Модуль 1 · Python и анализ данных

Вертикальная структура атмосферы: температура, давление, влажность

Ph.D., старший преподаватель Мадина Турсумбаева

Кафедра метеорологии и гидрологии

Курс: Современные цифровые технологии в метеорологии

Цель лекции

Объяснить вертикальную структуру атмосферы — изменение давления, температуры и влажности с высотой — и научить анализировать её по профилю радиозонда: строить профили, рассчитывать относительную влажность, находить инверсии и тропопаузу.

Профиль радиозонда из лекции 6 — основа этой лекции.

Результаты обучения

После лекции студент будет:

Знать

Гидростатическое равновесие и масштабную высоту

Слои атмосферы и тропопаузу

Формулу относительной влажности

Уметь

Построить профиль T и Td по высоте

Вычислить относительную влажность

Найти инверсии в профиле

Понимать

Почему давление падает с высотой по экспоненте

Почему инверсия важна для качества воздуха

Почему давление падает с высотой

```
dp/dz = −ρ · g          # гидростатическое равновесие
```

≈ 8 км

масштабная высота H = RT/g: давление падает в e раз

≈ 6,5 К/км

стандартный градиент температуры в тропосфере

≈ 8–18 км

высота тропопаузы, зависит от широты и сезона

Масштабная высота — удобное приближение: p(z) ≈ p0 · exp(−z/H).

Слои атмосферы

1

Пограничный слой

Нижние сотни метров — 1–2 км. Перемешивание, суточный ход, высота меняется во времени

2

Тропосфера

Температура падает с высотой; здесь формируется погода

3

Тропопауза

Переходный слой: градиент температуры становится малым

4

Стратосфера

Температура растёт с высотой; озоновый слой

- Граница слоёв зависит от широты, сезона и погоды: в профиле её находят по градиенту, а не по фиксированной высоте.

Профиль температуры и точки росы

```
import matplotlib.pyplot as plt
fig, ax = plt.subplots(figsize=(5.5, 6))
ax.plot(snd["T"], snd["z"] / 1000, color="tab:red", label="T")
ax.plot(snd["Td"], snd["z"] / 1000, color="tab:blue", label="Td")
ax.set_xlabel("Температура, °C"); ax.set_ylabel("Высота, км")
ax.legend(); ax.grid(alpha=0.3)
```

Как читать

Ось высоты — вертикальная; давление можно показывать второй осью.

Расхождение T и Td — сухость воздуха; совпадение — насыщение.

Для синоптической диаграммы (Skew-T) используют MetPy: metpy.plots.SkewT.

Относительная влажность

```
def e_sat(t_c):                          # давление насыщения, гПа
    return 6.112 * np.exp(17.67 * t_c / (t_c + 243.5))   # формула Болтона

rh = 100 * e_sat(snd["Td"]) / e_sat(snd["T"])          # RH, %
```

Смысл

Относительная влажность — отношение фактического давления пара e = e_s(Td) к давлению насыщения e_s(T), в процентах.

Проверка

RH не может превышать 100 %. Если превышает — проверьте, что Td ≤ T и единицы температуры.

Инверсии в профиле

```
gamma = -np.gradient(snd["T"], snd["z"]) * 1000   # К/км
snd["inversion"] = gamma < 0                      # T растёт с высотой
layers = snd.loc[snd["inversion"], "z"]           # высоты слоёв инверсии
print(layers.min(), layers.max())
```

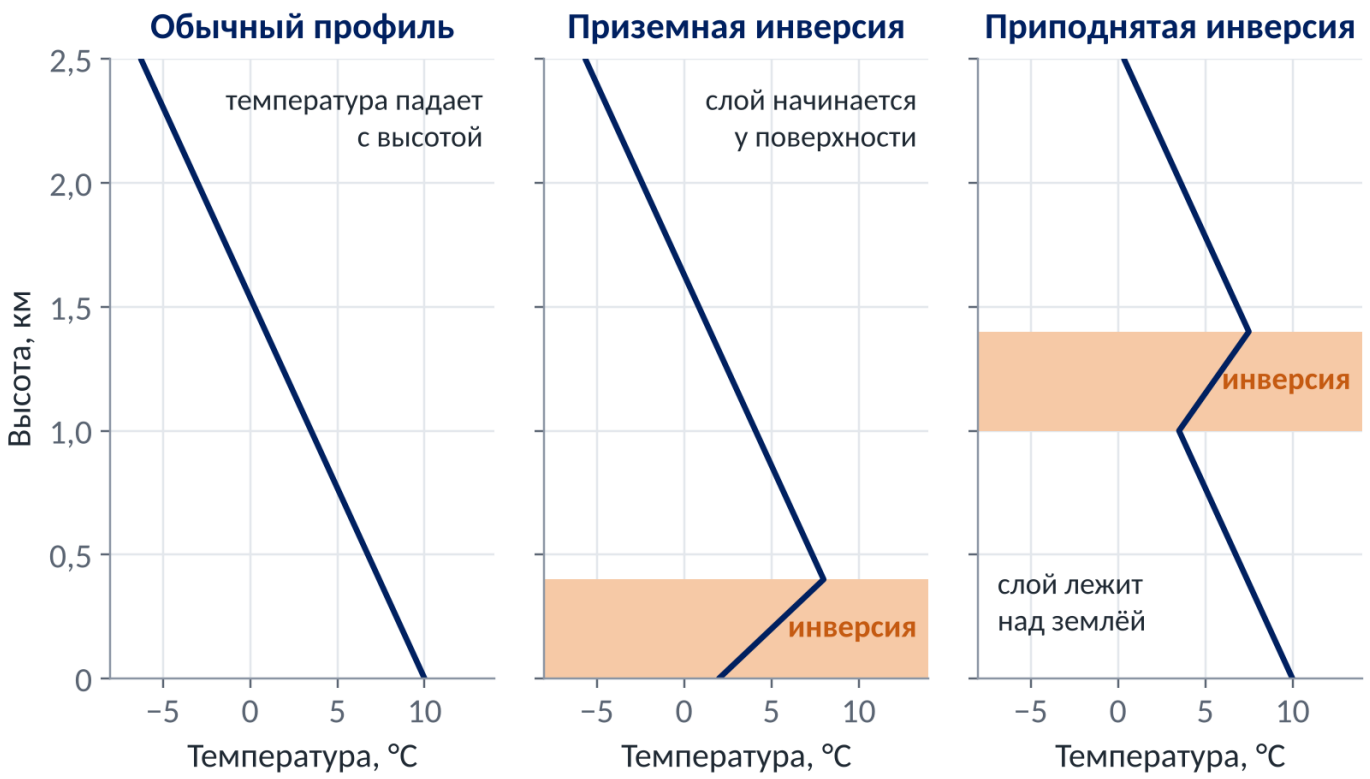
Важно для воздуха

Инверсии задерживают загрязнение у поверхности. В межгорных котловинах зимой они встречаются особенно часто.

Осторожно

Один «шумный» уровень даёт ложную инверсию. Сначала сглаживайте или проверяйте данные.

Инверсии на профиле: как они выглядят



Как узнать инверсию

На обычном профиле линия температуры уходит влево: с высотой холоднее.

В инверсионном слое линия поворачивает вправо: с высотой теплее, gamma < 0.

Два вида

Приземная — начинается у поверхности.

Приподнятая — слой лежит над землёй.

Почему это важно

Инверсия важна для качества воздуха: под ней накапливается загрязнение.

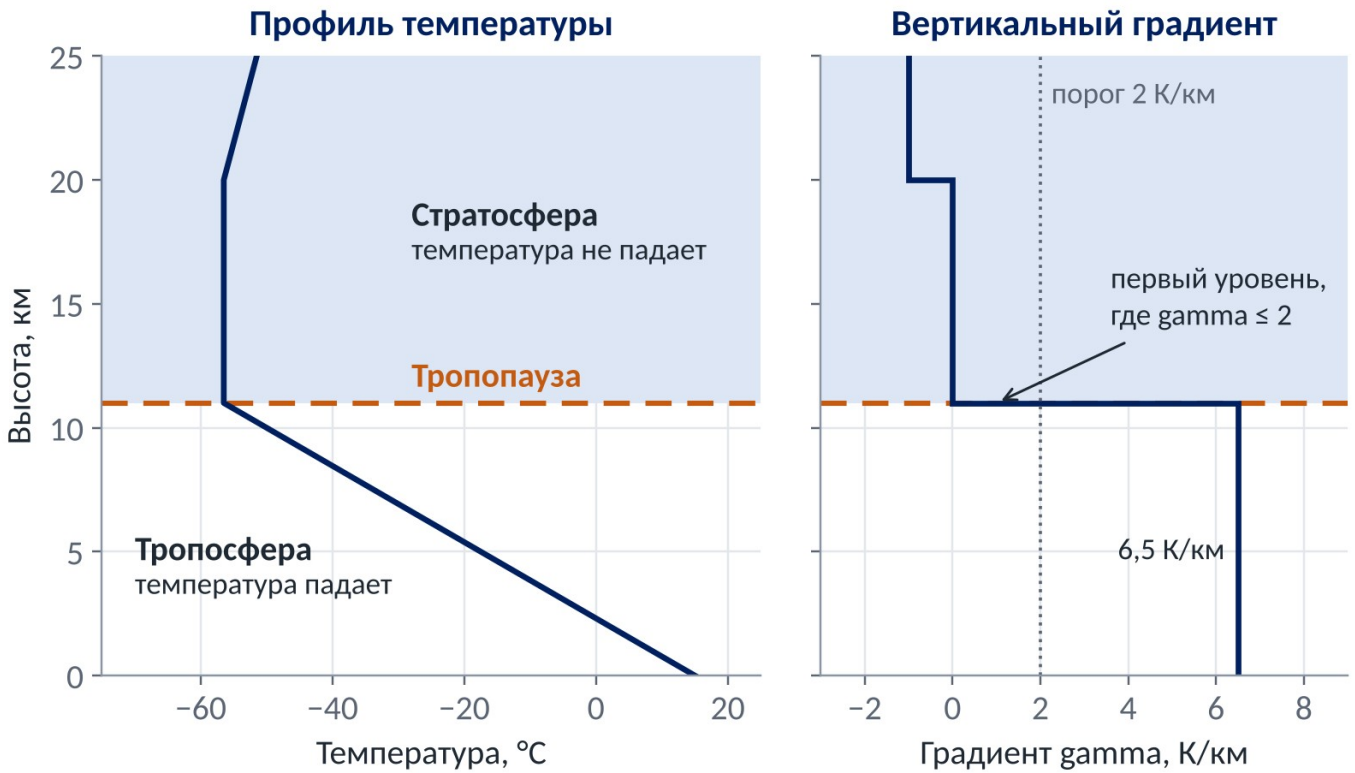
Схемы условные: значения температуры и высоты слоёв выбраны для наглядности.

Тропопауза: упрощённая оценка

```
# упрощённо: первый уровень, где градиент не выше 2 К/км
low = snd.loc[gamma <= 2, "z"]
trop_z = low.min()                  # высота, м
# полное правило ВМО учитывает средний градиент над уровнем (лекция 6)
```

- Полное правило ВМО проверяет, что средний градиент в слое 2 км над кандидатом тоже не выше 2 К/км.
- В MetPy есть готовые функции для тропопаузы: см. документацию MetPy.

Тропопауза на профиле: как она выглядит



Что видно на профиле

В тропосфере температура падает с высотой.

Выше тропопаузы она перестаёт падать, а затем растёт.

Как найти тропопаузу

Справа — градиент gamma. Тропопауза — первый уровень, где gamma не выше 2 К/км.

Это то же условие, что в коде: gamma <= 2.

Не фиксированная высота

Высота тропопаузы зависит от широты, сезона и погоды.

Схема по стандартной атмосфере: 15 °C у поверхности, 6,5 К/км до 11 км, далее −56,5 °C до 20 км.

Типичные ошибки и их исправление

Ошибка	Что происходит	Как исправить
Высота в метрах на оси в км	Профиль растянут в тысячу раз	Единицы оси — одна шкала
RH больше 100 %	Td выше T или перепутаны столбцы	Проверить Td ≤ T
Инверсия по одному уровню	Ложная инверсия из шума	Сглаживание или проверка соседних уровней
Масштабная высота принята за точную	Ошибка на высоких уровнях	Использовать профиль, а не формулу

Заключение

1

Гидростатика

давление падает экспоненциально

2

Слои

тропосфера, тропопауза, стратосфера

3

Влажность

RH из T и Td

4

Инверсии

градиент больше 0 — инверсия

Главный вывод

Давление убывает с высотой по экспоненте, а ход температуры определяет слои атмосферы. По профилю радиозонда рассчитывают относительную влажность и находят инверсии и тропопаузу; инверсии важны для качества воздуха.

Вопросы для самопроверки

1. Почему масштабная высота примерно 8 км?
2. Почему RH нельзя считать по одной только температуре?
3. Почему инверсия важна для загрязнения воздуха в котловине?
4. Почему тропопауза в профиле определяется по градиенту, а не по фиксированной высоте?

Семинар 7 и самостоятельная работа 2

Семинар 7 · Профили

Температура, давление и влажность по высоте для выбранного профиля.

RH, инверсии и график профиля.

МӨЖ 2 · 20 баллов (неделя 9)

Региональный климатический анализ по ERA5. Консультация по заданию — на неделе 7 (СРОП).

Следующая лекция — NetCDF и xarray: многомерные климатические данные.

Литература

- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). Atmospheric Science: An Introductory Survey (2nd ed.). Academic Press.
- Stull, R. (2017). Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science. University of British Columbia.
- Bolton, D. (1980). The computation of equivalent potential temperature. Monthly Weather Review, 108(7), 1046–1053.
- MetPy Developers. MetPy Documentation. https://unidata.github.io/MetPy/