

**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

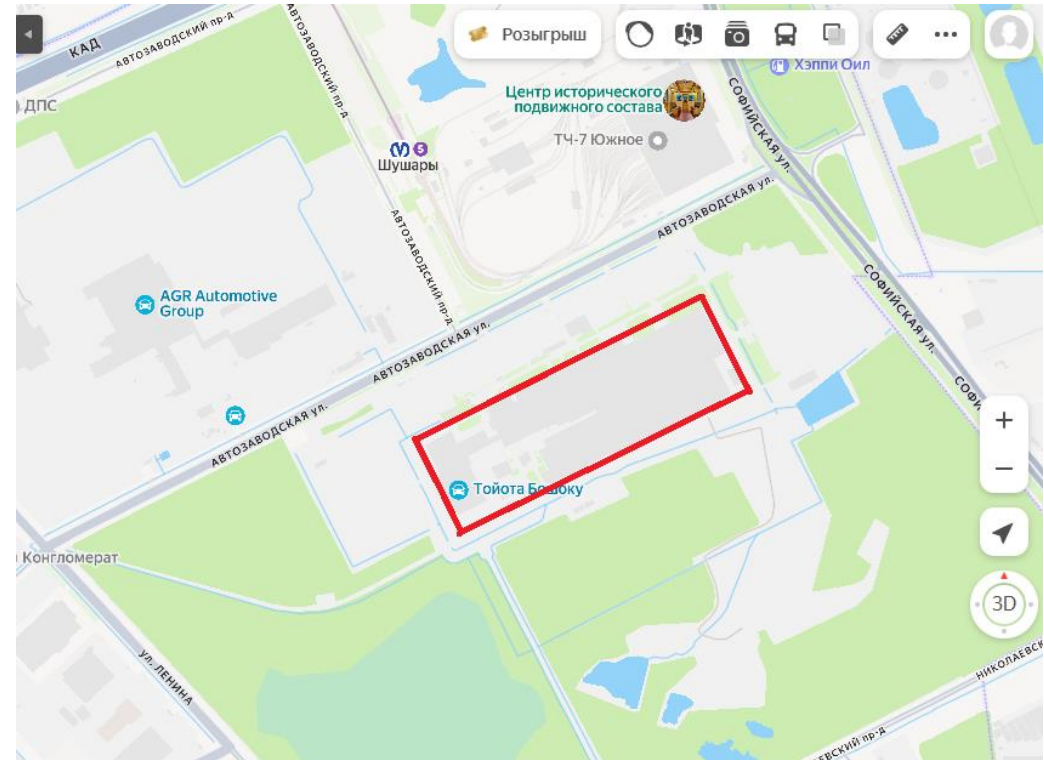
[urfin17@yandex.ru](mailto:urfin17@yandex.ru)

# 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](http://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*

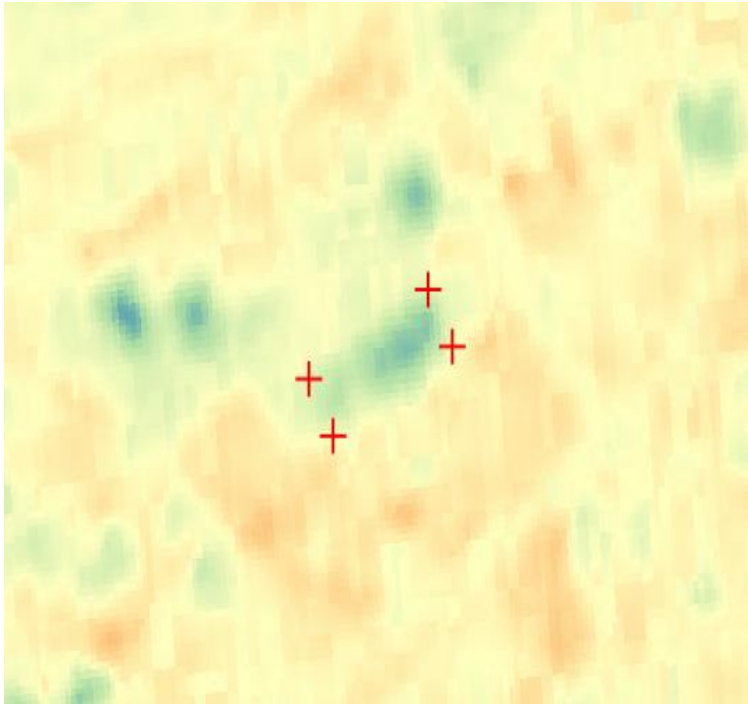
<https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites>

# Источники данных о температуре для валидации

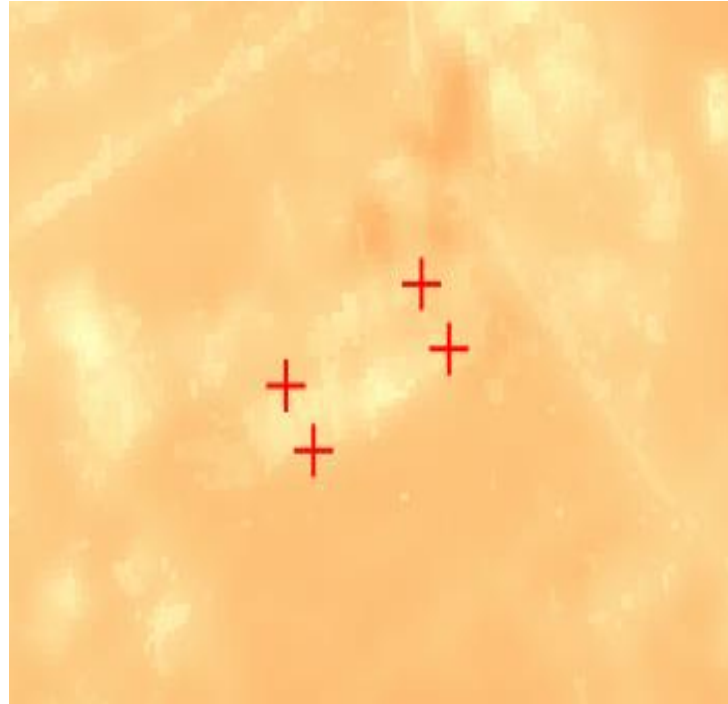
Сегодня		Завтра		3 дня		Неделя		2 недели		Ещё	
Изменить диапазон		Январь		2025							
<b>янв</b>		фев		мар		апр		май		июн	
<b>июл</b>		авг		сен		окт		ноя		дек	
<b>весь месяц</b>		начало месяца		середина месяца		конец месяца					
ПН	ВТ	СР	ЧТ	ПТ	СБ	ВС					
		1	2	3	4	5					
		+1° -3°	+2° -5°	-2° -4°	-4° -8°	-3° -11°					
6	7	8	9	10	11	12					
-3° -11°	-2° -6°	0° -1°	+1° -2°	0° -1°	0° 0°	0° -4°					
13	14	15	16	17	18	19					
-2° -12°	+2° -1°	+2° 0°	+3° 0°	+3° +2°	+3° +1°	+1° 0°					
20	21	22	23	24	25	26					
+1° -3°	-4° -6°	-1° -7°	+1° 0°	+1° 0°	+2° +1°	+3° +2°					
27	28	29	30	31							
+2° +1°	+3° +1°	+4° +3°	+5° +4°	+5° +3°							
Минимальная температура			-12°		в январе 2025 года						
Максимальная температура			+5°		в январе 2025 года						

- 20130407-t.xyz
- 20140226-t.xyz
- 20140314-t.xyz
- 20190406-t.xyz
- 20200314-t.xyz
- 20200323-t.xyz
- 20200408-t.xyz
- 20201001-t.xyz
- 20210310-t.xyz
- 20210411-t.xyz
- 20210418-t.xyz
- 20220305-t.xyz
- 20220313-t.xyz
- 20220320-t.xyz
- 20220321-t.xyz
- 20220413-t.xyz
- 20220421-t.xyz
- 20220422-t.xyz
- 20220430-t.xyz
- 20221030-t.xyz
- 20230227-t.xyz
- 20230408-t.xyz
- 20230409-t.xyz
- 20240411-t.xyz
- 20241020-t.xyz
- 20241104-t.xyz
- 20250413-t.xyz

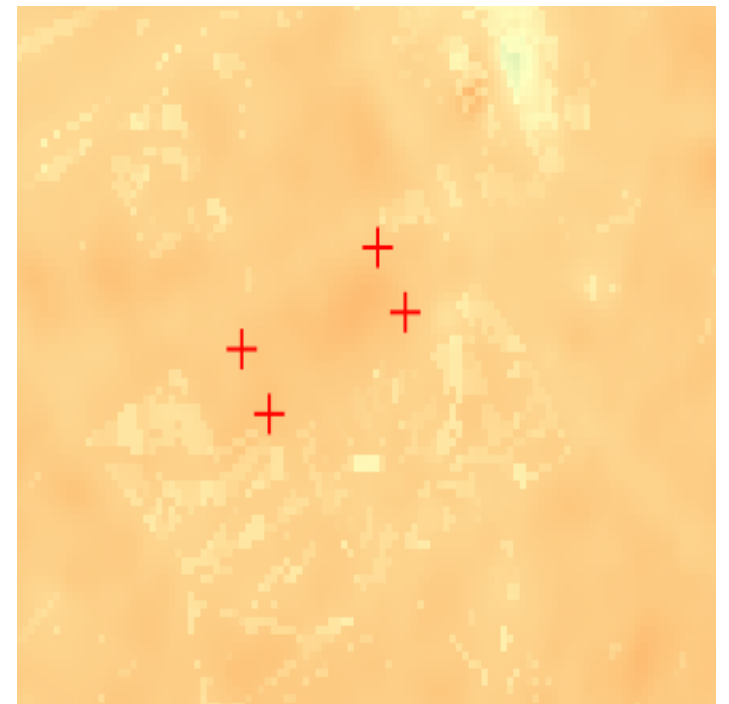
# Примеры тепловых карт



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



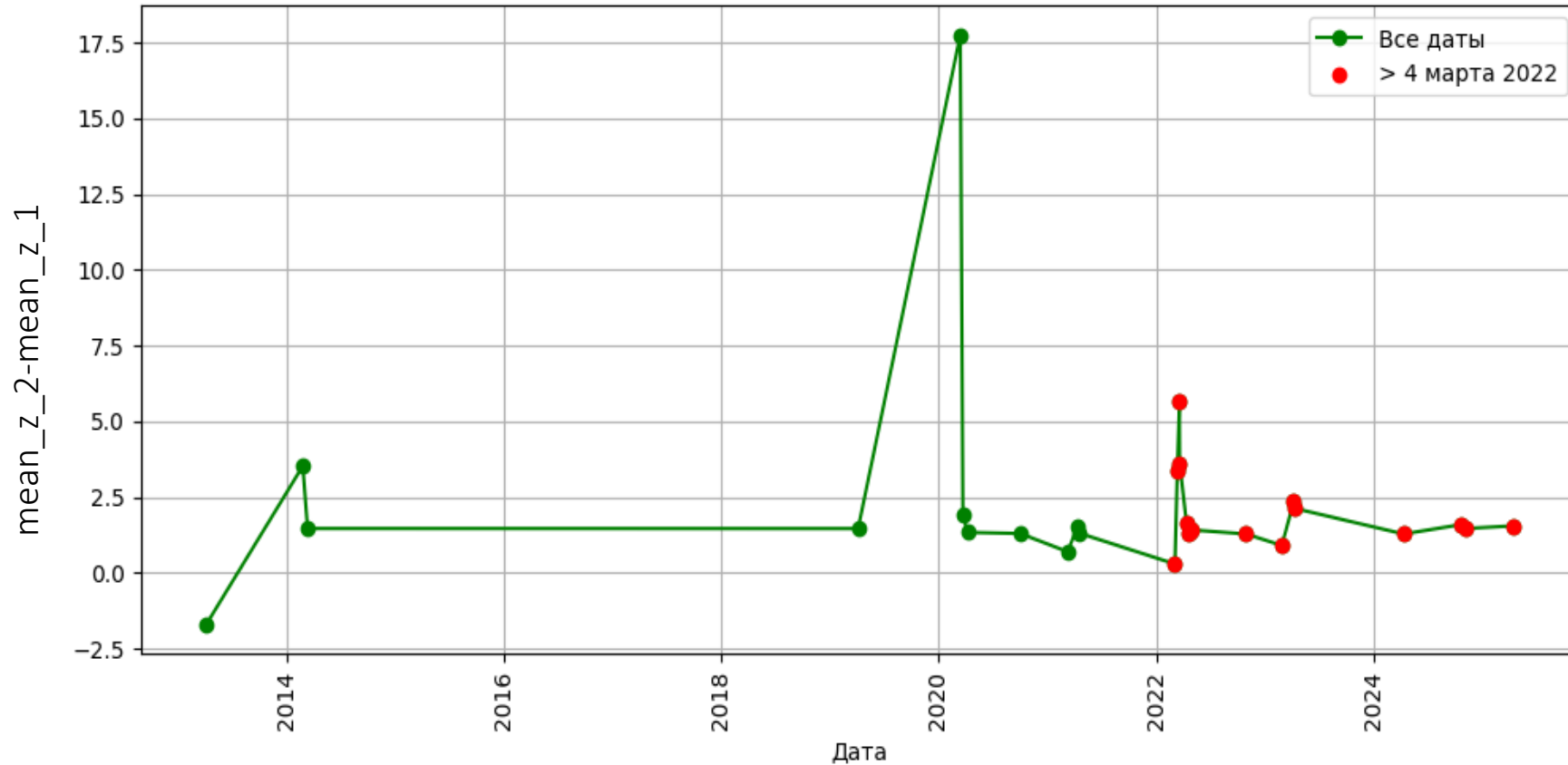


# Детектирование активности



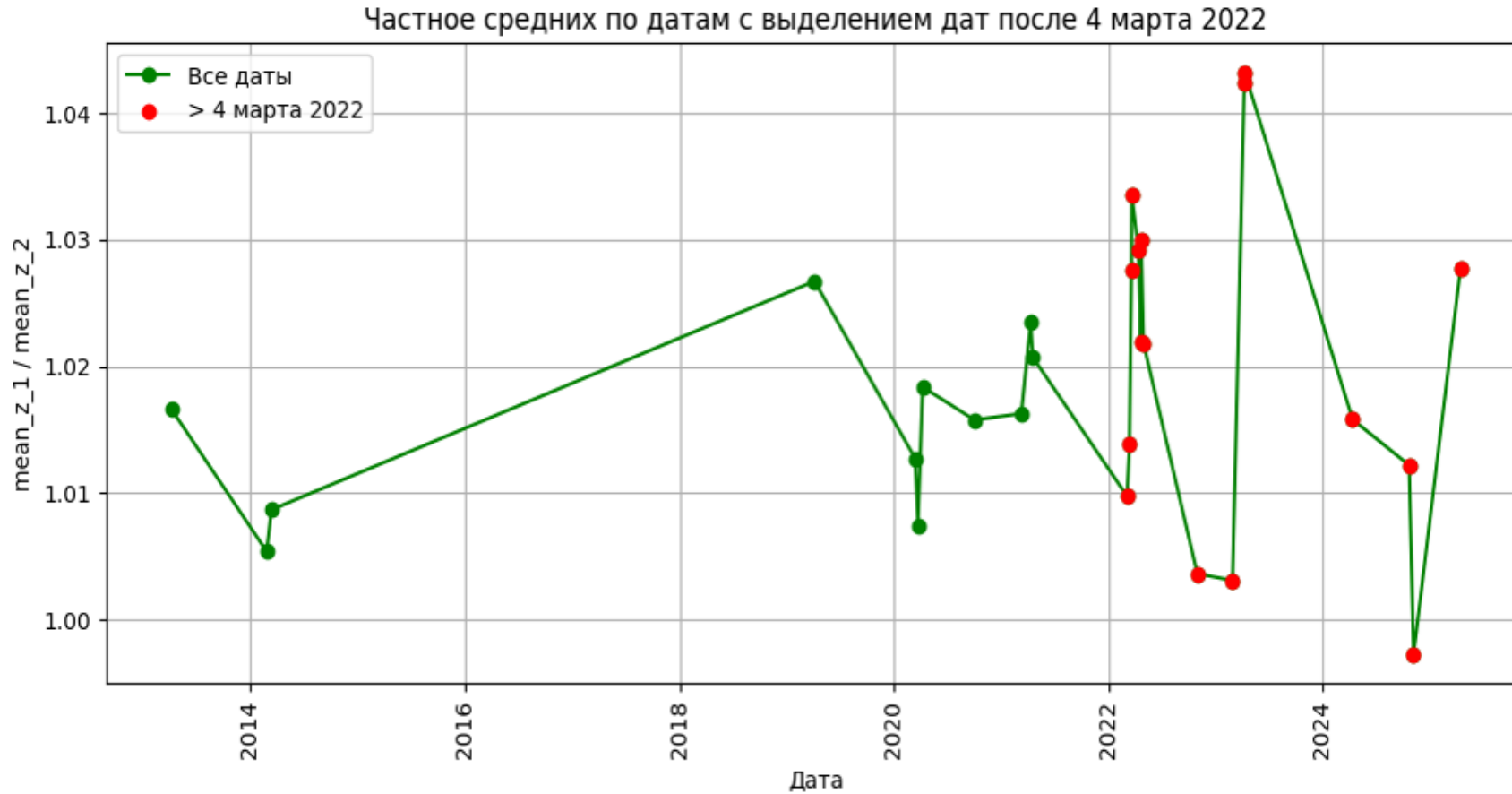
# Детектирование активности

Разница средних по датам с выделением дат после 4 марта 2022



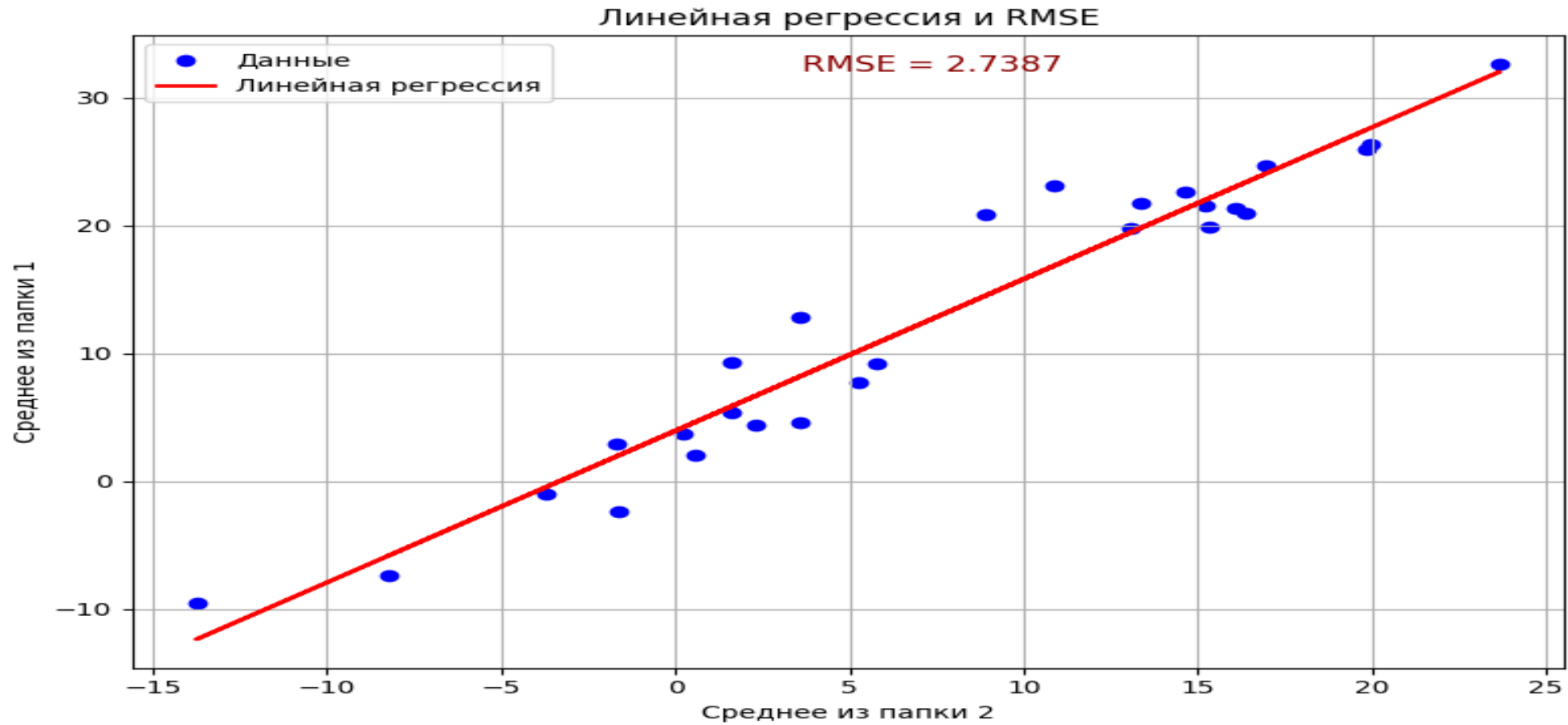
date	mean_z_1	mean_z_2
20130407	2.858089	-1.663646
20140226	2.064705	0.585819
20140314	7.672119	5.254324
20190406	24.680324	16.927602
20200314	3.687591	0.207847
20200323	4.344098	2.284804
20200408	21.375636	16.059553
20201001	19.875174	15.322051
20210310	-9.514297	-13.735812
20210411	19.786712	13.059551
20210418	25.925389	19.852407
20220305	-1.071039	-3.701602
20220313	5.393593	1.596813
20220320	9.231651	1.636529
20220321	12.837243	3.554828
20220413	21.737015	13.369494
20220421	26.361516	19.946096
20220422	32.576146	23.662887
20220430	21.523018	15.231014
20221030	4.613425	3.603344
20230227	-7.400338	-8.223413
20230408	20.846099	8.896862
20230409	23.128592	10.858653
20240411	20.971626	16.394493
20241020	9.203839	5.799753
20241104	-2.368306	-1.62337
20250413	22.62485	14.631228

# Детектирование активности

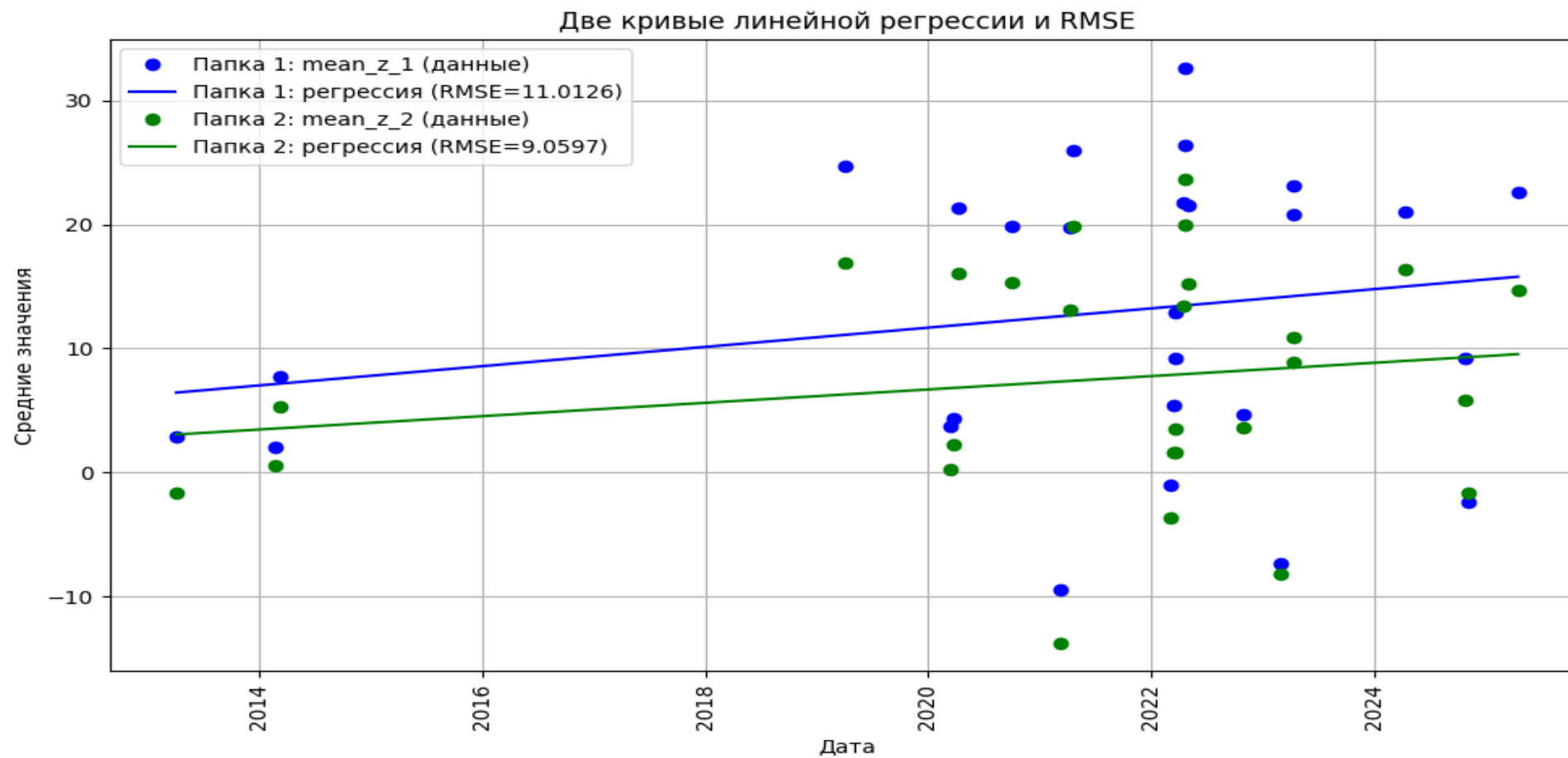


date	mean_z_1	mean_z_2
20130407	2.858089	-1.663646
20140226	2.064705	0.585819
20140314	7.672119	5.254324
20190406	24.680324	16.927602
20200314	3.687591	0.207847
20200323	4.344098	2.284804
20200408	21.375636	16.059553
20201001	19.875174	15.322051
20210310	-9.514297	-13.735812
20210411	19.786712	13.059551
20210418	25.925389	19.852407
20220305	-1.071039	-3.701602
20220313	5.393593	1.596813
20220320	9.231651	1.636529
20220321	12.837243	3.554828
20220413	21.737015	13.369494
20220421	26.361516	19.946096
20220422	32.576146	23.662887
20220430	21.523018	15.231014
20221030	4.613425	3.603344
20230227	-7.400338	-8.223413
20230408	20.846099	8.896862
20230409	23.128592	10.858653
20240411	20.971626	16.394493
20241020	9.203839	5.799753
20241104	-2.368306	-1.62337
20250413	22.62485	14.631228

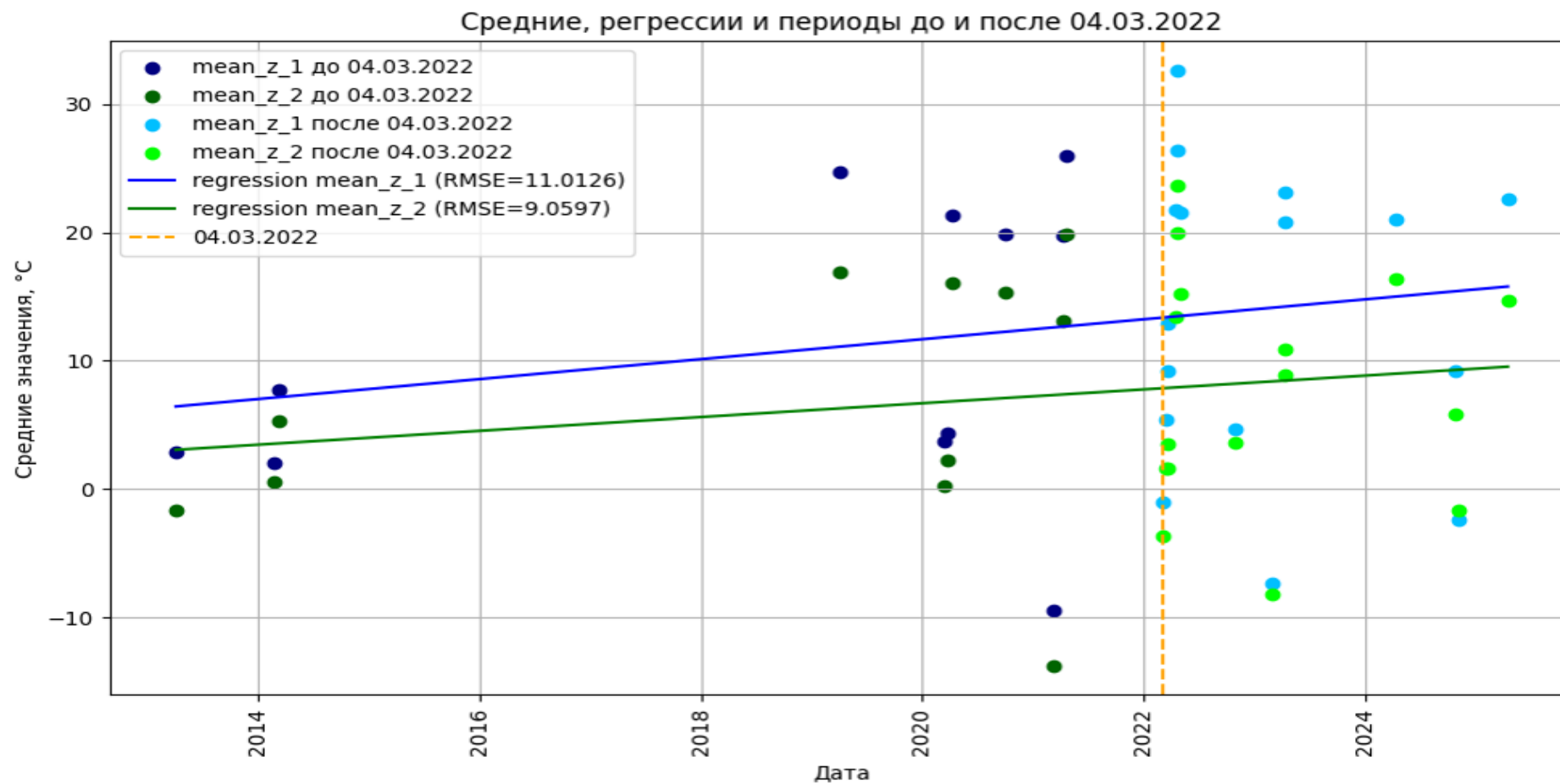
# Детектирование активности



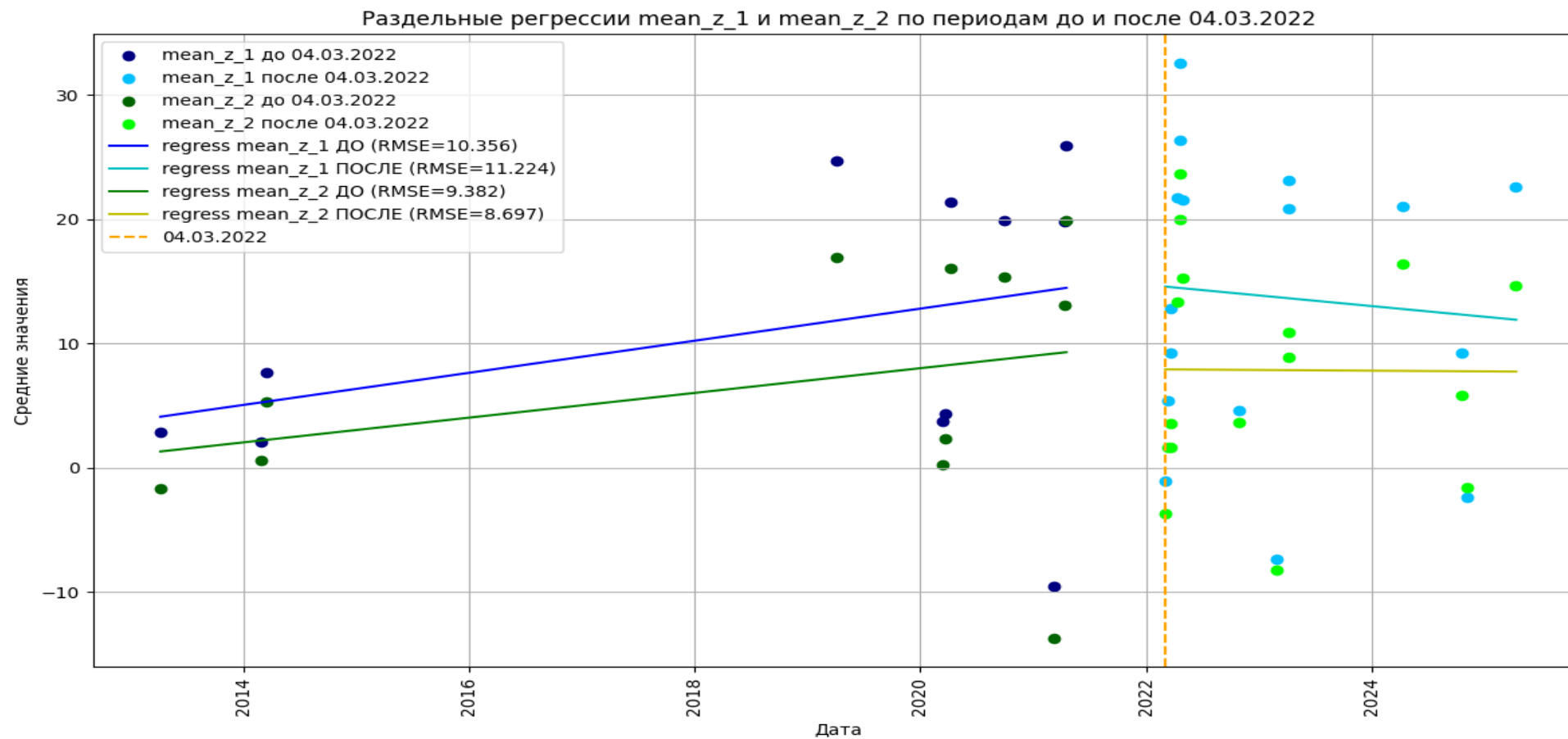
# Детектирование активности



# 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 отдельными 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.

# Оптимизационная 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.

# Оптимизационная задача

Формальная запись задачи имеет вид

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

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

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

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

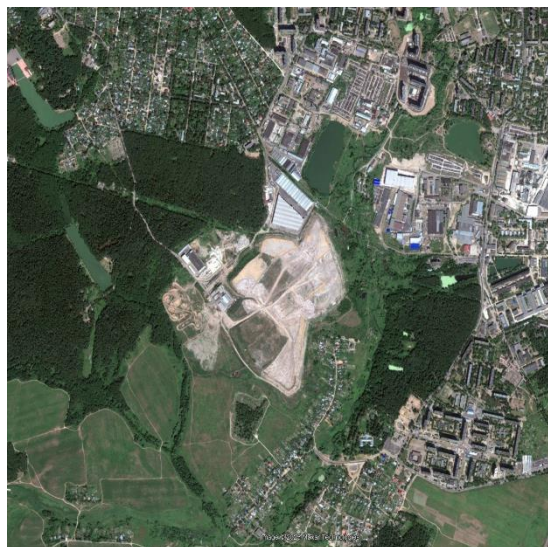
# Оптимизационная задача

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.

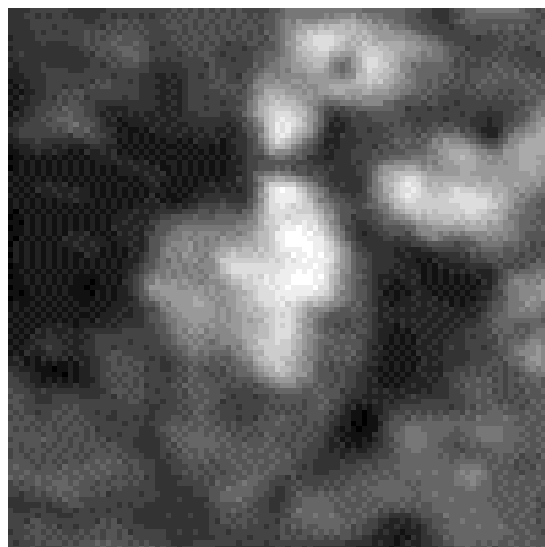
# Применение

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

# Тепловое свечение мусорной свалки



Google Earth

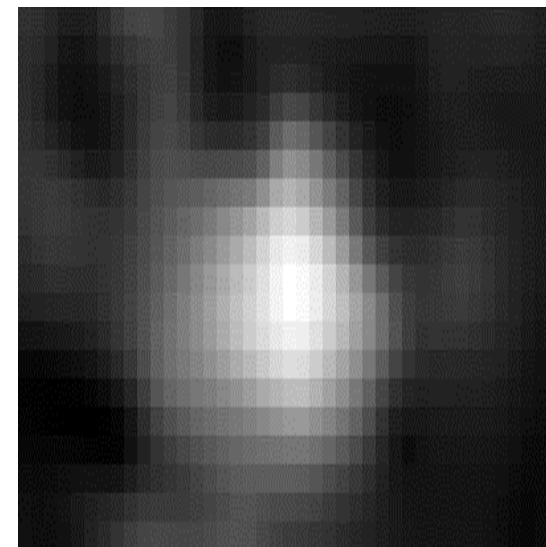


Тепловой канал

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



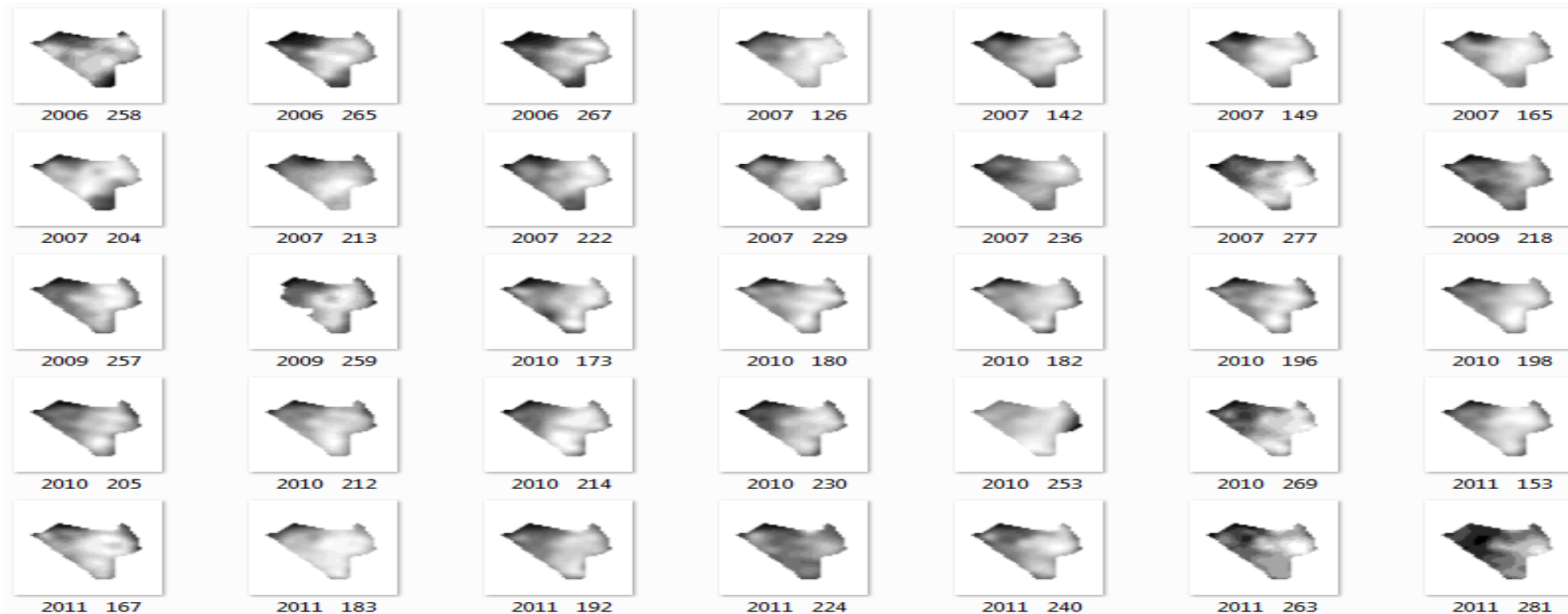
Google Earth



Тепловой канал

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

# Динамика температуры поверхности мусорной свалки



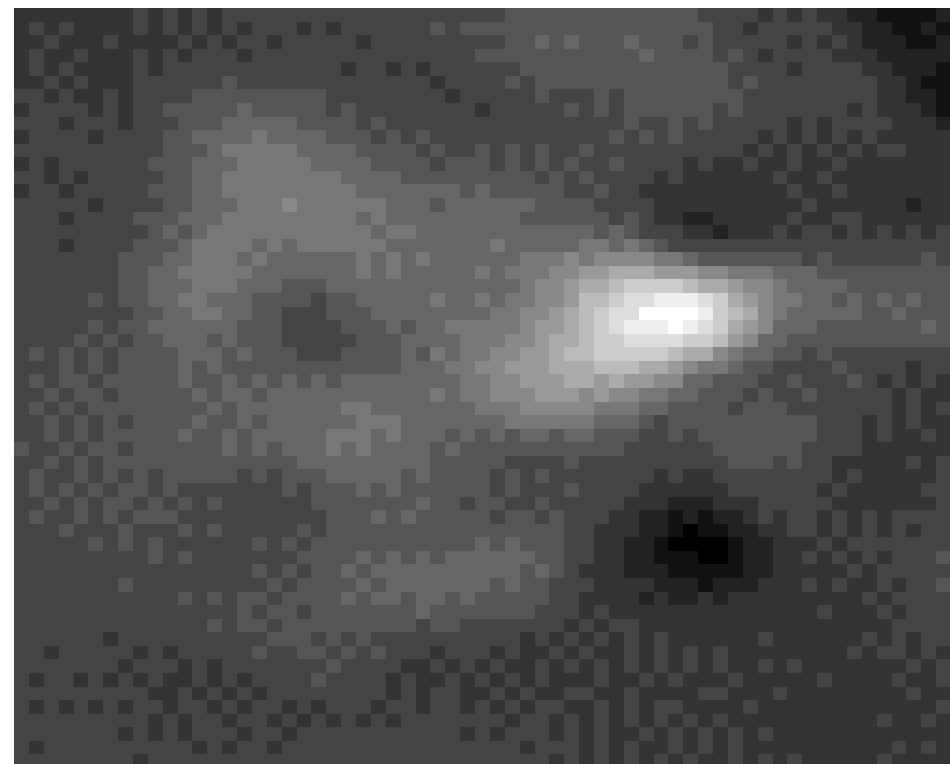
*Фрагмент временного ряда изображений температур поверхности по области (окрестность полигона ТКО Кучино)*



# Динамика температуры поверхности мусорной свалки



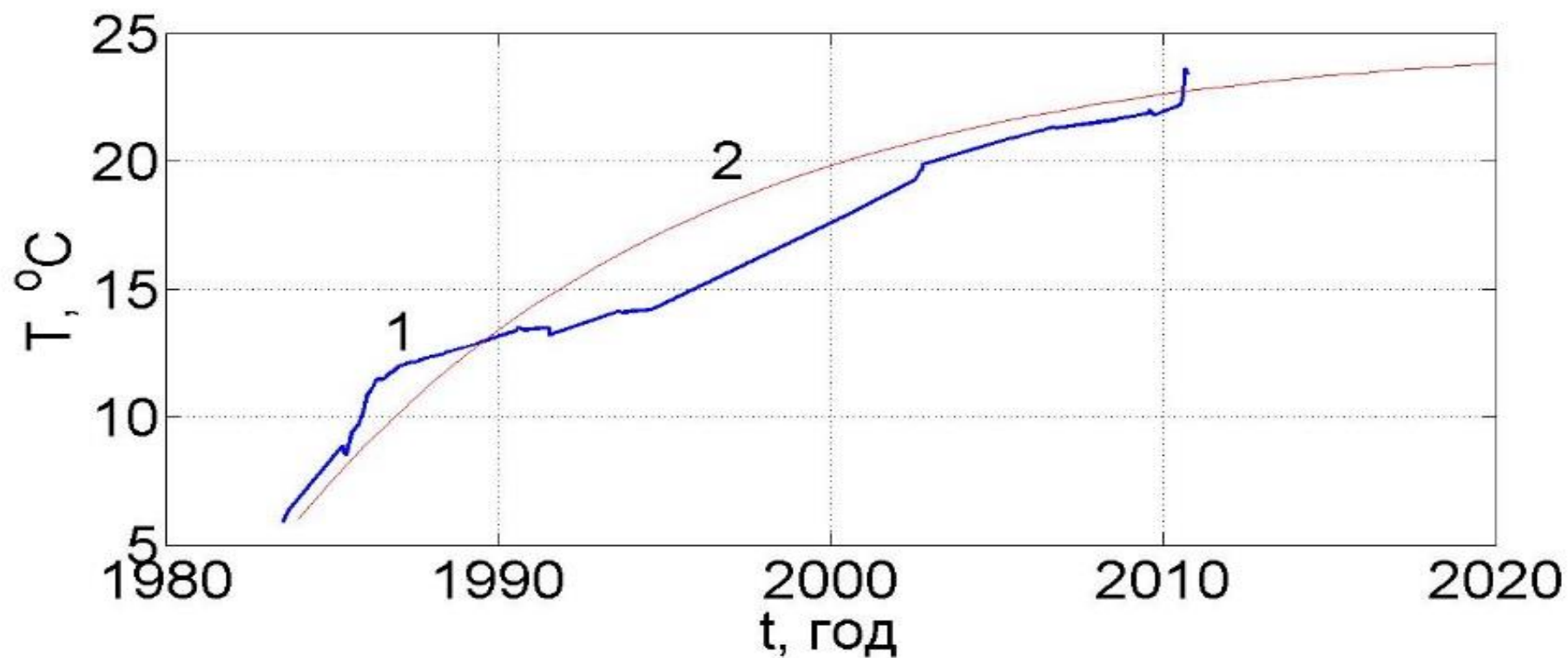
Изображение Google Earth



Изображение температурного тренда

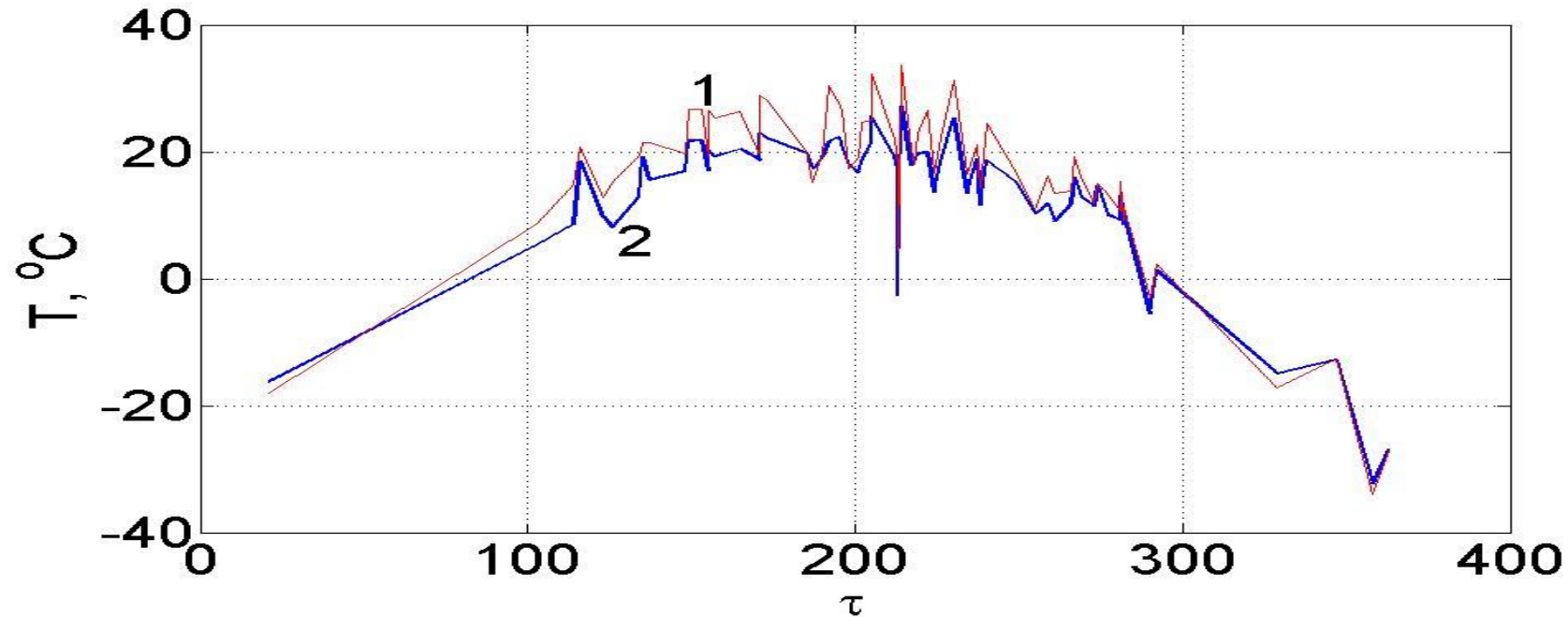
*Полигон ТКО Торбеево, Люберецкий район Московского региона*

## 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 теплотери;
- 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.