Модуль 1 · Python и анализ данных

Радиозонды: структура данных и обработка

Ph.D., старший преподаватель Мадина Турсумбаева

Кафедра метеорологии и гидрологии

Курс: Современные цифровые технологии в метеорологии

Цель лекции

Познакомить со структурой данных радиозондирования и научить загружать, проверять и обрабатывать вертикальный профиль: рассчитывать потенциальную температуру и вертикальный градиент, находить инверсию и тропопаузу.

Наблюдения станций — у поверхности. Радиозонд даёт вертикальную картину атмосферы: это вторая половина климатического анализа.

Результаты обучения

После лекции студент будет:

Знать

Что измеряет радиозонд и когда запускают

Стандартные уровни давления

Потенциальная температура и градиент

Уметь

Загрузить профиль и проверить его

Вычислить потенциальную температуру и градиент

Найти инверсию и тропопаузу (упрощённо)

Понимать

Почему профиль — это данные «по высоте», а не «по времени»

Почему давление и высота — разные оси

Что измеряет радиозонд

Давление

Барометр на борту: уровни давления в гПа.

Температура

Датчик температуры на каждом уровне.

Влажность

Температура точки росы и относительная влажность.

Ветер

По положению шара (GNSS): направление и скорость.

- Стандартные сроки запуска — 00 и 12 UTC, то есть два профиля в сутки.
- Высота уровня вычисляется по давлению и температуре, поэтому её тоже нужно проверять.

Стандартные уровни давления

Давление, гПа	Примерная высота, км	Что характеризует
1000	≈ 0,1	Приземный слой, близко к поверхности
850	≈ 1,5	Нижняя тропосфера, часто выше пограничного слоя
700	≈ 3	Средняя нижняя тропосфера
500	≈ 5,5	Средняя тропосфера, основной уровень для синоптики
300	≈ 9	Верхняя тропосфера, струйные течения
100	≈ 16	Нижняя стратосфера или тропопауза

Высоты приблизительные: точные значения зависят от температуры и влажности. Значащие уровни между стандартными передают излом профиля.

Источники данных радиозондирования

University of Wyoming

Архив профилей по станциям в текстовом виде. Удобен для одного дня или нескольких станций. Адрес: weather.uwyo.edu.

IGRA (NOAA)

Integrated Global Radiosonde Archive: единый архив радиозондирований по всему миру. Подходит для многолетних рядов.

В курсе используется подготовленный CSV-файл с уровнями: давление, высота, температура, точка росы, ветер.

Загрузка и переименование столбцов

```
import pandas as pd
# CSV с уровнями: давление (гПа), высота (м), T, Td (°C), ветер
snd = pd.read_csv("sounding_2024.csv")
# имена подберите под свой файл
snd = snd.rename(columns={"pressure": "p", "height": "z",
                          "temp": "T", "dewpt": "Td"})
snd[snd["p"] >= 100].head()     # нижние уровни до 100 гПа
```

- Имена из файла нужно сверить с документацией архива: одна ошибка в имени — и расчёт пойдёт по другому столбцу.
- Давление убывает с высотой: профиль сортируем по p по убыванию или по z по возрастанию.

Проверка профиля

```
# давление должно убывать с высотой
print((snd["p"].diff() > 0).sum(), "нарушений порядка")
# точка росы не может быть выше температуры
print((snd["Td"] > snd["T"]).sum(), "строк с Td > T")
# пропуски на верхних уровнях — норма, на нижних — нет
print(snd.isna().sum())
```

Что означают ошибки

Td > T — ошибка датчика или переименования.

Нарушение порядка давления — сортировка не выполнена.

Проверку выполняем до расчётов: один неверный уровень искажает весь профиль.

Потенциальная температура

```
kappa = 0.2857                    # R/cp для сухого воздуха
snd["theta"] = (snd["T"] + 273.15) * (1000 / snd["p"]) ** kappa   # K
```

Формула

θ = T · (1000 / p)^0,2857, где T — в кельвинах, p — в гПа.

Зачем

θ сохраняется при сухих адиабатических процессах. Её рост с высотой показывает устойчивость слоя.

Конвертируйте в кельвины до степенной функции: в градусах Цельсия формула даёт неверный результат.

Вертикальный градиент температуры

```
import numpy as np
snd = snd.sort_values("z")        # по возрастанию высоты
gamma = -np.gradient(snd["T"], snd["z"]) * 1000   # К/км
# сухая адиабата ≈ 9,8 К/км; стандартная атмосфера ≈ 6,5 К/км
```

- gamma > 0 — температура падает с высотой (обычное состояние).
- gamma < 0 — температура растёт с высотой: это инверсия.
- np.gradient считает разности по неравномерной сетке уровней; порядок по z обязателен.

Инверсия и тропопауза

Инверсия

Слой, где температура растёт с высотой. Инверсия «запирает» воздух у поверхности: загрязнение не рассеивается.

Тропопауза (ВМО)

Самый низкий уровень, где градиент падает до 2 К/км или меньше, и средний градиент над ним в слое 2 км тоже не превышает 2 К/км.

```
# упрощённо: инверсионные уровни
inv_levels = snd.loc[gamma < 0, "z"]
```

Типичные ошибки и их исправление

Ошибка	Что происходит	Как исправить
Давление и высота перепутаны	Профиль «переворачивается»	Проверять порядок и единицы
Срок 00 и 12 UTC перепутан	Суточный ход в профиле неверен	Фиксировать время в индексе
Td больше T	Физически невозможно	Проверить датчик и переименование
Гпа в Па	Степенная функция даёт неверный результат	Единицы проверять в заголовке файла
θ в градусах Цельсия	Ошибка порядка величины	Переводить в кельвины

Заключение

1

Загрузить

p, z, T, Td, ветер

2

Проверить

порядок, Td ≤ T, пропуски

3

Рассчитать

θ и градиент температуры

4

Найти

инверсии и тропопаузу

Главный вывод

Радиозонд даёт вертикальный профиль атмосферы — данные по высоте, а не по времени. После проверки профиля по нему рассчитывают потенциальную температуру и вертикальный градиент и находят инверсии и тропопаузу.

Вопросы для самопроверки

1. Почему профиль радиозонда нельзя сравнивать с суточным рядом станции?
2. Почему θ считают в кельвинах?
3. Что означает gamma < 0 на некотором уровне?
4. Почему для сортировки профиля важно знать, по какой координате он упорядочен?

Семинар 6 и следующая лекция

Семинар 6 · Атмосферные вертикальные профили

Загрузка профиля радиозонда, проверка и построение графика T и Td по высоте.

Расчёт θ и градиента температуры.

Лекция 7

Вертикальная структура атмосферы: температура, давление, влажность и диаграммы профилей.

Литература

- WMO. Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8). World Meteorological Organization.
- Durre, I., et al. (2006). Overview of the Integrated Global Radiosonde Archive. Journal of Climate, 19, 53–68.
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). Atmospheric Science: An Introductory Survey (2nd ed.). Academic Press.
- University of Wyoming. Atmospheric soundings. https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html
- Wilks, D. S. (2019). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences (4th ed.). Elsevier.