

Метод мониторинга и оптимизации энергоэффективности территорий на основе анализа спутниковых измерений распределения температуры

Лобанцов В.В. (1), Мурынин А.Б. (2,3), Рихтер А.А. (2)

(1) Государственный университет по землеустройству, Москва, РФ

(2) НИИ "АЭРОКОСМОС", Москва, РФ

(3) ФИЦ ИУ РАН, Москва, РФ

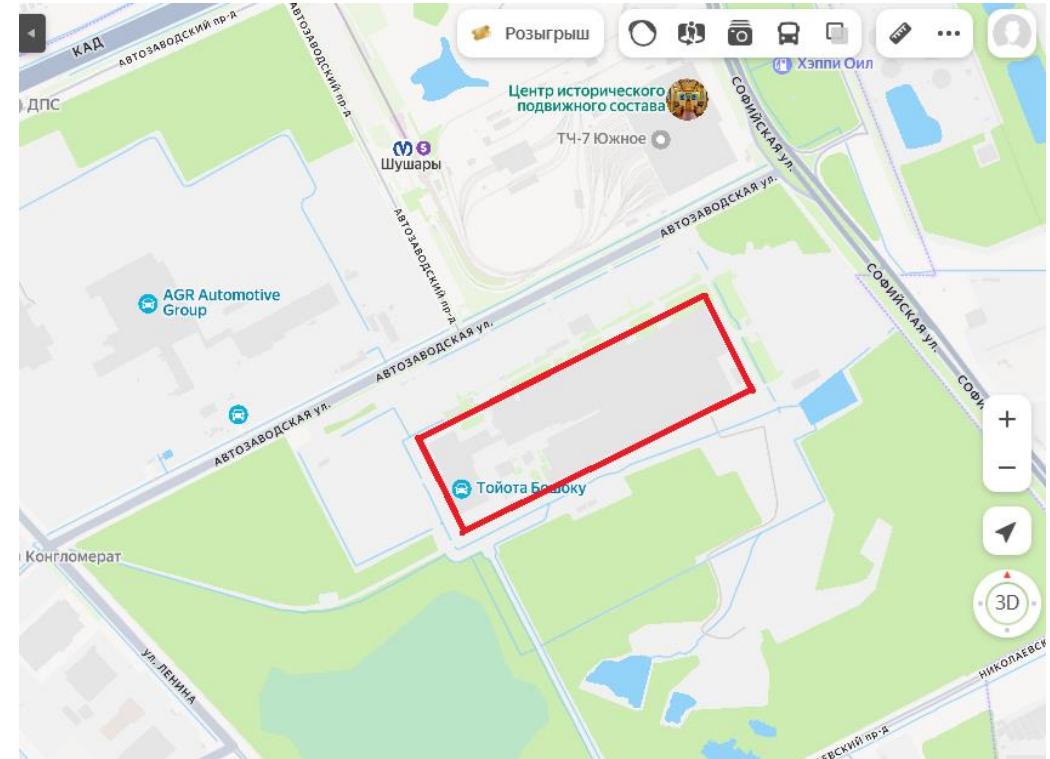
urfin17@yandex.ru

Постановка задачи

По данным дистанционного зондирования Земли в инфракрасном диапазоне требуется:

- определить тепловую активность объектов на промышленной или городской территории;
- выявить тепловые аномалии, связанные с работой энергетических и промышленных объектов, потерями энергии, экологическими нарушениями (свалки, утечки, загрязнения), а также образованиями тепловых пятен в городской среде;
- показать, что инфракрасные спутниковые снимки предоставляют карту температуры поверхности, достаточную по точности для анализа энергетической инфраструктуры и промышленности.

Территория исследования



Территория завода Toyota в районе Шушары, открылся 21 декабря 2007 г., в простое с 4 марта 2022 г.

*Фото с сайта www.drive.ru

Спектральные каналы снимков Landsat

Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Band 1 – Blue	0.45–0.52	30
Band 2 – Green	0.52–0.60	30
Band 3 – Red	0.63–0.69	30
Band 4 – Near Infrared (NIR)	0.76–0.90	30
Band 5 – Shortwave Infrared (SWIR) 1	1.55–1.75	30
Band 6 – Thermal	10.40–12.50	120 (resampled to 30)
Band 7 – Shortwave Infrared (SWIR) 2	2.08–2.35	30

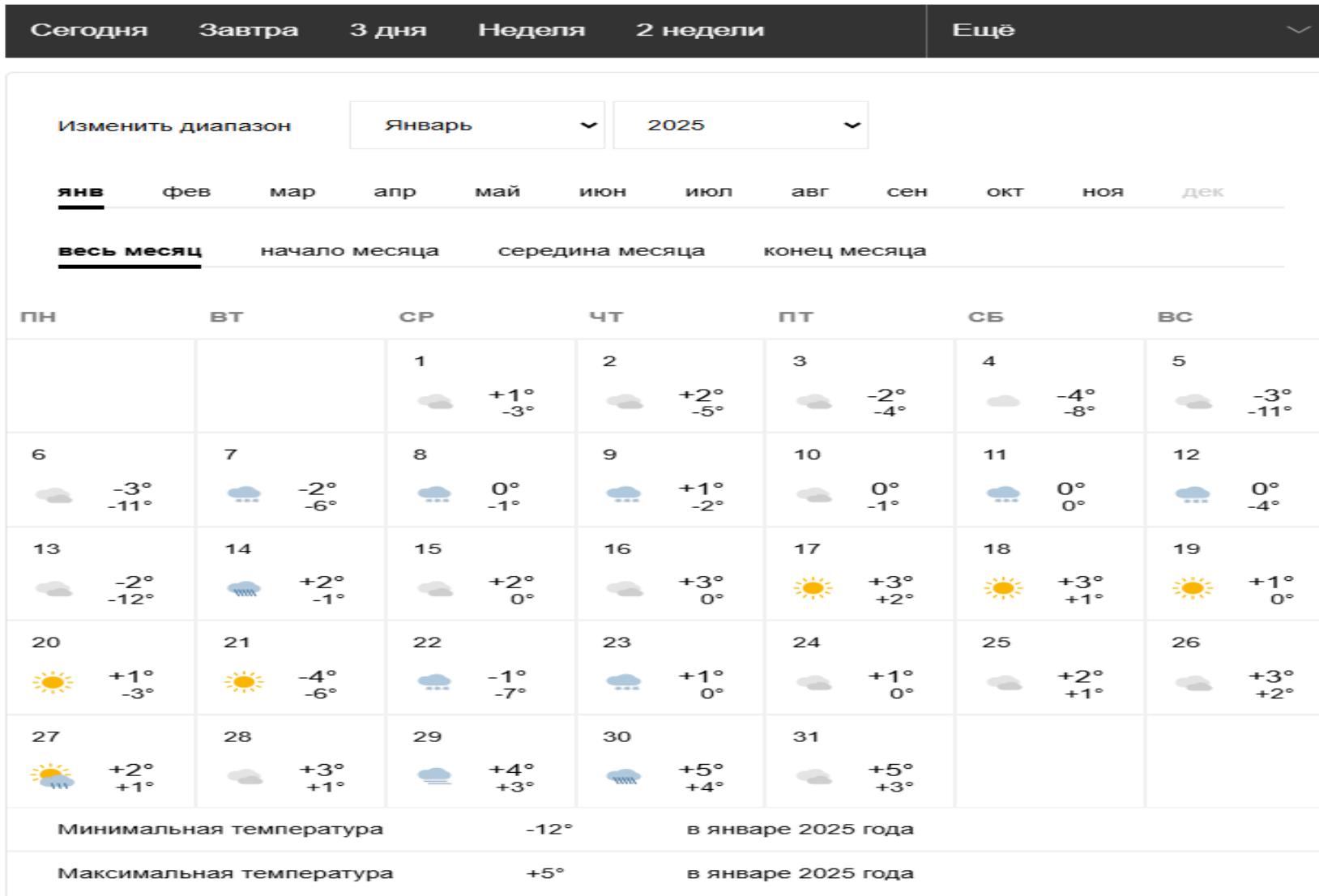
Landsat-5

Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Band 1 – Coastal aerosol	0.43–0.45	30
Band 2 – Blue	0.45–0.51	30
Band 3 – Green	0.53–0.59	30
Band 4 – Red	0.64–0.67	30
Band 5 – Near Infrared (NIR)	0.85–0.88	30
Band 6 – Shortwave Infrared (SWIR) 1	1.57–1.65	30
Band 7 – Shortwave Infrared (SWIR) 2	2.11–2.29	30
Band 8 – Panchromatic	0.50–0.68	15
Band 9 – Cirrus	1.36–1.38	30
Band 10 – Thermal Infrared (TIRS) 1	10.6–11.19	100 (resampled to 30)
Band 11 – Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50–12.51	100 (resampled to 30)

Landsat-8

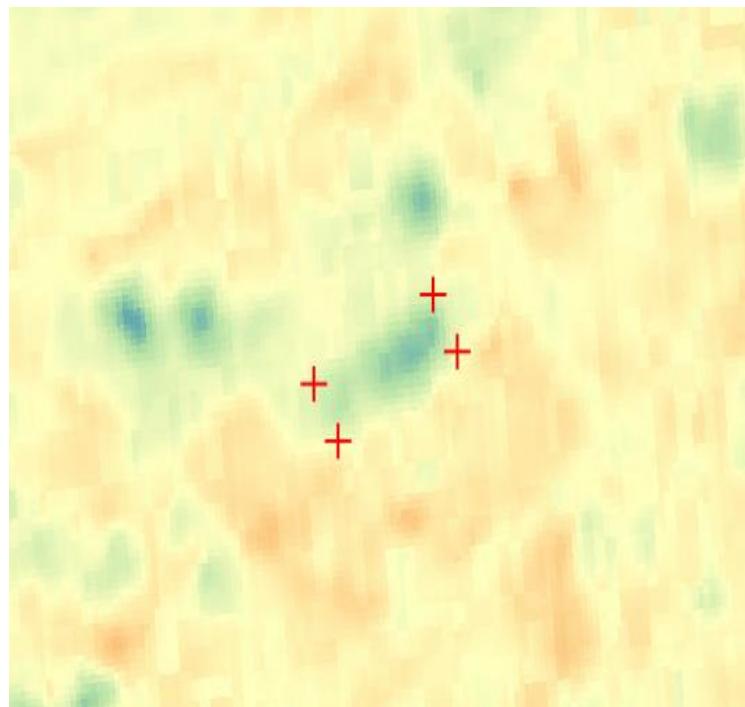
<https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites>

Источники данных о температуре для валидации

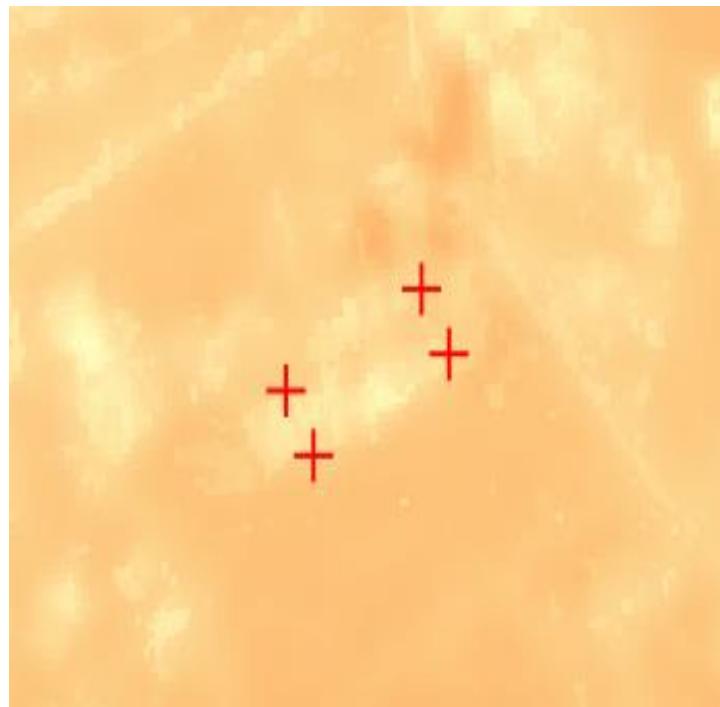


- [20130407-t.xyz](#)
- [20220321-t.xyz](#)
- [20140226-t.xyz](#)
- [20220413-t.xyz](#)
- [20140314-t.xyz](#)
- [20220421-t.xyz](#)
- [20190406-t.xyz](#)
- [20220422-t.xyz](#)
- [20200314-t.xyz](#)
- [20220430-t.xyz](#)
- [20200323-t.xyz](#)
- [20221030-t.xyz](#)
- [20230227-t.xyz](#)
- [20201001-t.xyz](#)
- [20230408-t.xyz](#)
- [20210310-t.xyz](#)
- [20230409-t.xyz](#)
- [20210411-t.xyz](#)
- [20240411-t.xyz](#)
- [20220305-t.xyz](#)
- [20241020-t.xyz](#)
- [20220313-t.xyz](#)
- [20241104-t.xyz](#)
- [20220320-t.xyz](#)
- [20250413-t.xyz](#)

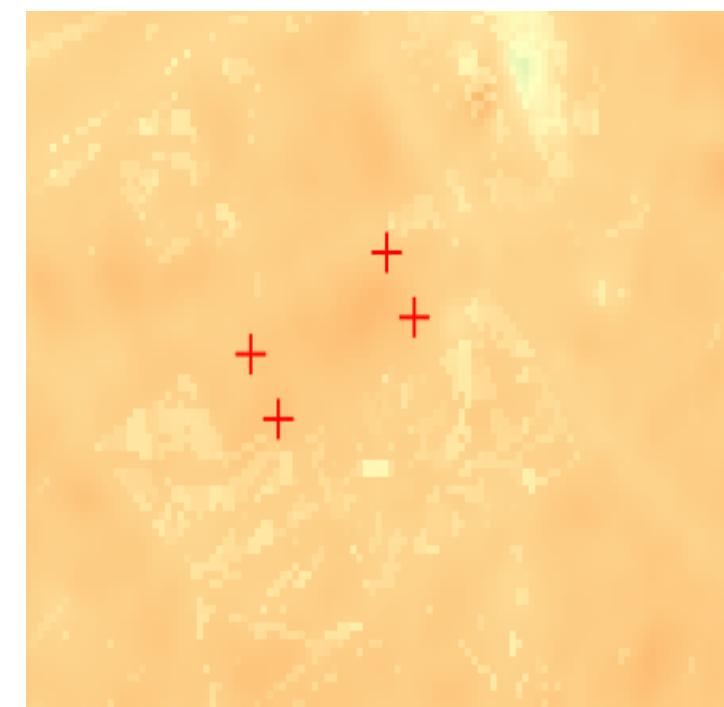
Примеры тепловых карт



11 апреля 2021 г.



05 марта 2022 г.



04 ноября 2024 г.

Примеры тепловых карт

Тепловые карты отражают изменения температуры и могут использоваться для детектирования тепловых следов активностей:

- техногенных (промышленных) и природных;
- военных и гражданских;
- легальных и нелегальных;
- опасных и не опасных;
- плановых и внеплановых.

Детектирование активности



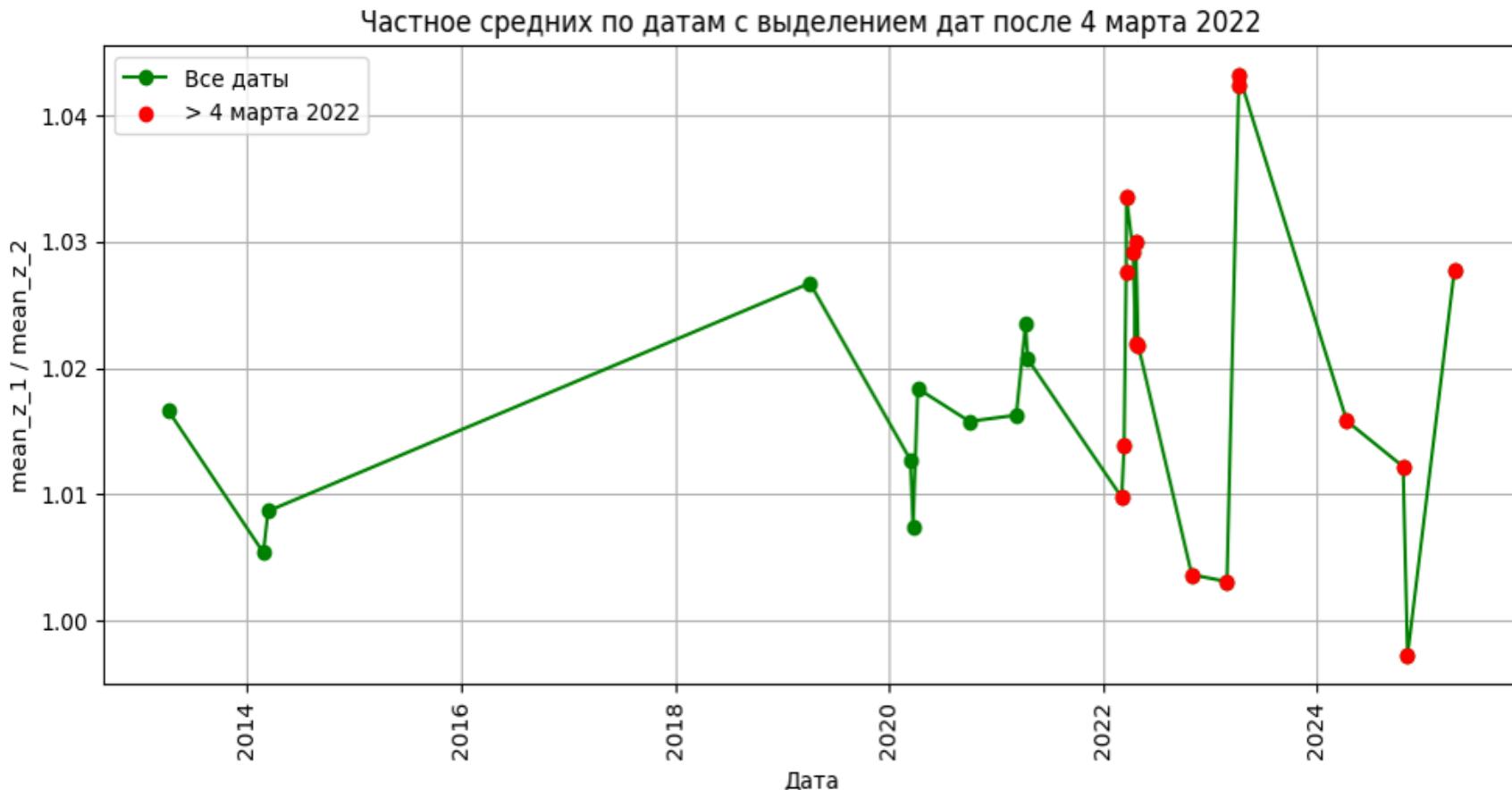
Детектирование активности



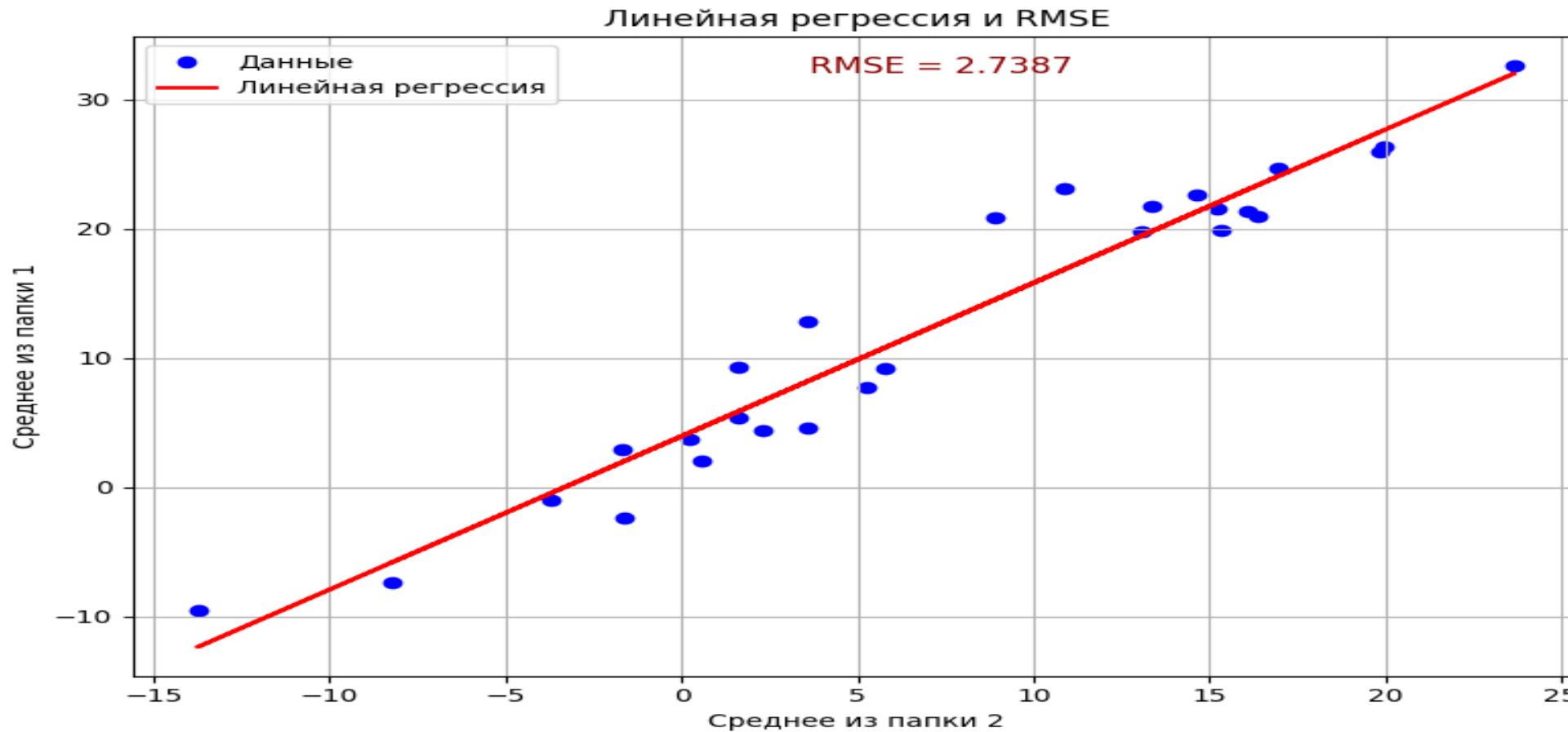
Детектирование активности



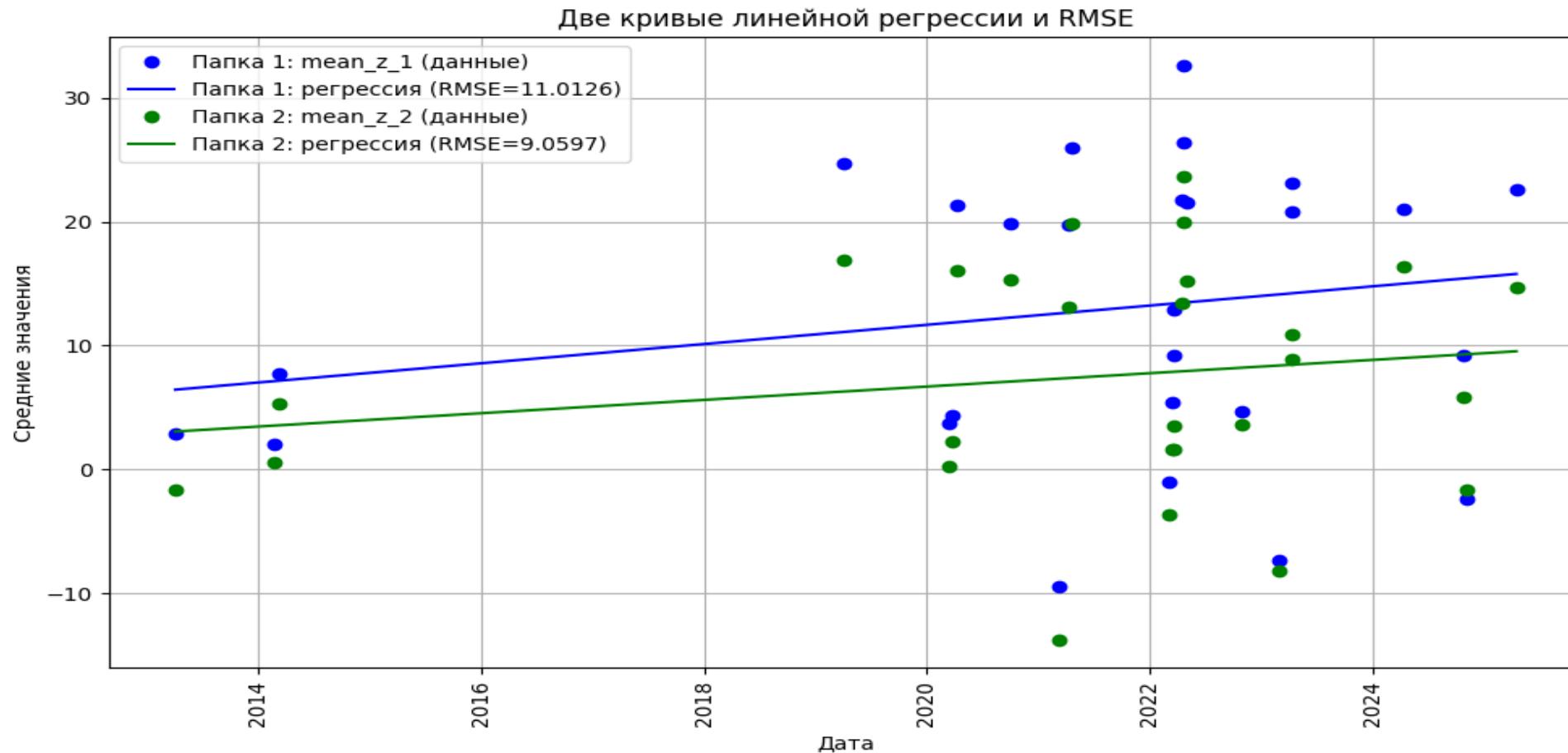
Детектирование активности



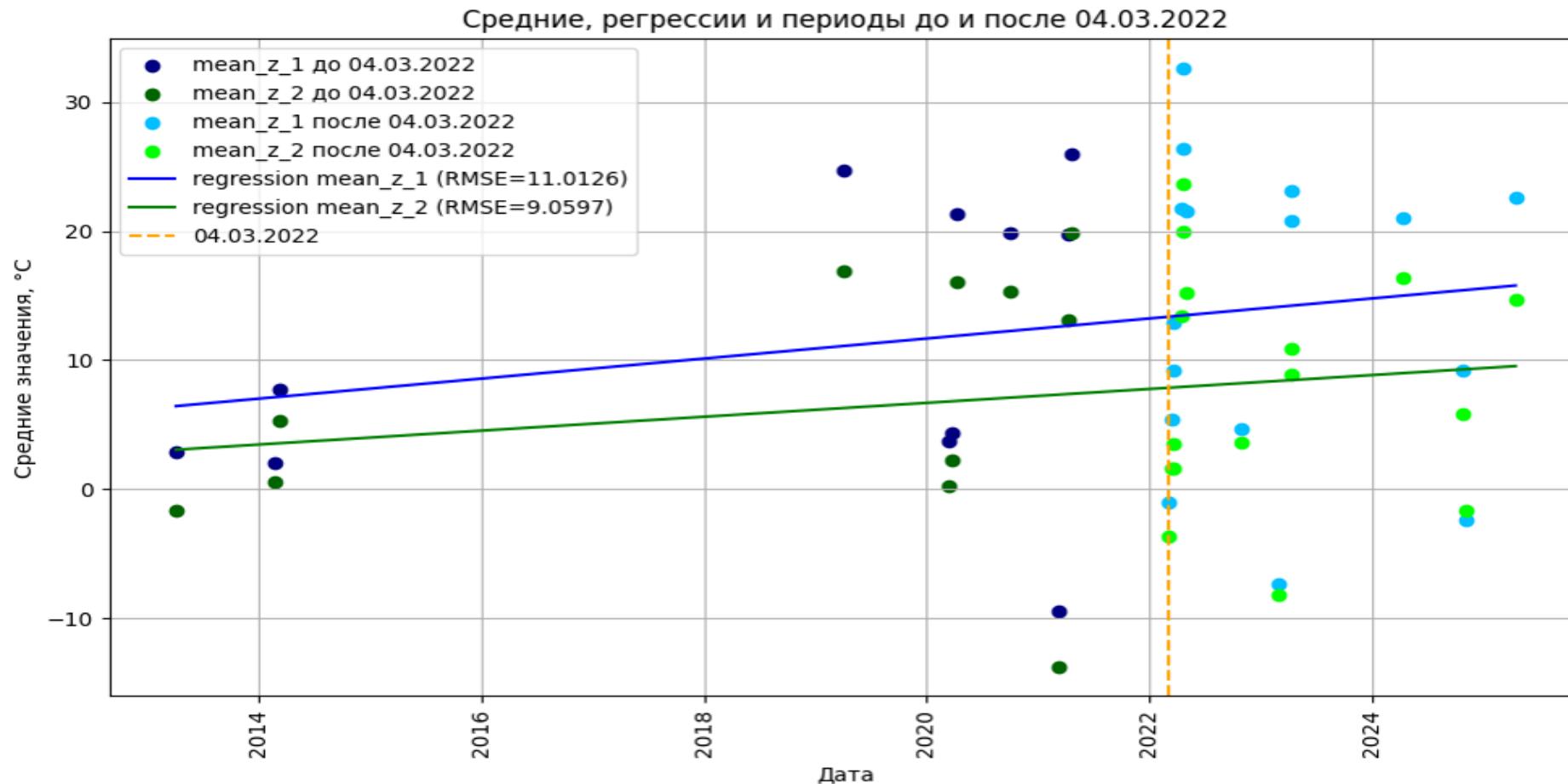
Детектирование активности



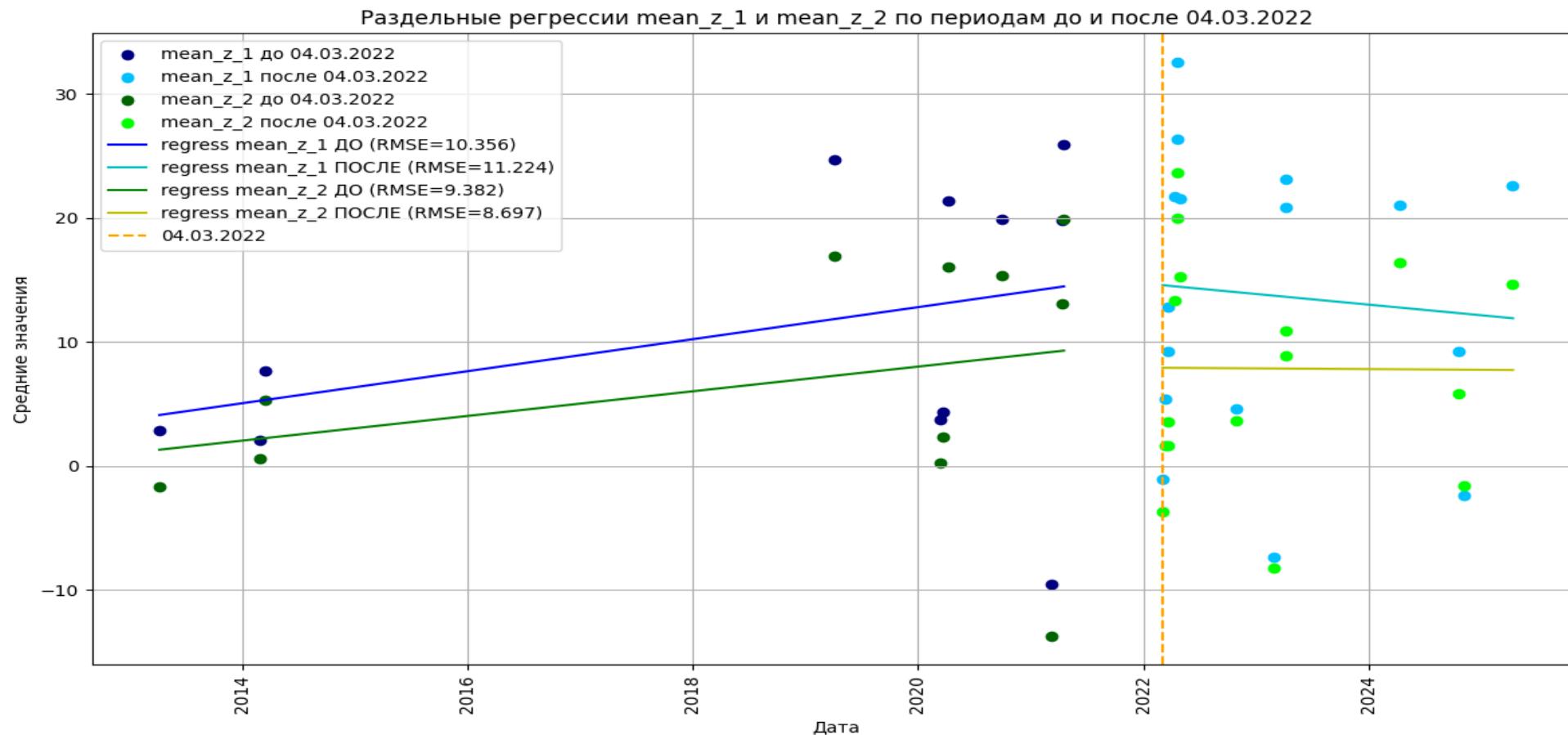
Детектирование активности



Детектирование активности



Детектирование активности



Анализ графиков

На представленном графике показаны средние значения для двух выборок:

- “mean_z_1” – активность завода (средняя температура территории завода);
- “mean_z_2” – референс (средняя опорная температура)

по датам с раздельными регрессиями для периодов до и после 04.03.2022 г., обозначенной оранжевой вертикальной линией.

До 04.03.2022 г. средние значения обеих выборок (синие и зелёные точки) имеют положительный тренд — линии регрессии для mean_z_1 (синяя линия) и mean_z_2 (зелёная линия) и зазор между ними возрастают. Это указывает на то, что с течением времени активность завода росла.

После 04.03.2022 г. mean_z_1 (голубые точки) и mean_z_2 (салатовые точки) не только теряют характерный рост, но и линии регрессии становятся пологими (стагнирующими) или даже убывающими (особенно для mean_z_2), точки плотно расположились вдоль почти горизонтальных линий регрессии. Также уменьшается зазор между ними. Процесс стал стабильнее, колебания меньше, развитие замедлилось или вообще прекратилось. Это свидетельствует о снижении активности или даже её прекращении.

По регрессии видно, что активность завода росла, а потом стала падать.

Оптимизационная задача

Детектирование активностей является оптимизационной задачей распределения информации по классам и решается методами декомпозиции в следующей постановке [2] [3]. Имеются m источников (типов) информации об активности объекта (температура средняя, максимальная, температурный контраст с окружением, дисперсия и др.) и n классов активности (пороги подтверждения активаций классов активности) – пунктов потребления информации для обнаружения активности (пороги информативности). В каждом i -м источнике информации задан объем информативности $a_i, i = \overline{1, m}$, в каждом j -м – объем потребления $b_j, j = \overline{1, n}$.

Оптимизационная задача

Кроме того, существуют еще n дополнительных аномальных источников. Каждый j -й дополнительный источник может поставлять информацию только j -му пункту потребления. Объем информативности в дополнительных источниках информации не ограничен. Имеется также m дополнительных аномальных пунктов потребления информации об активности. Каждому i -му дополнительному пункту потребления информации может поставлять только i -й обычный источник информации. Объем информативности в дополнительных пунктах не ограничен. Указанные промежуточные пункты можно интерпретировать как дополнительные (резервные) неидентифицированные потоки информации.

Оптимационная задача

Стоимость передачи информации c_{ij} является мерой степени "неуверенности" или риска ошибки при классификации активности данного i -го источника как класс j – чем выше, тем менее вероятно или желательна такая интерпретация.

Стоимость распределения информации из j -го дополнительного источника пропорциональна p_j – степени от объема информации. Стоимость распределения информации в i -й дополнительный пункт потребления пропорциональна r_i – степени от объема перевозки. Необходимо минимизировать суммарные затраты на перевозки.

Оптимационная задача

Формальная запись задачи имеет вид

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} + y_i = a_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} + w_j = b_j, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^m d_i y_i^{r_i} + \sum_{j=1}^n e_j w_j^{p_j} \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0, y_i \geq 0, w_j \geq 0, c_{ij} \geq 0, d_i, e_j - \text{целые.} \quad (4)$$

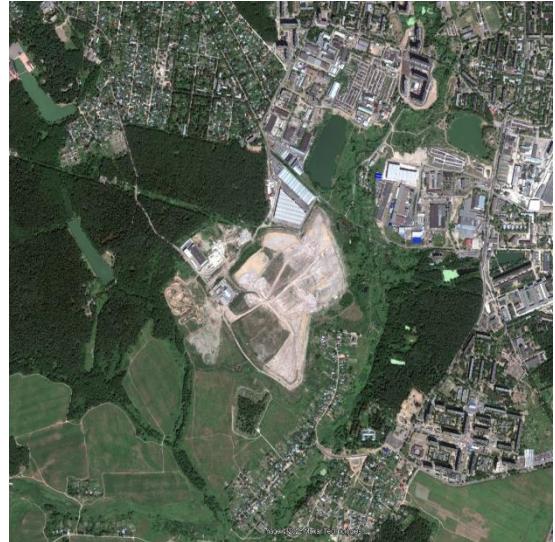
Оптимизационная задача

Здесь x_{ij} – количество единиц информации, переданной из источника j в пункт потребления i ; y_i – количество информации, доставляемого в дополнительный $-i$ -й пункт потребления; w_j – количество информации, передаваемой из дополнительного j -го источника. Можно считать c_{ij} четными числами, что не ограничивает общности рассмотрения.

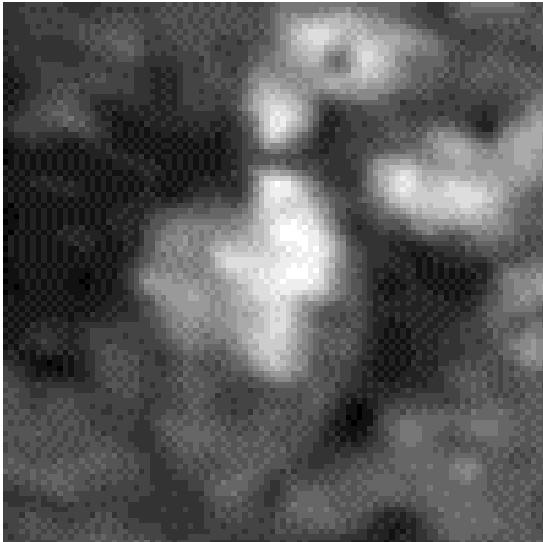
Применение

- Анализ энергоэффективности
- Мониторинг промышленных зон
- Поиск утечек и перегревов
- Выявление незаконных свалок
- Оценка городских тепловых островов

Тепловое свечение мусорной свалки



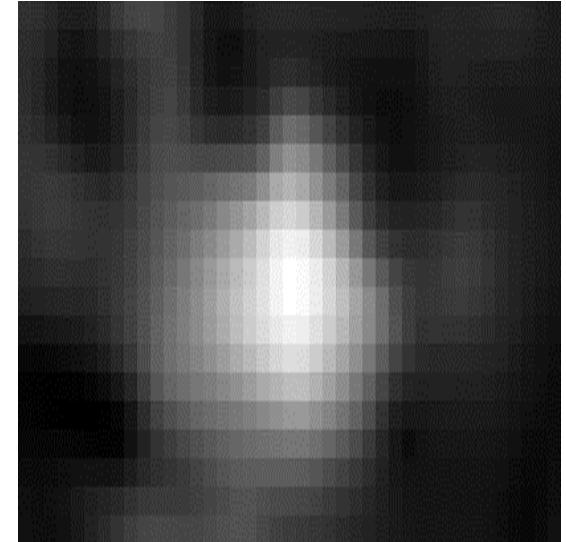
Google Earth



Тепловой канал



Google Earth



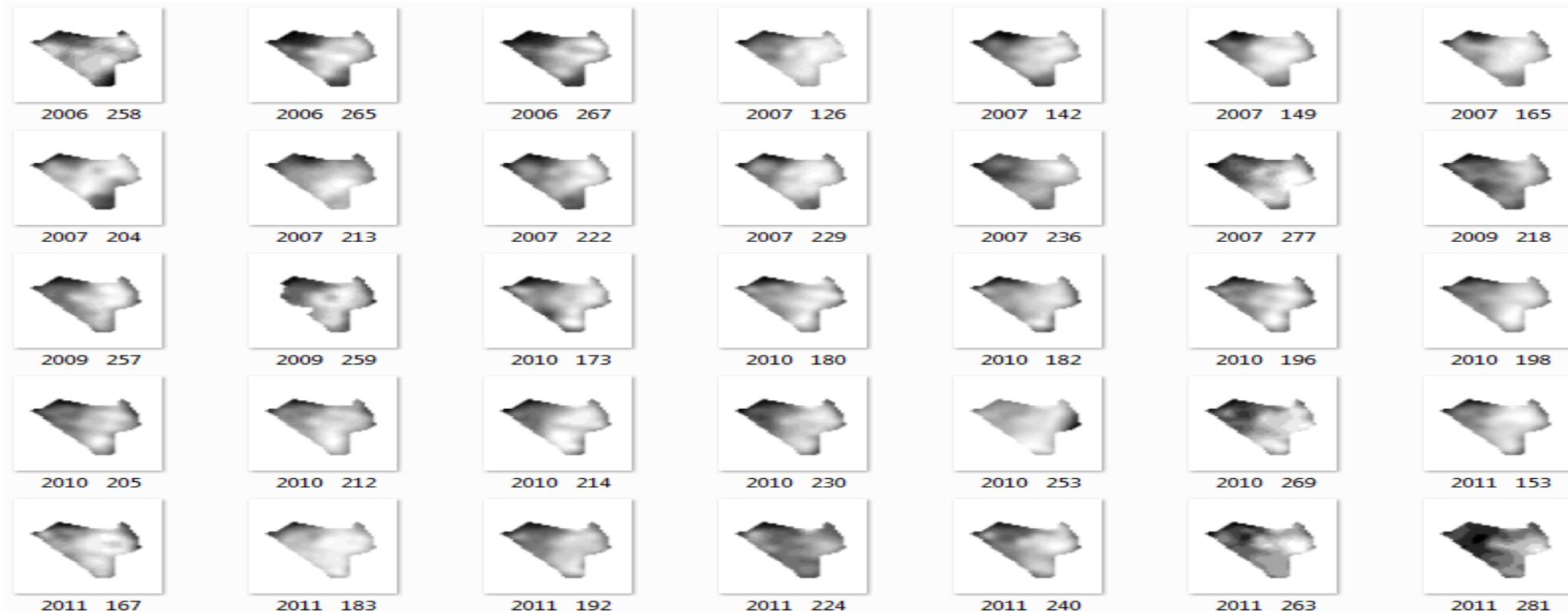
Тепловой канал

Полигон ТКО Кучино, Балашихинский район
Московского региона,
Landsat 5, Сентябрь 2009

Полигон ТКО Заволенье, Орехово-Зуевский
район Московского региона,
Landsat 8, Июль, 2016

Тепловые изображения мусорных свалок и прилегающей окрестности [1]

Динамика температуры поверхности мусорной свалки

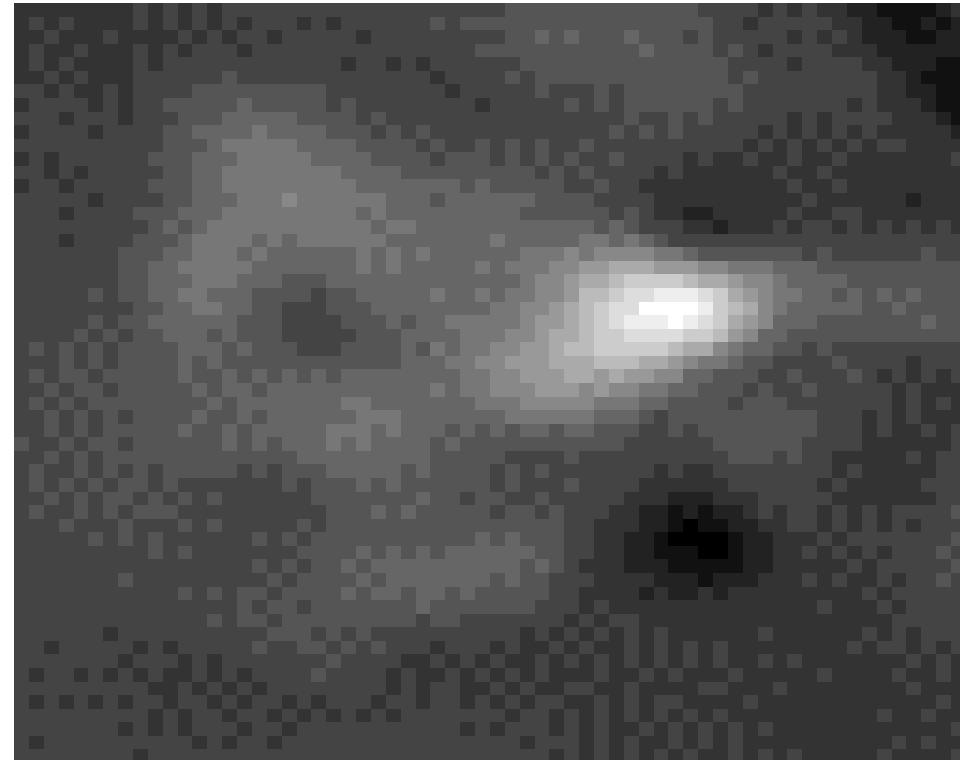


*Фрагмент временного ряда изображений температур поверхности по
области (окрестность полигона ТКО Кучино)*

Динамика температуры поверхности мусорной свалки



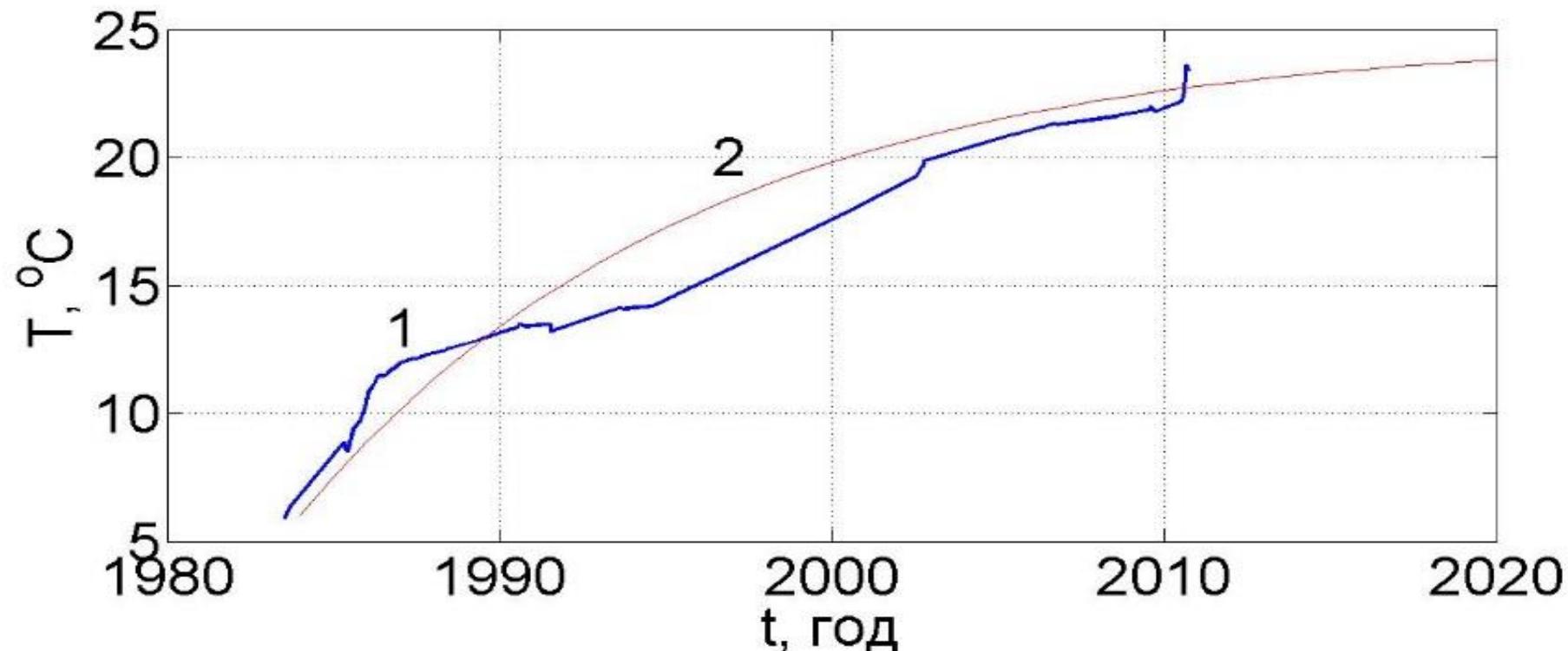
Изображение Google Earth



Изображение температурного тренда

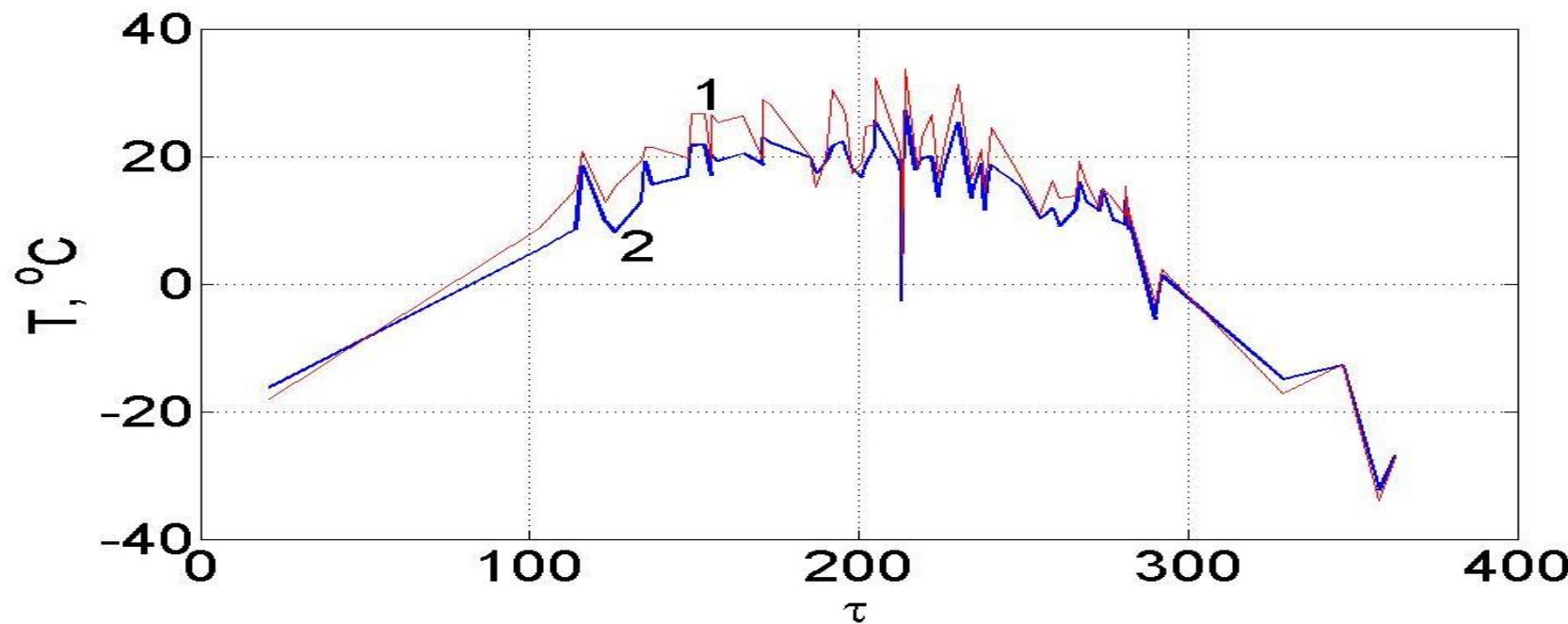
Полигон ТКО Торбеево, Люберецкий район Московского региона

Хронологические изменения температуры поверхности мусорной свалки



- (1) – Хронологические изменения температуры поверхности на свалке
(2) – Переходной процесс изменений температуры

Сезонные изменения температуры поверхности мусорной свалки



- (1) – Сезонные изменения температуры поверхности на свалке
- (2) – Сезонные изменения температуры окружающей природной среды

Выводы

Разработан способ оценки энергоэффективности промышленных зон с помощью спутниковых данных. С помощью снимков Landsat измеряется температура поверхности земли и находятся "горячие точки" - участки с повышенным тепловыделением.

В работе использованы продукты Landsat, точность которых подтверждена валидацией с наземными измерениями.

Для оптимизации энергозатрат мы использовали математические методы, которые помогают:

- определить, где происходят наибольшие теплопотери;
- оптимально распределить ресурсы;
- выбрать самые проблемные зоны на модернизацию.

Выявлено, что тепловые аномалии часто коррелируют с объектами экологического загрязнения в санитарных зонах предприятий. На основе интеграции тепловых карт и оптимизационных моделей предложен подход для поддержки принятия решений в области энергосбережения промышленных объектов.

Литература

1. Murynin A.B., Rihter A.A., Vorobyev V.E. Algorithms for Morphological Analysis of Vectorized Boundaries in Images // ISSN 1054-6618, Pattern Recognition and Image Analysis, 2025, Vol. 35, No. 3, pp. 438–454.
2. Lobantsov V.V., Tizik A.P., Tsurkov V.I. Decomposition Algorithm in a Nonlinear Transport Problem with Storage // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2024, Vol. 63, No. 5, pp. 800–820. – DOI 10.1134/S1064230724700576.
3. Lobantsov V., Tizik A., Tsurkov V., Matveev I. Decomposition Algorithm for a Nonlinear Three-Index Transportation Problem // Mathematics. – 2025. – Vol. 13. – No. 6. – DOI 10.3390/math13060944.