Модуль 2 · Реанализ и многомерные климатические данные

Анализ ERA5: тренды, сезонность и аномалии

Ph.D., старший преподаватель Мадина Турсумбаева

Кафедра метеорологии и гидрологии

Курс: Современные цифровые технологии в метеорологии

Цель лекции

Научить анализировать температуру по данным реанализа ERA5: строить ряды разной частоты, рассчитывать норму, аномалии и линейный тренд — и учитывать ограничения реанализа при оценке трендов.

Температура в этой лекции — только ERA5. Google Earth Engine используется здесь только для температуры.

Результаты обучения

После лекции студент будет:

Знать

Частоты агрегации ERA5: сутки, месяцы, годы

Ограничения ERA5 для оценки трендов

Уметь

Считать суточные, месячные и годовые ряды

Оценивать норму, аномалию и линейный тренд

Получить суточную температуру ERA5 в GEE

Понимать

Один год не доказывает тренд

Тренд в реанализе может отражать смену систем наблюдений

Что даёт ERA5 для анализа температуры

Почасовой ряд

Шаг 1 час с 1940 года до настоящего времени: любые агрегаты строятся из одного источника.

Сетка 0,25°

Около 31 км. Значение — средняя по ячейке, а не измерение в точке.

Модель + наблюдения

Ассимиляция наблюдений в модели прогноза. Результат — оценка, не измерение.

- Единицы — кельвины: переводите в °C до расчёта средних и аномалий.
- ERA5 производится ECMWF в рамках Copernicus Climate Change Service (C3S); при использовании указывайте источник.

Реанализы: сравнение источников

Reanalysis	Period	Resolution	Institution
ERA-Interim	1979–2019	~80 km, 60 levels	ECMWF
ERA5	1940–present	31 km, 137 levels, 1 hour	ECMWF (Copernicus Climate Data Store)
MERRA-2	1980–present	~50 km	NASA
JRA-55	1958–present	~55 km	JMA (Japan)
NCEP/NCAR	1948–present	~200 km	NOAA (USA)

Источник: таблица сравнения реанализов из материалов курса (презентация по ERA5). Выбирайте реанализ по периоду, пространственному разрешению и целевой переменной.

Временные ряды: сутки, месяцы, годы

```
# t2m_c — DataArray в °C, из лекции 8
daily = t2m_c.resample(valid_time="1D").mean()
tmax = t2m_c.resample(valid_time="1D").max()      # суточный максимум
monthly = t2m_c.resample(valid_time="1MS").mean()
annual = t2m_c.resample(valid_time="1YS").mean()
```

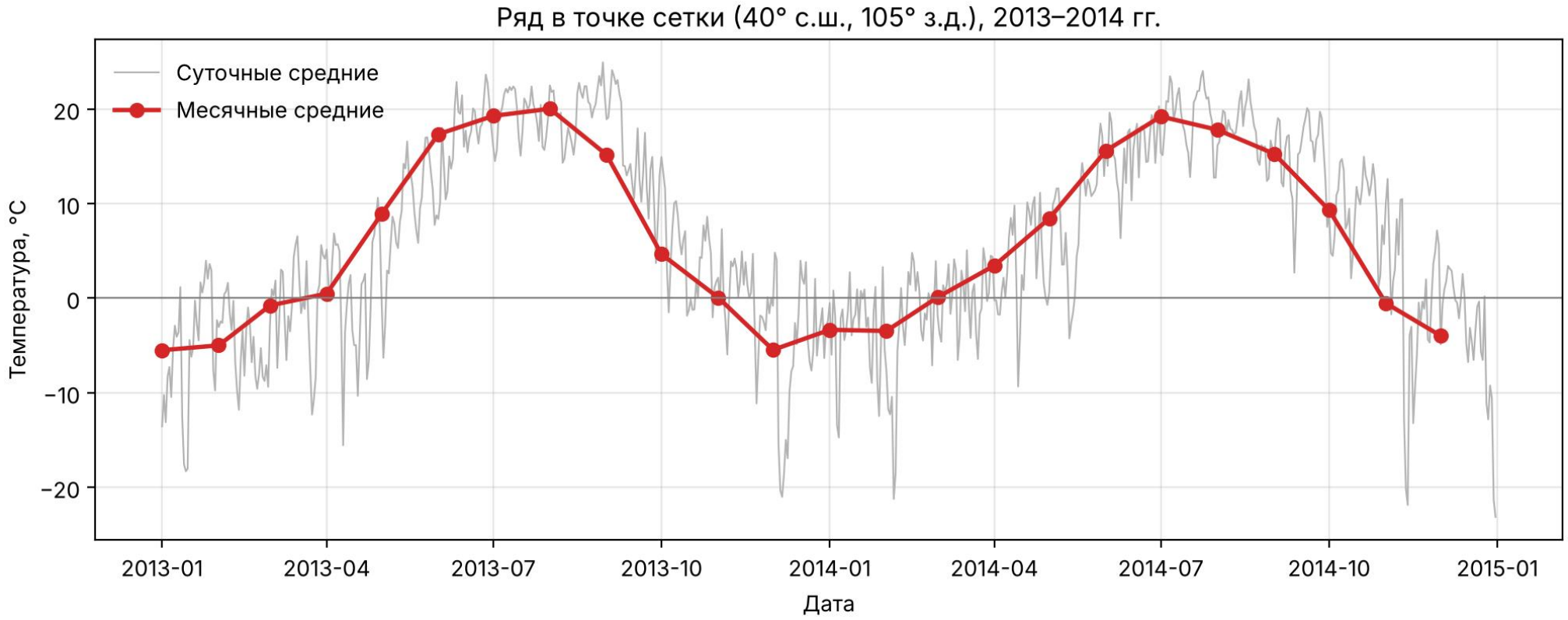
Полнота года

Последний год может быть неполным. Для тренда берите только полные годы.

Тмин, Тмакс

Суточные минимум и максимум нужны для климатологии экстремов, не только для средних.

Пример ряда в точке: NCEP, не ERA5



Пример из NCEP/NMC: точка 40° с.ш., 105° з.д., 2013–2014 гг. Суточные и месячные средние получены тем же resample, что в коде выше. Значения ERA5 здесь не показаны: их нужно загрузить по CDS.

Норма и аномалии ERA5

```
# норма за 1991–2020 гг. по месяцам
base = monthly.sel(valid_time=slice("1991-01-01", "2020-12-31"))
clim = base.groupby("valid_time.month").mean()
# аномалия: месячное значение минус норма того же месяца
anom = monthly.groupby("valid_time.month") - clim
```

Сравнение с лекцией 5

Тот же принцип, что для станции: норма по месяцам, аномалия — отклонение от неё. Разница — в инструменте: groupby по valid_time.month вместо pandas.

Линейный тренд температуры

```
import numpy as np
# только полные годы, например 1991–2024
years = annual["valid_time"].dt.year.values
slope, intercept = np.polyfit(years, annual.values, 1)
print(round(slope * 10, 2), "°C за 10 лет")
```

Что означает

Наклон — средняя скорость изменения. Умножение на 10 переводит её в градусы за десять лет.

Значимость тренда

Наклон без проверки значимости — не вывод. Для временных рядов используют тест Манна–Кендалла, он учитывает ранги и не требует нормальности.

Сезонный анализ ERA5

```
# сезонные средние за весь период: DJF, MAM, JJA, SON
seasonal = t2m_c.groupby("valid_time.season").mean()
seasonal.values                    # по одному значению на сезон
# ВНИМАНИЕ: DJF — декабрь относится к той же зиме, что и январь–февраль
```

Сезоны и тренд

Сезонные тренды могут различаться: зима может теплеть быстрее лета. Считайте тренд по каждому сезону отдельно.

Интерпретация

Сезонное среднее показывает норму сезона, а не климат года. Сравнивайте сезоны одного периода.

Ограничения ERA5 для трендов

Нефизические тренды и разрывы

Смена систем наблюдений создаёт скачки, особенно в верхней стратосфере. Для приземной температуры влияние меньше, но его нужно учитывать.

Систематические поверхностные ошибки

Ошибки приземных наблюдений и модельного описания поверхности дают смещения, которые могут меняться со временем.

Неопределённость занижена

Ансамбль ERA5 занижает реальные ошибки. Не переоценивайте точность тренда.

Что делать

Сравнивайте тренд с независимыми станционными рядами (лекция 10) и указывайте период и неопределённость.

GEE: суточная температура ERA5

```
// ECMWF/ERA5/DAILY: суточные агрегаты ERA5; температура — в кельвинах
var t2m = ee.ImageCollection("ECMWF/ERA5/DAILY")
  .select("mean_2m_air_temperature")
  .filter(ee.Filter.date("2000-01-01", "2020-12-31"))
  .map(function (img) {
    return img.subtract(273.15).copyProperties(img, ["system:time_start"]);
  });
var almaty = ee.Geometry.Point([76.95, 43.25]);   // [долгота, широта]
var chart = ui.Chart.image.series({imageCollection: t2m, region: almaty,
  reducer: ee.Reducer.mean(), scale: 27830})
  .setOptions({title: "ERA5 суточная средняя T2m, Алматы, °C"});
print(chart);
```

Проверьте период

В каталоге GEE указан ограниченный период доступности датасета. Актуальный — на странице датасета.

Ограничение курса

GEE используется здесь только для температуры ERA5. Для других переменных — CDS.

Типичные ошибки и их исправление

Ошибка	Что происходит	Как исправить
Тренд по нескольким годам	Случайная изменчивость принята за тренд	Период не короче нескольких десятилетий
Средние в кельвинах и °C вместе	Ошибка на 273 градуса	Перевод до агрегации
Неполный последний год	Занижен годовой средний	Брать полные годы
Тренд без значимости	Вывод не проверен	Тест Манна–Кендалла или доверительный интервал
Точка GEE задана как [широта, долгота]	Точка — в другом месте	Порядок: [долгота, широта]

Заключение

1

Агрегация

сутки, месяцы, годы

2

Норма

по valid_time.month

3

Тренд

polyfit, полные годы

4

Ограничения

смена наблюдений, ошибки

Главный вывод

По данным ERA5 получают ряды температуры разной частоты, норму, аномалии и линейный тренд. Тренд оценивают по полным годам и сверяют со станционными рядами: один год его не доказывает, а в реанализе тренд может отражать смену систем наблюдений.

Вопросы для самопроверки

1. Почему один тёплый год не доказывает тренд?
2. Почему для тренда берут только полные годы?
3. Что означает наклон, умноженный на 10?
4. Почему тренд ERA5 нужно сверять со станционными рядами?

Семинар 9 и МӨЖ 2 (20 баллов)

Семинар 9 · Анализ временных рядов ERA5

Суточные, месячные и годовые ряды для выбранной точки.

Норма, аномалии, линейный тренд и сезонные средние.

МӨЖ 2 · 20 баллов

Особенности использования ERA5 в региональном климатическом анализе.

Следующая лекция — сравнение реанализа с данными наблюдений.

Литература

- Hersbach, H., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. QJRMS, 146, 1999–2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803
- Gorelick, N., et al. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18–27.
- ECMWF / Google Earth Engine. ERA5 Daily Aggregates. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_DAILY
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica, 13, 245–259.
- Kendall, M. G. (1975). Rank Correlation Methods (4th ed.). Charles Griffin.
- Copernicus Climate Data Store (CDS). https://cds.climate.copernicus.eu