

# Общий обзор почти полного марсианского года по данным наблюдений спектрометра ACS TIRVIM в надир на борту КА ExoMars TGO

## Авторы:

Павел Власов<sup>1</sup> ([pavel.vlasov@phystech.edu](mailto:pavel.vlasov@phystech.edu)), Николай Игнатъев<sup>1</sup>, Олег Кораблёв<sup>1</sup>, Алексей Григорьев<sup>4</sup>, Алексей Шакун<sup>1</sup>, Дмитрий Пацаев<sup>1</sup>, Игорь Маслов<sup>1</sup>, Людмила Засова<sup>1</sup>, Михаил Лугинин<sup>1</sup>, Александр Трохимовский<sup>1</sup>

- 1) Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
- 2) Research School of Astronomy and Astrophysics, Australian National University, Канберра, Австралия

Обработка и анализ данных в ИКИ РАН финансируются грантом РФФ 20-42-09035.



Australian  
National  
University



XX международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»  
Институт космических исследований РАН, 14–18 ноября 2022 г.

# Основные научные задачи фурье-спектрометра ACS TIRVIM на борту КА ExoMars TGO

## Основные цели исследования:

- Исследование суточной динамики и сезонной изменчивости температуры атмосферы до 60 км и поверхности Марса с плотным покрытием за почти полный марсианский год
- Исследование сезонной изменчивости содержания аэрозолей (частиц пыли и водяного льда) за почти полный марсианский год
- Детальное изучение нерегулярного события – глобальной пылевой бури MY 34, которая наблюдалась TIRVIM в числе прочих приборов и экспериментов

## Основные научные задачи ACS TIRVIM в режиме наблюдений в надир:

- Мониторинг динамики температурных полей
- Мониторинг атмосферной пыли и облаков водяного льда на Марсе

## Основные научные задачи ACS TIRVIM в режиме солнечных затмений:

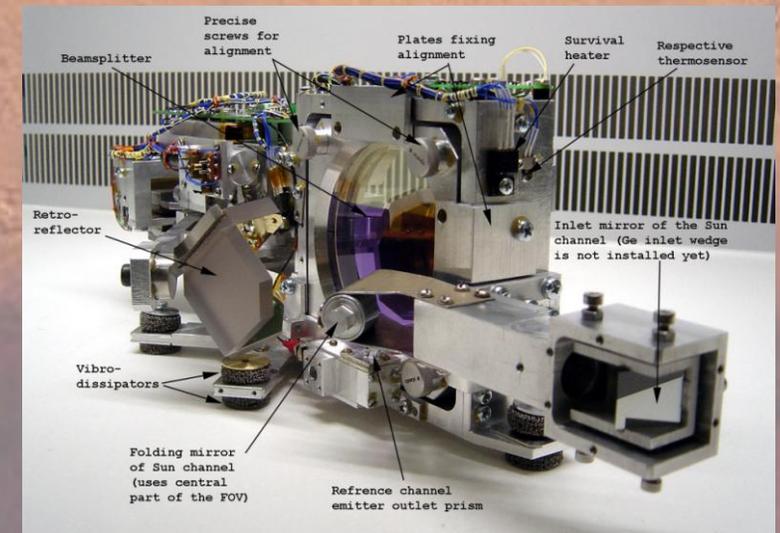
- Детектирование малых газовых составляющих

## Характеристики ACS TIRVIM в режиме наблюдения в надир:

Спектральный диапазон: 5–16 мкм ( $600\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ )

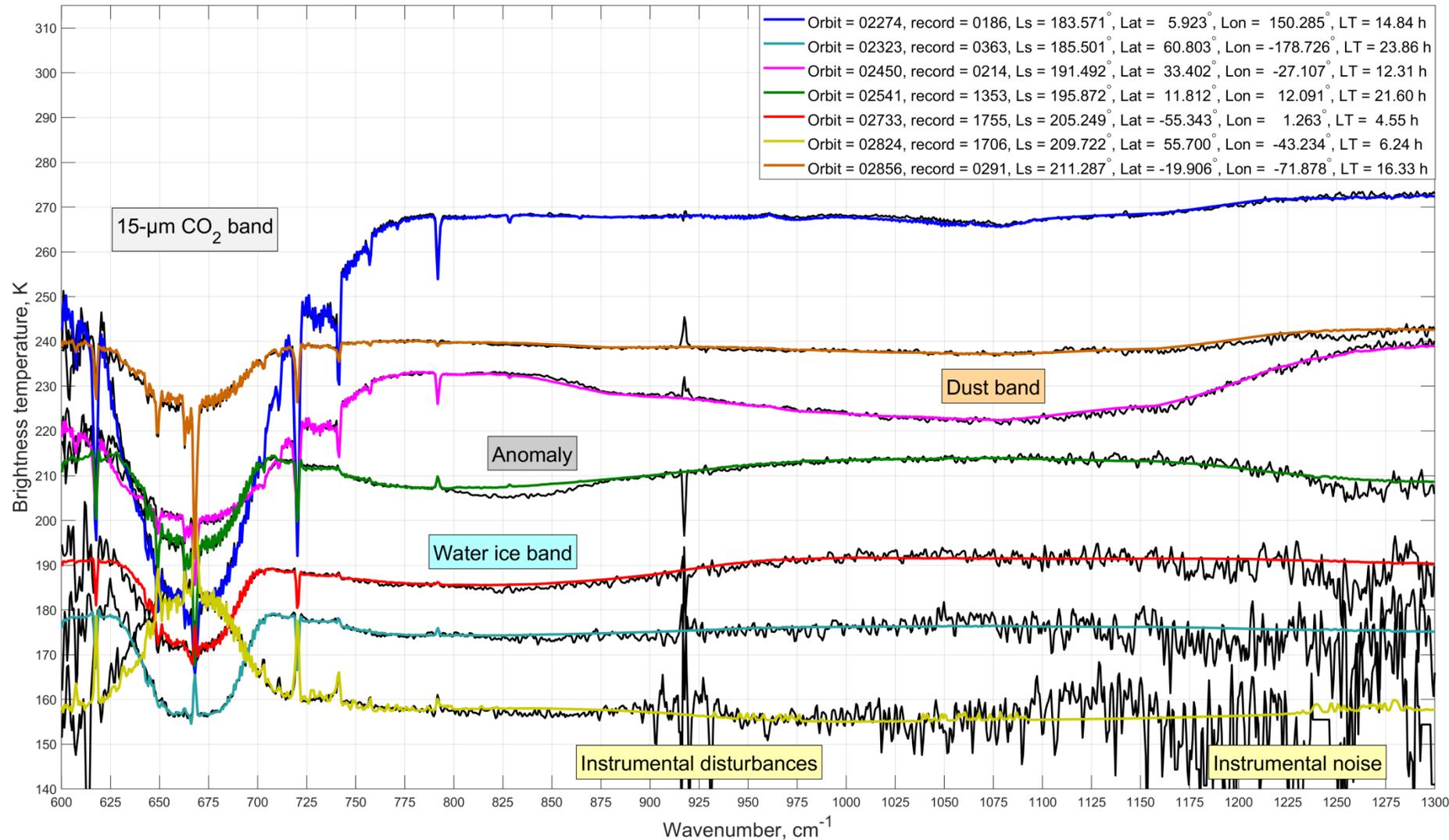
Спектральное разрешение: FWHM =  $1.174\text{ см}^{-1}$

FOV:  $\varnothing 2.5^\circ$  (=  $\varnothing 17\text{ км}$ )

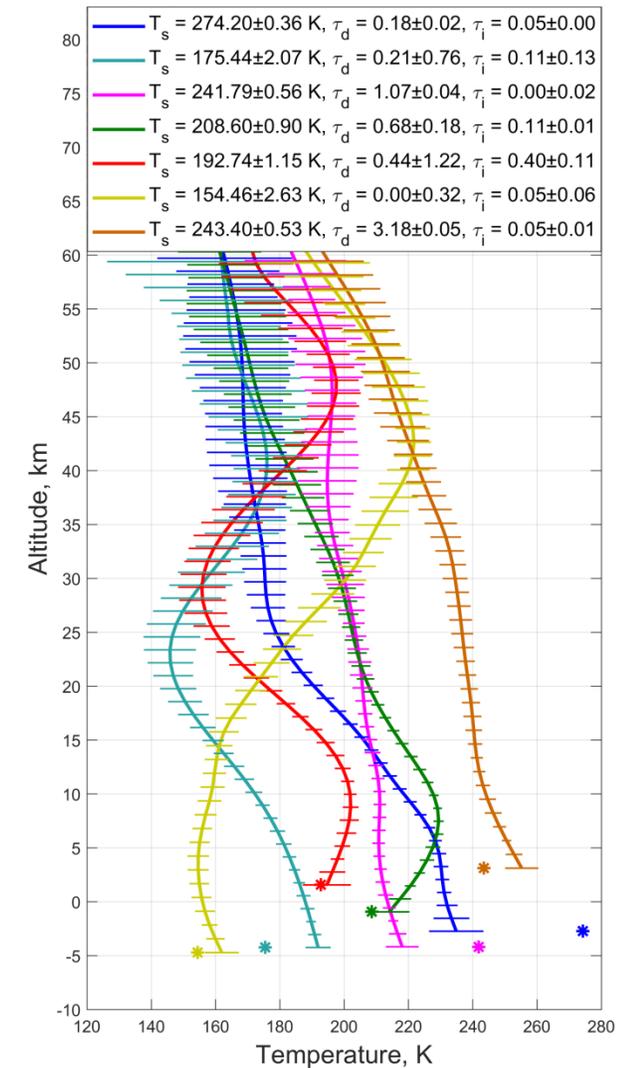


# Примеры измеренных TIRVIM спектров в надир и восстановленных вертикальных температурных профилей

(a) Measured and model spectra



(b) Retrieved temperatures



# Постановка задачи восстановления атмосферных параметров из зондирования в тепловом ИК диапазоне

Задача теплового зондирования включает в себя самосогласованное восстановление вертикального температурного профиля вместе с общим содержанием аэрозолей по измеренному ACS TIRVIM спектру уходящего излучения и представляет собой обратную задачу по отношению к прямой задаче переноса излучения в атмосфере Марса в тепловом ИК.

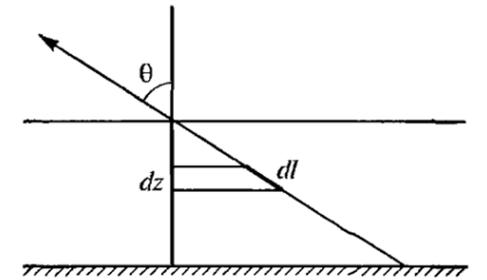
Прямая задача:  $F(T_{surf}, T(z), \tau_{dust}, \tau_{ice}) = I_v(z)$

Обратная задача:  $\{T_{surf}, T(z), \tau_{dust}, \tau_{ice}\} = F^{-1}(I_{meas})$

Решение уравнения переноса излучения без учёта многократного рассеяния на аэрозолях для приближения плоскопараллельной атмосферы в тепловом ИК диапазоне:

$$I_v = \varepsilon_v \cdot B_v(T_{surf}) \cdot t_v(0, \mu) + \int_{z_{surf}} B_v(T(z)) \cdot t_v(z, \mu) \frac{d\tau_v(z)}{\mu}, \quad z = \ln p, \quad t_v(z, \mu) = \exp(-\tau_v(z, \mu)), \quad \mu = \cos \theta$$

где  $B$  – функция Планка,  $\varepsilon$  – излучательная способность поверхности,  $T_{surf}$  – её температура



Для решения обратной задачи атмосфера разбивается на  $M$  слоёв, в которых будет восстанавливаться температурный профиль, а в 15-мкм полосе поглощения  $\text{CO}_2$  выбираются  $M$  спектральных каналов в диапазоне  $665 - 780 \text{ см}^{-1}$ . Метод оптимальной оценки (Rodgers, 1976) даёт итерационное решение обратной задачи в виде:

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

$T_0$  – априорная температура,  $S$  – априорная ковариационная матрица,  $E$  – матрица погрешности измерения прибора

$$K_{ij} = dI_i / dT_j, \quad i, j = \overline{1, M}$$

$K$  – матрица функциональных производных интенсивности в  $i$ -ом канале по температуре в  $j$ -ом слое

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

Апостериорная корреляционная матрица  $C$  определяет погрешность восстановления температуры в  $j$ -ом слое по высоте

# Восстановление содержания аэрозолей и весовые функции для восстановления профиля температуры

Для тройки параметров (температура поверхности, оптическая толщина пыли на  $1075 \text{ cm}^{-1}$  и оптическая толщина водяного льда на  $825 \text{ cm}^{-1}$ ) итерационное решение обратной задачи даётся аналогично:

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

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

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

где  $K$  – векторы функциональных производных,  $\sigma$  – априорная ошибка,  $C$  – апостериорная ошибка :

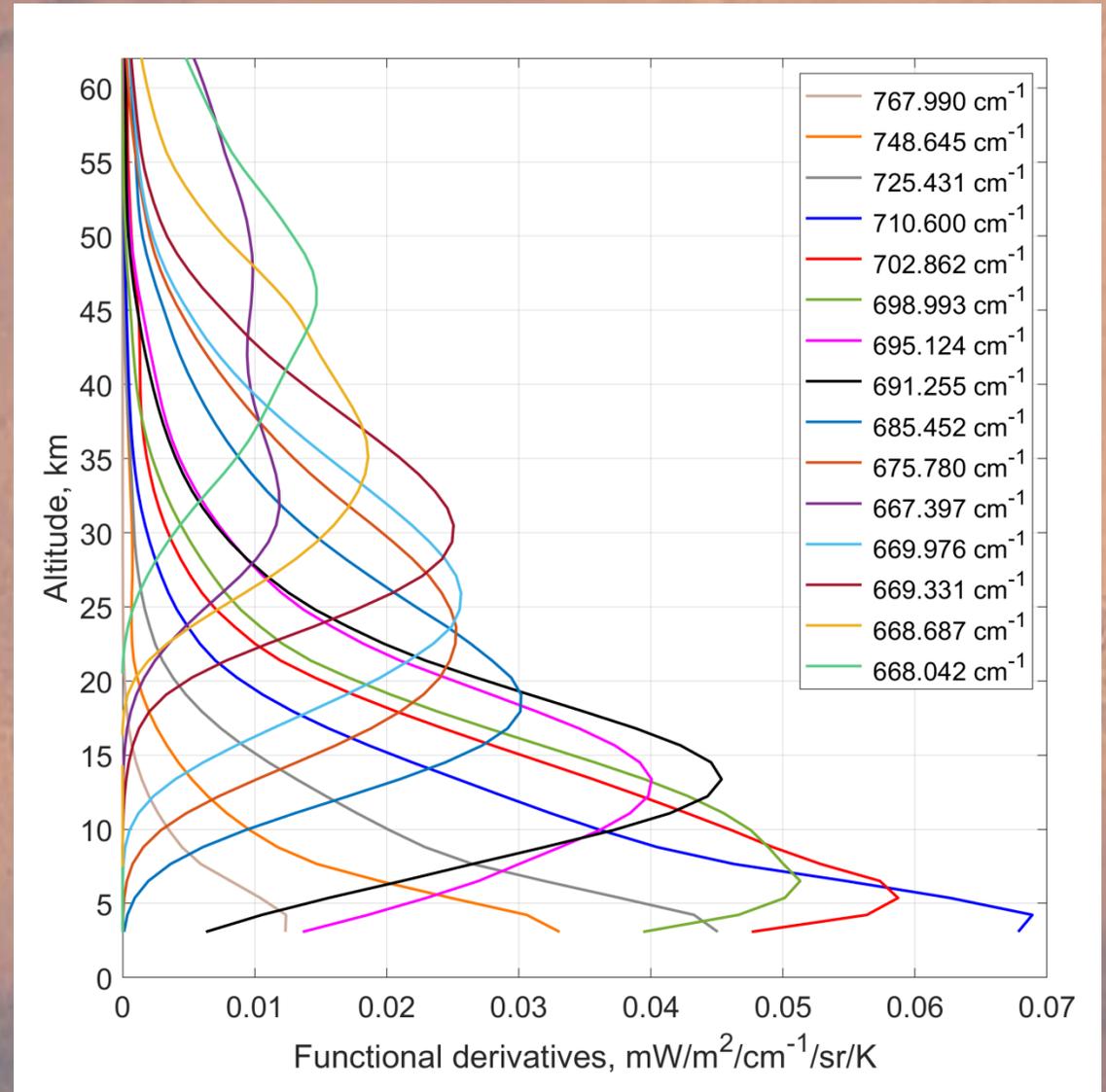
$$\Delta I = I_{meas} - I^{(n)}$$

$$Y = (\sigma_{T_{surf}} \cdot K_{T_{surf}} \times K_{T_{surf}}^T + \sigma_{dust} \cdot K_{dust} \times K_{dust}^T + \sigma_{ice} \cdot K_{ice} \times K_{ice}^T + E)^{-1}$$

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

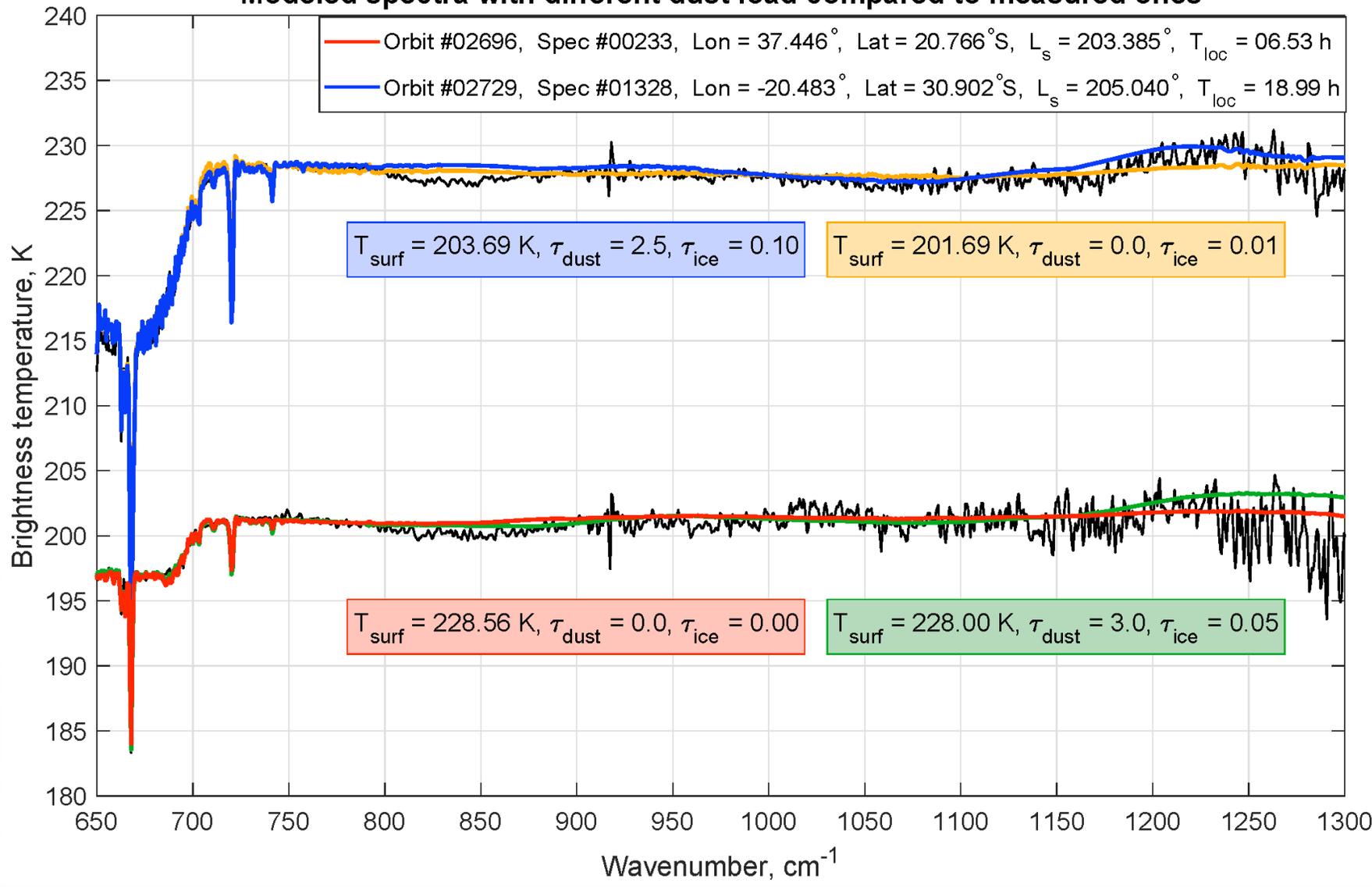
$$C_{dust} = \sigma_{dust} - \sigma_{dust} \cdot K_{dust}^T \times Y \times K_{dust} \cdot \sigma_{dust}$$

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

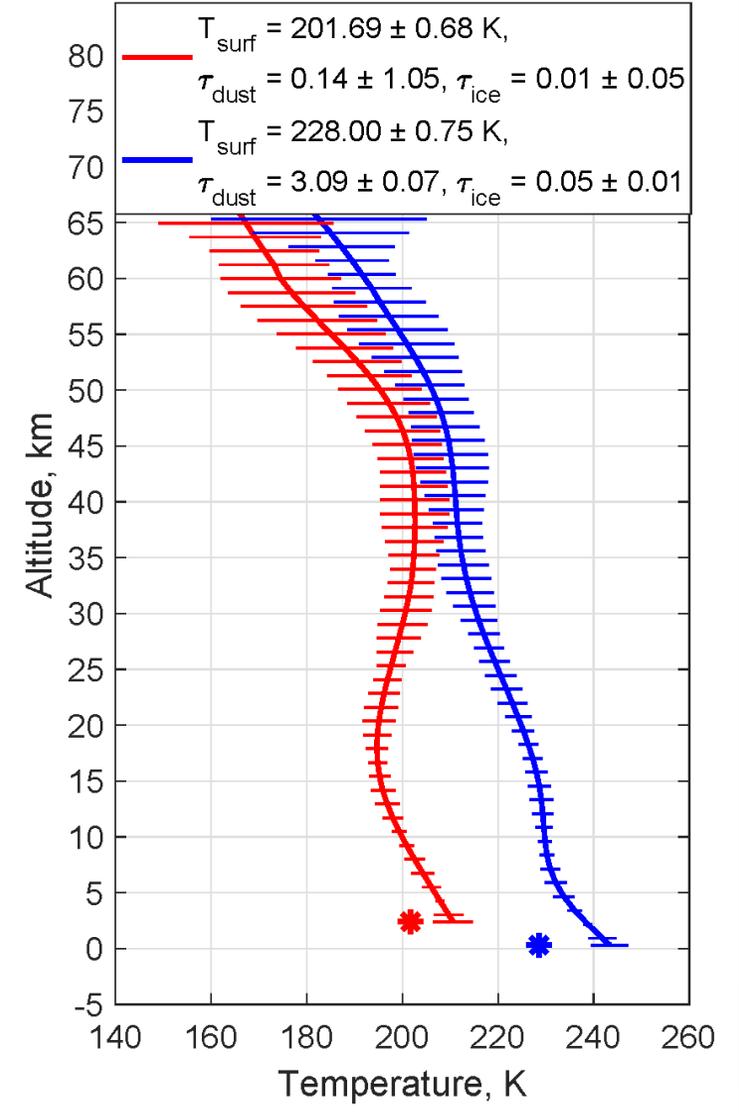


# Случаи вырожденности восстановления содержания пыли

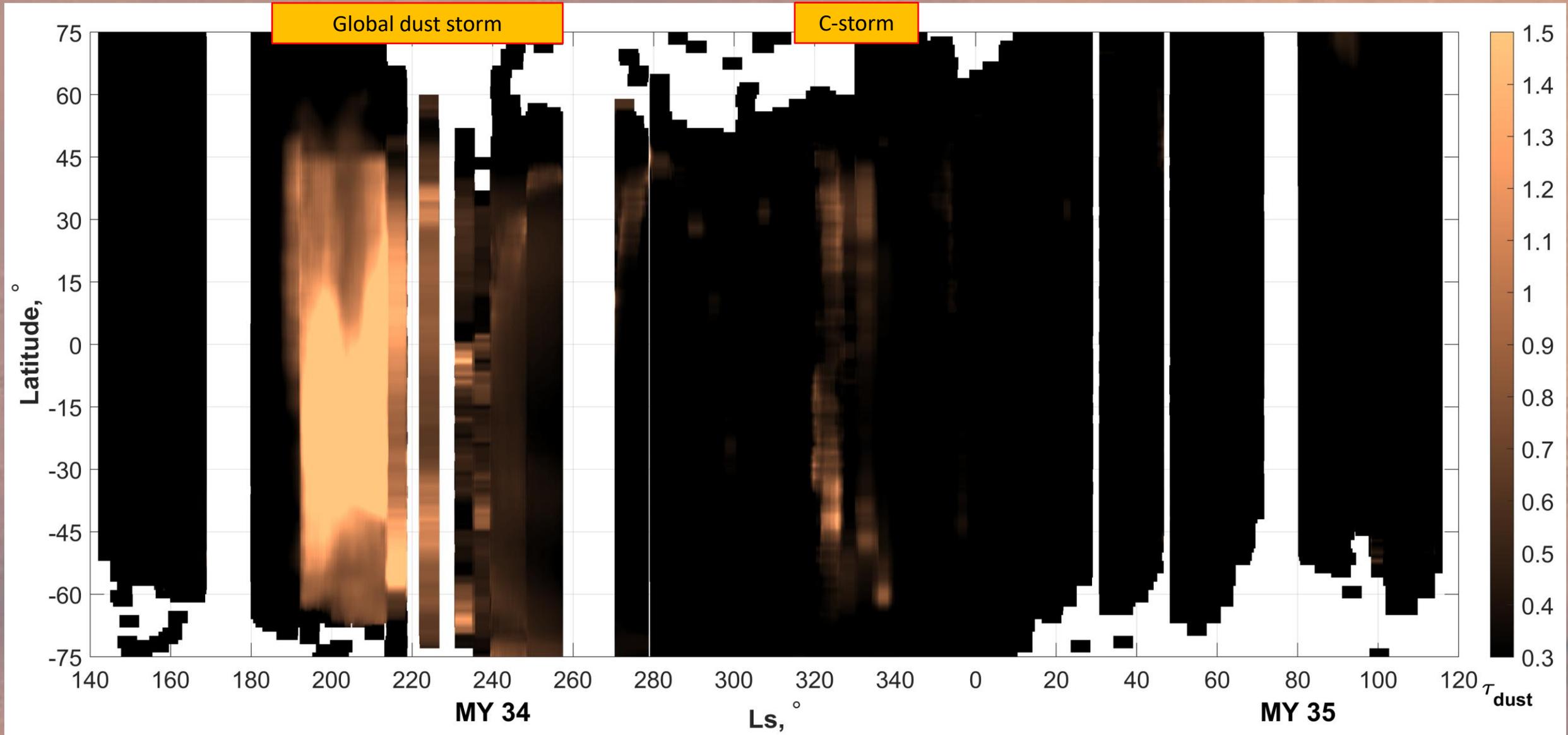
Modeled spectra with different dust load compared to measured ones



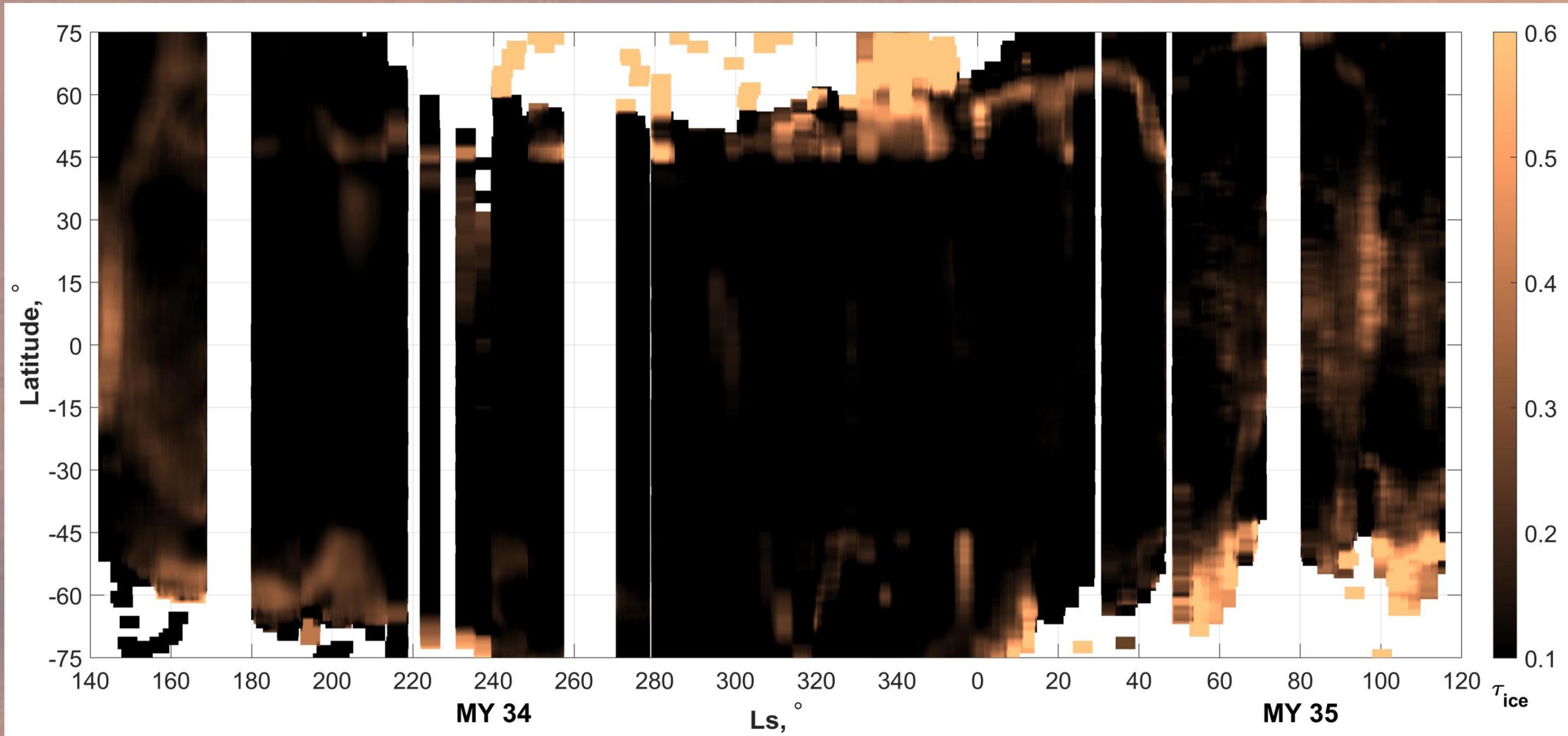
Retrieved temperatures and aerosols



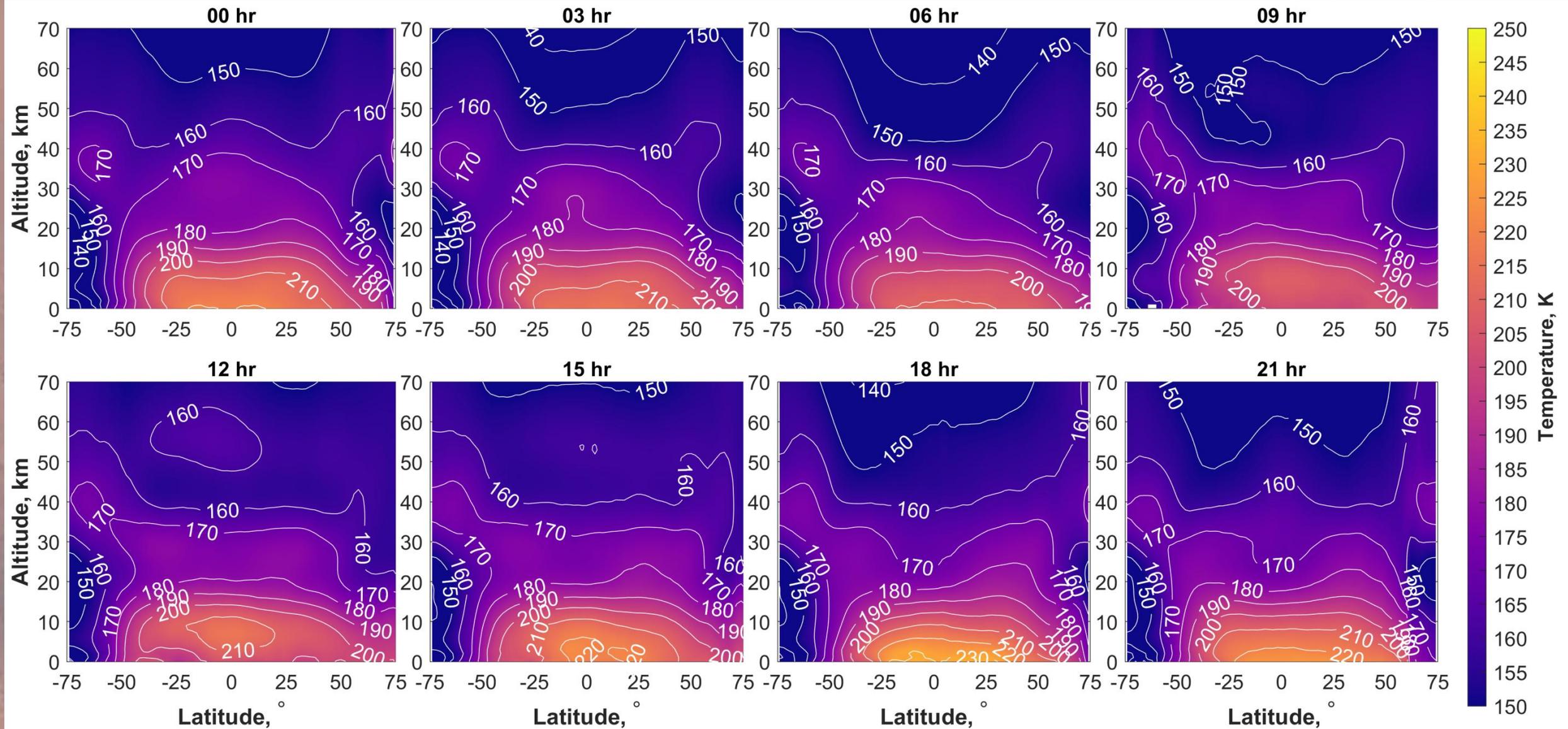
Сезонное содержание пыли в виде оптической толщины экстинкции на  $1075 \text{ cm}^{-1}$



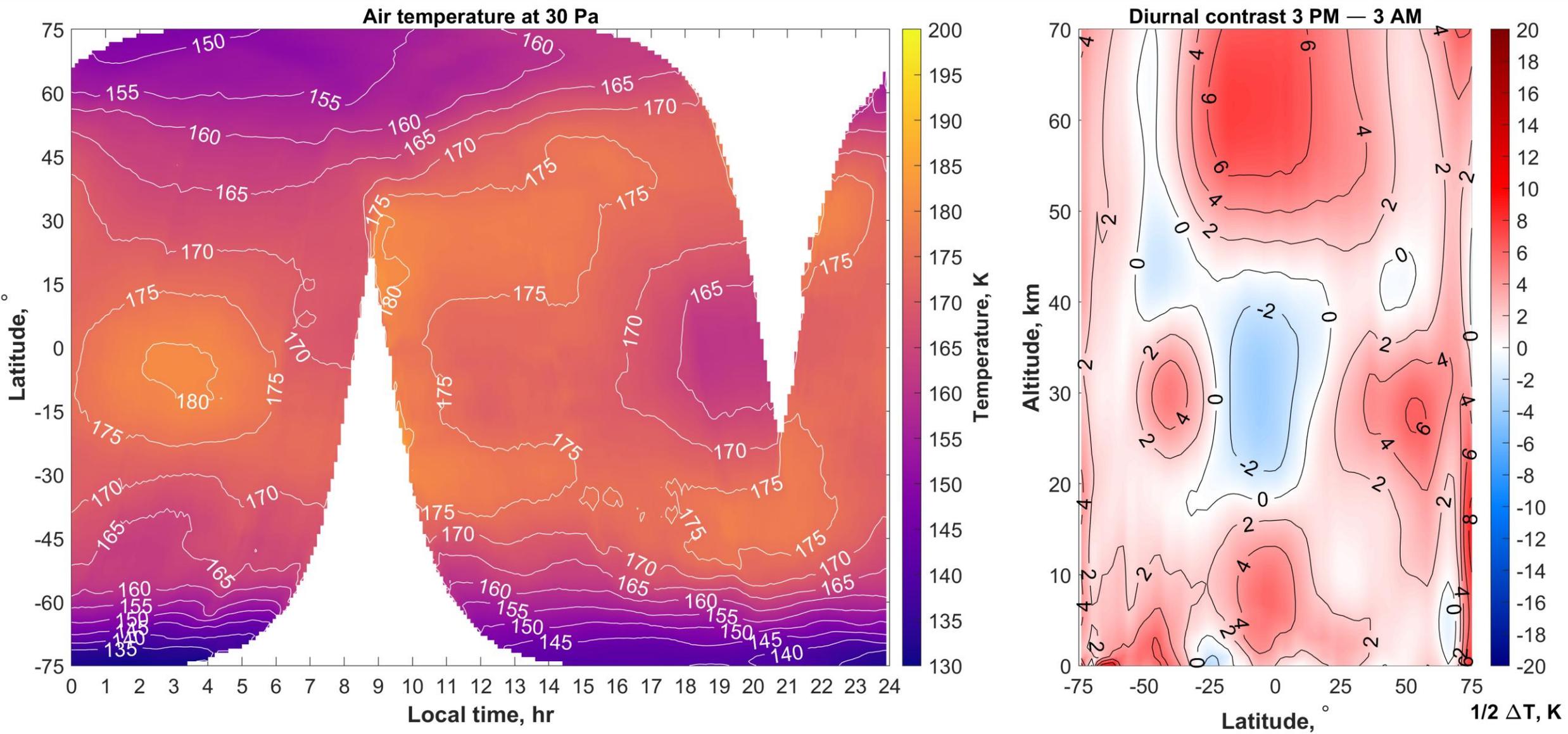
Сезонное содержание водяного льда в виде оптической толщины экстинкции на  $825\text{ см}^{-1}$



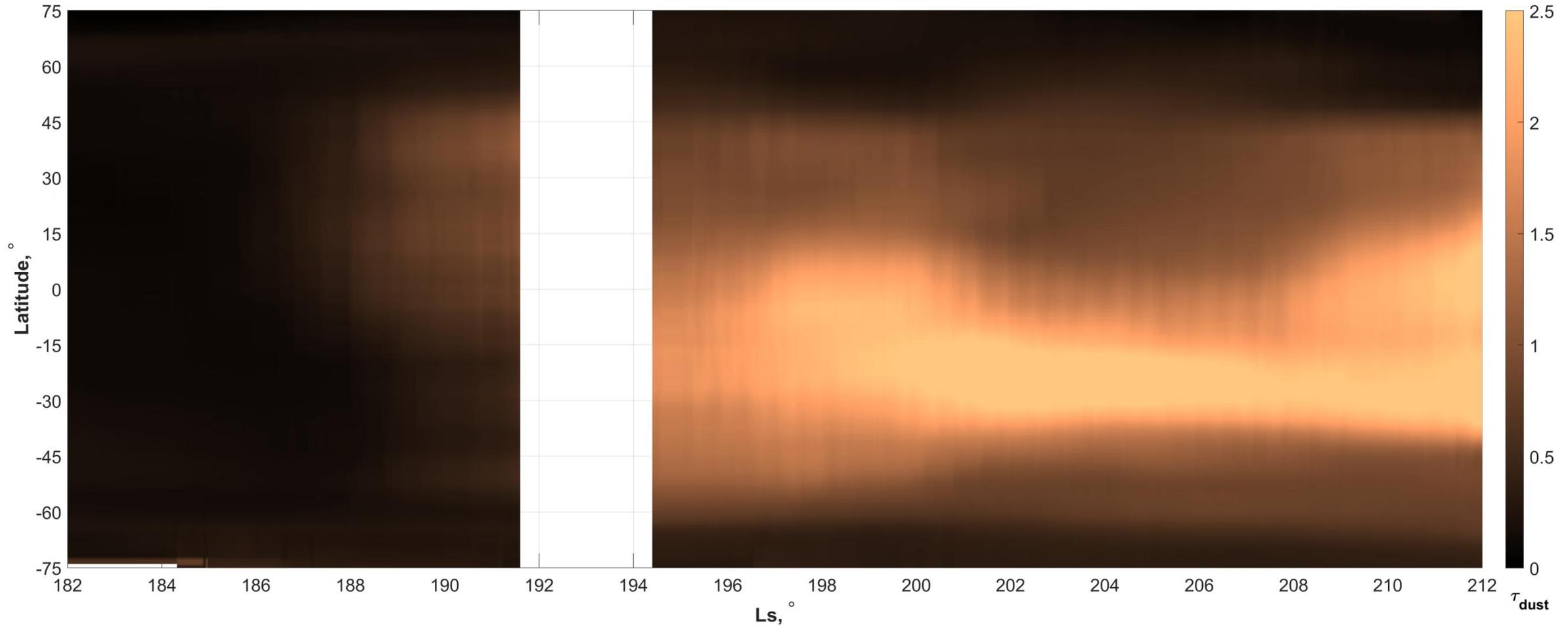
Зонально усреднённая тепловая структура в течение суток в северную осень,  $L_s = 142^\circ\text{--}185^\circ$ , MY 34



Суточный цикл температуры атмосферы на 30 Па ( $\approx 30$  км) и суточный полуконтраст,  $L_s = 142^\circ\text{--}167^\circ$ , MY 34

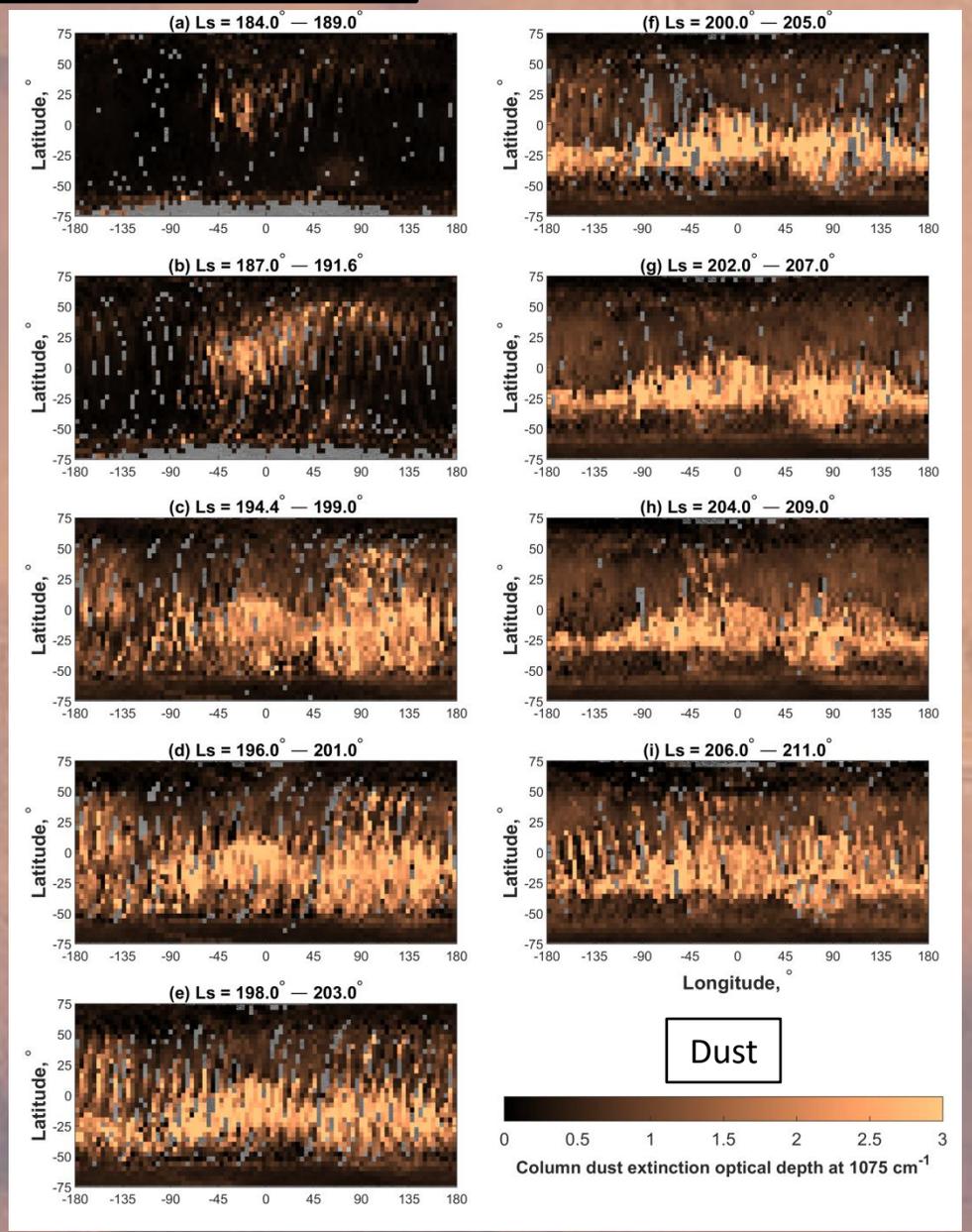
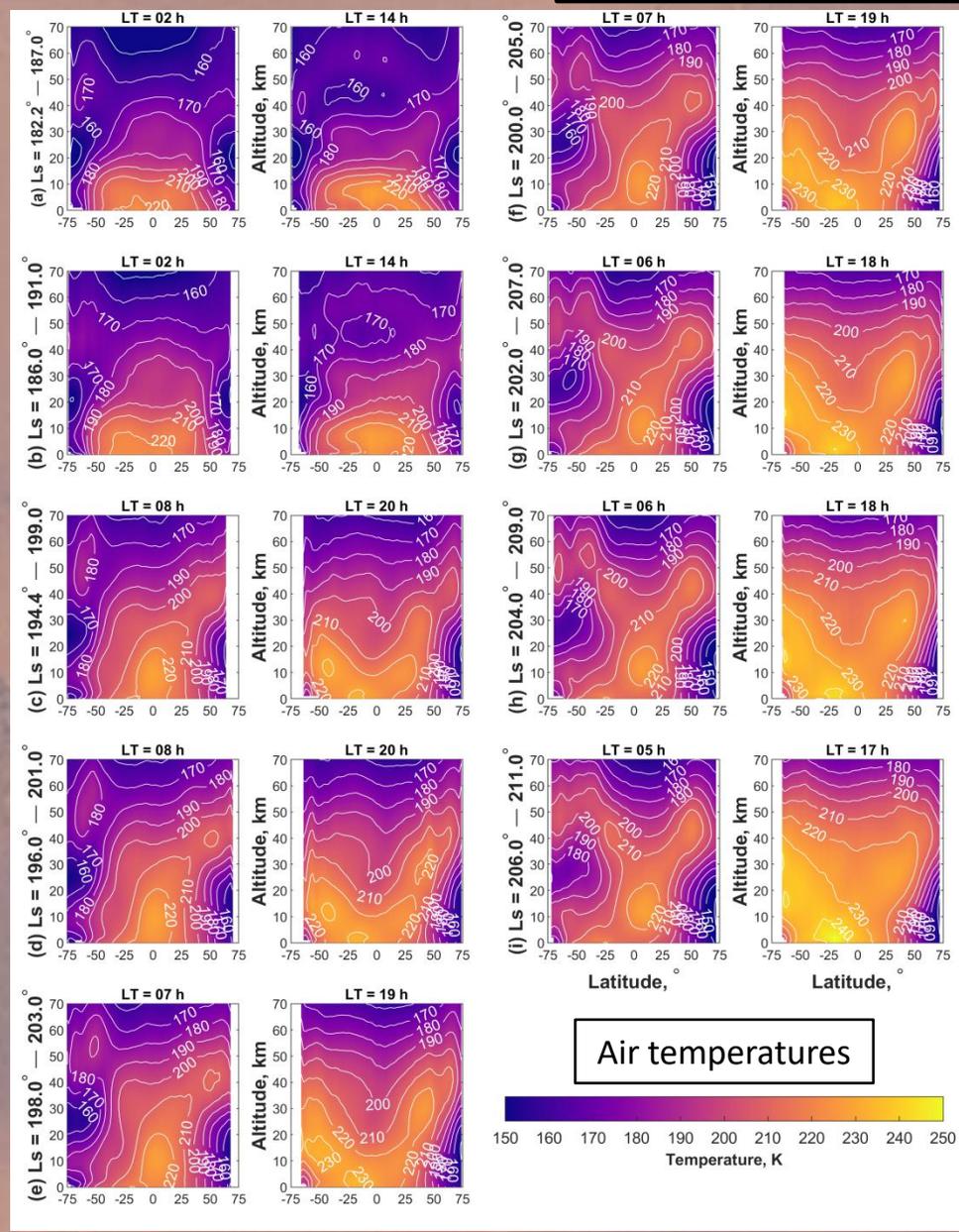


# Зонально усреднённая оптическая толщина экстинкции пыли на $1075\text{ см}^{-1}$ во время MY 34 GDS



Подробности о глобальной пылевой буре (GDS) MY 34 по наблюдениям TIRVIM в надир можно посмотреть в нашей статье: Vlasov, P., Ignatiev, N., Guerlet, S., Grassi, D., Korablev, O., Grigoriev, A., et al. (2022). Martian atmospheric thermal structure and dust distribution during the MY 34 global dust storm from ACS TIRVIM nadir observations. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127, e2022JE007272. <https://doi.org/10.1029/2022JE007272>

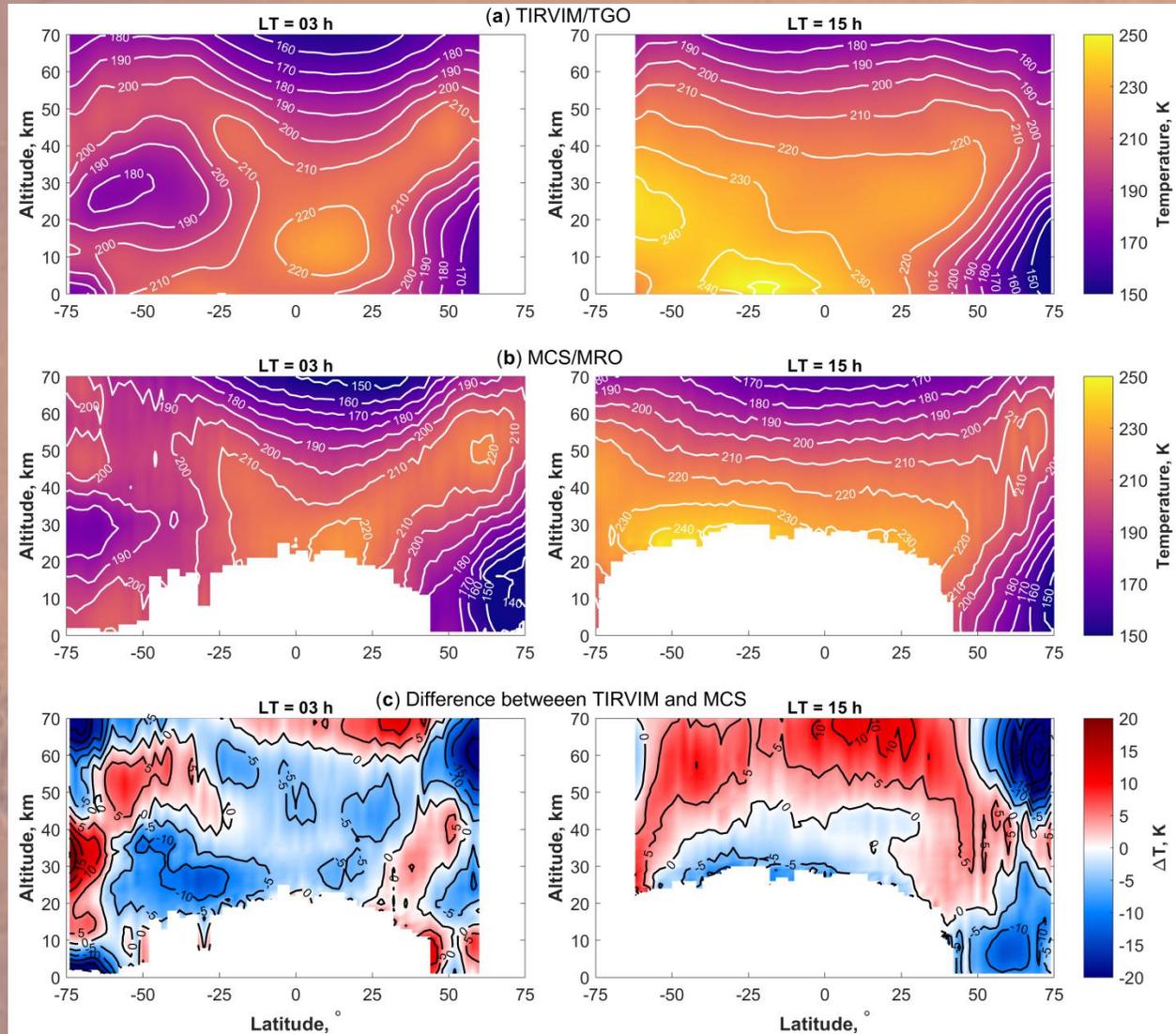
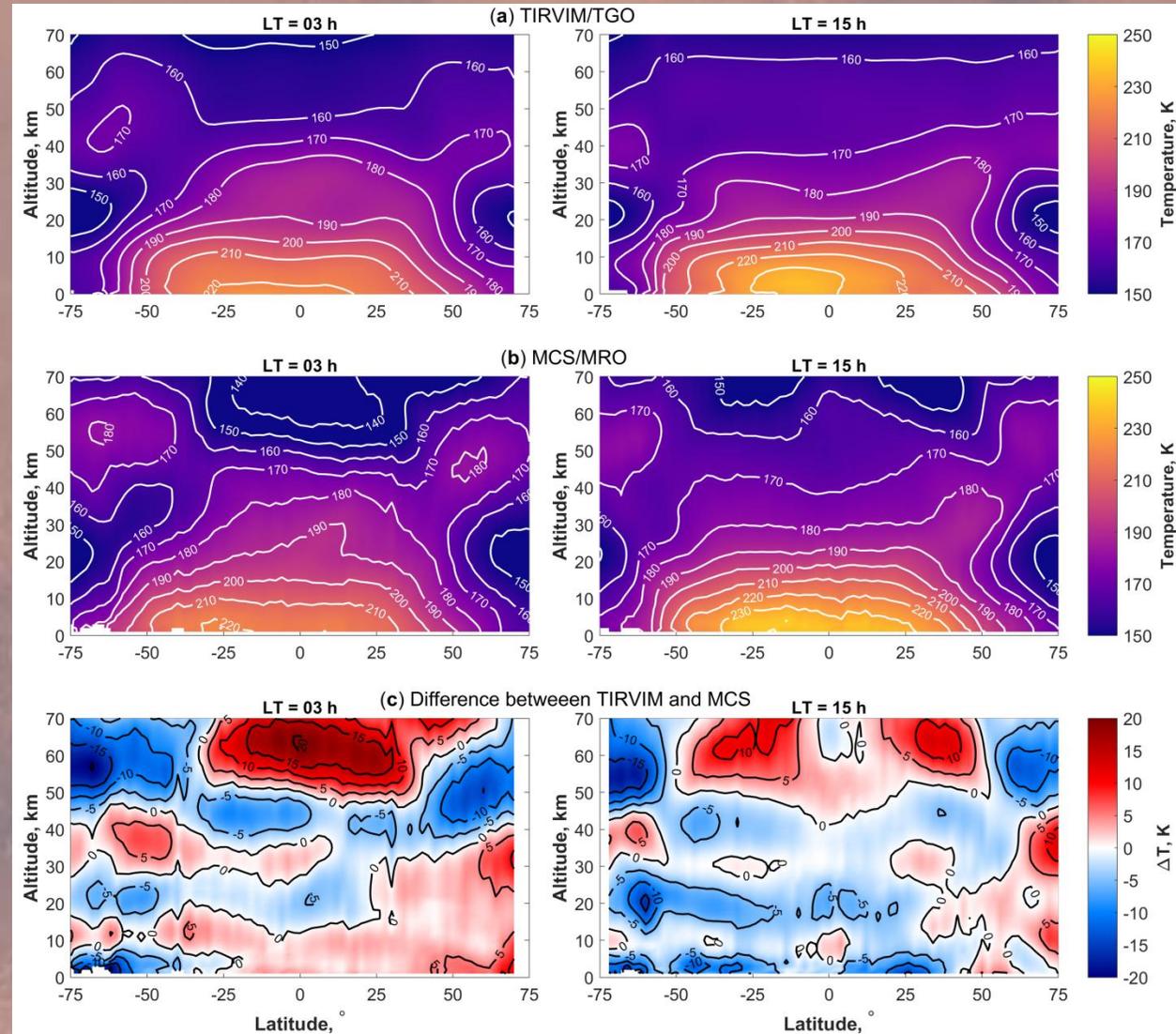
# Развитие глобальной пылевой бури (GDS) MY 34



# Сравнение зонально усреднённых температурных полей по данным TIRVIM/TGO и MCS/MRO

Перед GDS,  $L_s = 182.2^\circ - 187.0^\circ$

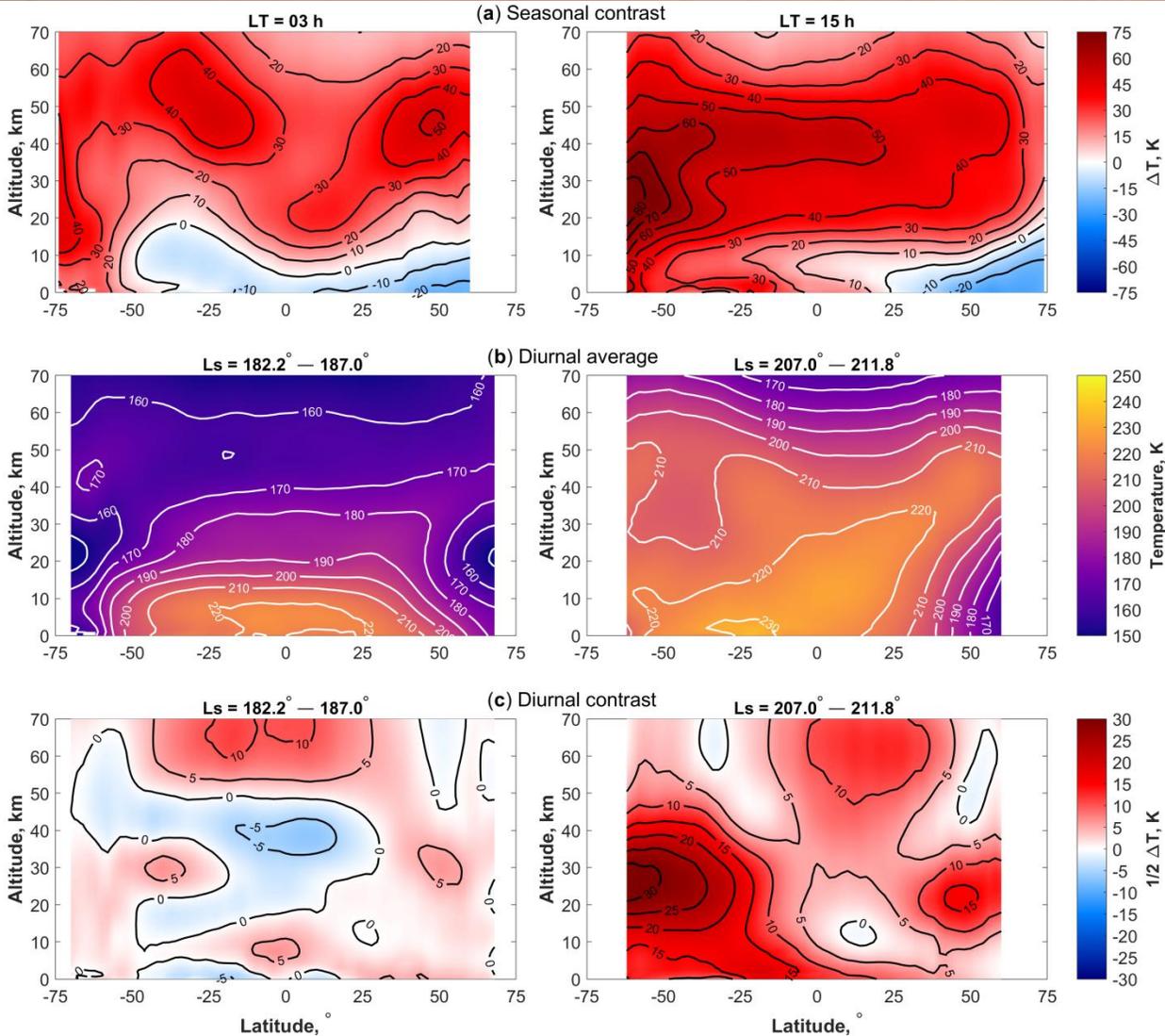
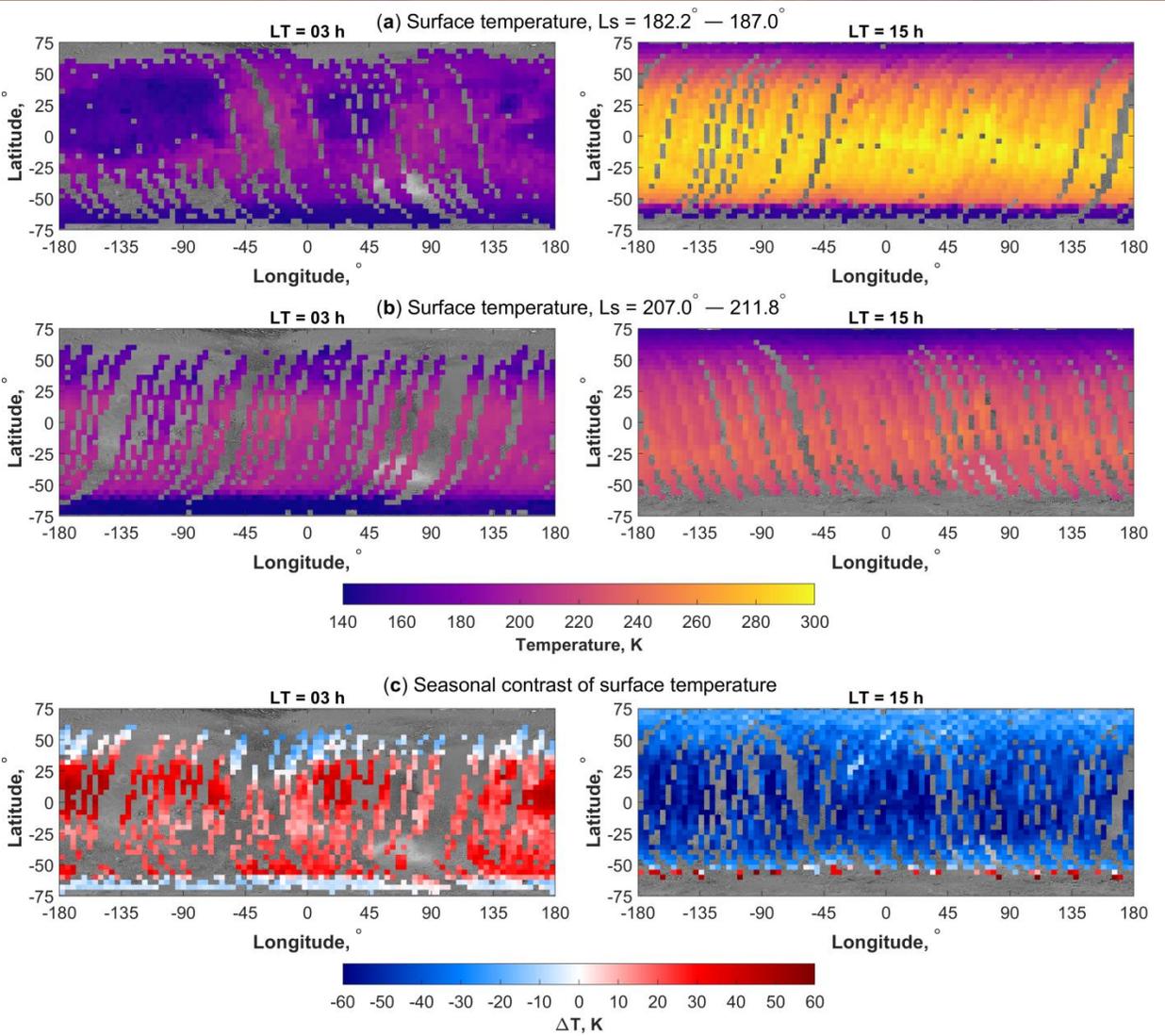
В разгар GDS,  $L_s = 207.0^\circ - 211.8^\circ$



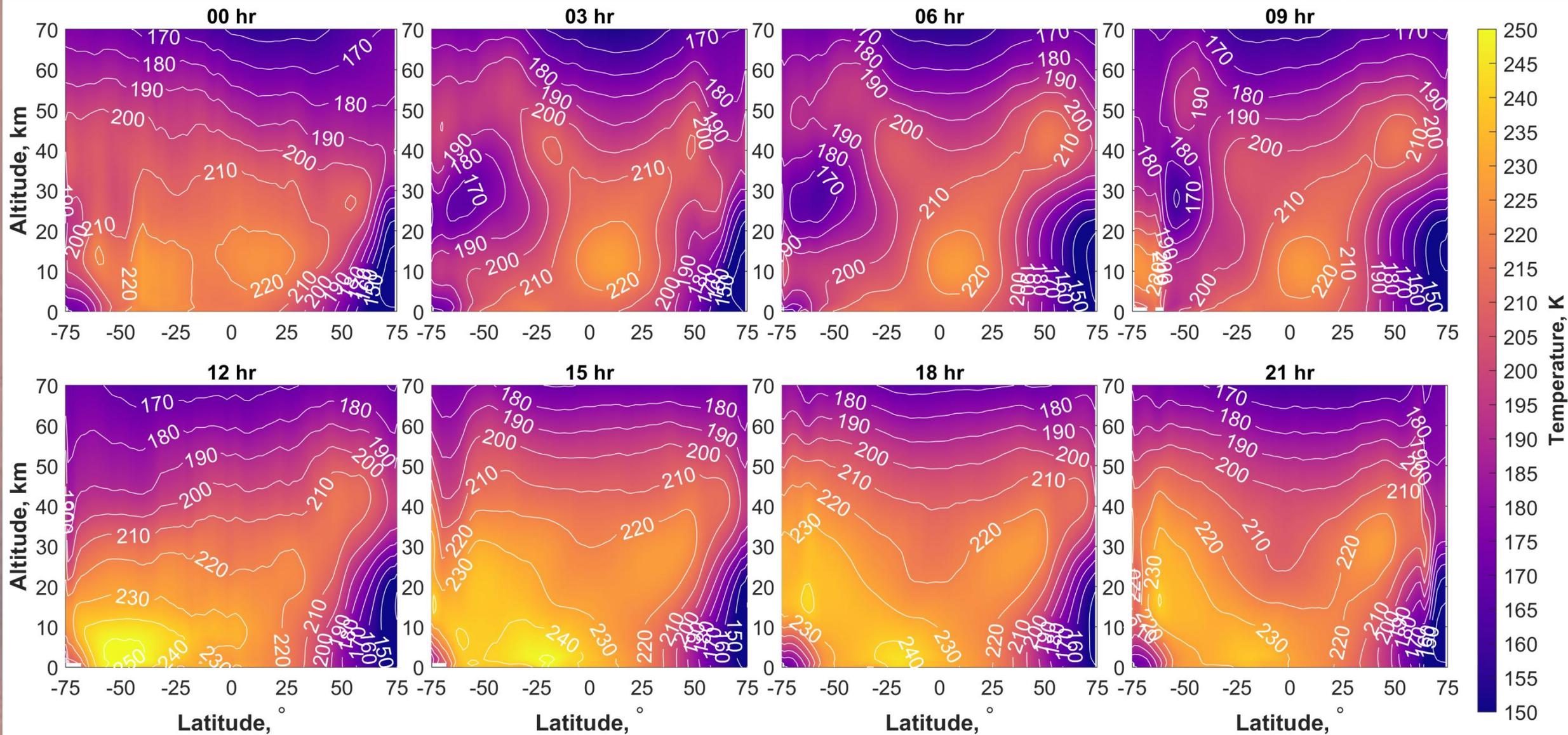
# Изменения тепловой структуры, вызванные MY 34 GDS

## Температура поверхности

## Сезонный и суточный контрасты температуры воздуха

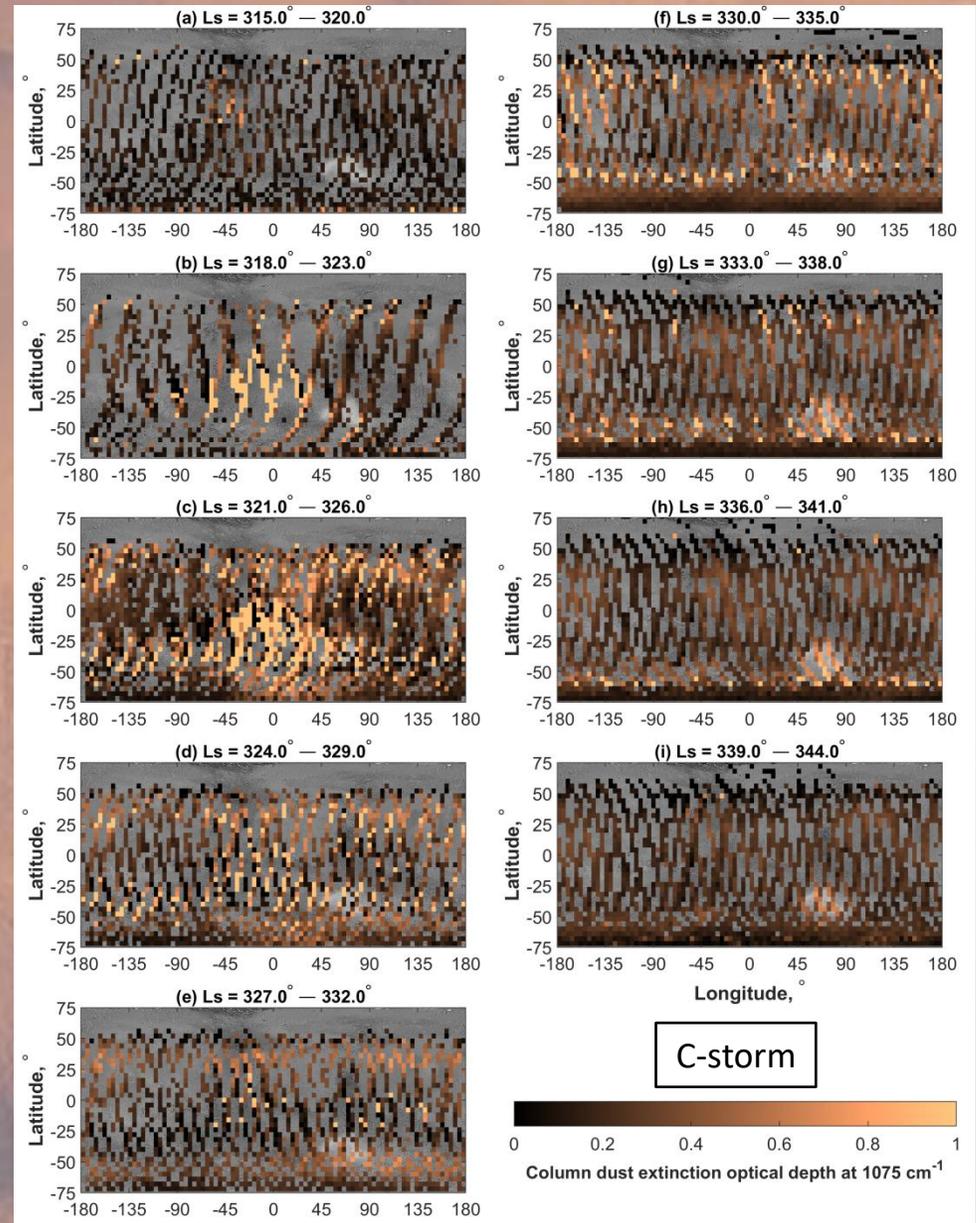
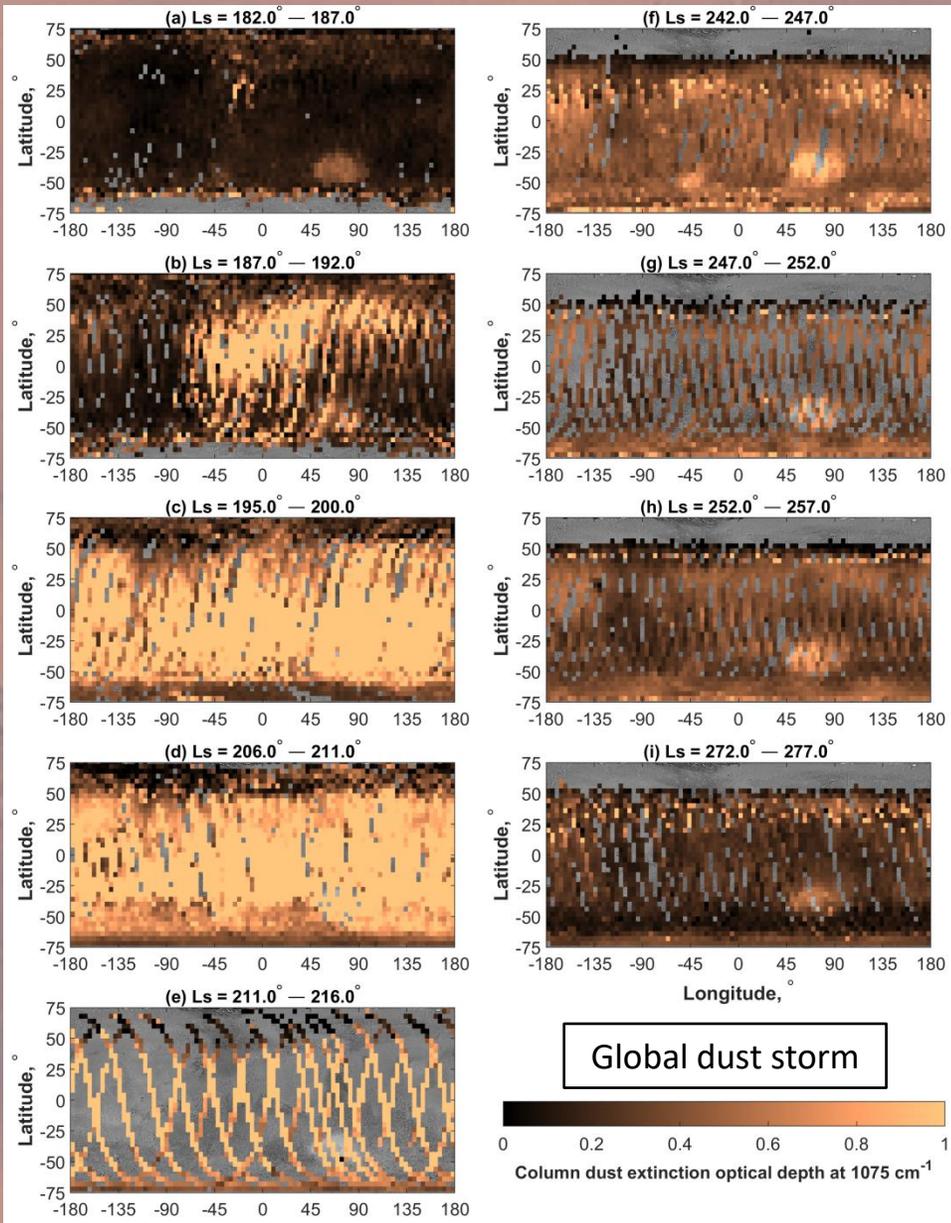


Зонально усреднённая тепловая структура в течение суток во время GDS,  $L_s = 200^\circ - 245^\circ$ , MY 34

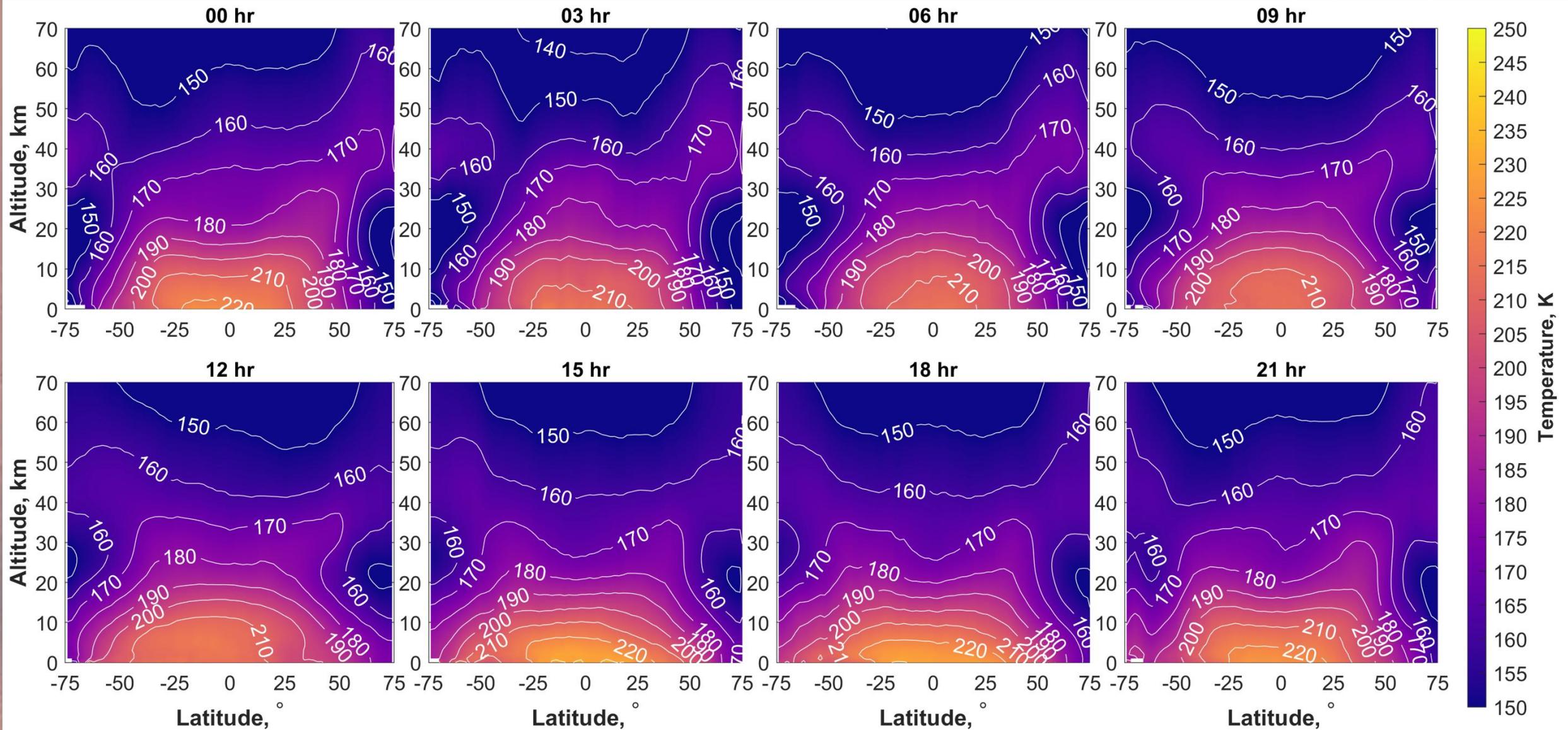




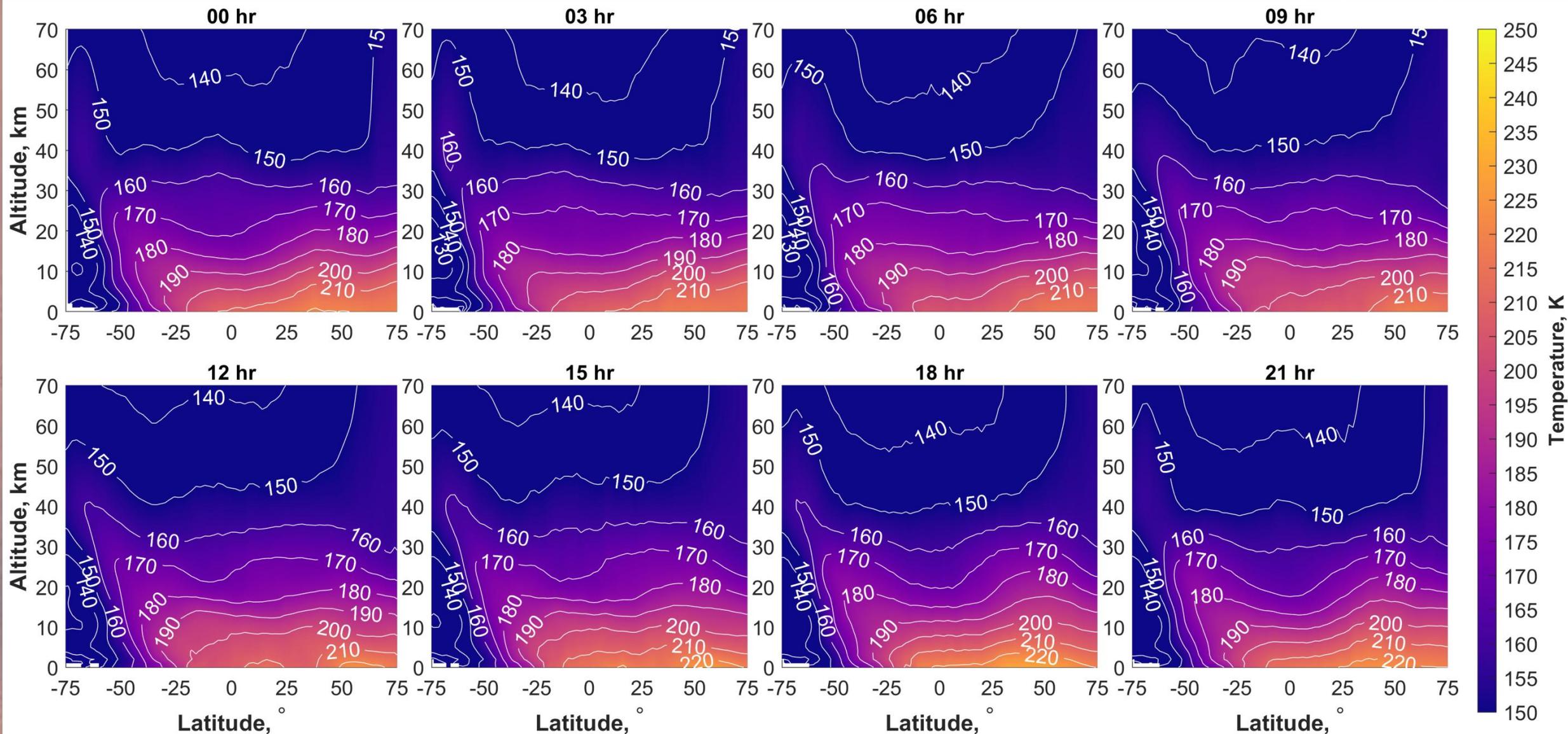
# Сравнение глобальной ( $L_s = 182^\circ - 277^\circ$ ) и региональной ( $L_s = 315^\circ - 344^\circ$ ) пылевых бурь МУ 34



Зонально усреднённая тепловая структура в течение суток в северную весну,  $L_s = 345^\circ - 030^\circ$ , MY 34–35



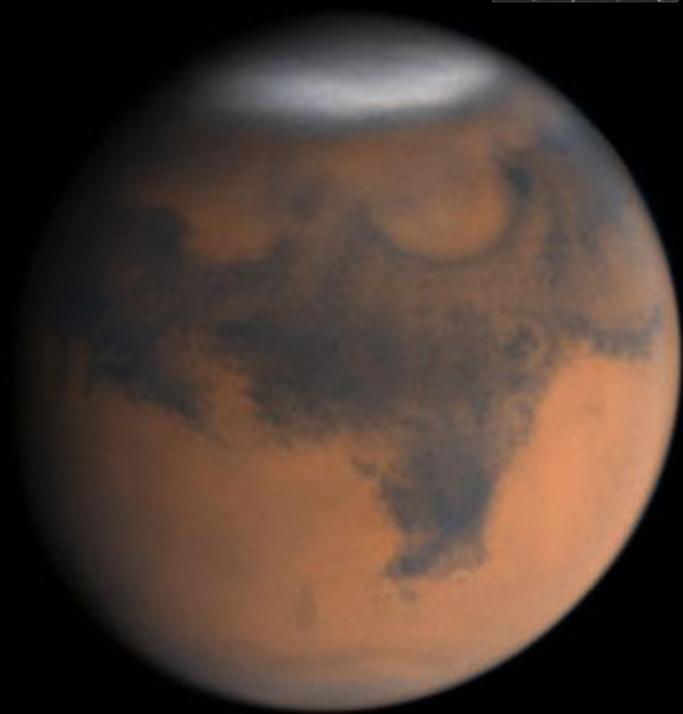
Зонально усреднённая тепловая структура в течение суток в северное лето,  $L_s = 070^\circ - 115^\circ$ , MY 35



## Заключение

- Обработано  $\approx 2.6 \cdot 10^6$  спектров, полученных фурье-спектрометром ACS TIRVIM на борту КА ExoMars TGO в режиме наблюдений в надир в период с 13 марта 2018 ( $L_s = 142^\circ$ , MY 34) по 2 декабря 2019 ( $L_s = 115^\circ$ , MY 35). По измеренным спектрам в диапазоне  $600 - 1300 \text{ см}^{-1}$  восстановлены вертикальные профили температуры от поверхности до 60 км, температура поверхности и общее содержание частиц пыли и водяного льда виде оптической толщины экстинкции на  $1075 \text{ см}^{-1}$  и  $825 \text{ см}^{-1}$  соответственно.
- По результатам восстановления температур построены зонально усреднённые тепловые структуры атмосферы Марса для 8 интервалов местного времени и для разных времён года в течение почти полного марсианского года от  $L_s = 142^\circ$  MY 34 до  $L_s = 115^\circ$  MY 35. Полученные поля температур демонстрируют типичные структуры, характерные для осеннего и весеннего равноденствий, а также для зимнего и летнего солнцестояний в северном полушарии.
- Плотное покрытие измерений TIRVIM во время непрерывной работы в начале серии научных измерений позволяет построить почти полный суточный цикл зонально усреднённого температурного поля, характерного для осеннего сезона в северном полушарии ( $L_s = 142^\circ - 167^\circ$ , MY 34). Данный сезон характеризуется симметричной циркуляцией Хэдли, а тепловая структура демонстрирует чёткий суточный прилив с амплитудами  $\approx 5 \text{ K}$ .
- Построены зонально усреднённые сезонные карты общего содержания пыли и водяного льда, демонстрирующие случившиеся в MY 34 глобальную (GDS) и региональную (C-storm) пылевые бури, а также сезонную изменчивость содержания водяного льда. Для обеих пылевых бурь также построена эволюция глобального распределения содержания пыли.
- Плотное покрытие измерений TIRVIM в начале развития и разгар GDS ( $L_s = 185^\circ - 212^\circ$ , MY 34) позволяет подробно изучить эволюцию суточно усреднённого глобального содержания пыли и реакцию температуры атмосферы дважды в сутки. Фиксируется широтная асимметрия содержания пыли и нагрева воздуха, существенное изменение температуры поверхности в ночное и дневное время, а также усиление циркуляции Хэдли с изменением структуры суточного теплового прилива.
- Полученные результаты согласуются с измерениями MCS/MRO в пределах погрешности восстановления, вертикального разрешения полученных профилей и пределов чувствительности зондирования в 15-мкм полосе  $\text{CO}_2$  в надир.

# Спасибо за внимание!



June 8, 2018



July 7, 2018