

Тепловая структура и плотность мезосферы и нижней термосферы Венеры по данным SOIR/VEh 2006-2014 гг.

Федорова Е.С. (1), Беляев Д.А. (1), Федорова А.А. (1), Кораблев
О.И. (1)

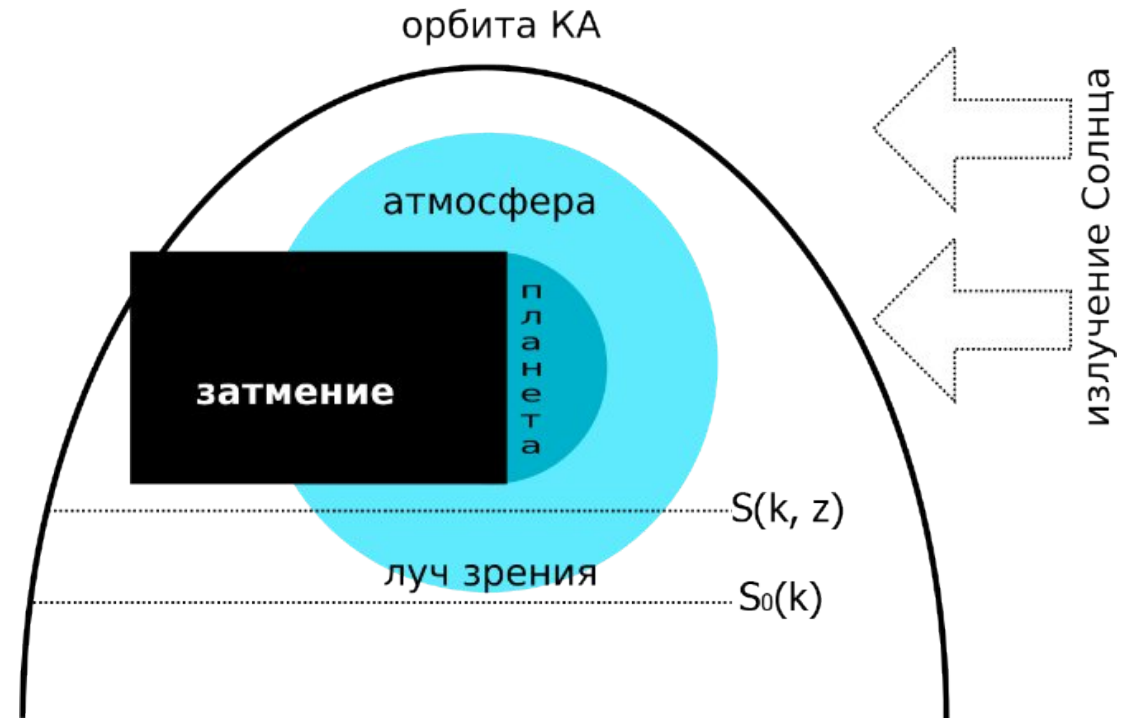
(1) Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Цель работы

- **Цель:** восстановление вертикальных профилей температуры и плотности в мезосфере и нижней термосфере Венеры на основе данных SOIR/VEh за 2006-2014 гг.
- **Перспектива:** создание обширной базы вертикальных профилей как основы для получения профилей концентраций малых газовых составляющих и для улучшения фотохимических моделей атмосферы

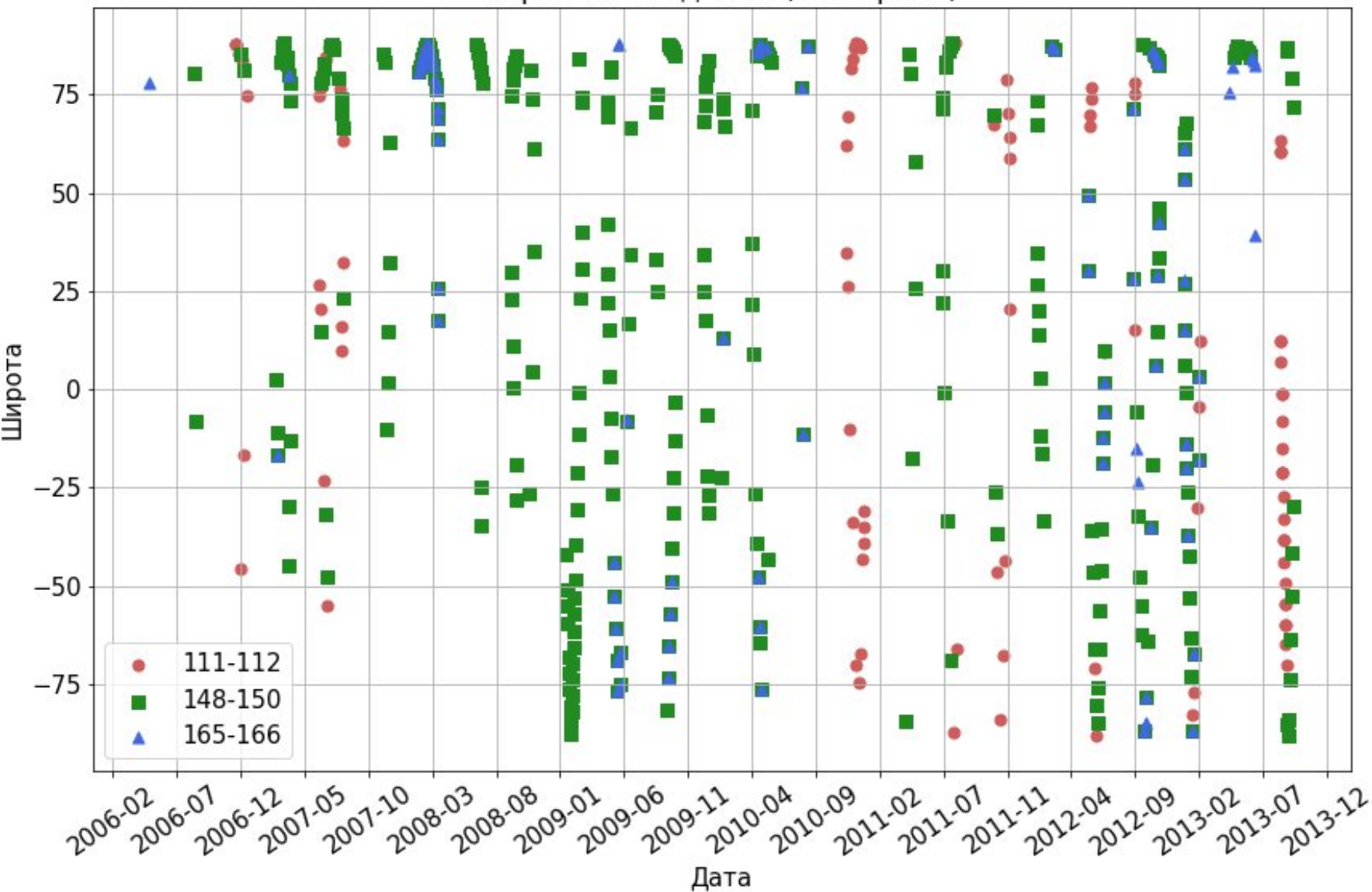
Спектрометр SOIR/VEr

- **Годы работы:** 2006-2014
- **Спектральный диапазон:** 2257-4430 cm^{-1} или 2,2-4,3 μm (ИК)
- **Эшелле-спектрометр**, 94 порядка дифракции (101-194).
- Акустооптический перестраиваемый фильтр (**АОПФ**)
- Обнаружение тонких полос поглощения CO_2 , H_2O , HDO и других молекул на высотах от 65 км (над облаками Венеры).



Карта наблюдений

Карта наблюдений (648 орбит)



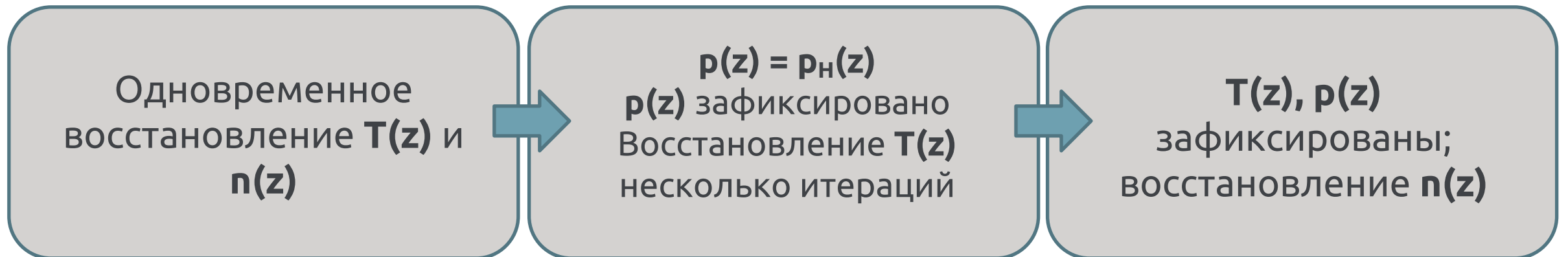
Выбранные порядки дифракции:

Порядки	Спектр. диапазон	Диапазон высот
111-112	2481-2524 см^{-1} (~4 мкм)	70-110 км
148-150	3308-3381 см^{-1} (~3 мкм)	70-120 км
165-166	3687-3741 см^{-1} (2.7 мкм)	90-150 км

Алгоритм восстановления

Применялся при работе с данными ACS/ExoMars (Fedorova et al., 2020; Belyaev et al., 2021).

Впервые применяется для данных SOIR.



Алгоритм восстановления (1)

Одновременное
восстановление $\mathbf{T}(\mathbf{z})$ и
 $\mathbf{n}(\mathbf{z})$

- 1) Априорные профили $T(z)$ и $n(z)$ — здесь **VIRA** (Keating et al., 1985)
- 2) Решение задачи оптимизации (в дальнейшем аналогичная решается на каждом шагу)

$$\chi^2 = \sum_k \left[\frac{J_{model}(k, z, \mathbf{n}(z), \mathbf{T}(z), \tau_a(z)) - J_{data}(k, z)}{\Delta J_{data}} \right]^2$$

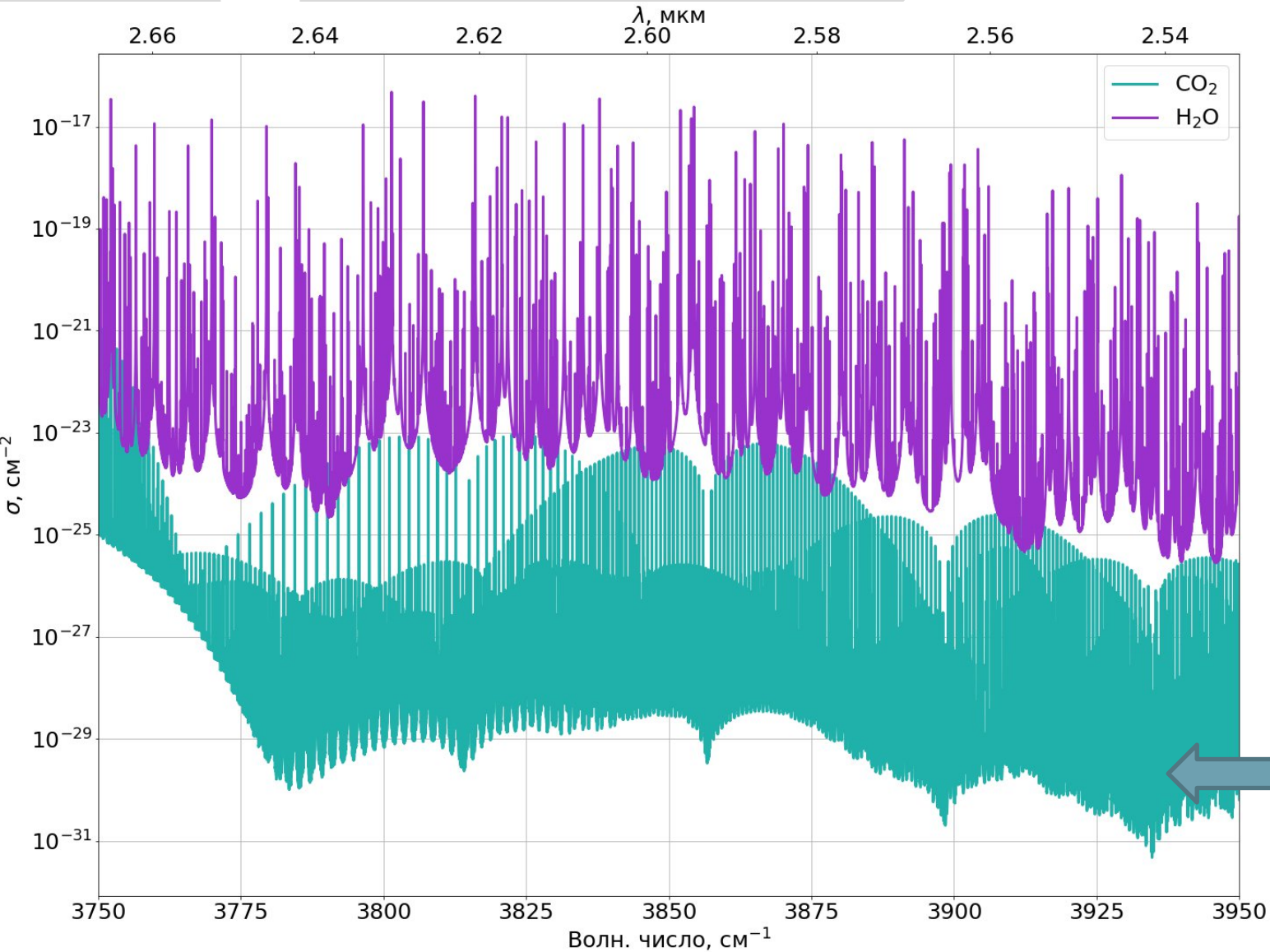
J_{model} — модельный спектр пропускания

J_{data} — измеренный спектр пропускания

ΔJ_{data} — статистическая ошибка

k — сетка волновых чисел

Моделирование спектров



Закон Бугера-Ламберта-Бэра:

$$J(z) = \exp\left(-\int \sum_{gas} \sigma_{gas}(T, p) n_{gas}(z) dz - \tau_{aer}\right)$$

σ — сечения поглощения, вычислены с помощью HITRAN 2020 (Gordon et al., 2022);

n — плотность;

τ_{aer} — аэрозольная экстинкция.

На графике: H_2O и CO_2 сечения поглощения ($p = 1$ мбар, $T = 240$ К, 85 км над пов-тью Венеры)

Алгоритм восстановления (2)

$p(z) = p_H(z)$ (1)
 $p(z)$ зафиксировано;
восстановление $T(z)$
несколько итераций

(1) Гидростатическое давление:

$$p_H(z) = p_0 \cdot \exp\left(-\int \frac{m(z)g(z)}{kT(z)} dz\right)$$

где p_0 - точка, в которой по расчетам наименьшая ошибка $p(z)$

1) Априорные профили: $T(z)$ из предыдущей итерации, $n(z) = p_H(z)/kT(z)$

2) Количество итераций: **5**;

$$p_1(z) = p(z)$$

$$p_2(z) = (3p(z) + p_H(z))/4$$

$$p_3(z) = (p(z) + p_H(z))/2$$

$$p_4(z) = (p(z) + 3p_H(z))/4$$

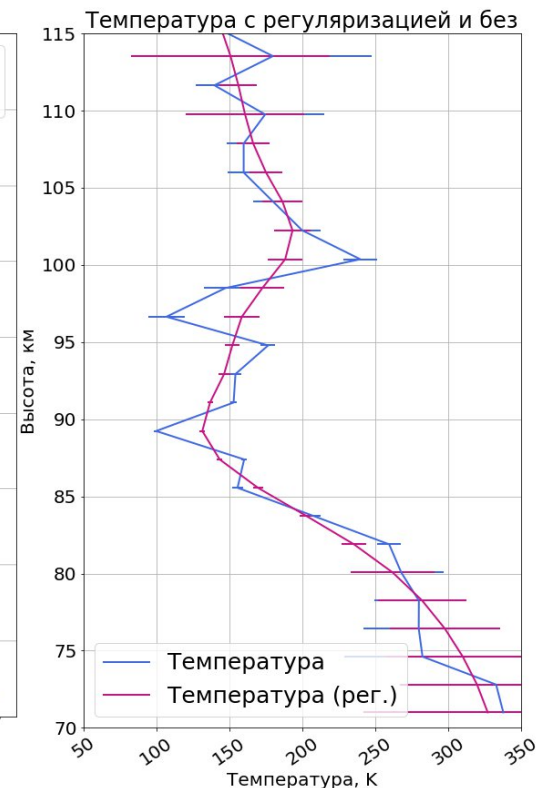
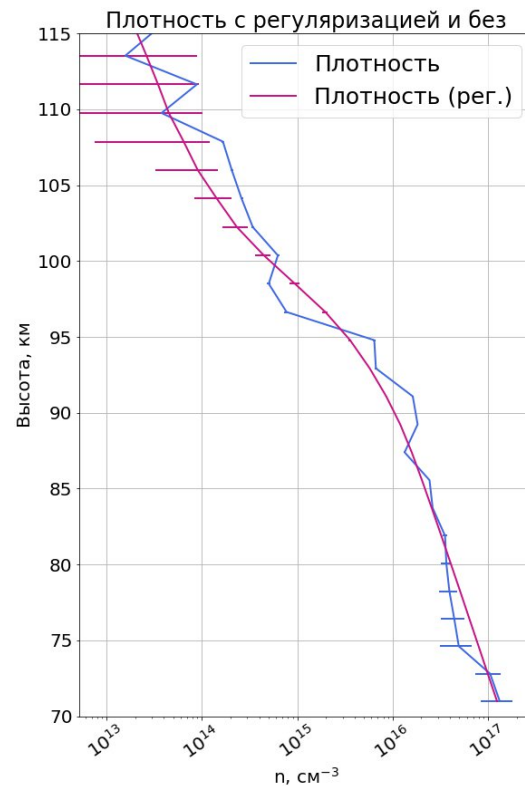
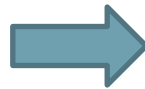
$$p_5(z) = p_H(z)$$

Алгоритм восстановления (3)

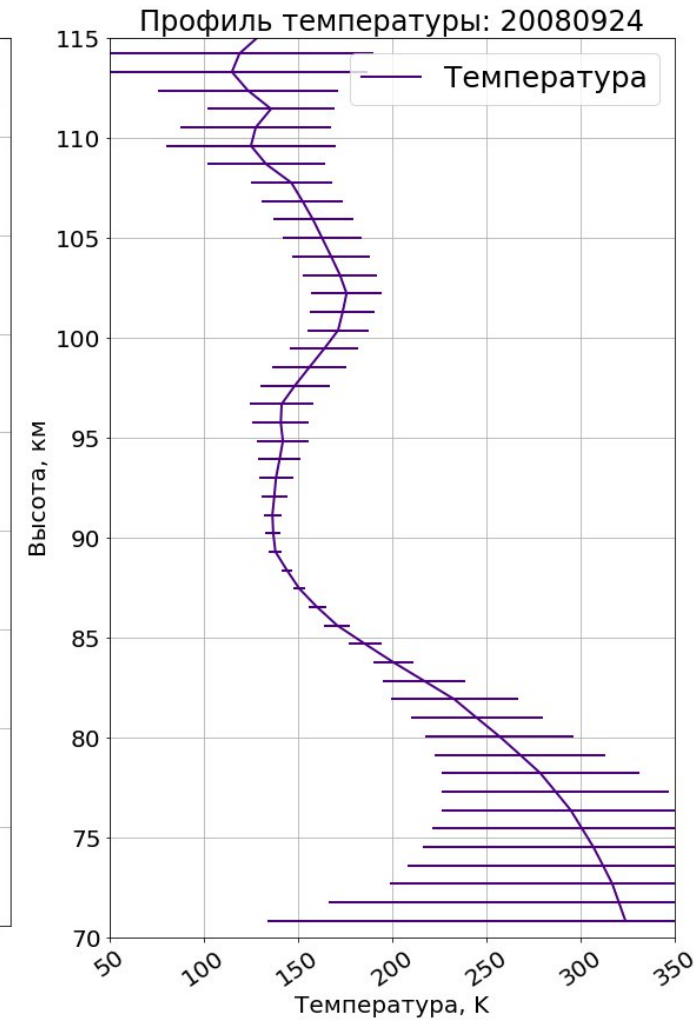
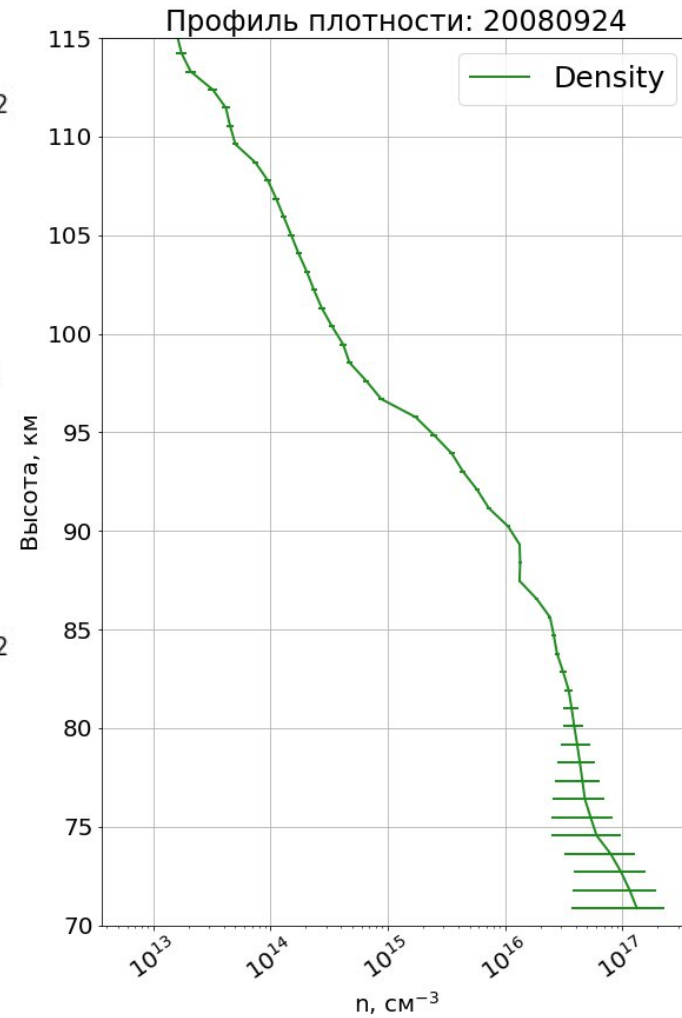
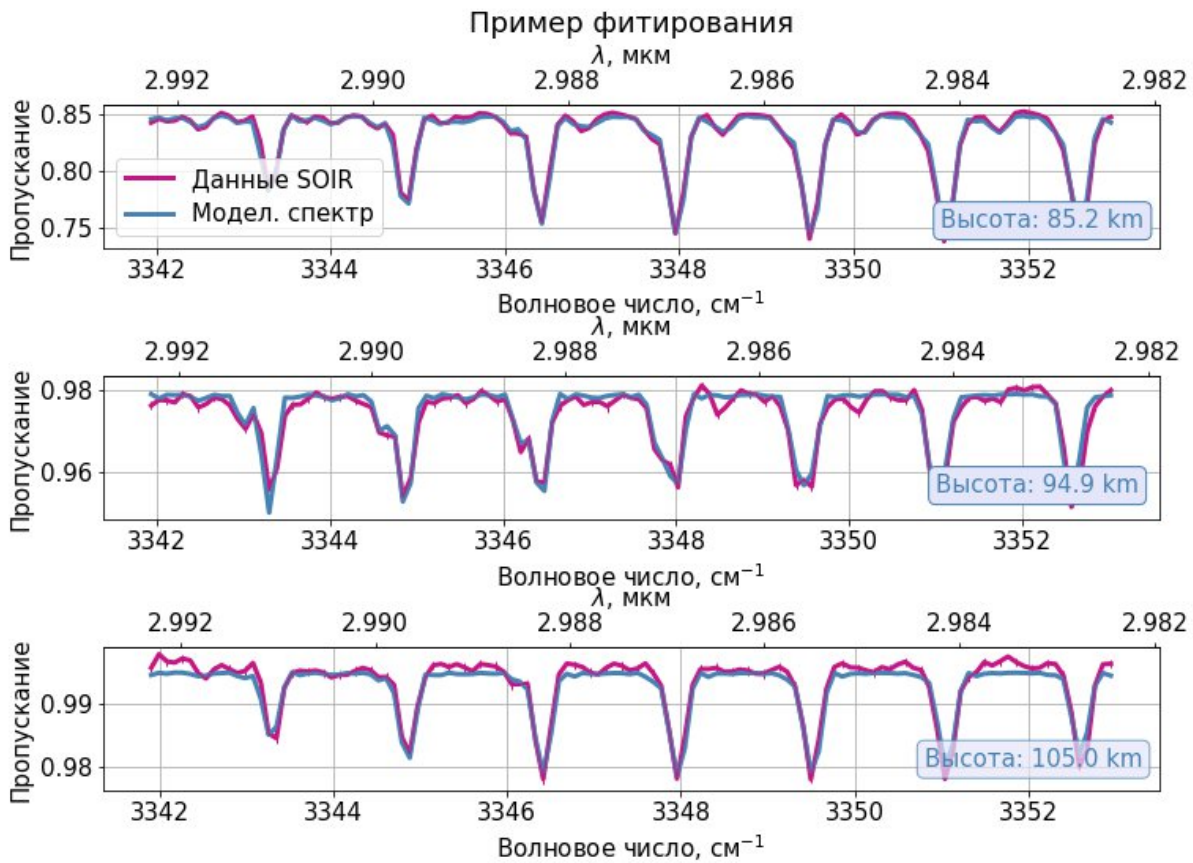
$T(z), \rho(z)$
зафиксированы;
восстановление $n(z)$

- 1) Априорные профили: $T(z)$ из предыдущей итерации, $n(z) = \rho_H(z)/kT(z)$
- 2) Регуляризация: проводится для сглаживания профилей.

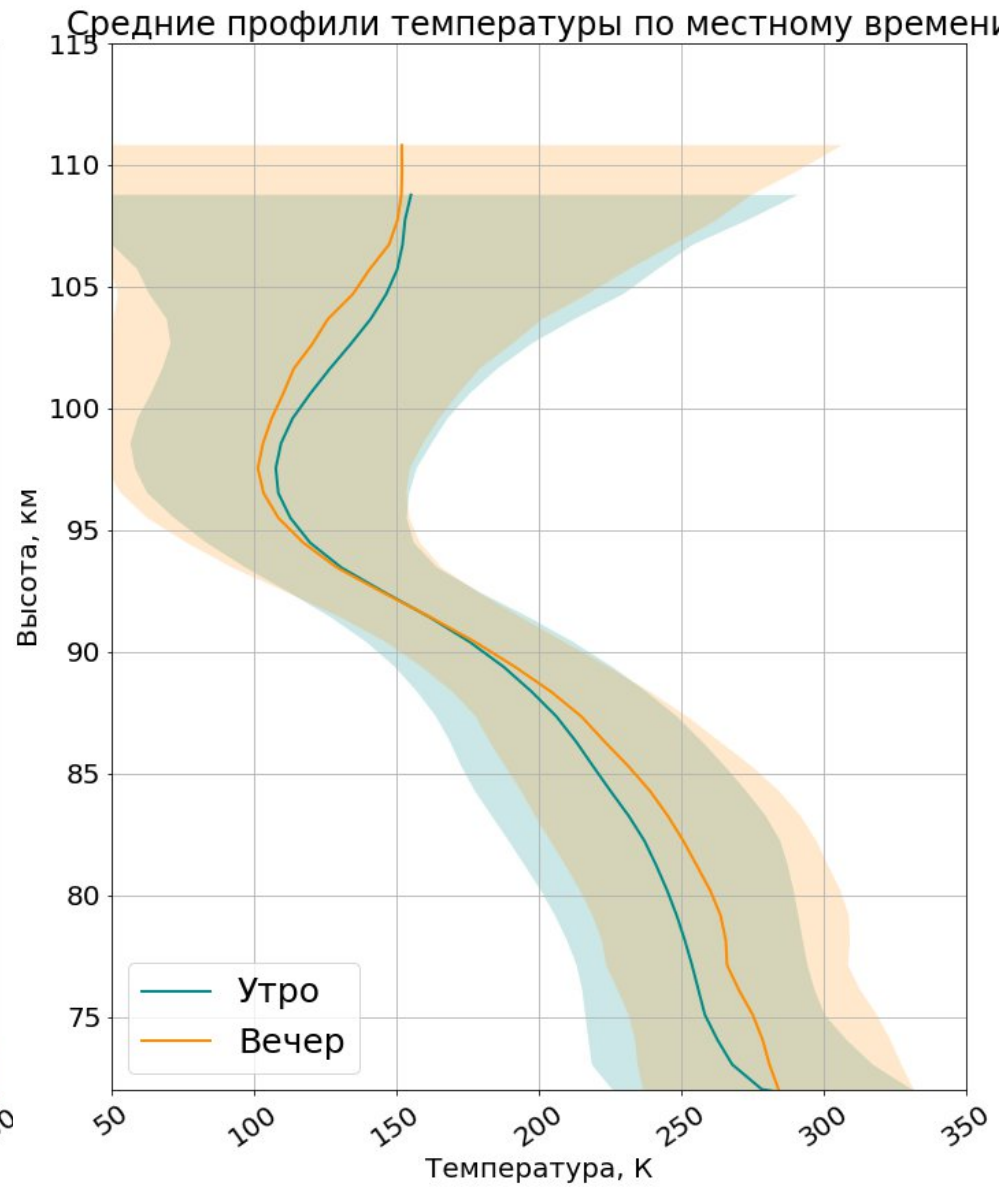
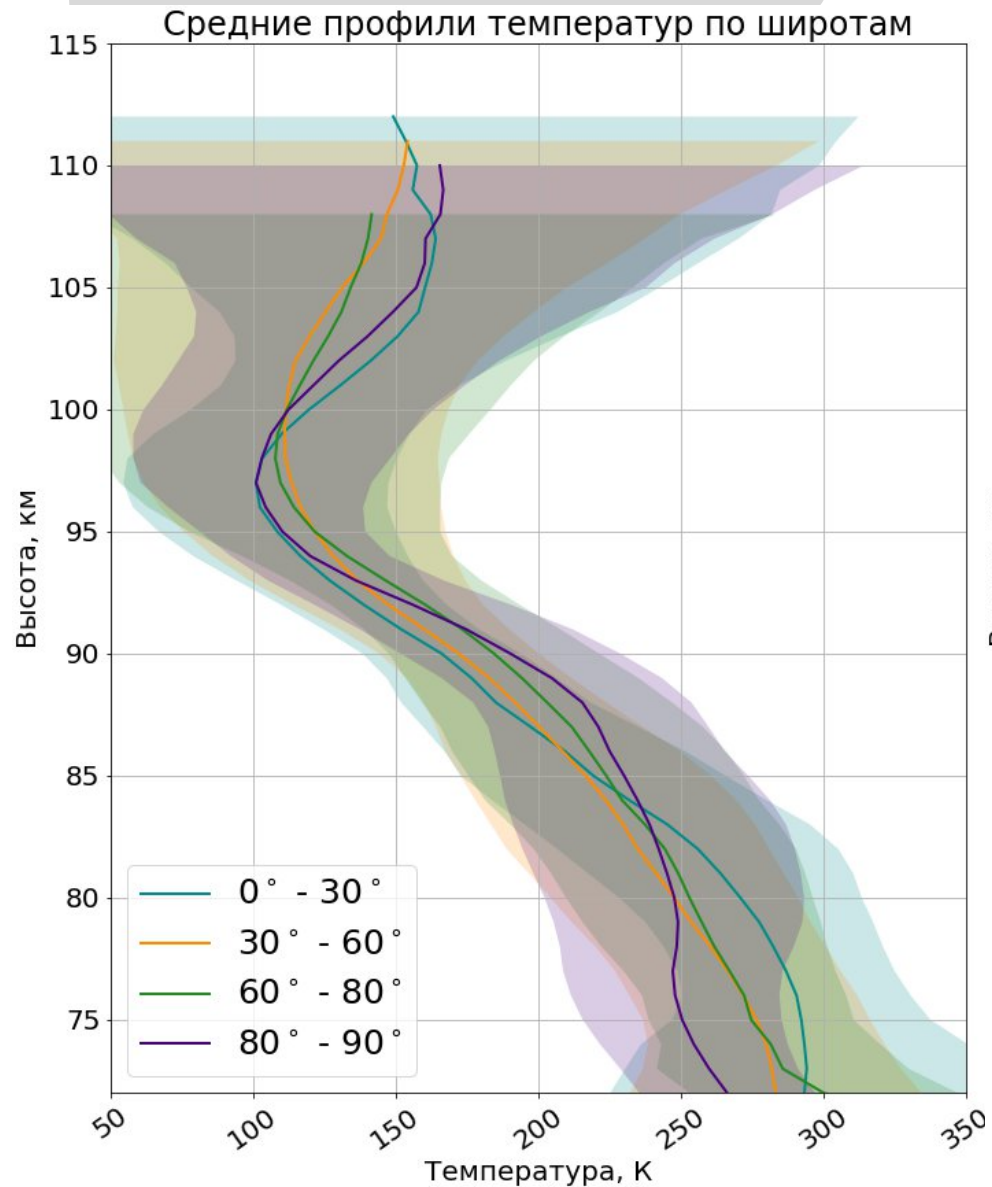
На графиках:
сравнение профилей $n(z)$ и $T(z)$ до и
после регуляризации



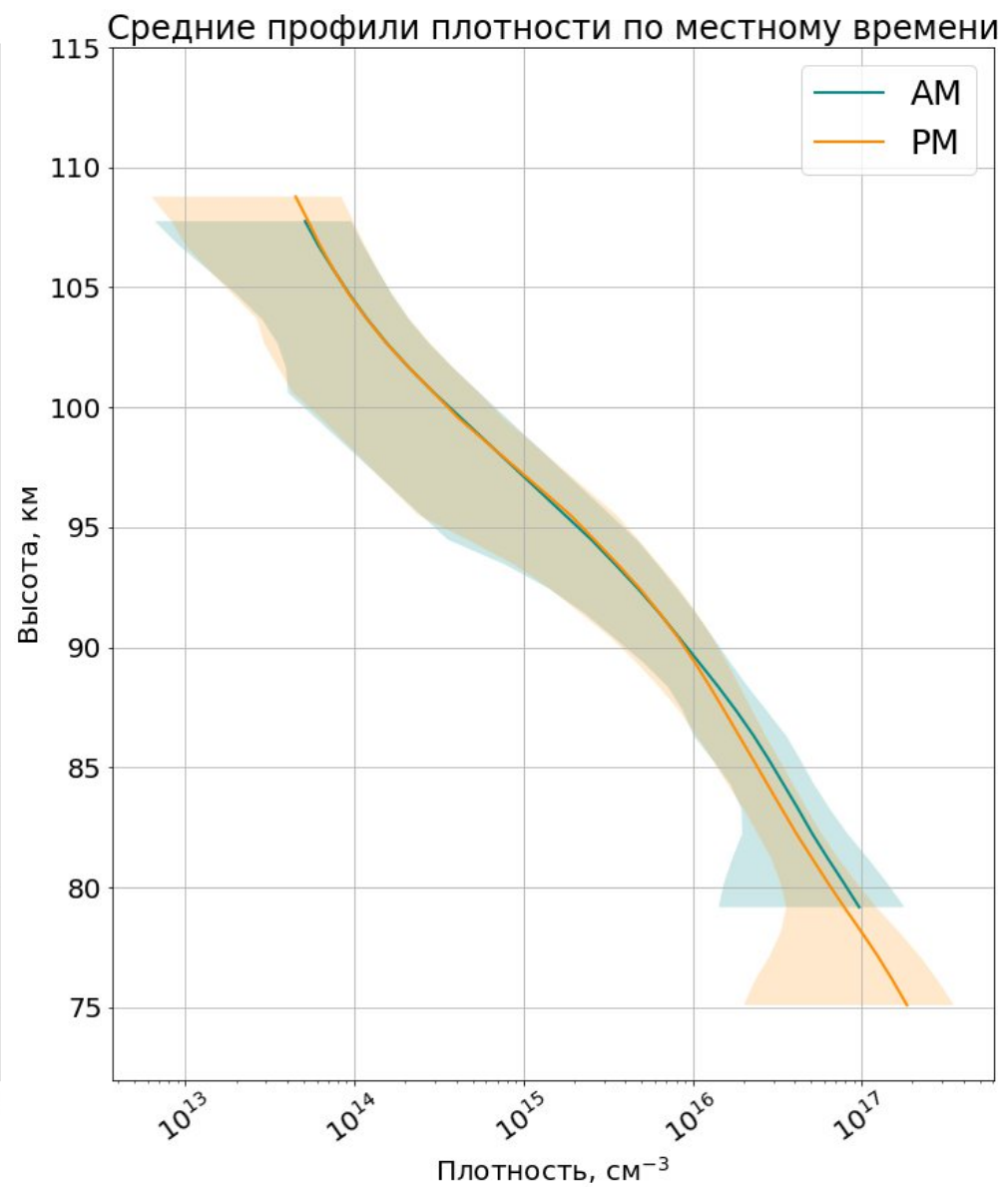
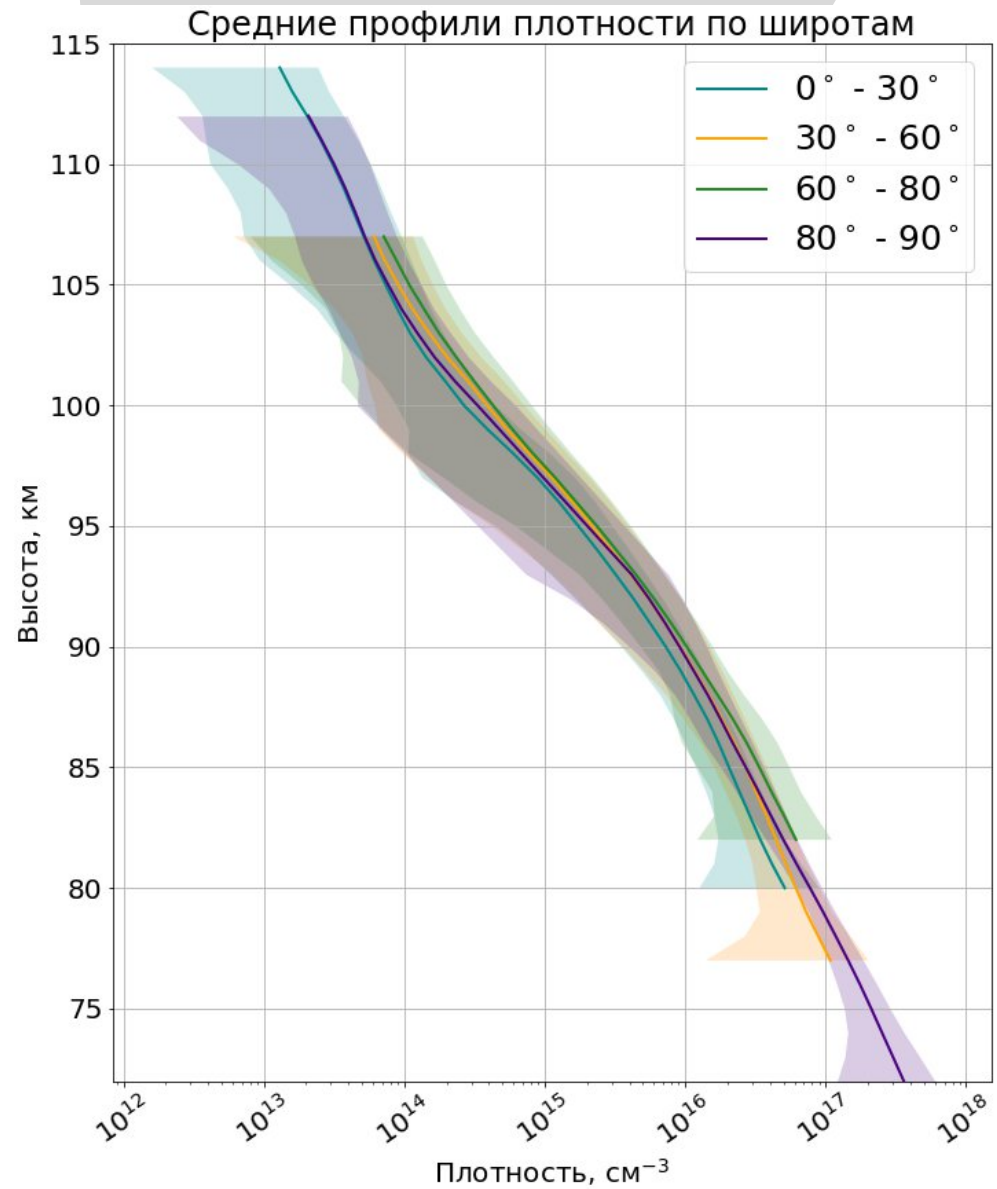
Пример фитирования



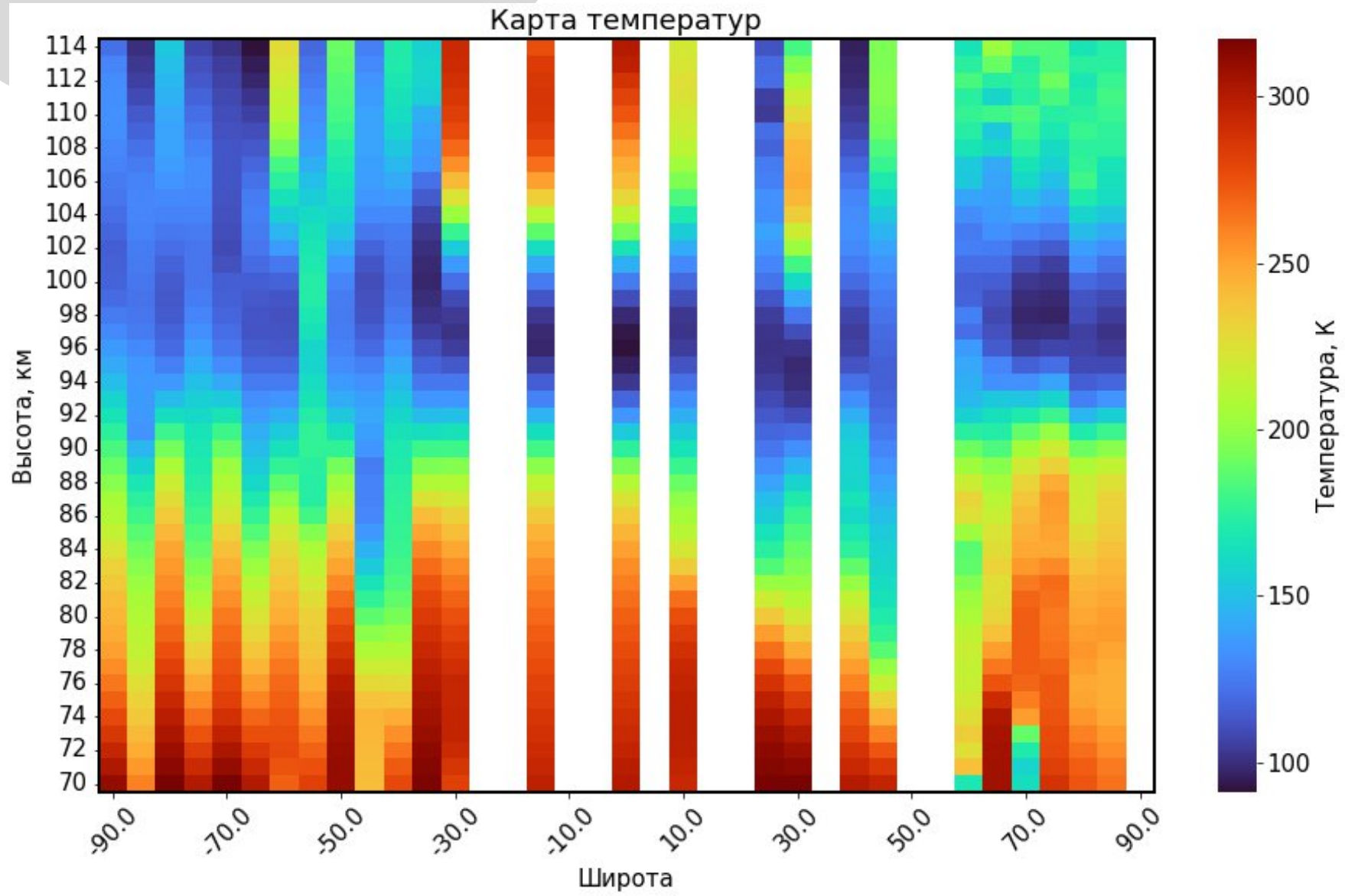
Вертикальные профили температуры



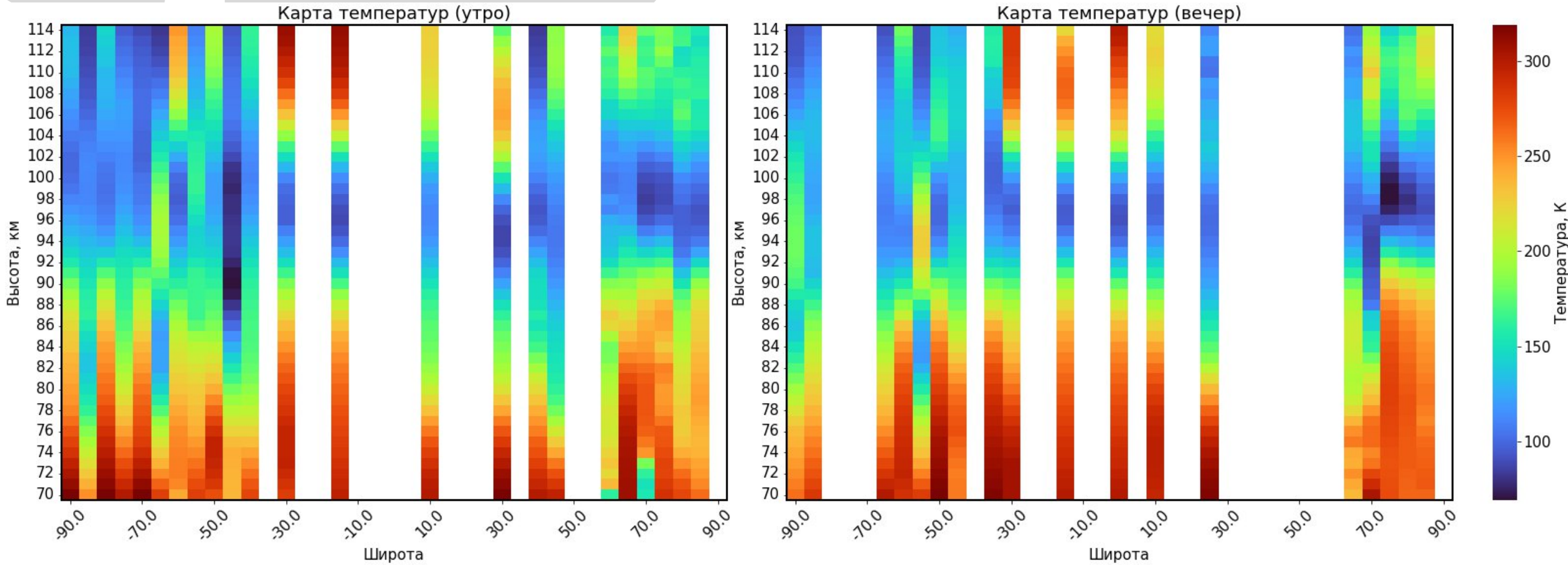
Вертикальные профили плотности



Карта температур



Карта температур (утро, вечер)

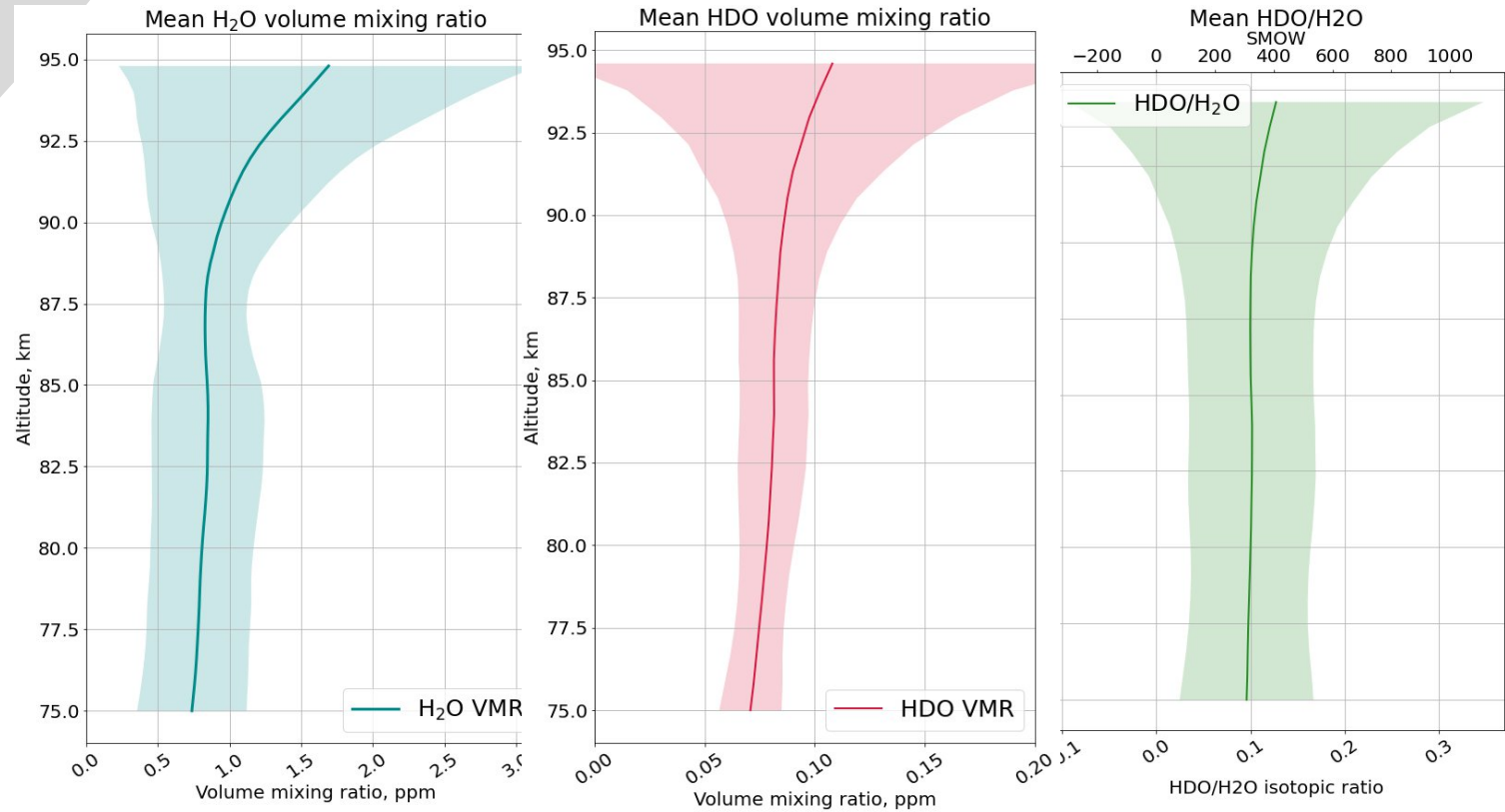


Некоторые результаты по H₂O и HDO

Полученное соотношение
HDO/H₂O:
0.103 ± 0.077
(примерно в **300** раз больше
земного)

Согласно (Mahieux et al.,
2024), соотношение HDO/H₂O
от **0.025** на ~70 км до **0.24** на
~108 км (в **162-1519** больше
земного)

Эта работа будет продолжаться по мере пополнения базы температурных профилей.



Выводы

- Применяемый алгоритм показывает хороший результат при восстановлении профилей $T(z)$ и $n(z)$ в большем диапазоне высот, чем алгоритм ASIMAT (Mahieux et al. 2010; 2023).
- База вертикальных профилей $T(z)$ и $n(z)$ будет расширена и использована при восстановлении содержаний малых газовых составляющих в мезосфере и нижней термосфере Венеры по данным SOIR.