

Возможности восстановления содержания углекислого газа по измерениям ИКФС-2 в области 15-мкм полосы CO₂

Власов П.В., Стариченко Е.С., Игнатьев Н.И., Трохимовский А.Ю., Фёдорова А.А., Кораблев О.И., Ломакин А.А.
Институт космических исследований РАН

XXIII международная конференция «Современные проблемы
дистанционного зондирования Земли из космоса»
ИКИ РАН, 12 ноября 2025

Основные задачи ACS TIRVIM на борту КА ExoMars TGO при наблюдении в надир:

- Мониторинг динамики тепловой структуры марсианской атмосферы
- Мониторинг изменчивости общего содержания аэрозолей в атмосфере
- Мониторинг общего содержания водяного пара в атмосфере

Научные задачи TIRVIM в режиме солнечных затмений:

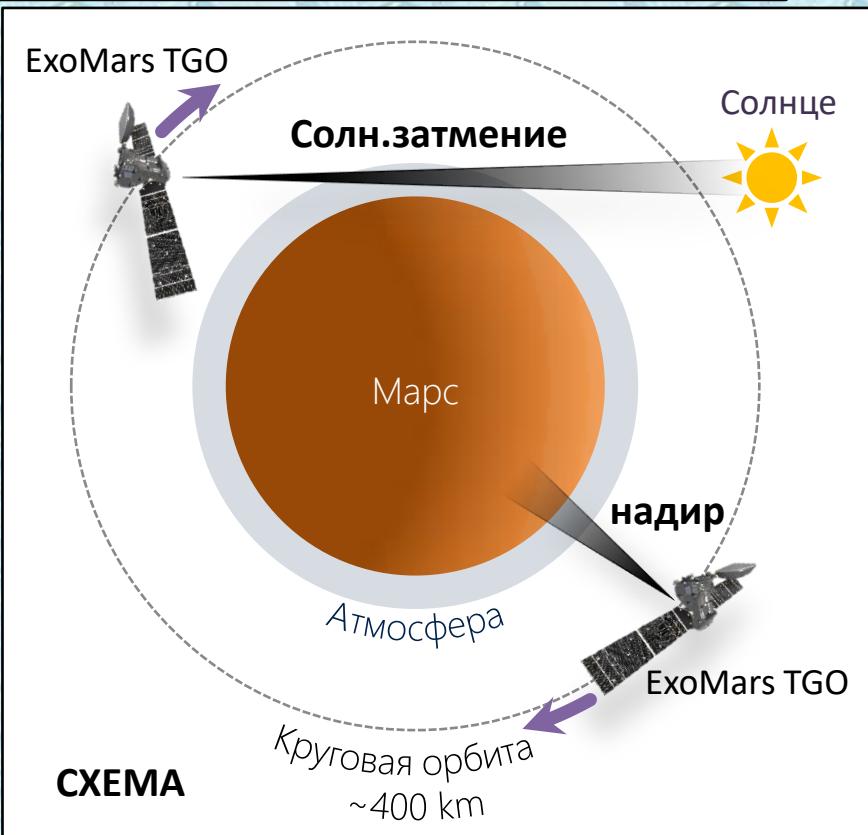
- Детектирование и мониторинг малых газовых составляющих атмосферы Марса

Основные научные задачи ИКФС-2 на борту КА «Метеор-М» №2:

- Мониторинг температуры земной атмосферы и поверхности
- Мониторинг содержания малых газовых составляющих (H_2O , CO_2 ?, O_3 , CH_4 , и др.) в атмосфере Земли

Текущие цели исследования:

- ✓ Адаптация алгоритма обработки данных TIRVIM/TGO к измерениям ИКФС-2 и к особенностям спектроскопии в земной атмосфере
- ✓ Восстановление температуры поверхности и воздуха в безоблачную погоду
- Анализ возможности восстановления содержания CO_2 по полосе 15 мкм и исследование точности результата в зависимости от априорных данных
 - Усовершенствование алгоритма и валидация с существующими
 - Вопрос целесообразности восстановления содержания других парниковых газов



Отличие атмосфер Марса и Земли с точки зрения спектроскопии в ИК-диапазоне

- Линии газов в атмосфере Марса уширяются в CO₂, что нужно учитывать в виде поправок к базам данных линий и к форме линий CO₂
- Полосы O₃, H₂O в земной атмосфере более глубокие и широкие, требуется точное знание излучательной способности поверхности во всём диапазоне спектра
- Линии H₂O присутствуют в полосе CO₂ 15 мкм, влияя на процесс восстановления температуры в атмосфере Земли, в отличие от Марса
- На фоне линий водяного пара различаются линии CH₄ в случае земной атмосферы
- На Земле куда меньший диапазон суточных колебаний температуры поверхности
- Облачность в земной атмосфере осложняет наблюдения в тепловом ИК диапазоне

ACS TIRVIM в надир:

Фактический спектральный диапазон: 6–16 мкм (640–1800 см⁻¹)

Спектральное разрешение с аподизацией: FWHM = 1.17 см⁻¹

Поле зрения: Ø2.5° (= Ø17 км)

Фактический NESR: 0.1–1 мВт/м²/ср/см⁻¹

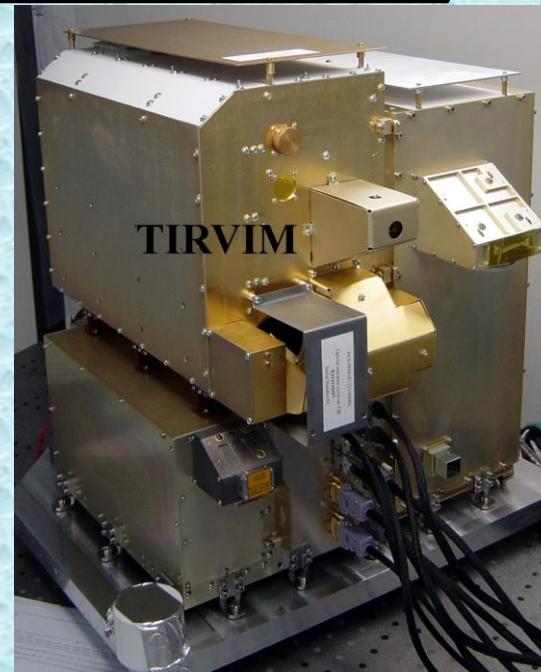
ИКФС-2:

Фактический спектральный диапазон: 5–16 мкм (660–2000 см⁻¹)

Спектральное разрешение: FWHM = 0.7 см⁻¹ до 1210 см⁻¹ / 1.4 см⁻¹ на >1210 см⁻¹

Поле зрения: Ø2.3° (= Ø30 км)

Заявленный NESR: 0.1–0.6 мВт/м²/ср/см⁻¹



Априорные данные и начальные приближения

- Профиль температуры-давления, давление у поверхности – база данных «ERA5 global atmospheric reanalysis» до 80 км
- Профили относительного содержания некоторых малых газовых составляющих – также «ERA5 global atmospheric reanalysis»
- Для задачи восстановления температуры концентрация CO₂ задаётся постоянной в 420 ppmv (как параметр) на всех высотах
- Излучательная способность поверхности – база данных «Combined ASTER and MODIS Emissivity database over Land (CAMEL)»
- Аэрозольные априорные данные пока не рассматриваются, облачность исключается из спутниковых снимков

Особенности расчёта спектров поглощения в применении к данным ИФКС-2

- Коэффициенты газового поглощения для CO₂ (без интерференции линий), O₃, CH₄, N₂O и т.д. считаются с контуром Фойгта, H₂O с контуром Лоренца до 25 cm⁻¹ + континуум (MT_CKD), с шагом 0.01 cm⁻¹, после чего интерполируются
- Игнорирование аэрозолей и исключение облачных измерений, т.к. на данном этапе проверяется лишь возможность восстановления содержания CO₂ с адекватной точностью
- Излучательная способность поверхности берётся из базы CAMEL и при необходимости варьируется в некоторых окнах прозрачности в случаях явного несоответствия измеренному спектру
- Аппаратная функция ИФКС-2 сшита из 2 участков с гауссианами шириной 0.7 и 1.4 cm⁻¹
- Перенос излучения без учёта рассеяния, только молекулярное поглощение/излучение (на данном этапе)

Восстановление температурного профиля

- Метод статистической регуляризации (nonlinear optimal estimation method, Rodgers, 2000) для профиля температуры до 60 км
- 43 спектральных канала в диапазоне 660–760 см⁻¹ для весовых функций восстановления температуры отобраны вручную
- Восстановление содержания аэрозолей не рассматривается, облачная погода исключена на данный момент
- Температура поверхности восстанавливается в окне прозрачности в районе 900 см⁻¹
- Постоянное по атмосфере заданное относительное содержание CO₂, оно варьируется как входной параметр
- Масштабирование априорных профилей относительного содержания других малых газовых составляющих (H₂O, O₃, CH₄)
- Варьирование излучательной способности поверхности, не всегда соответствующей наблюдениям (в т.ч. на краю полосы CO₂)
- Учёт наличия линий H₂O в полосе поглощения CO₂ для более корректной сходимости

Решение уравнение переноса излучения без рассеяния:

$$I_\nu = \varepsilon_\nu \cdot B_\nu(T_{surf}) \cdot t_\nu(0, \mu) + \int_{z_{surf}} B_\nu(T(z)) \cdot t_\nu(z, \mu) \frac{d\tau_\nu(z)}{\mu}, \quad \text{где } z = -\ln p, \quad t_\nu(z, \mu) = \exp(-\tau_\nu(z, \mu)), \quad \mu = \cos \theta$$

Итерационное решение обратной задачи:

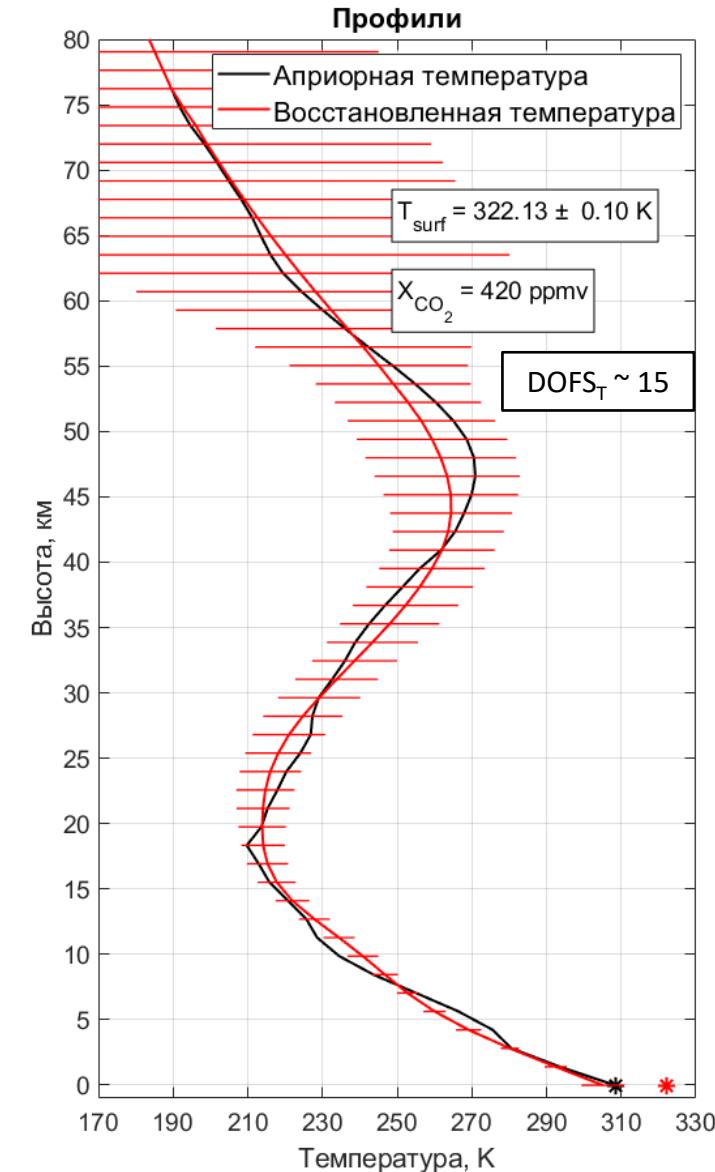
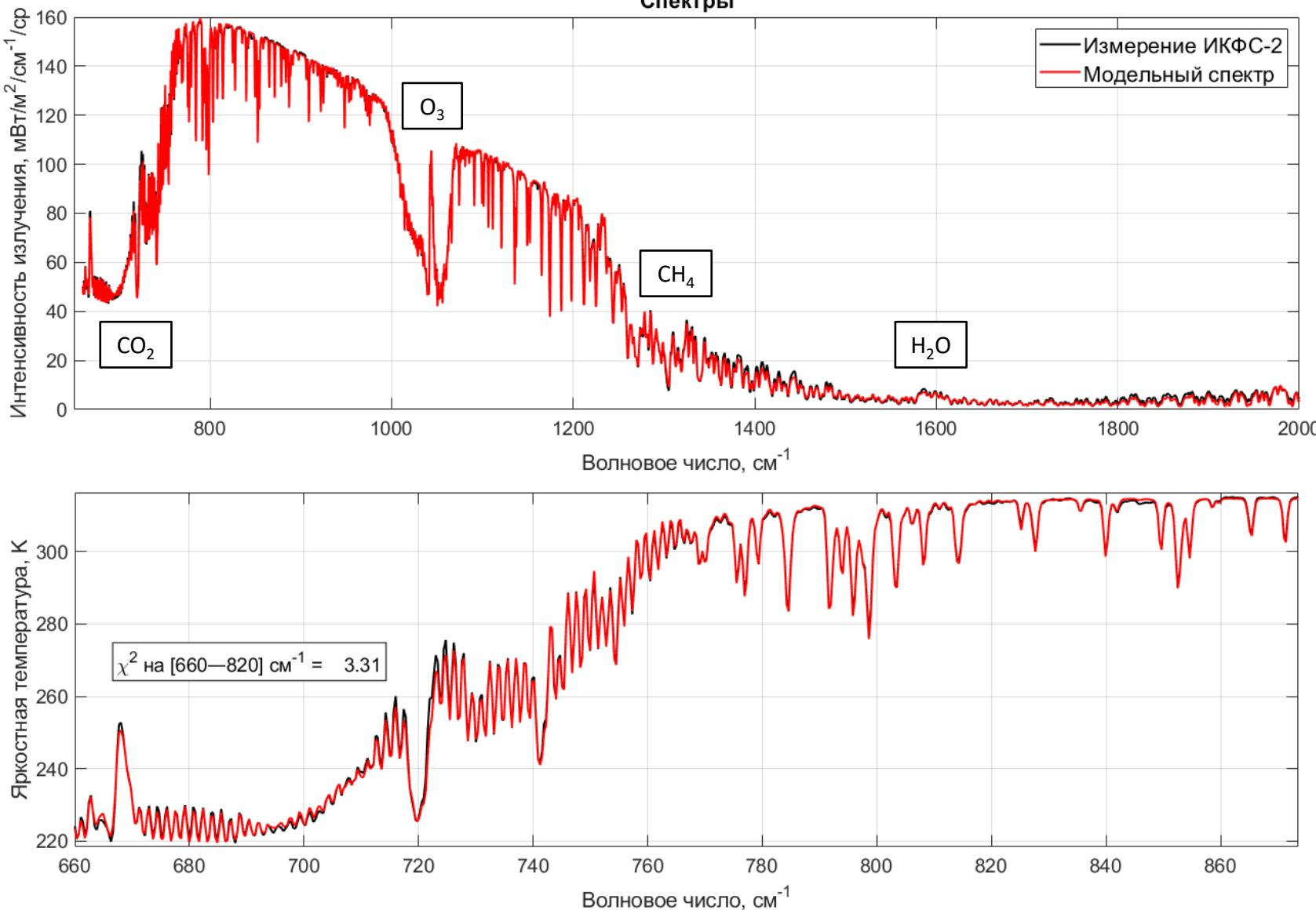
$$T^{(n+1)} = T_0 + S \times K^T \times (K \times S \times K^T + E)^{-1} (I_{meas} - I^{(n)} - K \times (T^{(n)} - T_0))$$

$$K_{ij} = \partial I_i / \partial T_j \quad i, j = 1, M$$

$$C = S - S \times K^T \times (K \times S \times K^T + E)^{-1} \times K \times S \quad \Delta T_j = \sqrt{C_{jj}}$$

K – матрица весовых функций (производные интенсивности излучения / в выбранных спектральных каналах по температуре *T* на атмосферных уровнях), *T₀* – начальная температура
S – корреляционная матрица неопределённости *T*
E – инструментальная погрешность, а диагональные элементы апостериорной ковариационной матрицы **C** определяют погрешность восстановления температуры

Пример спектра ИКФС-2 и восстановленного профиля температуры по спектру



Погрешность восстановления общего содержания CO₂

Содержание CO₂ может быть восстановлено похожим образом как единичный параметр с использованием каналов спектра в диапазоне 760–790 см⁻¹, исключая участки с поглощением H₂O. В этом случае уже профили температуры-давления, температура поверхности и пр. выступают как заранее фиксированные априорные данные.

$$N_{CO_2}^{(n+1)} = N_{CO_2}^{(n)} + \sigma_{CO_2} \cdot K_{CO_2}^T \times Y \times \Delta I$$

$$\Delta I = I_{meas} - I^{(n)}$$

$$Y = (\sigma_{CO_2} \cdot K_{CO_2} \times K_{CO_2}^T + E)^{-1}$$

$$C_{CO_2} = \sigma_{CO_2} - \sigma_{CO_2} \cdot K_{CO_2}^T \times Y \times K_{CO_2} \cdot \sigma_{CO_2}$$

$$\Delta N_{CO_2} = \sqrt{C_{CO_2}}$$

Если восстанавливать содержание CO₂ как одного параметра по одному каналу, формальная погрешность составляет около 2 ppm при условии, что используемые априорные данные абсолютно точны.

K – вектор производных интенсивности излучения *I* в выбранных спектральных каналах по общему содержанию *N* углекислого газа.

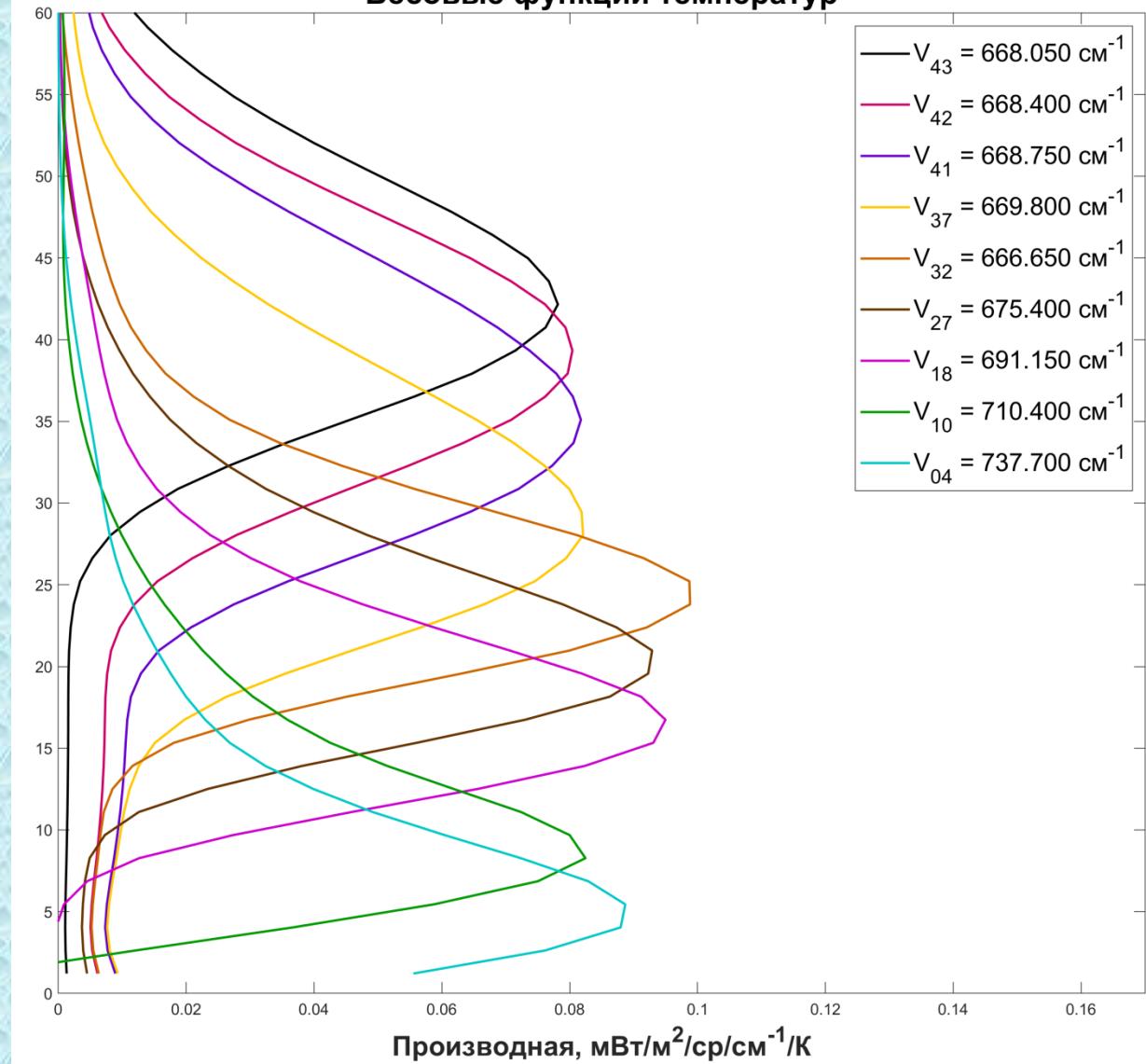
Дополнительную и самую значимую погрешность в задаче восстановления содержания CO₂ создаёт неопределённость самих априорных данных, в первую очередь вертикального профиля температуры. Эта неопределённость может складываться из:

- Погрешности самой модели или измерений профиля температуры в географической точке
- Точностей пространственного и временного разрешений сетки априорной температуры воздуха
- Вариаций температуры воздуха в пределах отпечатка поля зрения ИКФС-2 (область Ø30 км)
- Вариаций температуры поверхности в пределах отпечатка поля зрения ИКФС-2 из-за особенностей рельефа
- Погрешность базы данных излучательной способности поверхности в географической точке

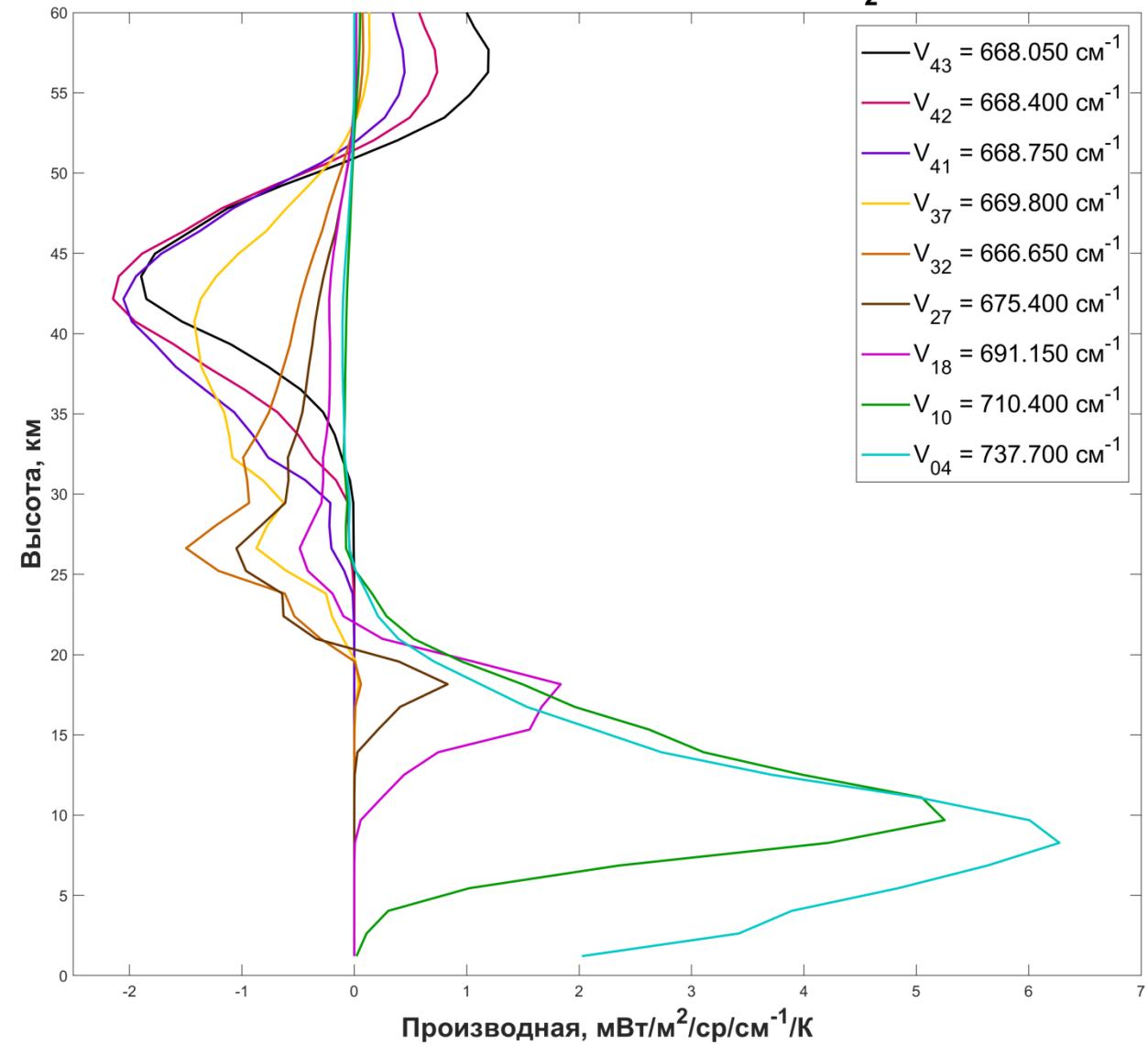
В совокупности, неопределённость априорной температуры воздуха и поверхности может достигать несколько К в тропосфере, что приводит к неопределённости в десятки ppm для общего содержания CO₂.

Весовые функции температуры атмосферы и относительного содержания CO_2 ($-\log_{10} N_{\text{CO}_2}$)

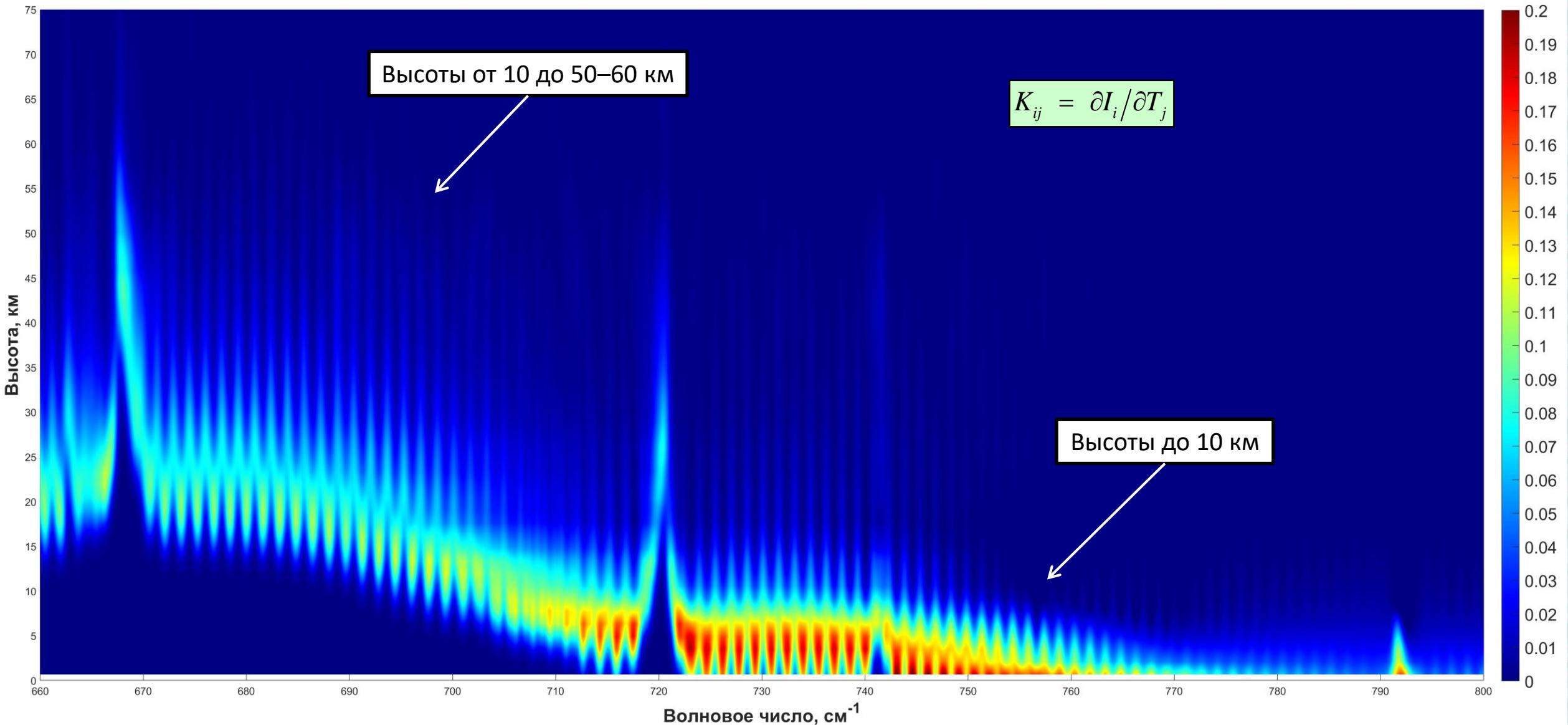
Весовые функции температур



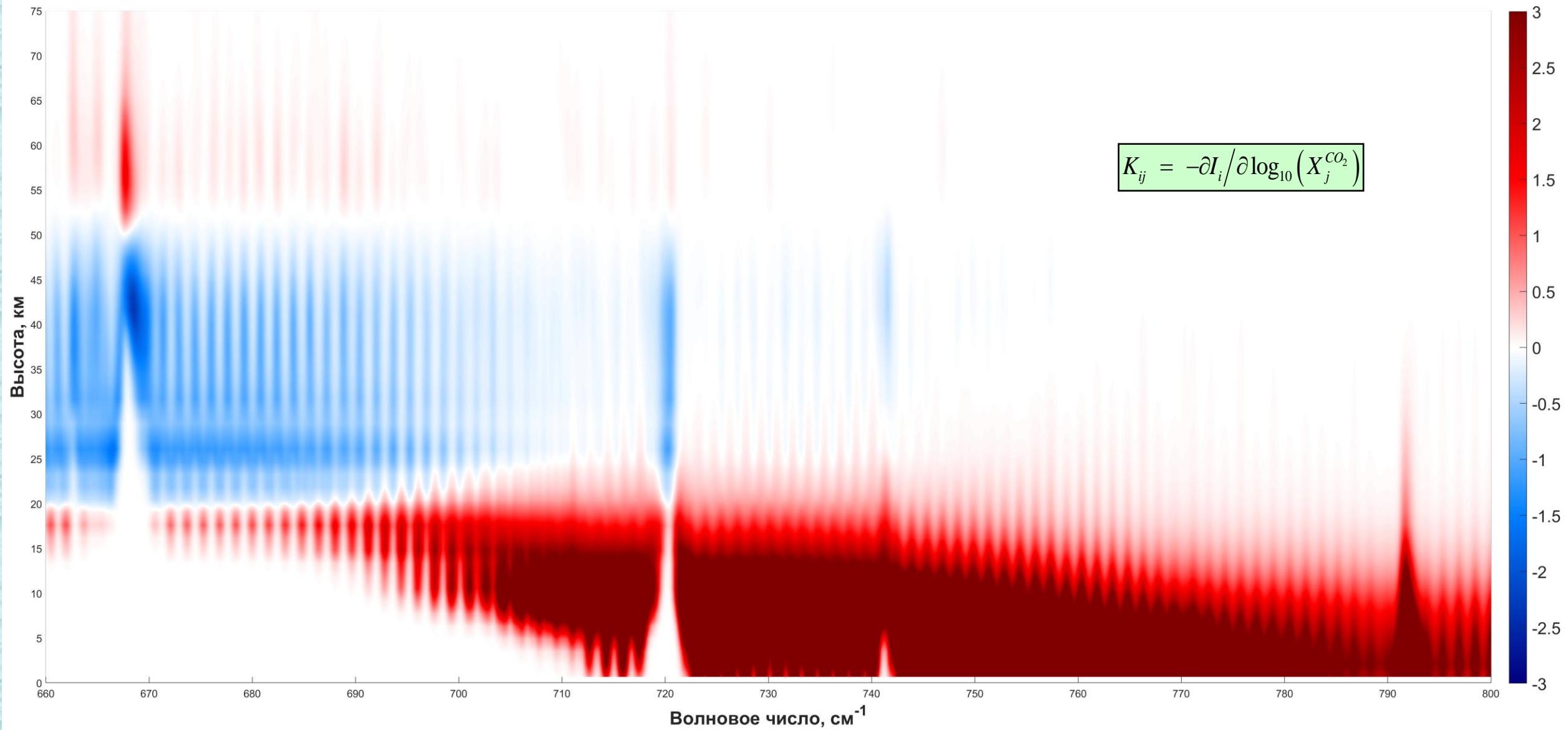
Весовые функции содержания CO_2



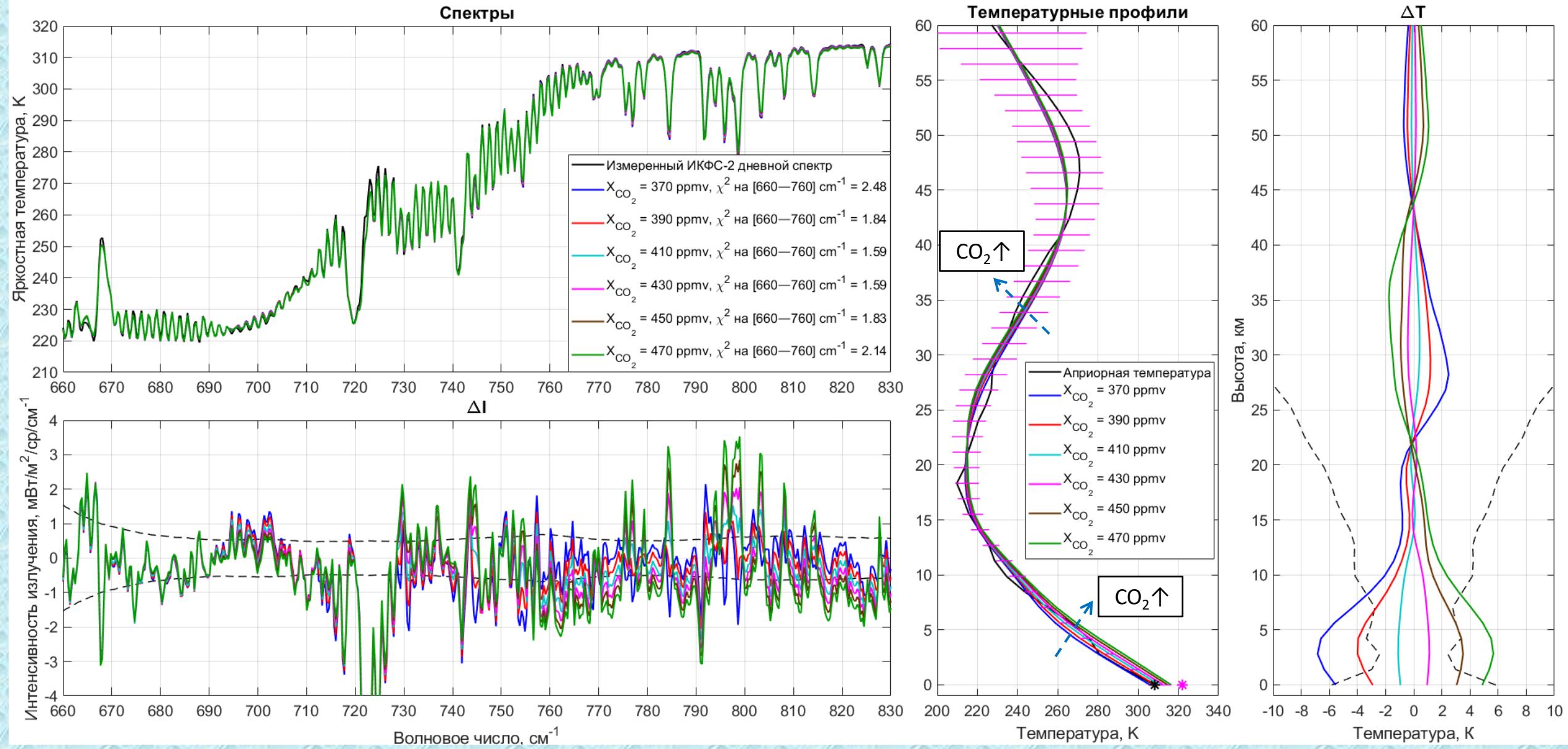
Возможности восстановления температурного профиля (развёртка весовых функций)



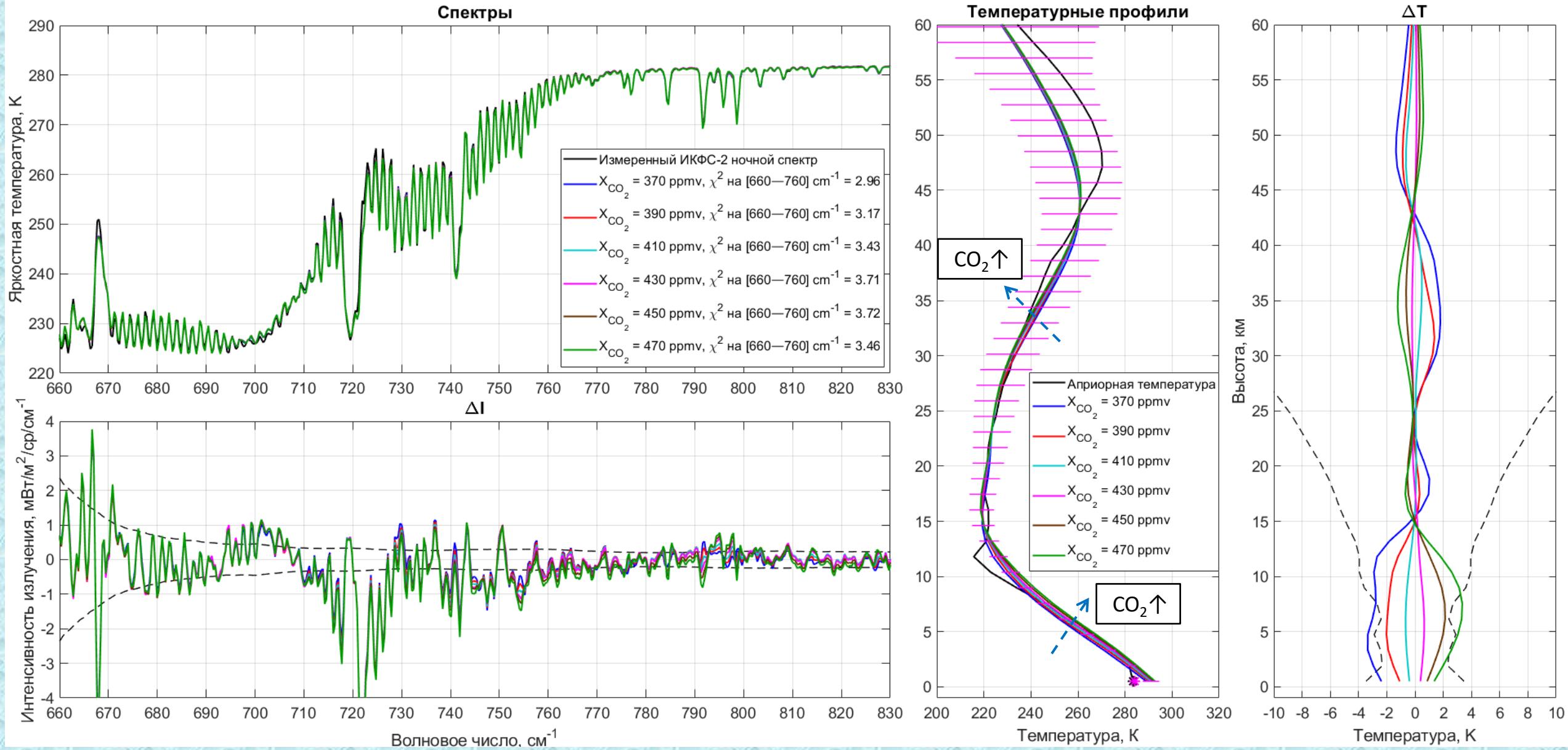
Возможности восстановления содержания CO₂ (развёртка весовых функций)

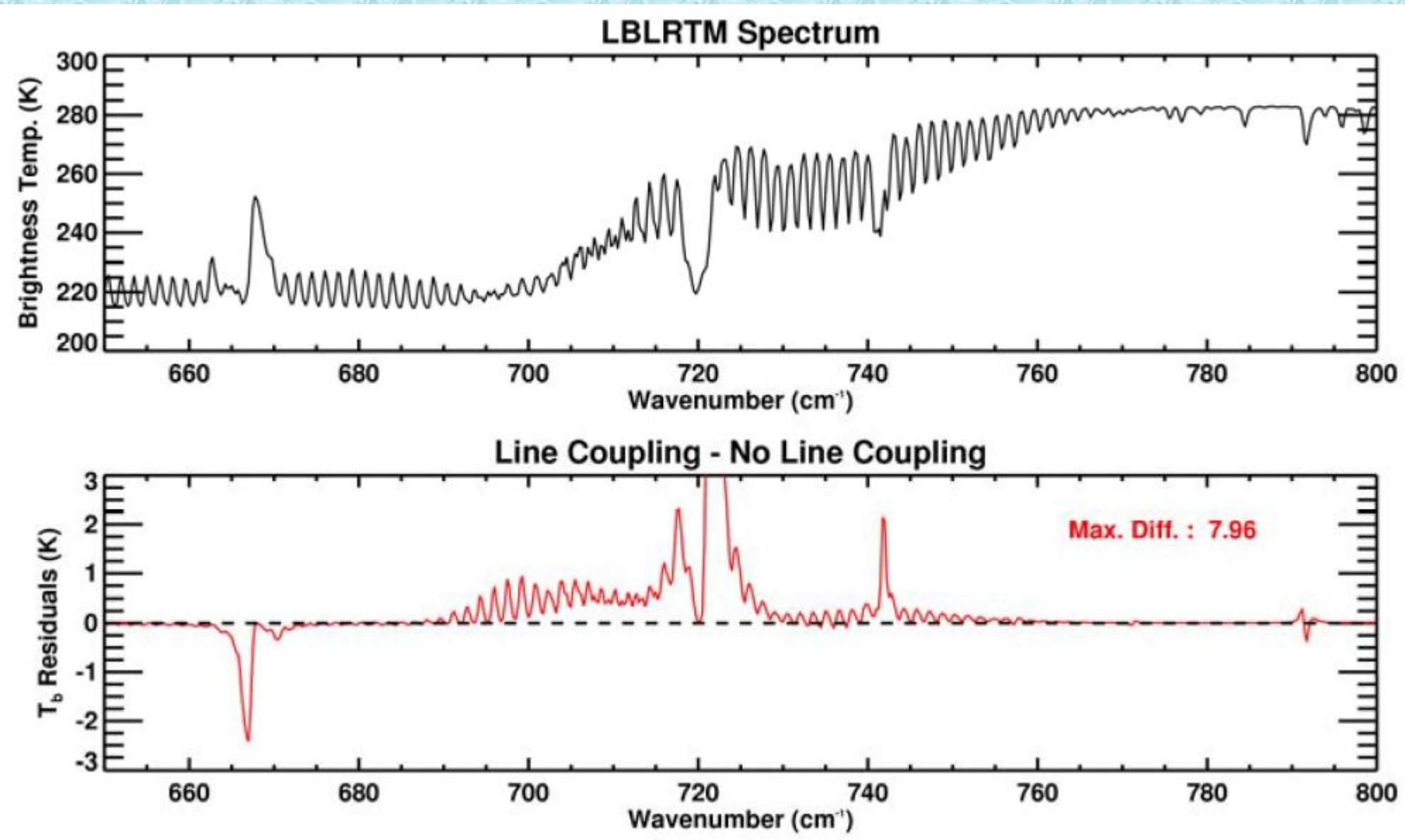


Пример восстановленной дневной температуры для широкого диапазона априорных содержаний CO₂



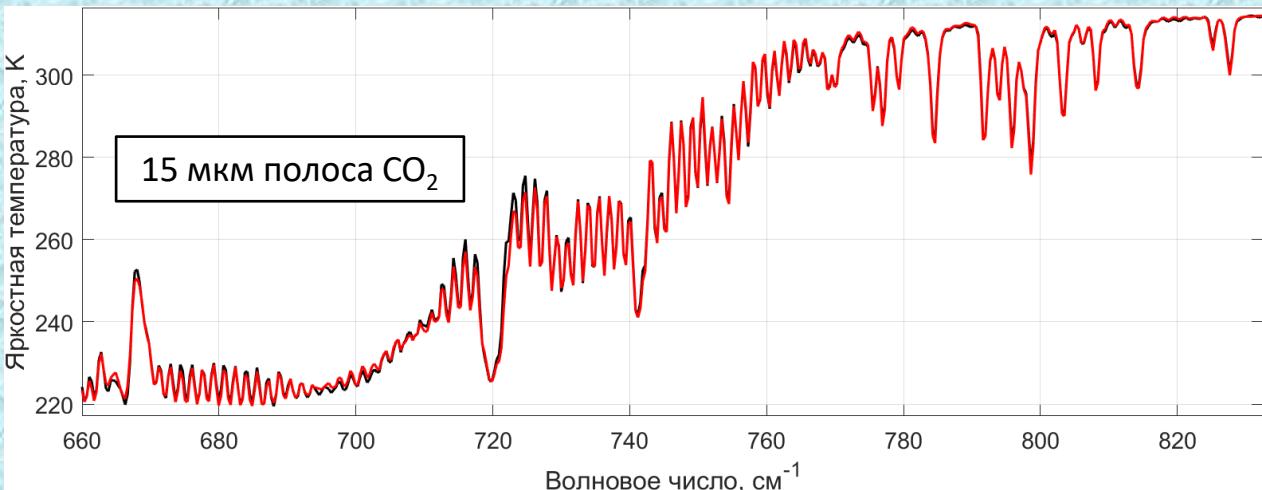
Пример восстановленной ночной температуры для широкого диапазона априорных содержаний CO₂



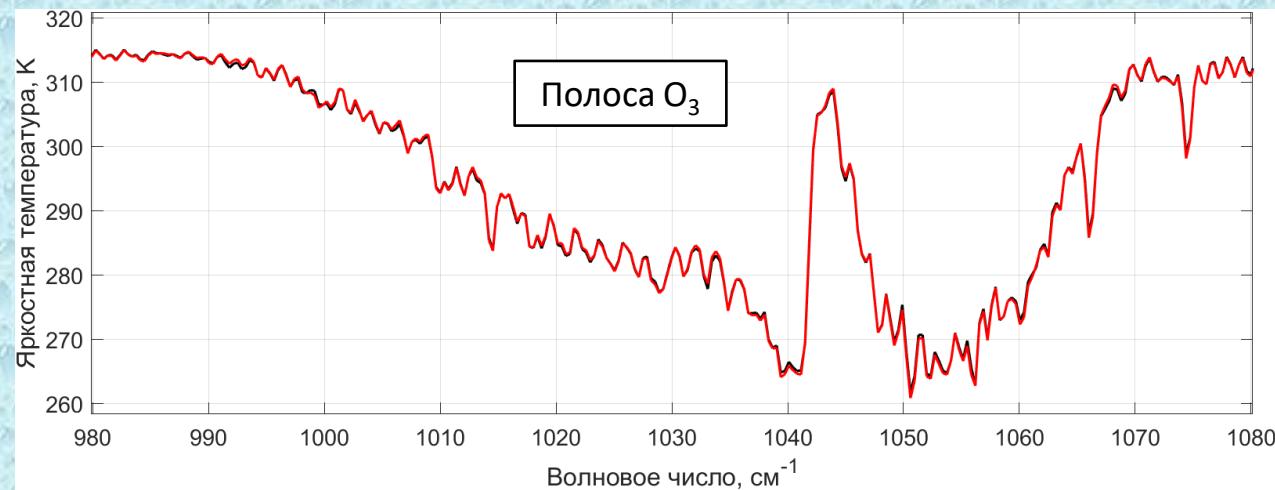


Сравнение измеренного спектра ИКФС-2 и модельного спектра в областях поглощения парниковых газов

Нужно учесть интерференцию линий в полосе CO₂:



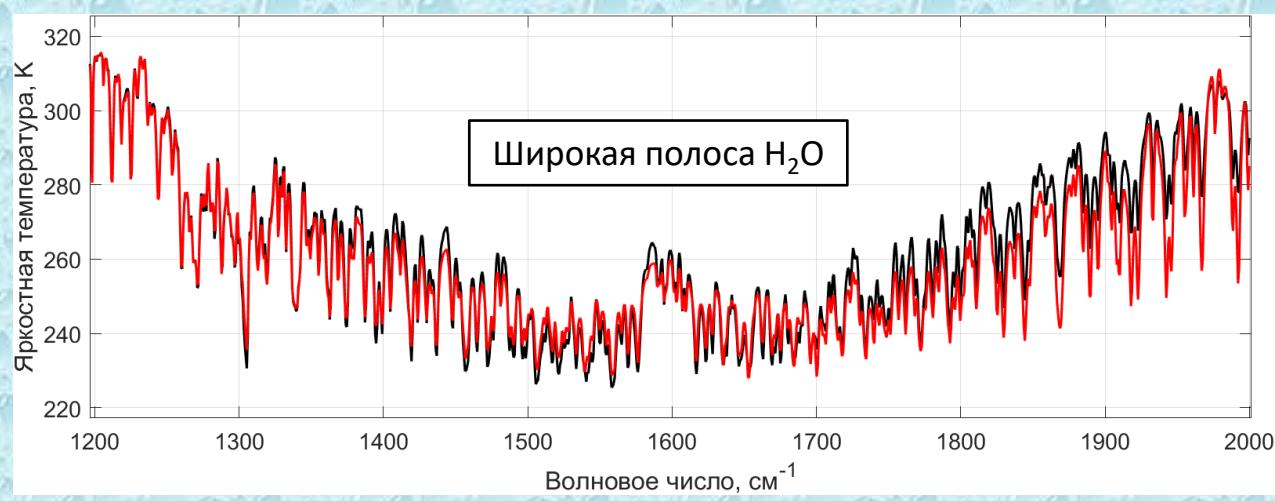
O₃ подгоняется хорошо, если известен его априорный профиль:



Для корректного восстановления CH₄ нужно точно определить H₂O:



Расчёт линий и континуума H₂O необходимо уточнить:



- Адаптирован алгоритм обработки данных ACS TIRVIM (температура, аэрозоли и H_2O в атмосфере Марса при наблюдении в nadir с борта ExoMars TGO) к данным ИКФС-2 (температура и малые газовые составляющие в земной атмосфере при наблюдении в nadir с борта «Метеор-М» №2) с учётом особенностей атмосфер обеих планет и приборных характеристик
- Возможность восстановления температуры поверхности и профиля температуры воздуха до 60 км по данным ИКФС-2 в ясную погоду по зондированию в 15-мкм полосе поглощения CO_2
- Возможность восстановления других малых газовых составляющих (O_3 , CH_4 , H_2O) с полосами поглощения в измеряемом диапазоне путём масштабированием априорного профиля содержания, однако для возможности восстановления профилей концентрации требуется дальнейшая работа
- Требуется более детальное исследование существующих моделей и измерений излучательной способности поверхности для лучшей сходимости спектров на разных интервалах (особенно коротковолновое крыло полосы CO_2 и полосы H_2O)
- Формальная погрешность восстановления общего содержания CO_2 по полосе 15 мкм в nadir составляет около 2 ppmv, а разброс значений за счёт неопределённости априорных данных – десятки ppmv, поэтому для точного измерения CO_2 требуются солнечные каналы наблюдения и другие полосы диоксида углерода

Что можно сделать ещё в дальнейшем:

- Полноценная проверка надёжности алгоритма восстановления на семействе измерений в широком наборе климатических и географических условий, валидация алгоритма с LBLRTM и RTTOV
- Анализ возможности восстановления параметров при наличии облачности
- Дополнительная оценка влияния пространственной неопределённости априорных данных на точность результата
- Анализ возможности восстановления общего содержания прочих парниковых газов (например, CH_4)

1. П.В. Власов, Н.И. Игнатьев, О.И. Кораблев, А.А. Фёдорова, А.В. Григорьев, Д.В. Пацаев, И.А. Маслов, А.В. Шакун, С. Герле, Д. Грасси, Л.В. Засова. Термическое зондирование атмосферы Марса при помощи фурье-спектрометра ACS TIRVIM на борту КА ExoMars TGO: метод решения обратной задачи // Астрономический вестник. 2023. Т. 57. № 6. С. 503–520. <https://doi.org/10.31857/S0320930X23060087>
2. Y.M. Timofeyev, A.B. Uspensky, F.S. Zavelevich, A.V. Polyakov, Y.A. Virolainen, A.N. Rublev, A.V. Kukharsky, J.V. Kiseleva, D.A. Kozlov, I.A. Kozlov, A.G. Nikulin, V.P. Pyatkin, E.V. Rusin. Hyperspectral infrared atmospheric sounder IKFS-2 on “Meteor-M” No. 2 – Four years in orbit. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2019. V. 238. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.106579>
3. НИЦ «Планета». Калиброванные данные ИКФС-2: <http://planet.rssi.ru/calval/public-ikfs>
4. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. 2023. ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>
5. Loveless, M.; Borbas, E.E.;Knuteson, R.; Cawse-Nicholson, K.;Hulley, G.; Hook, S. Climatology of the Combined ASTER MODIS Emissivity over Land (CAMEL) Version 2. Remote Sensing, № 13, 111. 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13010111>
6. Rodgers C.D. Inverse methods for atmospheric sounding: Theory and practice // World Scientific. 2000. p. 256. <https://doi.org/10.1142/3171>
7. Clough, T. Status of the LBLRTM Forward Model: IASI Validations. September 15-17, 2008: 4th Annual Advanced High Spectral Resolution Infrared Observations Workshop

Спасибо за внимание!