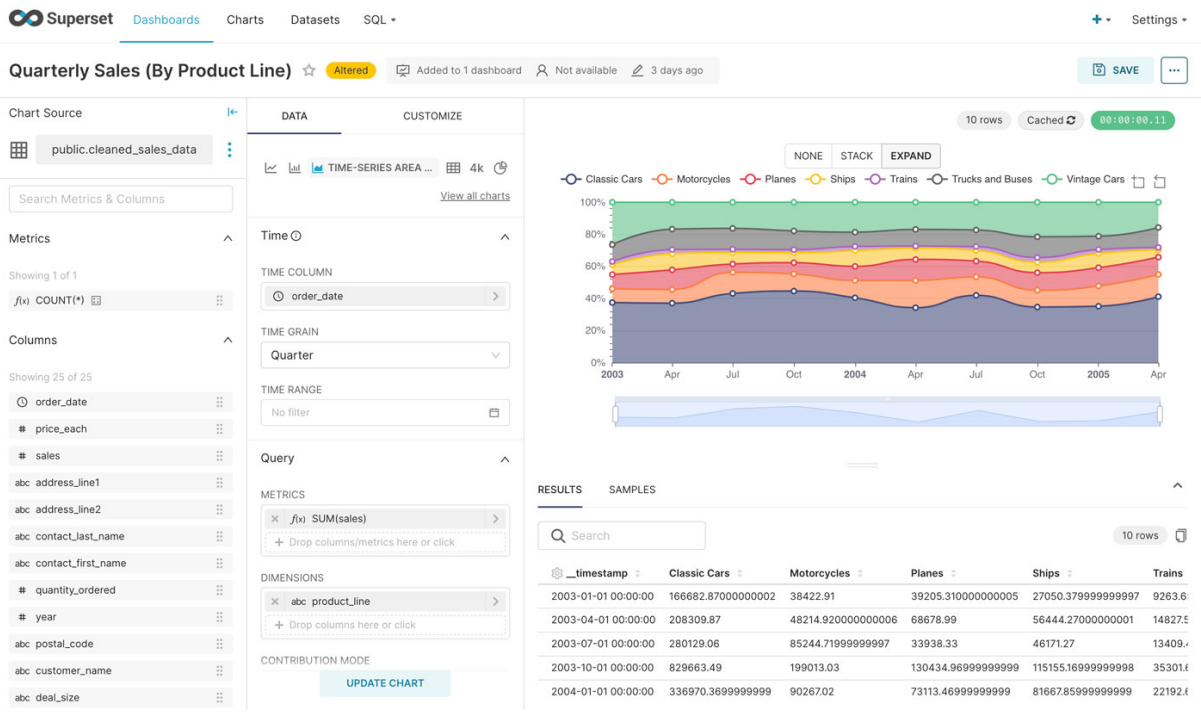




Инструменты с открытым исходным кодом

- *Apache **Superset*** (http://superset.apache.org)
  - Интерактивная визуализация данных на основе проекта *ECharts* и расширения *SQL*
  - Обычное ограничение на число точек в «чарте» – 50 000





Визуализация больших ВР

- Для своей «веб-морды»?
- ***µPlot*** (http://github.com/leeoniya/uPlot)
  - *A fast, memory efficient Canvas 2D based chart for plotting time series, lines, areas, ohlc & bars*
  - *From a cold start it can create an interactive chart containing **150 000 data points in 90 ms**, scaling linearly at **~31 000 pts/ms***
  - Но очень плохая документация…

Но это ещё не конец?!

Вопросы? Замечания? Предложения?

- Контакты:
  - к.т.н., доц. ***Незнанов Алексей Андреевич***
    - Старший научный сотрудник международной лаборатории интеллектуальных систем и структурного анализа ФКН НИУ ВШЭ
    - *E-mail*: alex.neznanov@gmail.ru
    - *Web-site*: http://hse.ru/staff/aneznanov
    - *Blog*: http://sibirianshamanssongs.blogspot.ru (RU)