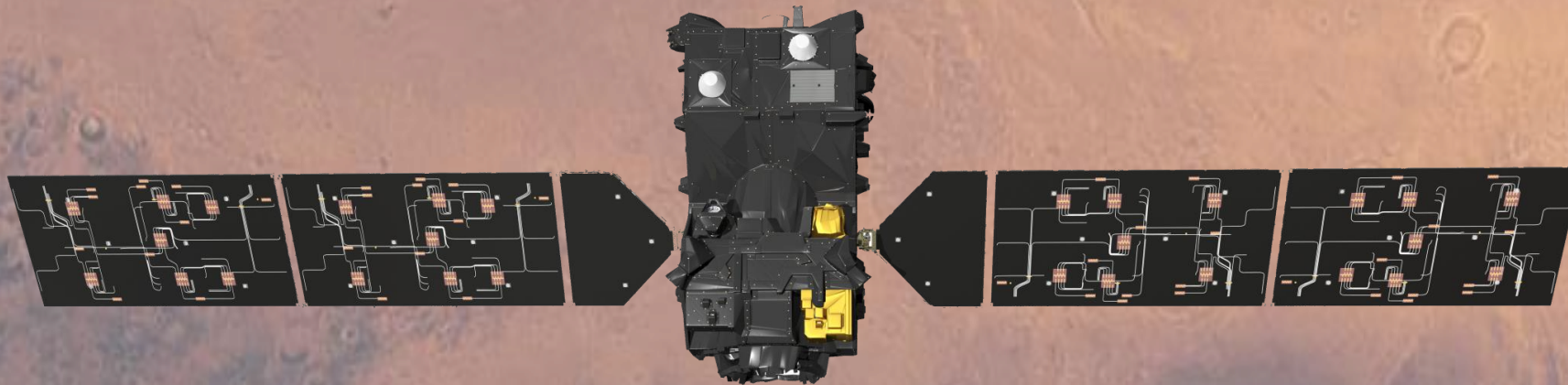


Сезонные вариации H_2O в атмосфере Марса по измерениям в полосе 6 мкм фурье-спектрометра ACS TIRVIM на борту КА ExoMars TGO

Авторы:

Власов П.В.^{1*} (pavel.vlasov@cosmos.ru), Игнатъев Н.И.¹, Кораблев О.И.¹, Фёдорова А.А.¹, Григорьев А.В.², Пацаев Д.В.¹, Маслов И.А.¹, Герле С.³, Грасси Д.⁴, Монтмессан Ф.³, Трохимовский А.Ю.¹, Засова Л.В.¹

- 1) Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
- 2) Research School of Astronomy and Astrophysics, Australian National University, Канберра, Австралия
- 3) LATMOS, CNRS/UVSQ/IPSL, Гуйанкур, Франция
- 4) Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali – Istituto Nazionale di Astrofisica, Рим, Италия



XXII конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»
ИКИ РАН, Москва, Россия, 11–15 ноября 2024

Фурье-спектрометр ACS TIRVIM на борту КА ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO)

Основные научные задачи ACS TIRVIM при наблюдениях в надир:

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

Научные задачи ACS TIRVIM в режиме солнечных затмений:

- Детектирование и мониторинг малых газовых составляющих атмосферы Марса

Характеристики ACS TIRVIM при наблюдениях в надир:

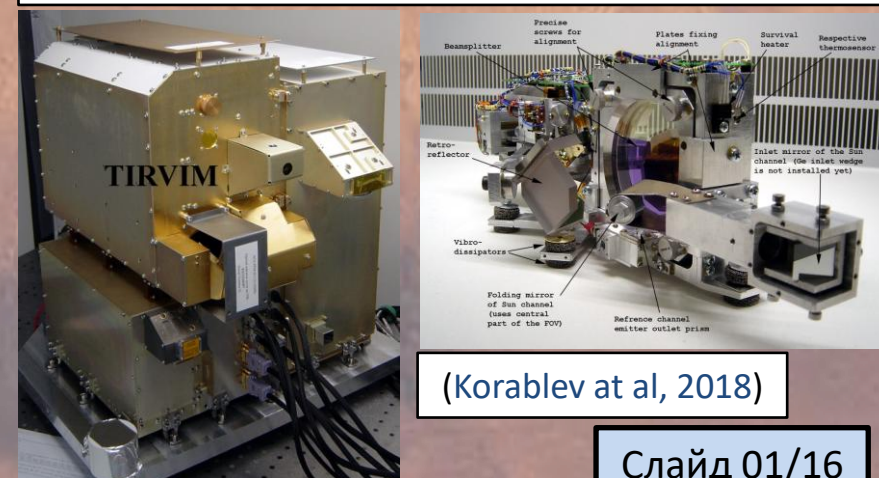
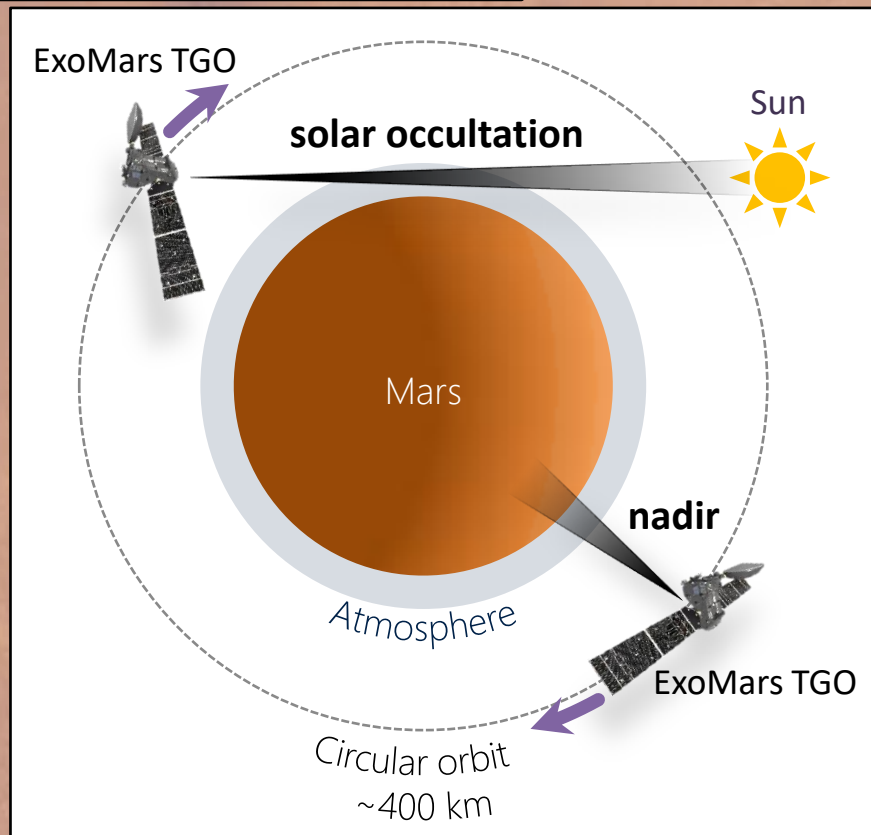
Спектральный диапазон: 5–16 мкм ($600\text{--}2000\text{ см}^{-1}$)

Спектральное разрешение: FWHM = 1.17 см^{-1}

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

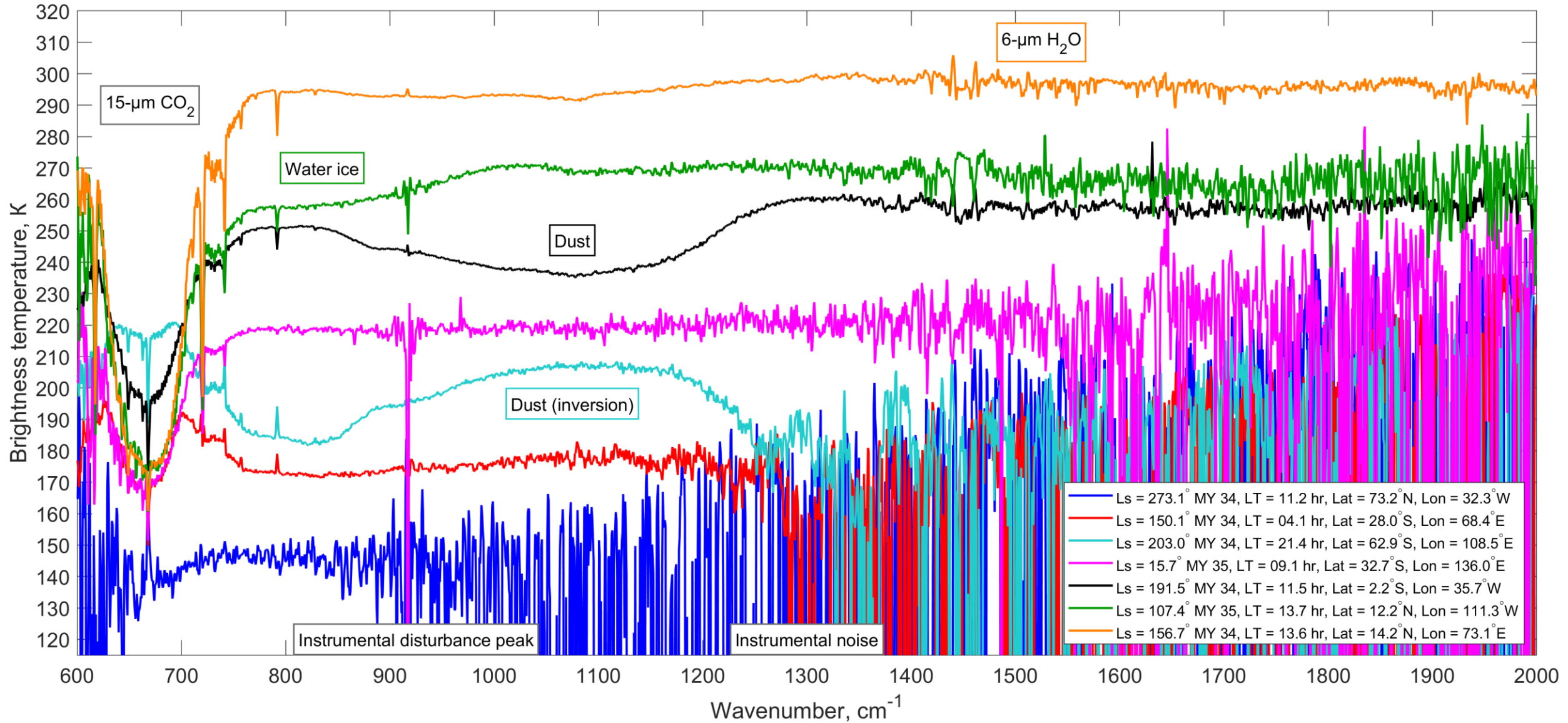
Основные цели данного исследования:

- Сезонный цикл общего содержания водяного пара в атмосфере Марса по данным TIRVIM при наблюдениях в надир в MY 34–35
- Определение ограничений возможности наблюдения водяного пара TIRVIM
- Учёт влияния разной параметризации уширения линий H_2O из 6 мкм полосы в CO_2 -атмосфере на значение восстановленного содержания
- Сравнение полученного результата по данным TIRVIM с одновременными наблюдениями H_2O в рамках других экспериментов



(Korablev et al, 2018)

Примеры ИК спектров (в ед. яркостной температуры) полученные ACS TIRVIM при наблюдениях в надир



Задача восстановления атмосферных параметров из зондирования в тепловом ИК диапазоне

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

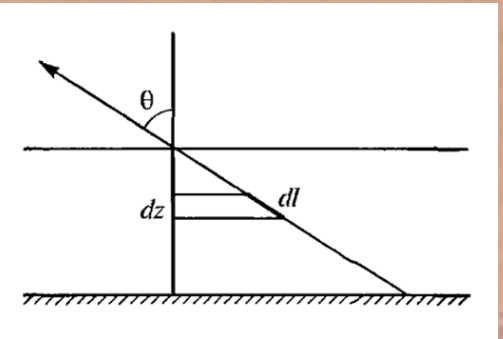
Прямая задача – перенос излучения: $F(T_{surf}, T(z), \tau_{dust}, \tau_{ice}) = I_v(z)$

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

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

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

B – функция Планка излучения АЧТ, ε – излучательная способность поверхности, T_{surf} – её температура



Температурный профиль определяет на M атмосферных уровнях, а уравнение переноса излучения линеаризуется для M спектральных каналов в диапазоне $665\text{--}770 \text{ см}^{-1}$ (крыло полосы 15-мкм поглощения CO_2). Метод оптимальной оценки для нелинейных случаев (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 – начальная температура, S – корреляционная матрица неопределённости T , E – инструментальная погрешность

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

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

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

Диагональные элементы апостериорной ковариационной матрицы C определяют погрешности восстановления температуры на слоях

Восстановление температуры поверхности, общего содержания аэрозолей и водяного пара

По спектру в диапазоне 800–1250 см⁻¹ также итерационно восстанавливаются температура поверхности, оптическая толщина столба пыли на 1075 см⁻¹ и оптическая толщина облаков водяного льда на 825 см⁻¹:

$$\begin{cases} T_{surf}^{(n+1)} = T_{surf}^{(n)} + \sigma_{T_{surf}} \cdot K_{T_{surf}}^T \times V \times \Delta I \\ \tau_{dust}^{(n+1)} = \tau_{dust}^{(n)} + \sigma_{dust} \cdot K_{dust}^T \times V \times \Delta I \\ \tau_{ice}^{(n+1)} = \tau_{ice}^{(n)} + \sigma_{ice} \cdot K_{ice}^T \times V \times \Delta I \\ \Delta I = I_{meas} - I^{(n)} \end{cases}$$

K – векторы функциональных производных, σ – априорная неопределённость, C – погрешности восстановления:

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

$$\begin{cases} \Delta T_{surf} = \sqrt{C_{T_{surf}}}, \quad \Delta \tau_{dust} = \sqrt{C_{dust}}, \quad \Delta \tau_{ice} = \sqrt{C_{ice}} \\ C_{T_{surf}} = \sigma_{T_{surf}} - \sigma_{T_{surf}} \cdot K_{T_{surf}}^T \times V \times K_{T_{surf}} \cdot \sigma_{T_{surf}} \\ C_{dust} = \sigma_{dust} - \sigma_{dust} \cdot K_{dust}^T \times V \times K_{dust} \cdot \sigma_{dust} \\ C_{ice} = \sigma_{ice} - \sigma_{ice} \cdot K_{ice}^T \times V \times K_{ice} \cdot \sigma_{ice} \end{cases}$$

Общее содержание водяного пара (в мкм осаждённой воды) по спектрам TIRVIM в диапазоне 1400–1800 см⁻¹ – аналогичным образом после температур и аэрозолей. DOFs ~1 для 6-мкм H₂O полосы, поэтому профиль относительного содержания H₂O не восстанавливается данным методом (лишь множитель к априорному профилю), профиль берётся из базы данных MCD.

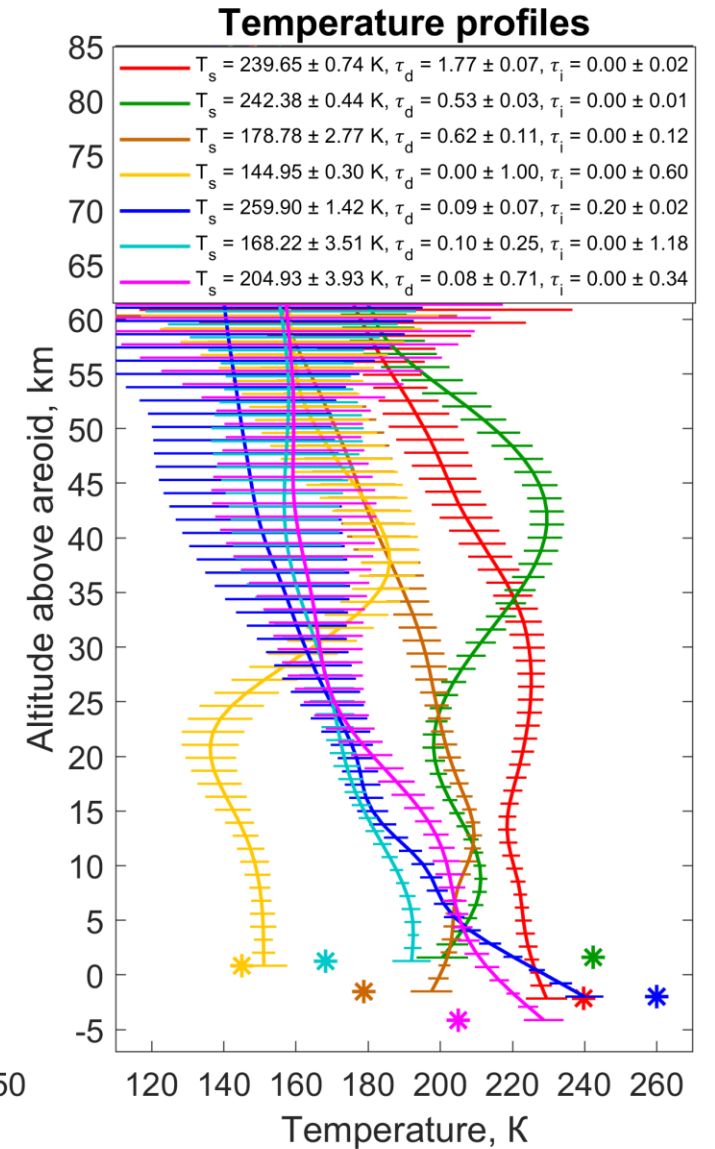
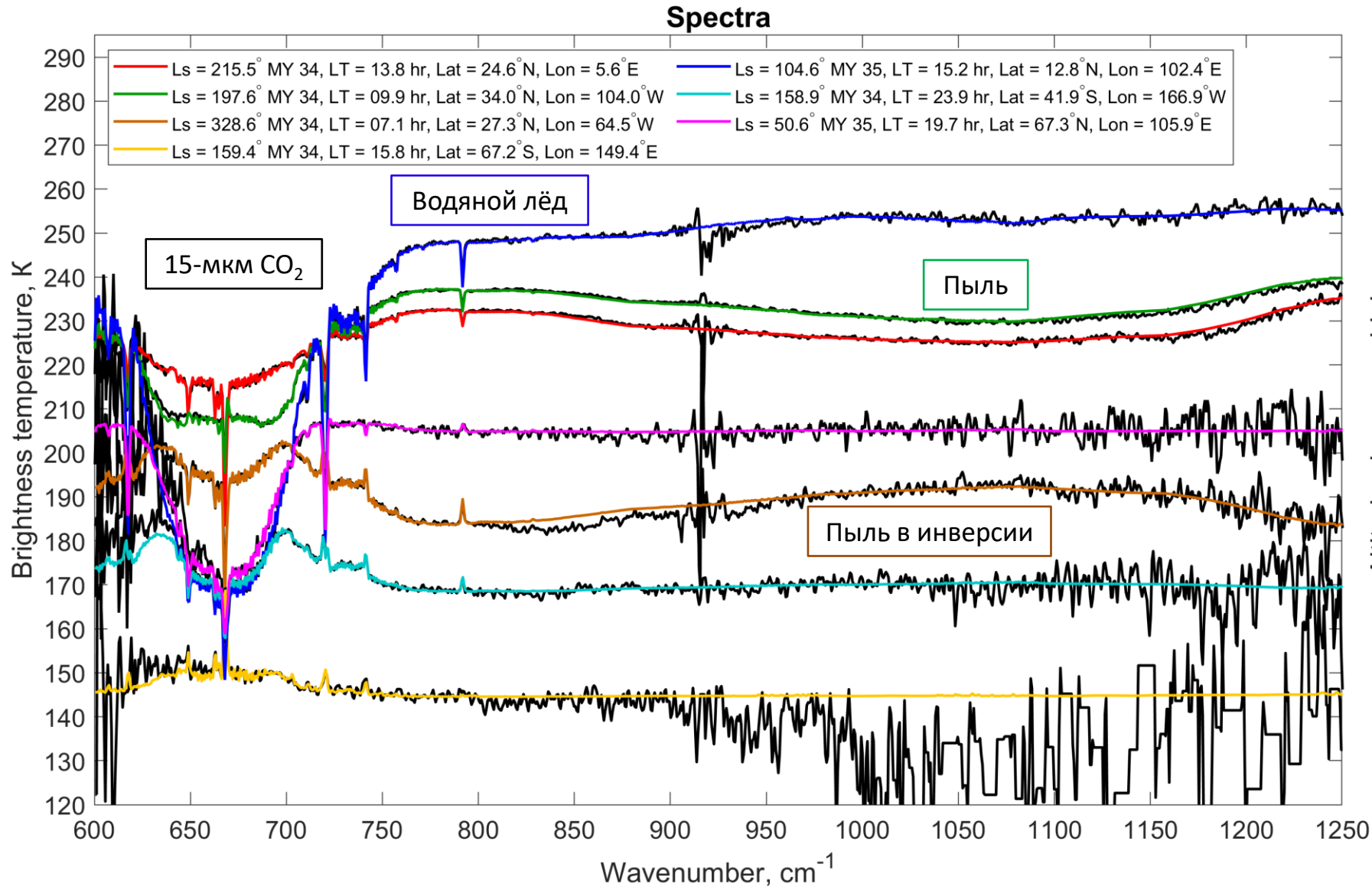
$$\begin{cases} P_{vap}^{(n+1)} = P_{vap}^{(n)} + \sigma_{vap} \cdot K_{vap}^T \times \left(\sigma_{vap} \cdot K_{vap} \times K_{vap}^T + E \right)^{-1} \times \Delta I \\ \Delta I = I_{meas} - I^{(n)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta P_{vap} = \sqrt{C_{vap}} \\ C_{vap} = \sigma_{vap} - \sigma_{vap} \cdot K_{vap}^T \times \left(\sigma_{vap} \cdot K_{vap} \times K_{vap}^T + E \right)^{-1} \times K_{vap} \cdot \sigma_{vap} \end{cases}$$

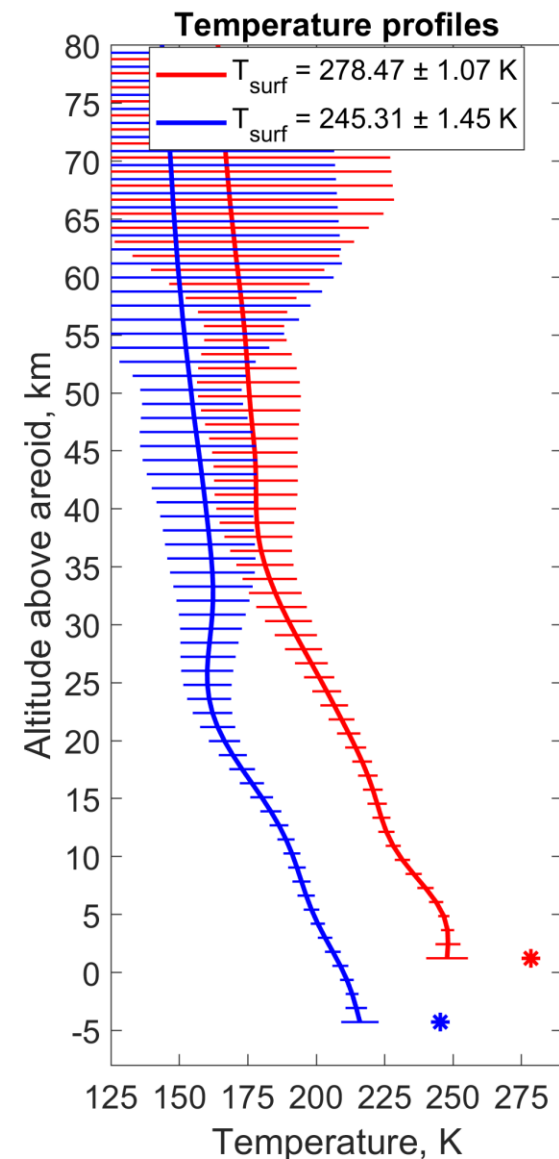
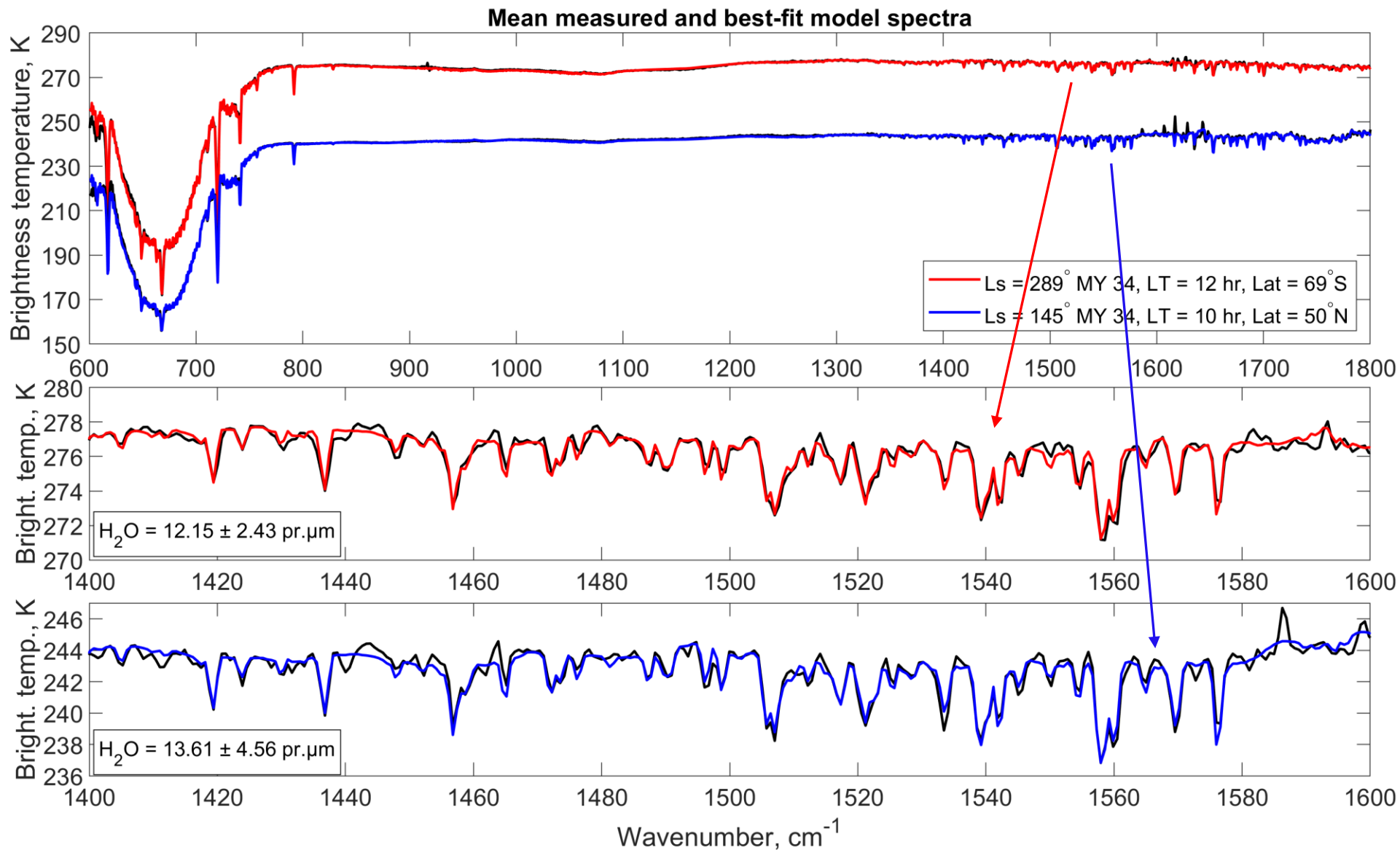
Для повышения соотношения сигнал/шум и разрешения линий H₂O спектры TIRVIM усредняются в диапазонах широт-долгот, местного времени и сезона.

В отличие от земной атмосферы, на Марсе в полосе 6 мкм не нужно учитывать слабый континуум линий поглощения H₂O, используется обычный контур Фойгта, но необходимо учесть, что линии H₂O уширяются в CO₂-атмосфере, а не в воздухе.

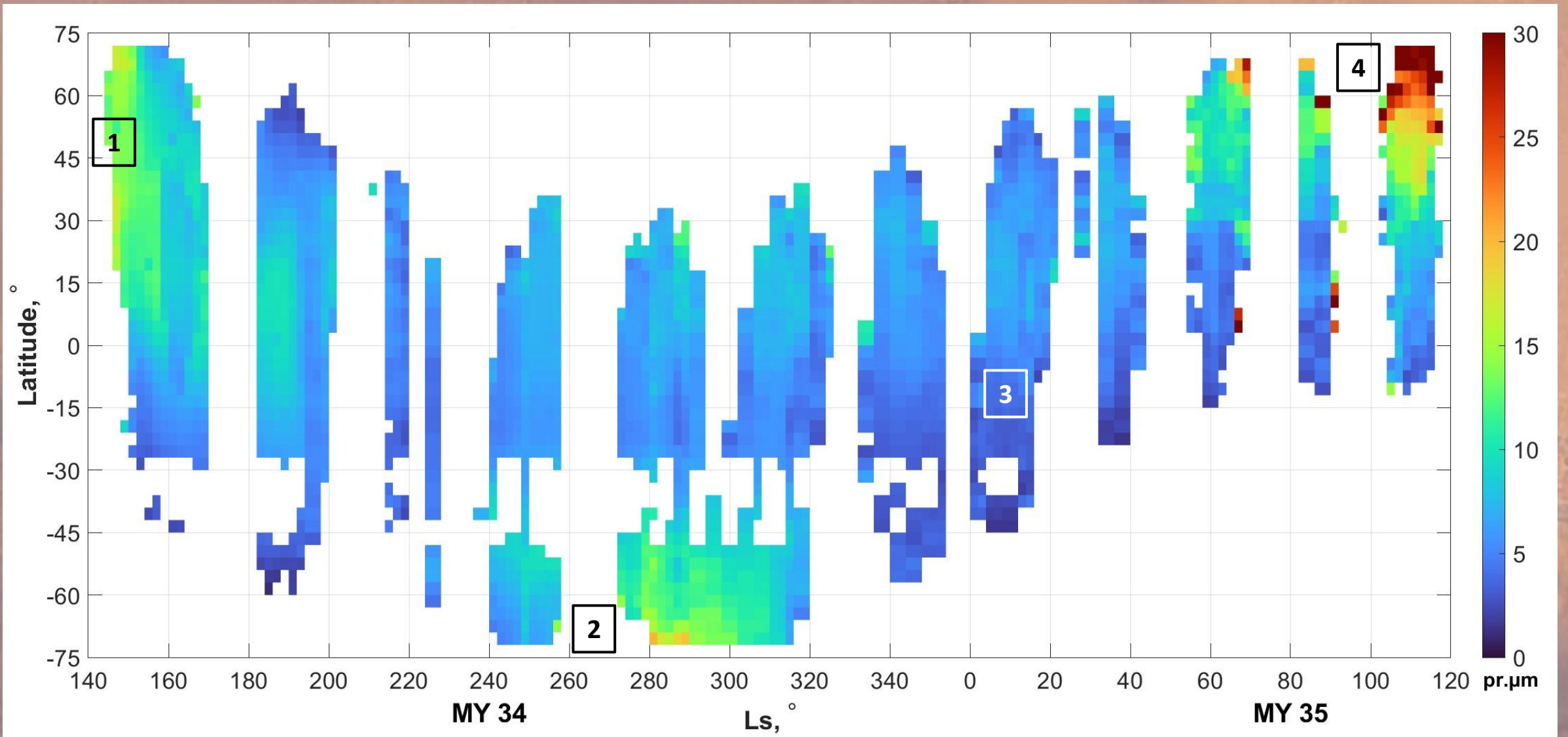
Восстановленные профили температуры и общее содержание аэрозолей по надирным данным TIRVIM



Восстановленное общее содержание водяного пара в атмосфере по усреднённым измерениям TIRVIM

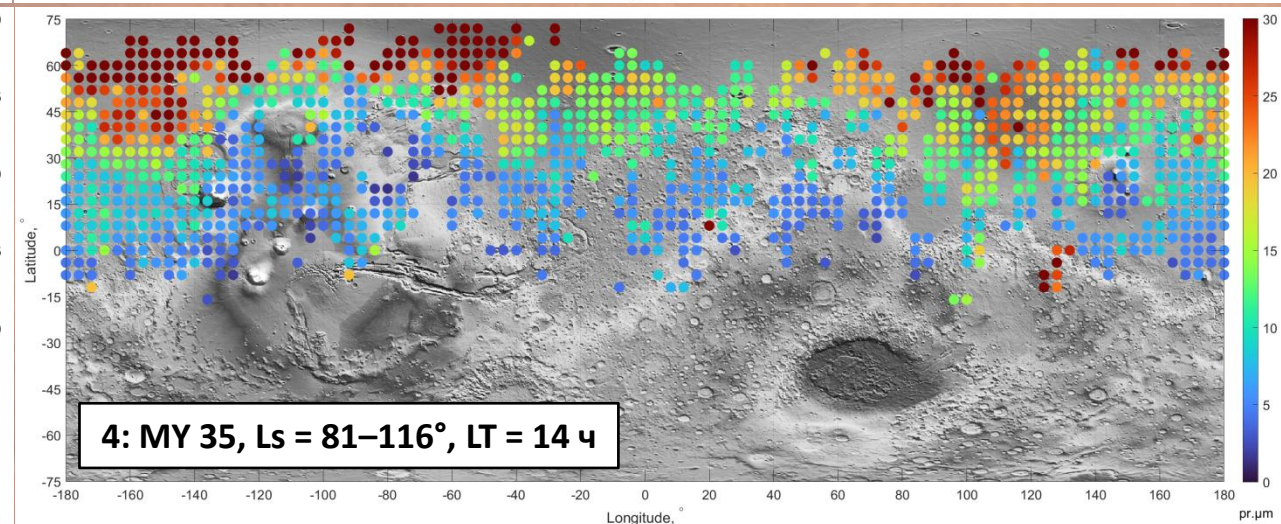
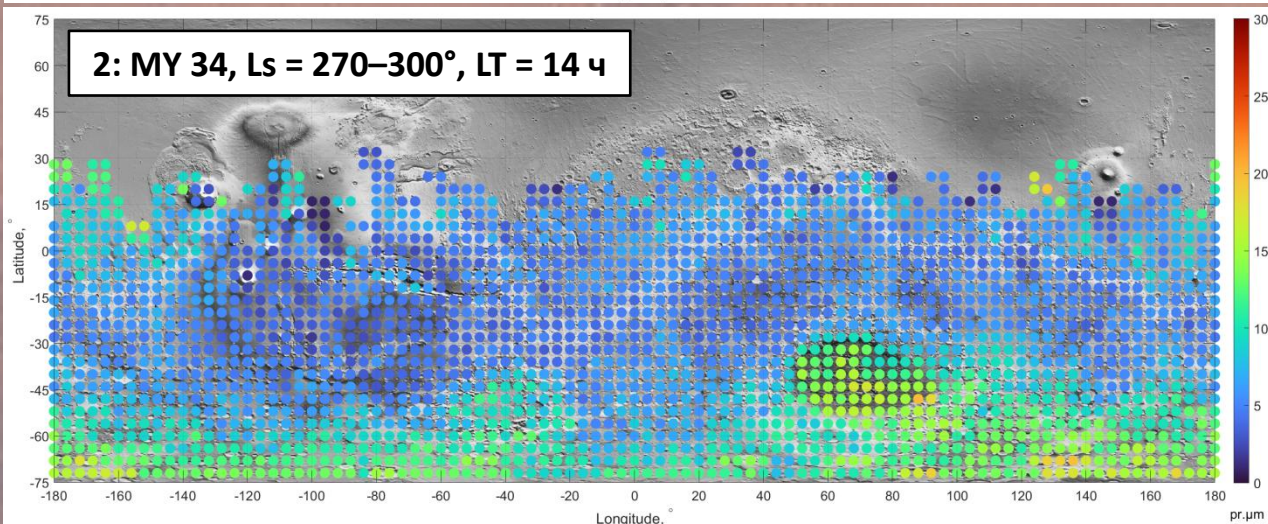
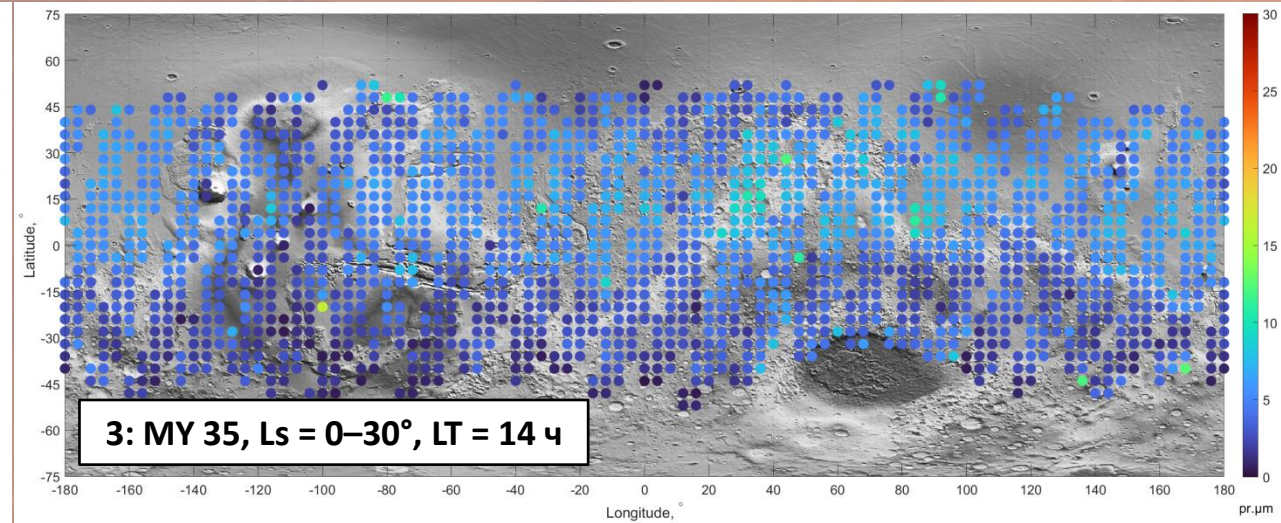
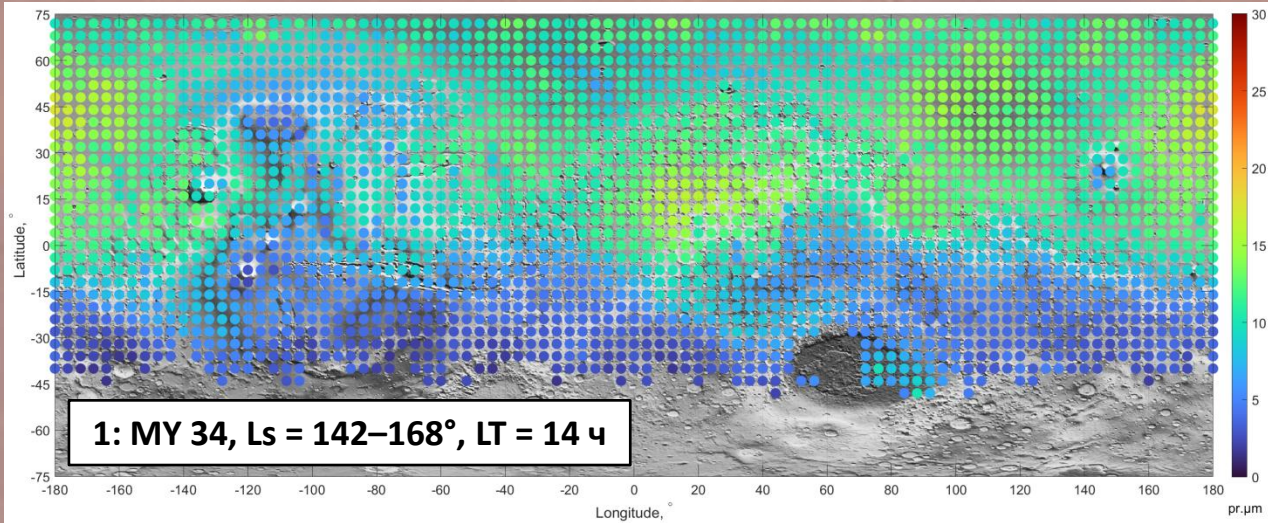


Среднемеридиональное дневное (7–19 ч) содержание водяного пара (мкм) в атмосфере Марса, МУ 34–35



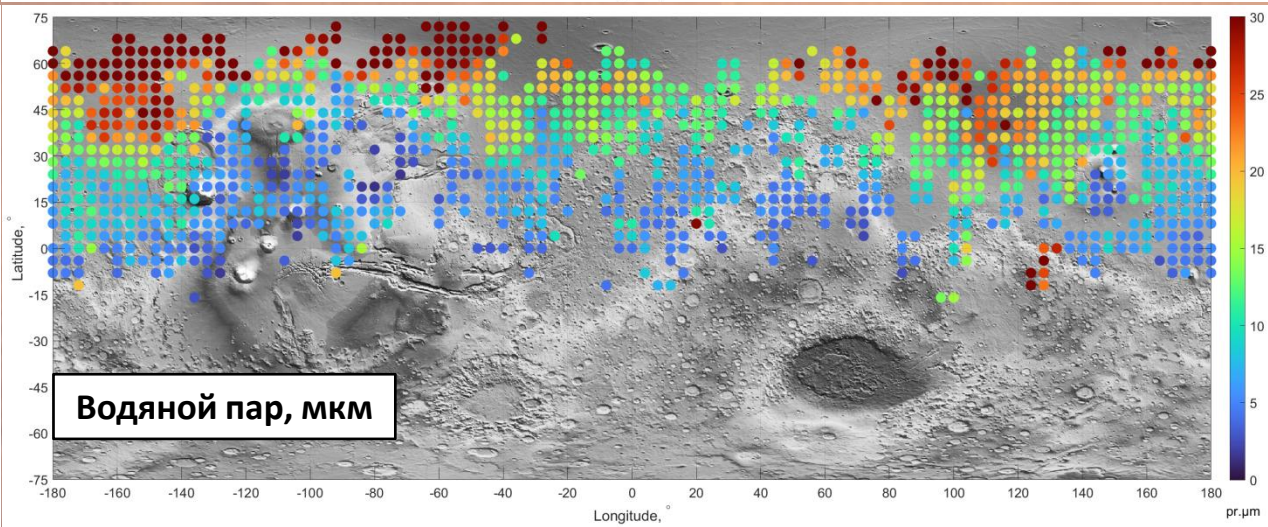
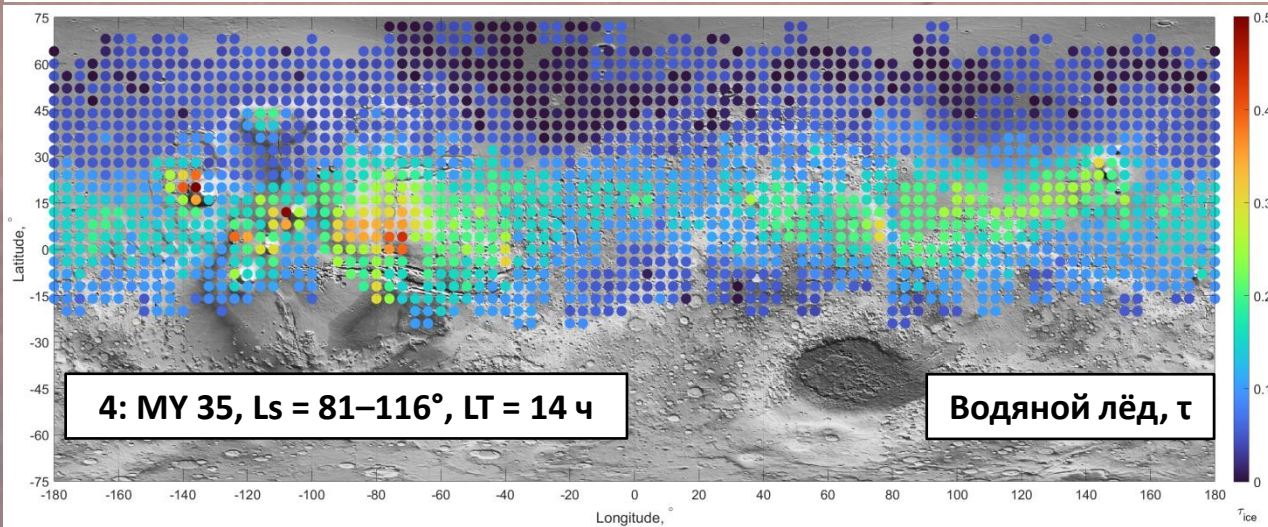
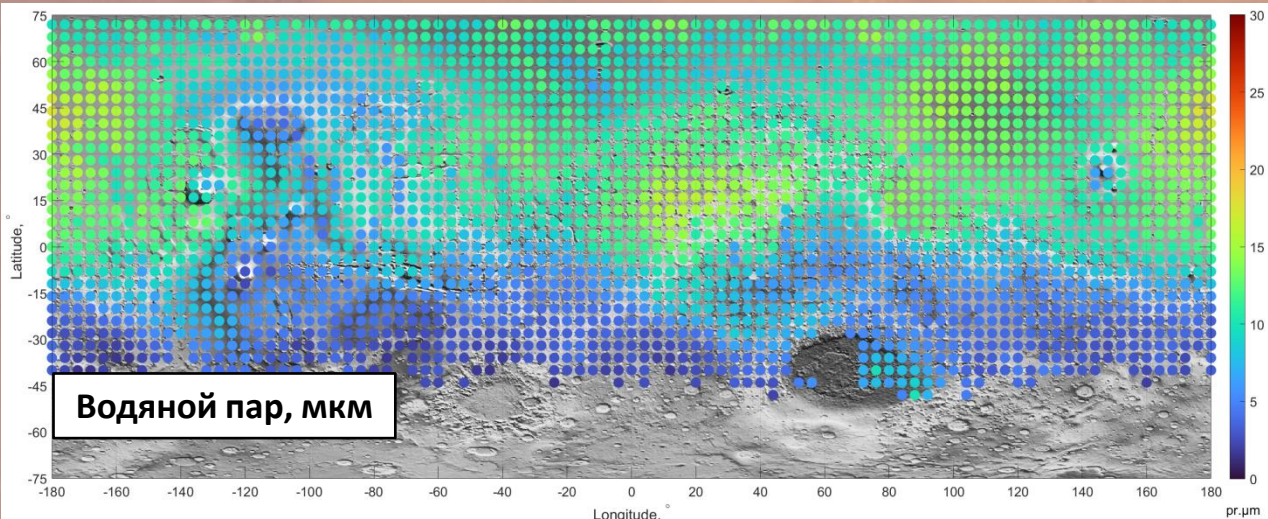
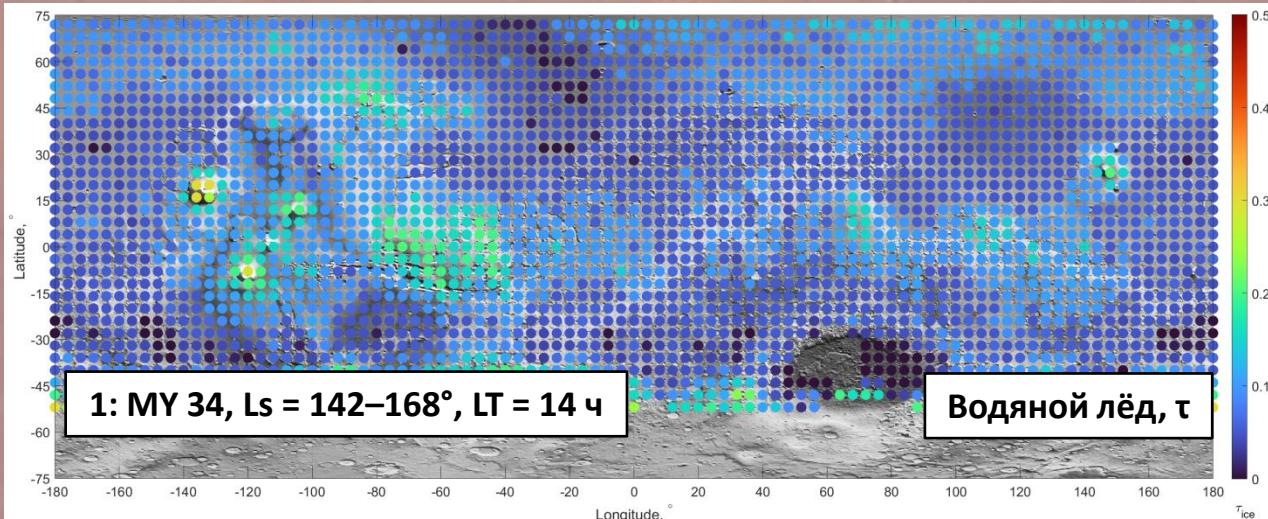
Меридионально усреднённые спектры TIRVIM, усреднение проводилось в диапазонах $\pm 2^\circ$ по широте и $\pm 1^\circ$ по Ls

Распределение дневного содержания (14 ч) водяного пара (мкм) в атмосфере Марса, MY 34–35



Водяной пар не восстанавливается по данным TIRVIM в зимние сезоны соответствующих полушарий даже в дневное время. Во время глобальной пылевой бури MY 34 также не удалось получить карту распределения содержания H_2O . Усреднение спектров проводилось в диапазонах $\pm 2^\circ$ по широте, $\pm 2^\circ$ по долготе и $\pm 1^\circ$ по Ls.

Корреляция общего содержания водяного пара и толщины облаков водяного льда в сезоны афелия МУ 34–35

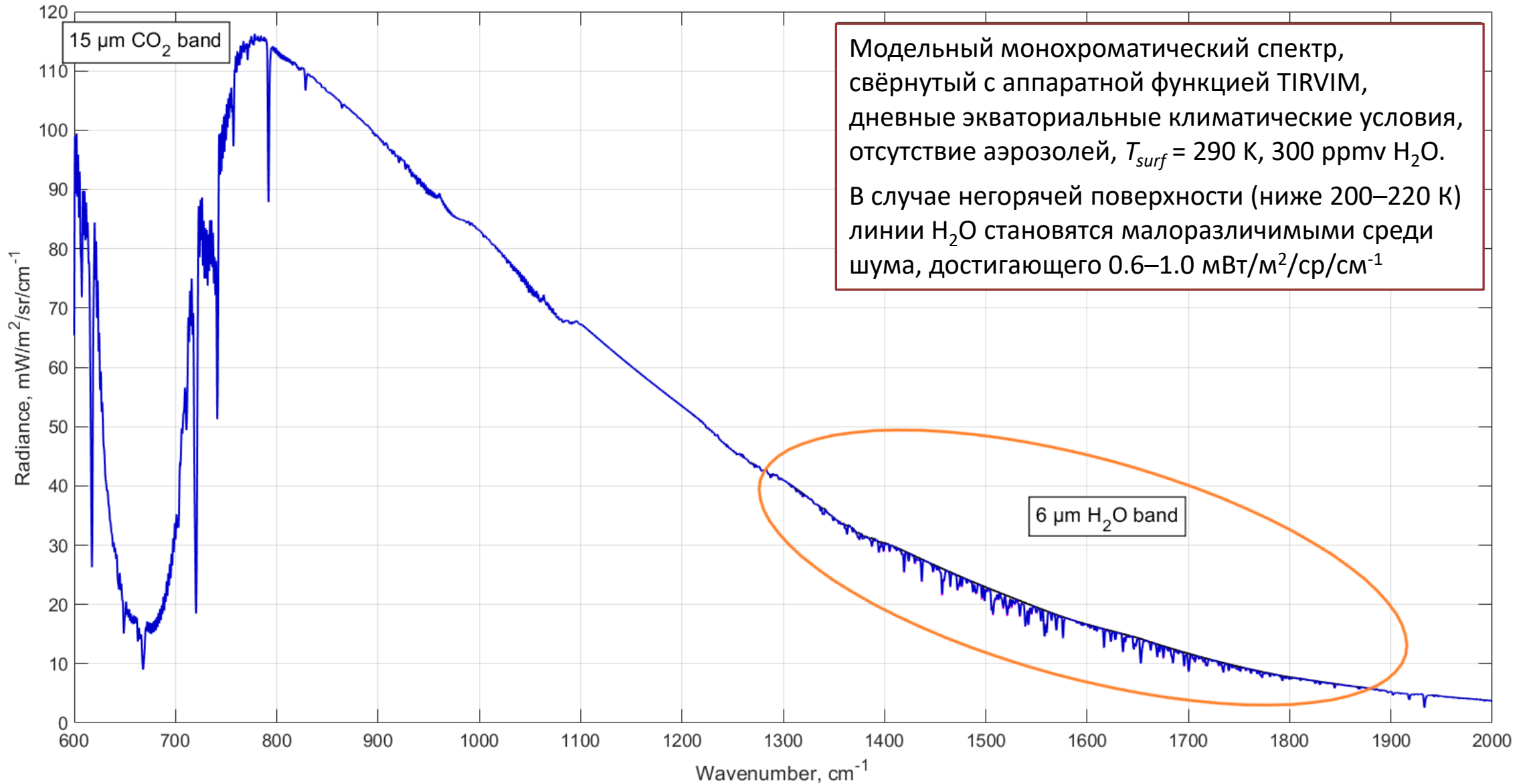


Видна антикорреляция водяного пара и облаков водяного льда в атмосфере Марса в сезон афелия в северном полушарии

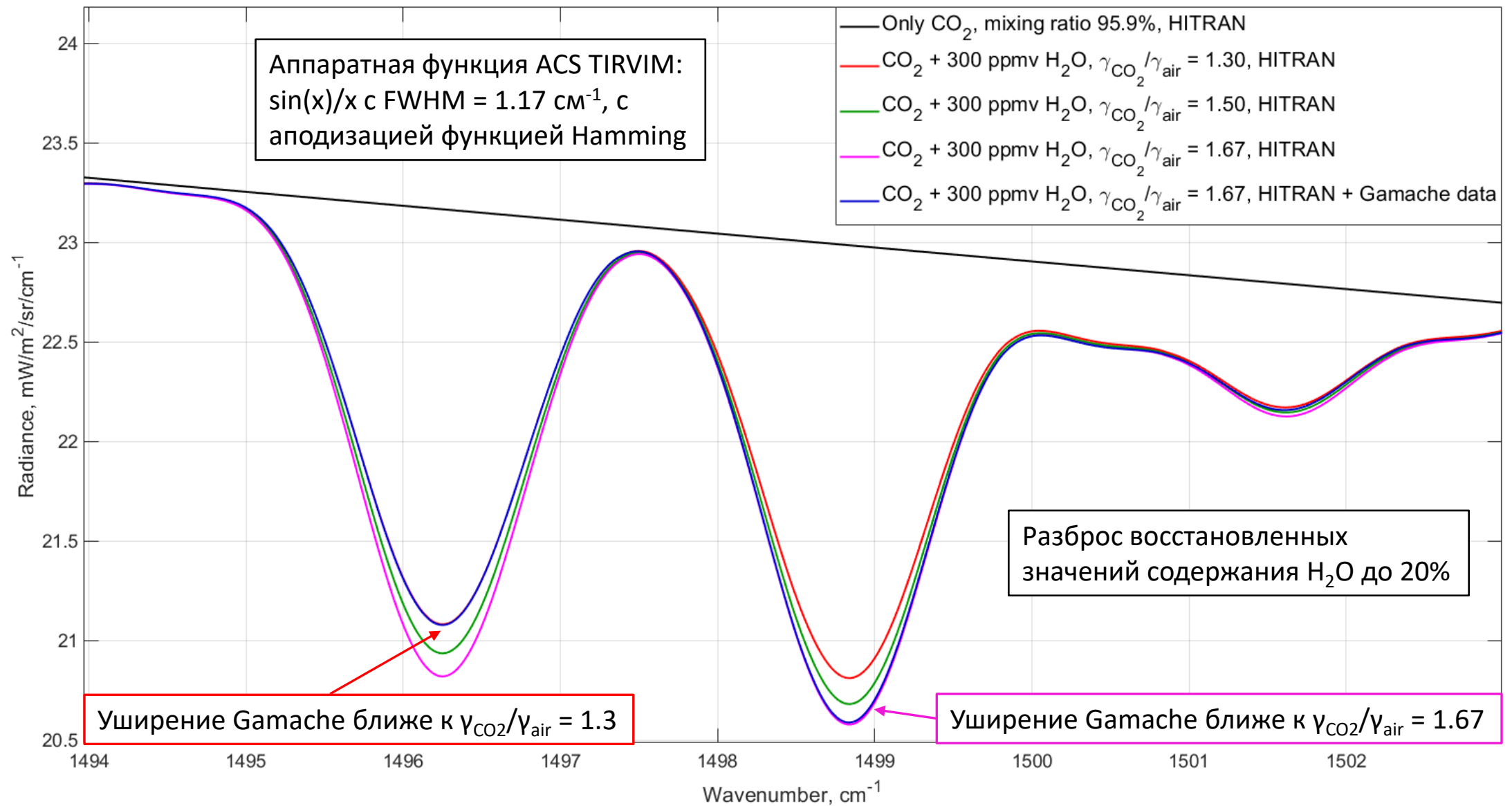
Некоторые особенности восстановления содержания H_2O из 6-мкм полосы по данным TIRVIM

- TIRVIM доступны только дневные наблюдения водяного пара в полосе 6 мкм из-за высокого шума (до $1 \text{ мВт/м}^2/\text{ср/см}^{-1}$), при $T_{\text{surf}} < 200\text{--}220 \text{ К}$ сигнал слишком слаб. В итоге, водяной пар наблюдается лишь с 7 ч до 19 ч местного времени, в другое местное время и при других случаях с холодной поверхностью линии H_2O попросту неразрешимы.
- Недоступность восстановления содержания H_2O вечером и утром делает невозможным сравнение результата с затменными экспериментами, только с одновременными наблюдениями соответствующих полос воды в надир в экспериментах SPICAM/Mars Express и NOMAD/TGO.
- «Затупление» центров линий H_2O при усреднении большого количества спектров TIRVIM, заданных на разных сетках волновых чисел, что приводит к недооценке восстановленного содержания водяного пара.
- Более редкое покрытие измерений TIRVIM и более высокий шум вследствие экономии работы холодильника ближе к концу работы прибора. Это усложнило восстановление содержания H_2O летом в северном полушарии MY 35, в результате чего были серьёзно ограничены широты и увеличены погрешности.
- Разная параметризация уширения линий H_2O в CO_2 -атмосфере:
 - $\gamma_{\text{CO}_2}/\gamma_{\text{air}} = 1.3$ (γ_{air} – уширение воздухом из HITRAN) по наблюдениям атмосферы Венеры с помощью Anglo-Australian Observatory в полосе H_2O 2.3 мкм (Crisp et al., 1991)
 - $\gamma_{\text{CO}_2}/\gamma_{\text{air}} = 1.5$ по измерениям TES/MGS атмосферы Марса в полосе H_2O 28–42 мкм (Smith, 2002).
 - $\gamma_{\text{CO}_2}/\gamma_{\text{air}} = 1.67$ (средний множитель) + отдельные линии H_2O по наземным наблюдениям с помощью National Solar Observatory в полосе H_2O 6 мкм ($1289\text{--}1988 \text{ см}^{-1}$) (Brown et al., 2007)
 - Спектроскопическая база линий H_2O (измерения + моделирование) в диапазоне $1100\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$ специально для CO_2 -атмосфер (Gamache et al., 2016)

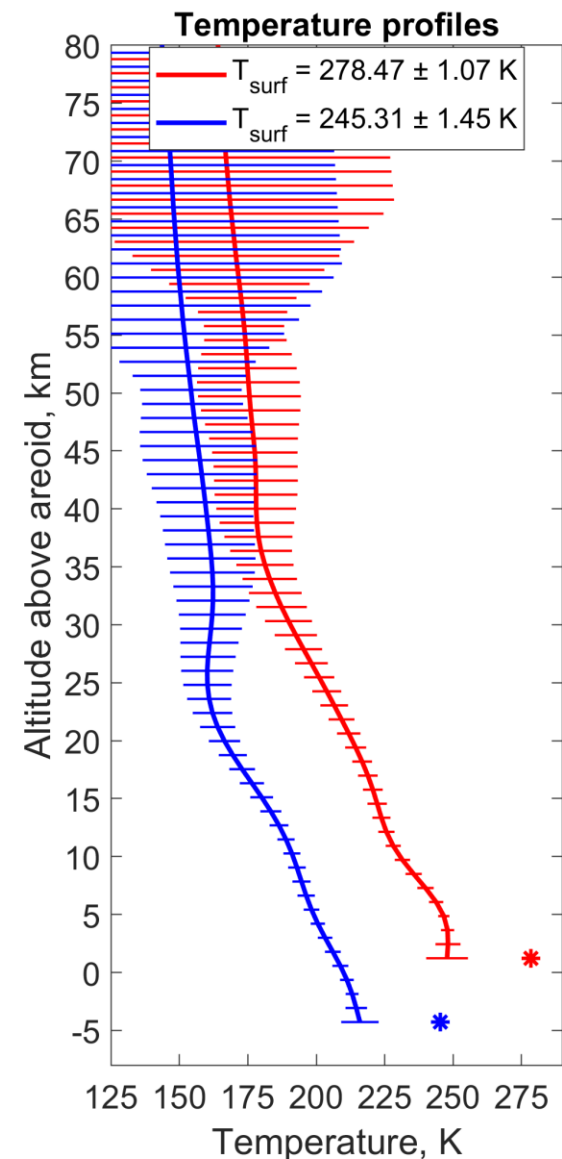
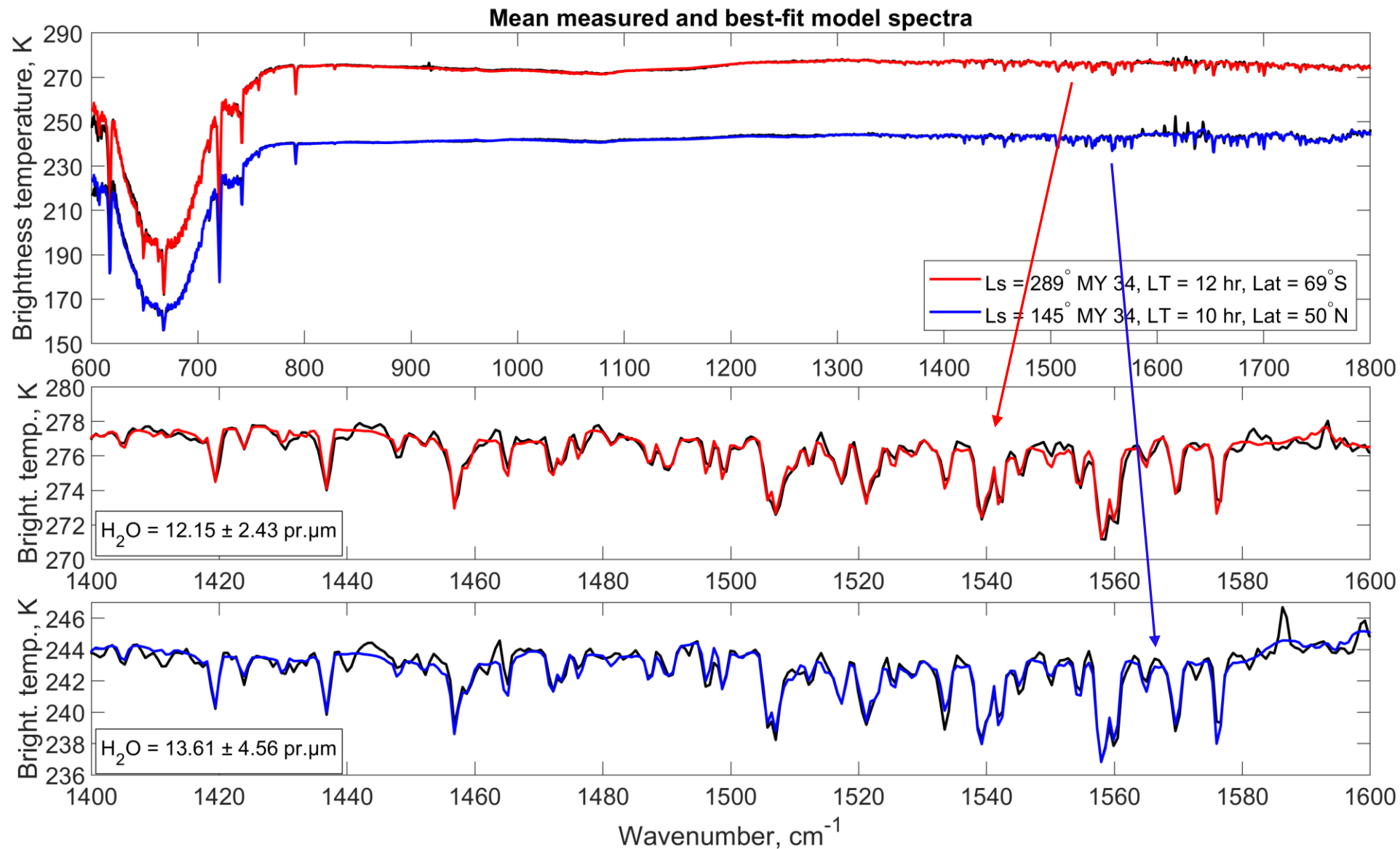
Пример модельного спектра излучения с линиями H₂O, свёрнутый с аппаратной функцией TIRVIM



Сравнение линий поглощения воды в свёрнутых модельных спектрах (с разным уширением H₂O–CO₂)

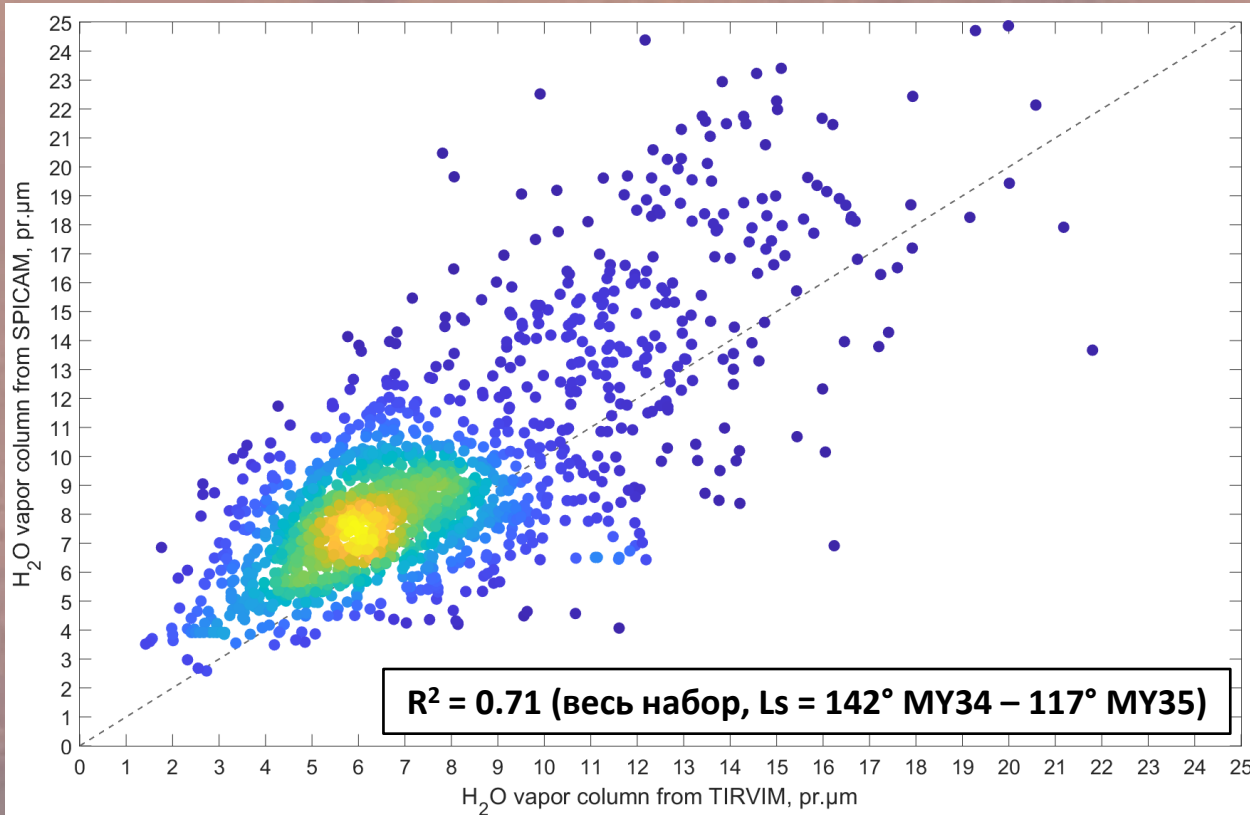


Восстановленное общее содержание водяного пара в атмосфере по усреднённым измерениям TIRVIM



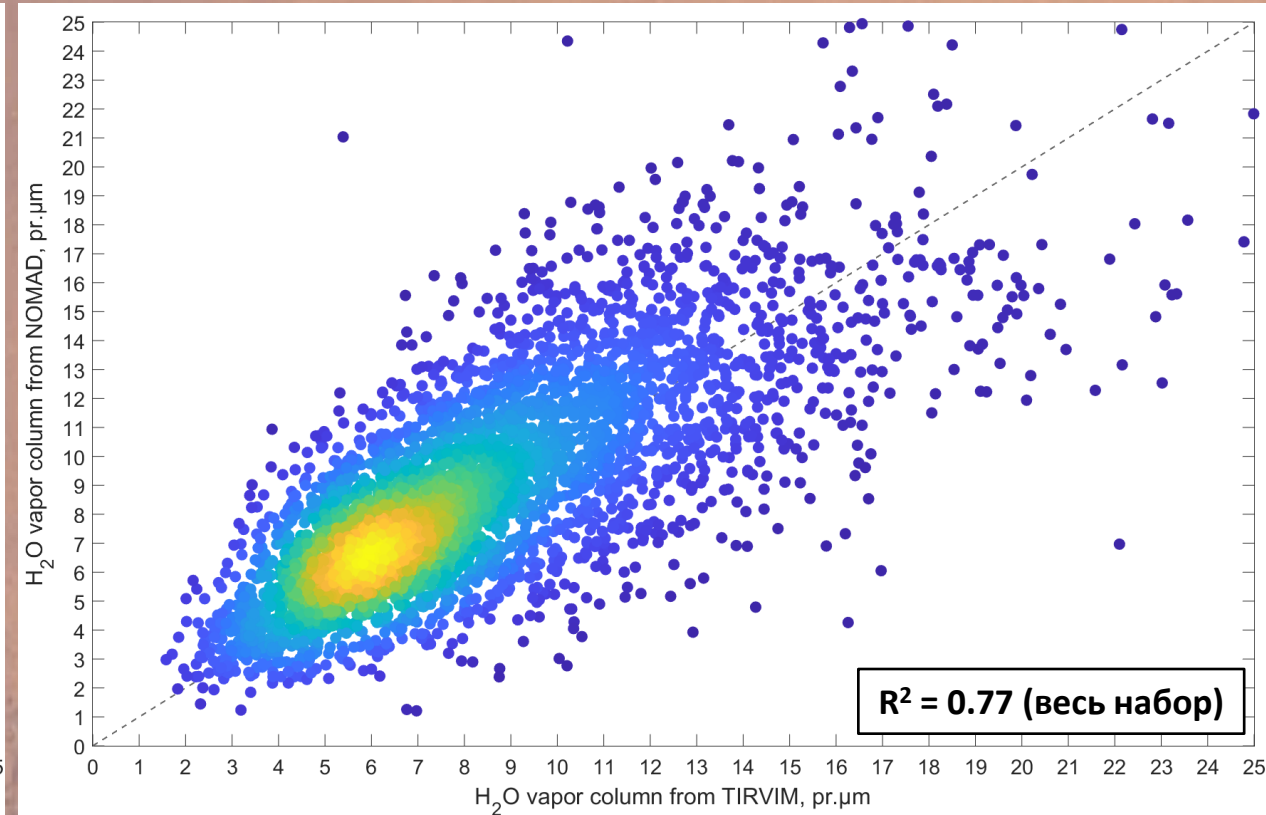
Корреляция с одновременными измерениями SPICAM/MEХ и NOMAD/TGO

SPICAM/Mars Express



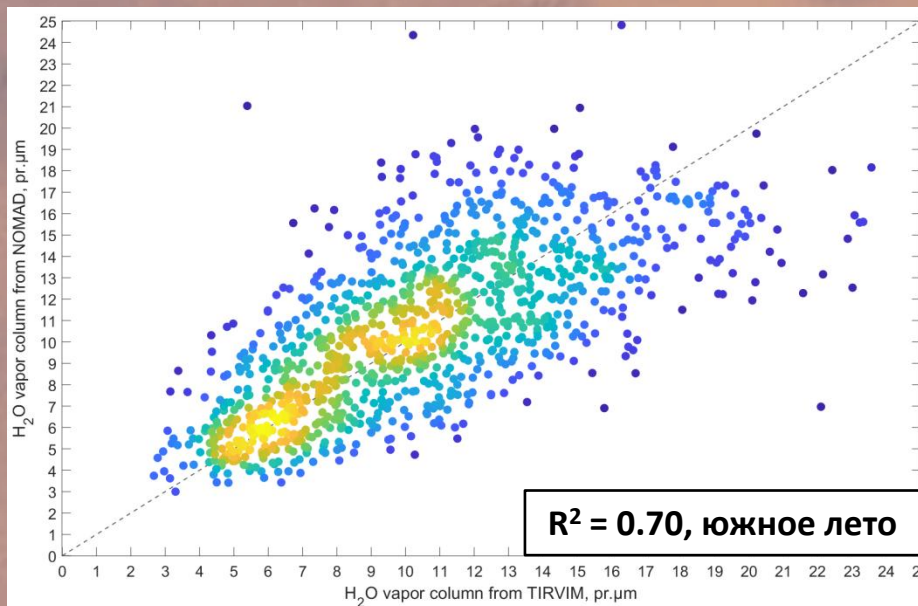
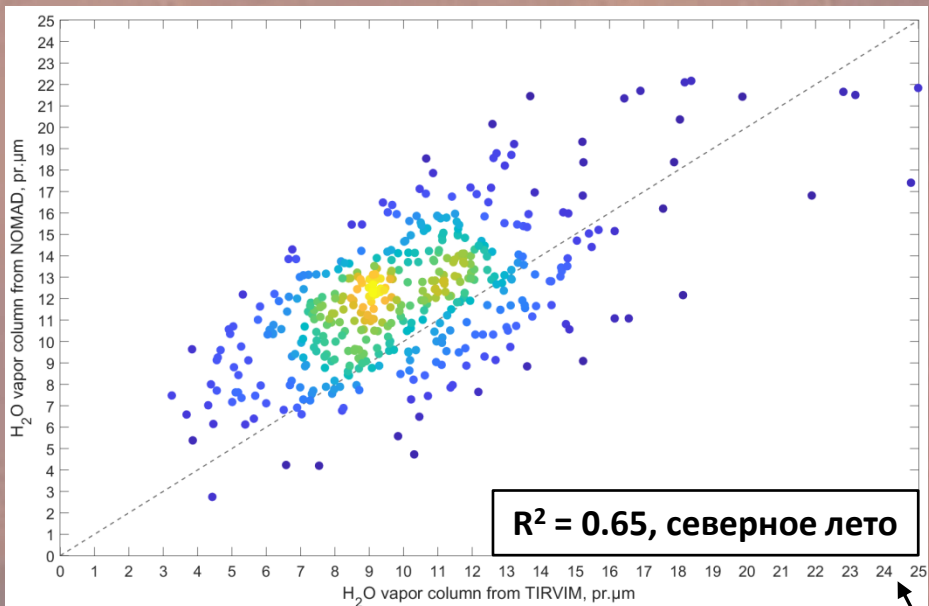
Полоса H₂O: 1.38 мкм (7250 см⁻¹)
3300 одновременных измерений с TIRVIM

NOMAD/TGO

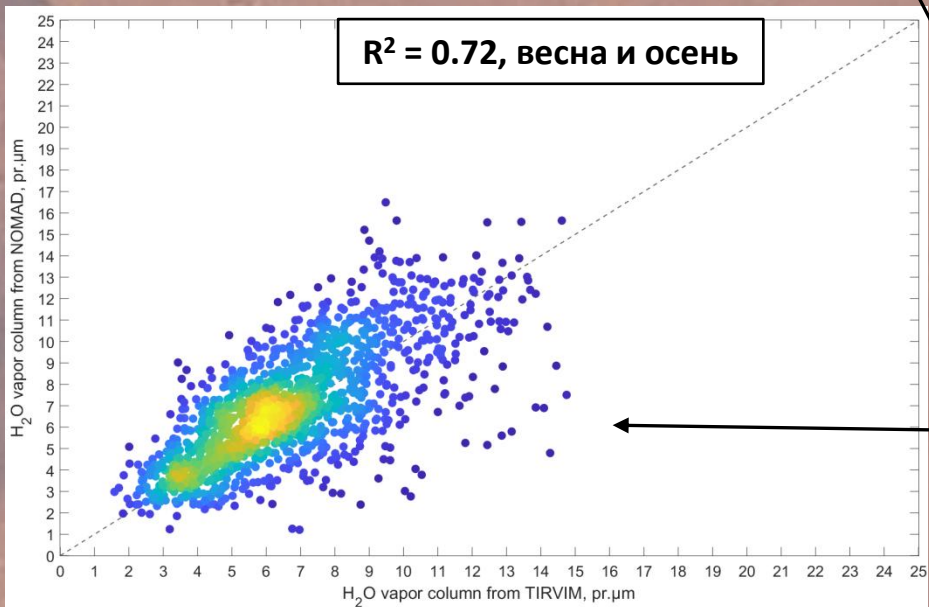


Полоса H₂O: 2.6 мкм (3800 см⁻¹), 169-й порядок дифракции
6310 одновременных измерений с TIRVIM

Корреляция с одновременными измерениями NOMAD/TGO для разных сезонов



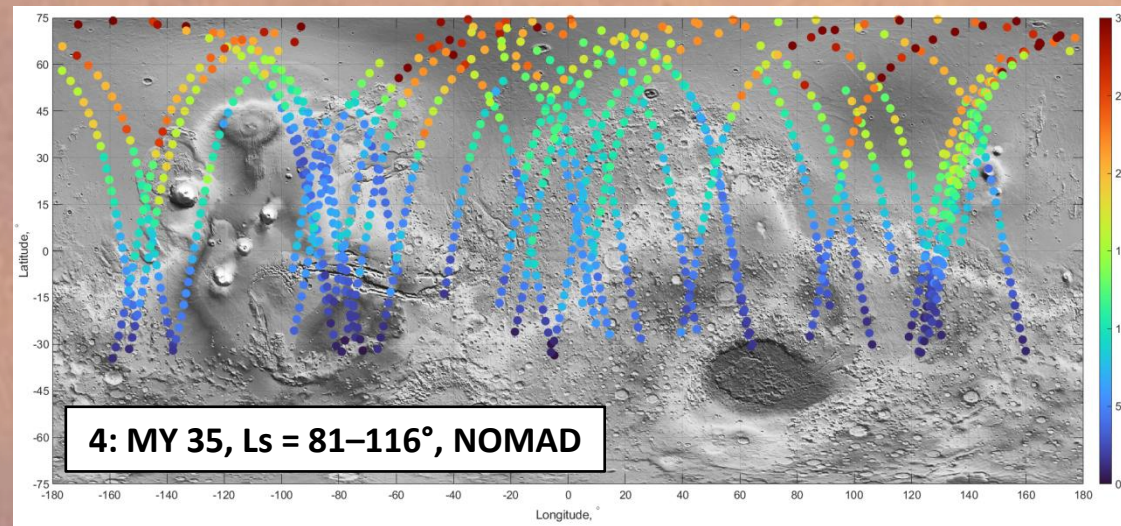
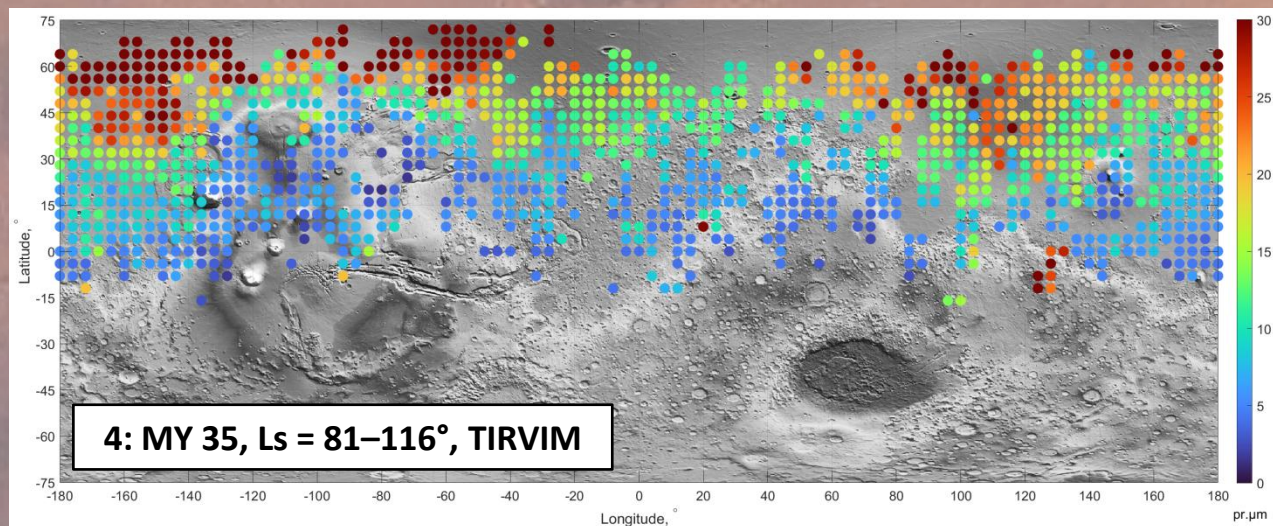
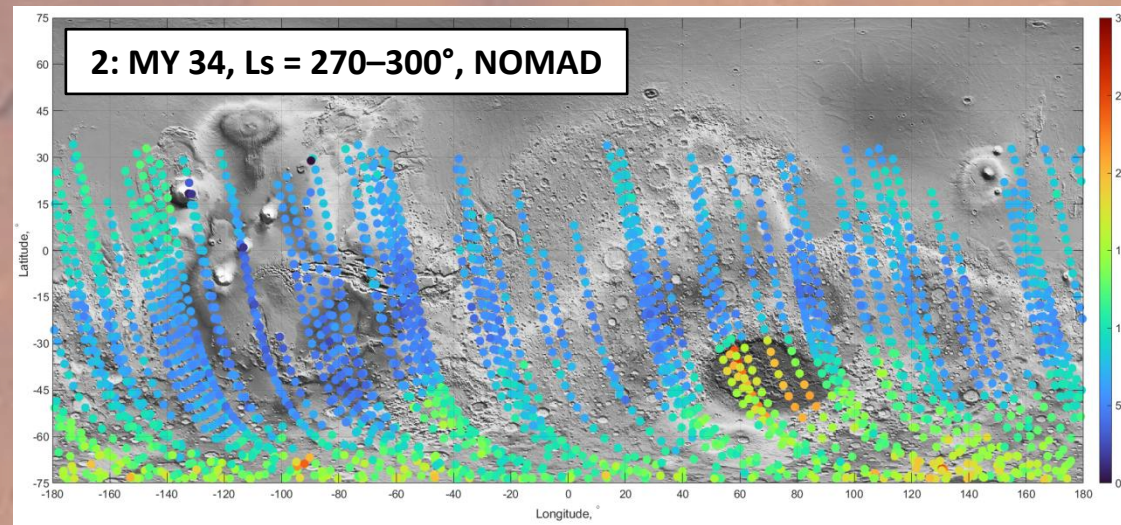
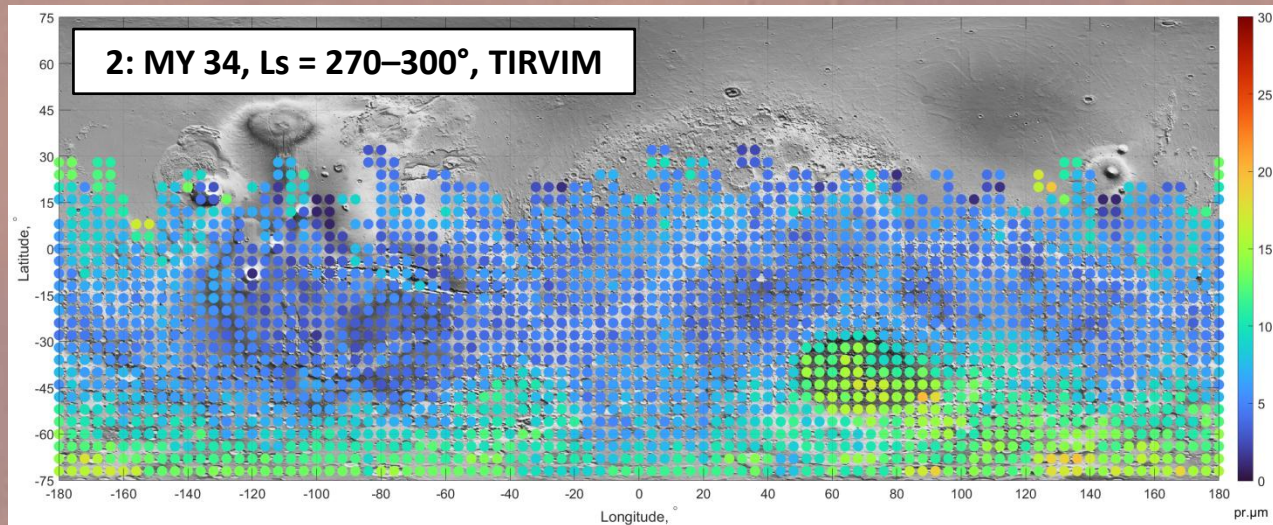
$L_s^\circ = 270-300$ MY 34



Покровие усреднённых данных TIRVIM во время лета в северном полушарии ($L_s^\circ = 81-116$ MY 35) самое разреженное, а сами спектры наиболее шумные в силу режима работы прибора, поэтому погрешность восстановления высокая

Среднее значение содержания водяного пара в нелетних полушариях ~ 6 мкм

Сравнение карт распределений воды по данным TIRVIM и NOMAD (169-й порядок) в летние сезоны



Покрытие данных TIRVIM лучше, чем 167-й и 169-й порядки NOMAD. 168-й порядок NOMAD содержит в разы больше измерений, однако они визуальнo намного более шумные. Отфильтровать данные NOMAD и объединить их из разных порядков не представляется пока возможным из-за отсутствия данных о погрешности восстановления из измерений NOMAD.

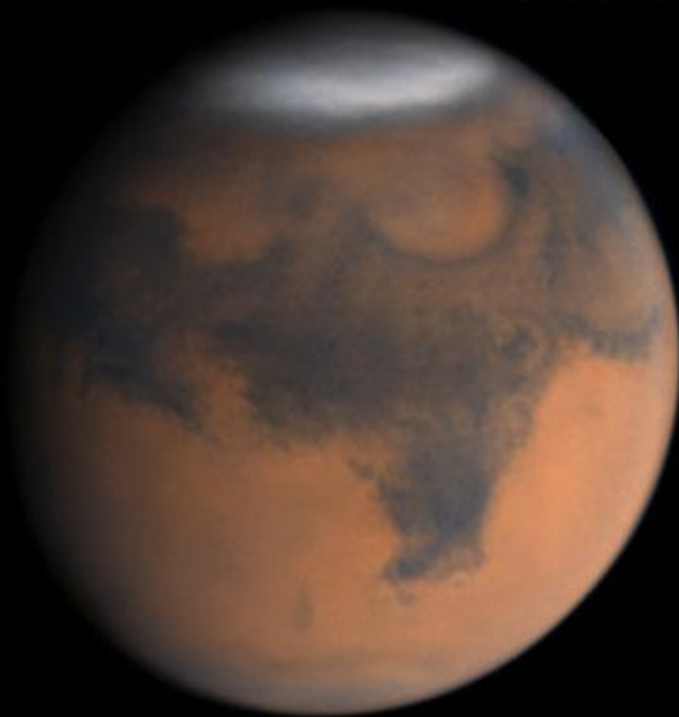
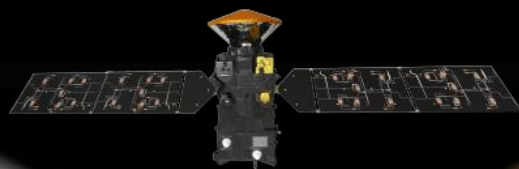
Заключение

- По измерениям ACS TIRVIM на борту КА ExoMars TGO в диапазоне $1400\text{--}1800\text{ см}^{-1}$, который содержит 6-мкм полосу H_2O , может быть восстановлено общее содержание водяного пара (в микронах осадённой воды) в атмосфере Марса. При этом профиль относительного содержания H_2O берётся из базы данных и не варьируется, а восстанавливается только множитель к нему.
- TIRVIM доступны только дневные наблюдения водяного пара из-за высокого шума (до $1\text{ мВт/м}^2/\text{ср/см}^{-1}$) относительно сигнала, который меньше шума прибора при $T_{\text{surf}} < 200\text{--}220\text{ К}$. В итоге, водяной пар наблюдается обычно лишь с 7 ч до 19 ч местного времени, в другое время линии H_2O не разрешаются. По той же причине осложнено восстановление содержания пара на околополярных широтах, в зимние сезоны и во время сильных пылевых бурь.
- Обработано ~ 230 тыс. усреднённых спектров. Полученные сезонная среднемеридиональная карта и набор пространственных карт среднего дневного содержания пара H_2O в атмосфере демонстрируют типичный сезонный цикл с повышенным содержанием воды летом в соответствующих полушариях. Также наблюдается антикорреляция пара с облаками водяного льда в сезон афелия.
- Недоступность восстановления содержания H_2O вечером и утром делает невозможным сравнение результата с затменными экспериментами. Поэтому полученное содержание воды было сопоставлено с одновременными наблюдениями водяного пара в надир в экспериментах SPICAM/Mars Express и NOMAD/TGO. Данные TIRVIM лучше коррелируют с данными NOMAD.
- Неопределённости восстановления содержания H_2O из-за разной параметризации уширения линий H_2O в CO_2 достигают 20%, но лучше всего походит база данных Gamache. Для корректного восстановления и аккуратного сравнения нужно точное уширение.
- При усреднении большого количества спектров TIRVIM, заданных на разных сетках волновых чисел, происходит «затупление» центров линий H_2O , что приводит к недооценке восстановленного содержания водяного пара.
- Покрытие измерений TIRVIM стало более редким ближе к концу работы прибора, а инструментальный шум вырос вследствие более экономной работы холодильника. Это усложнило восстановление содержания H_2O летом в северном полушарии MY 35, в результате чего были серьёзно ограничены широты и увеличены погрешности, что видно на картах и в сравнениях с NOMAD.

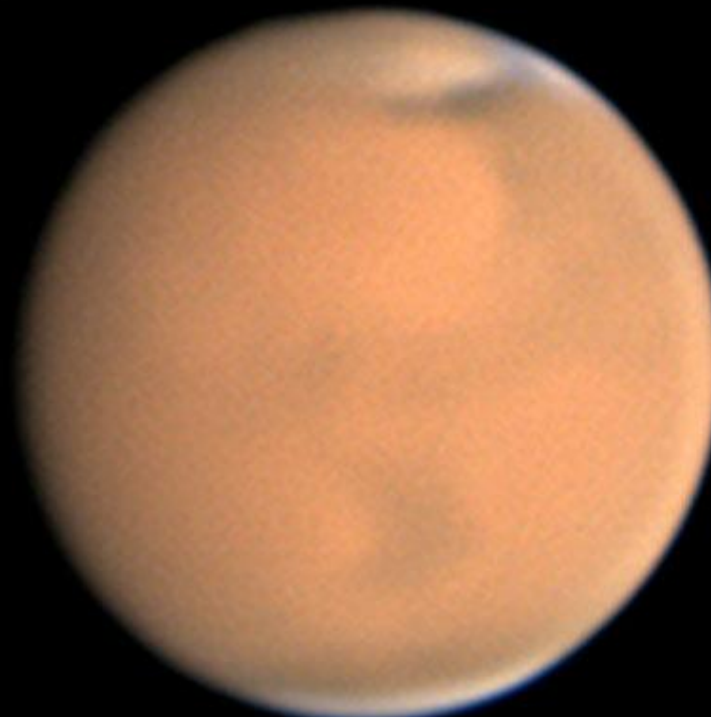
Список литературы

- Vago J., Witasse O., Svedhem H., Baglioni P., Haldemann A., et al. (2015). ESA ExoMars program: The next step in exploring Mars. *Solar System Research*, V. **49** № 7, 518–528
- Korablev, O., Montmessin, F., Trokhimovskiy, A., Fedorova, A. A., Shakun, A. V., Grigoriev, A. V., et al. (2018). The atmospheric chemistry suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 trace gas orbiter. *Space Science Reviews*, **214**(1), 7
- Shakun A., Ignatiev I., Luginin M., Grigoriev A., Moshkin B., et al. ACS/TIRVIM: Calibration and first results. *Conf. Infrared remote sensing and instrumentation XXVI*. SPIE, 2018, id. 107650E
- Rodgers, C. D. (2000). Inverse methods for atmospheric sounding: Theory and practice. World Scientific
- П.В. Власов, Н.И. Игнатьев, О.И. Кораблев, А.А. Фёдорова, А.В. Григорьев, и др. 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
- D. Crisp, D.A. Allen, D.H. Grinspoon, J.B. Pollack (1991). The Dark Side of Venus: Near-Infrared Images and spectra from the Anglo-Australian Observatory. *Science*, **253**, 1263–1266
- M.D. Smith (2002). The annual cycle of water vapor on Mars as observed by the Thermal Emission Spectrometer. *Journal of Geophysical Research*, **107**(E11), 5115
- L.R. Brown (2007). CO₂-broadened water in the pure rotation and v₂ fundamental regions. *Journal of Molecular Spectroscopy*, **246**, 1–21
- R.R. Gamache (2016). A spectral line list for water isotopologues in the 1100–4100 cm⁻¹ region for application to CO₂-rich planetary atmospheres. *Journal of Molecular Spectroscopy*, **326**, 144–150
- Montmessin F., Korablev O., Lefèvre F., Bertaux J.-L., Fedorova A., Trokhimovskiy A., et al. (2017). SPICAM on Mars Express: A 10 year in-depth survey of the Martian atmosphere. *Icarus*, **297**, 195–216
- Crismani M.M.J., Villanueva G.L., Liuzzi G., Smith M.D., Knutsen E.W., Daerden F., et al. (2021). A global and seasonal perspective of Martian water vapor from ExoMars/NOMAD. *JGR: Planets*, **126**, e2021JE006878

Спасибо за внимание!



June 8, 2018



July 7, 2018