

Многолетние наблюдения минеральной пыли и ледяных облаков в атмосфере Марса в эксперименте СПИКАМ на КА Марс-Экспресс

Федорова А.А. (1), Лугинин М.С. (1), Кораблев О.И. (1), Монтмессан Ф. (2), Берто Ж.-Л. (2)

МЕЖДУНАРОДНЫЕ ЕЖЕГОДНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

(Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов)

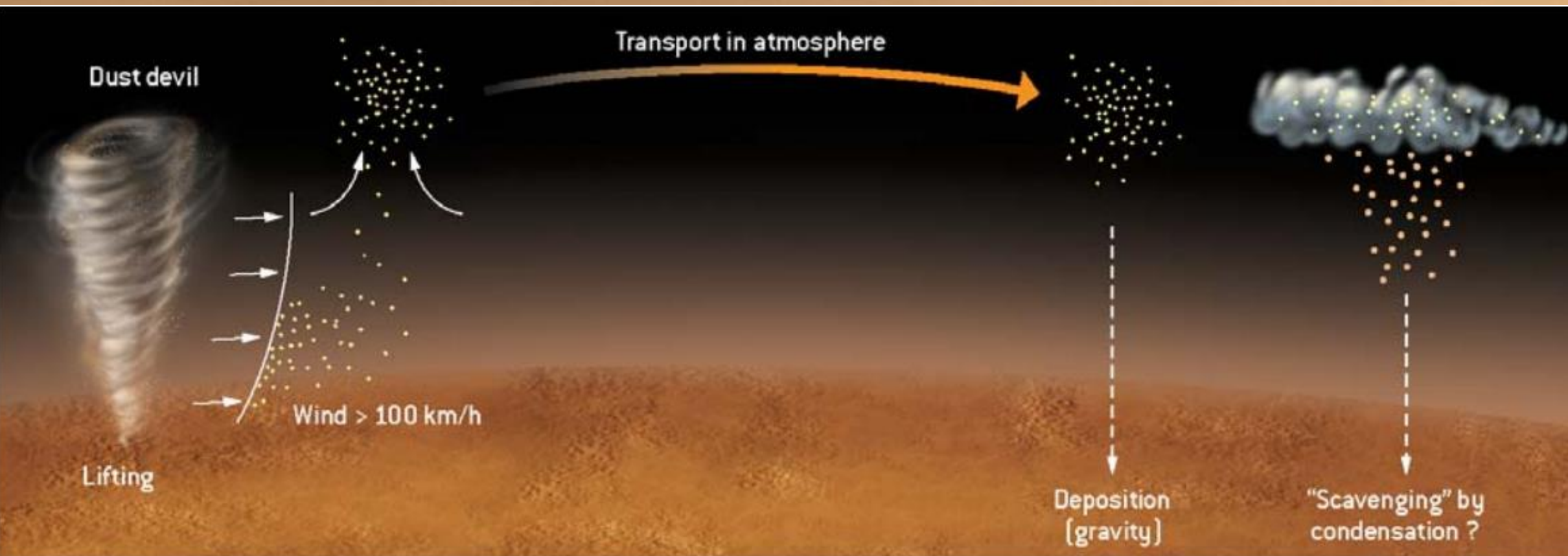
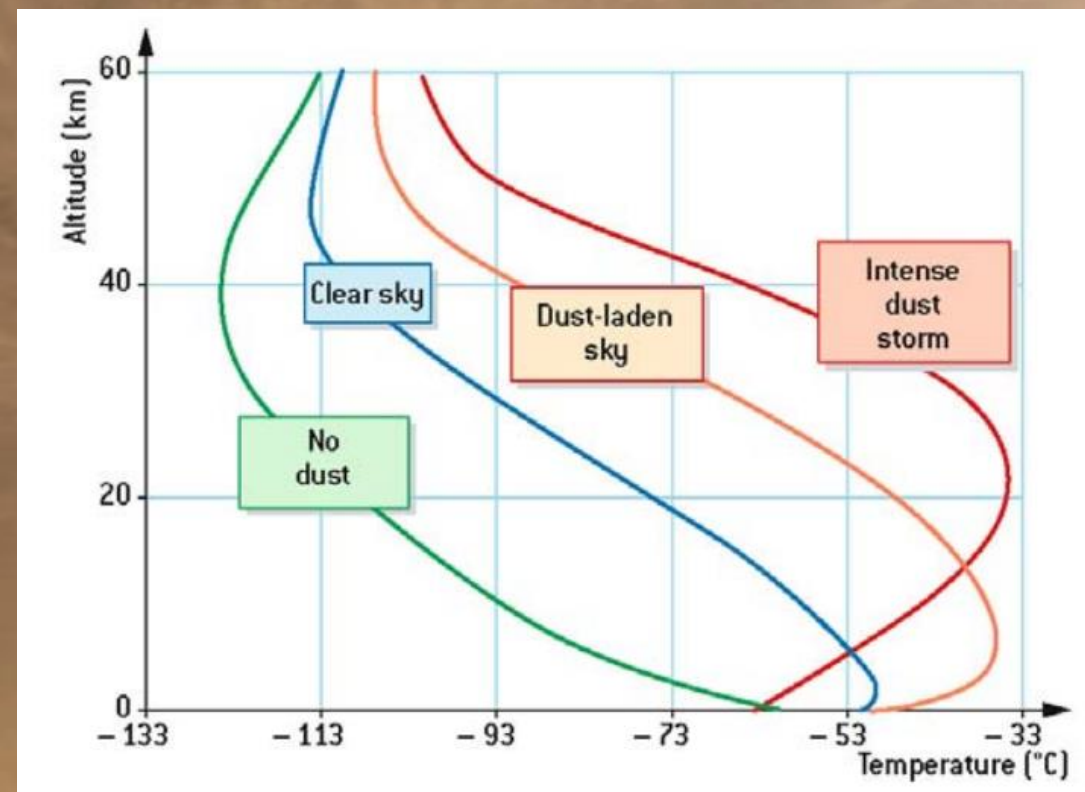
¹ *Институт космических исследований
РАН, Москва, 117997, Россия*

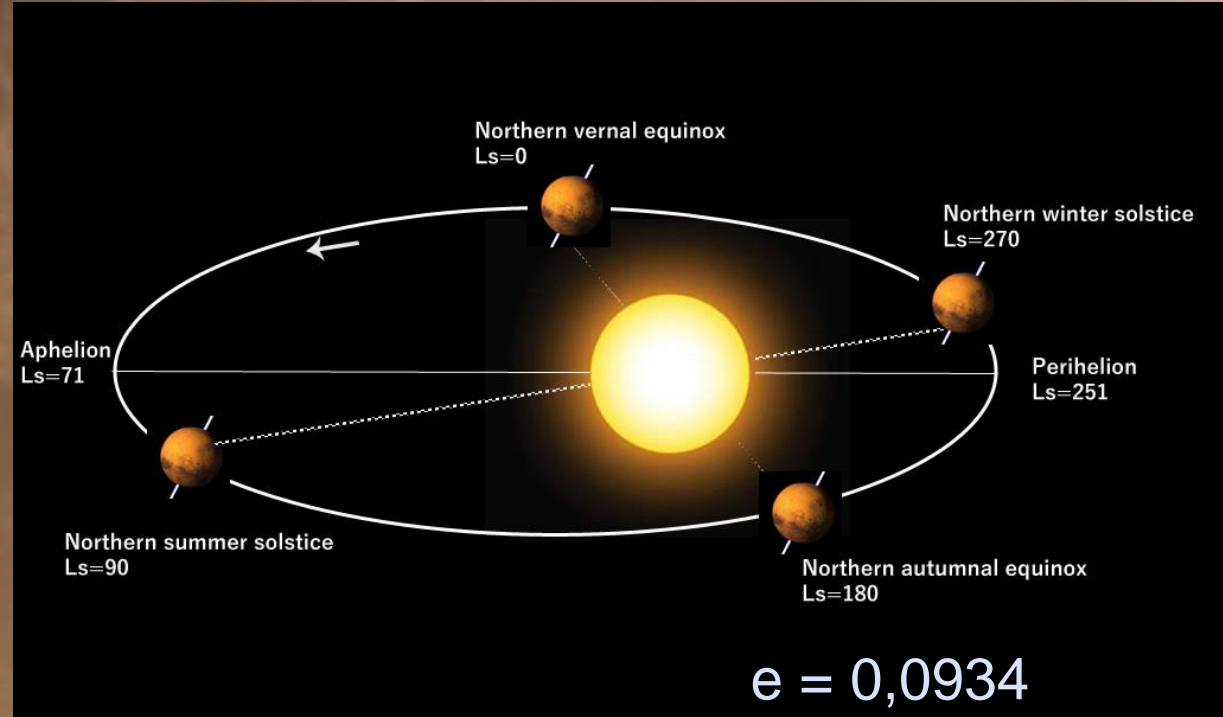
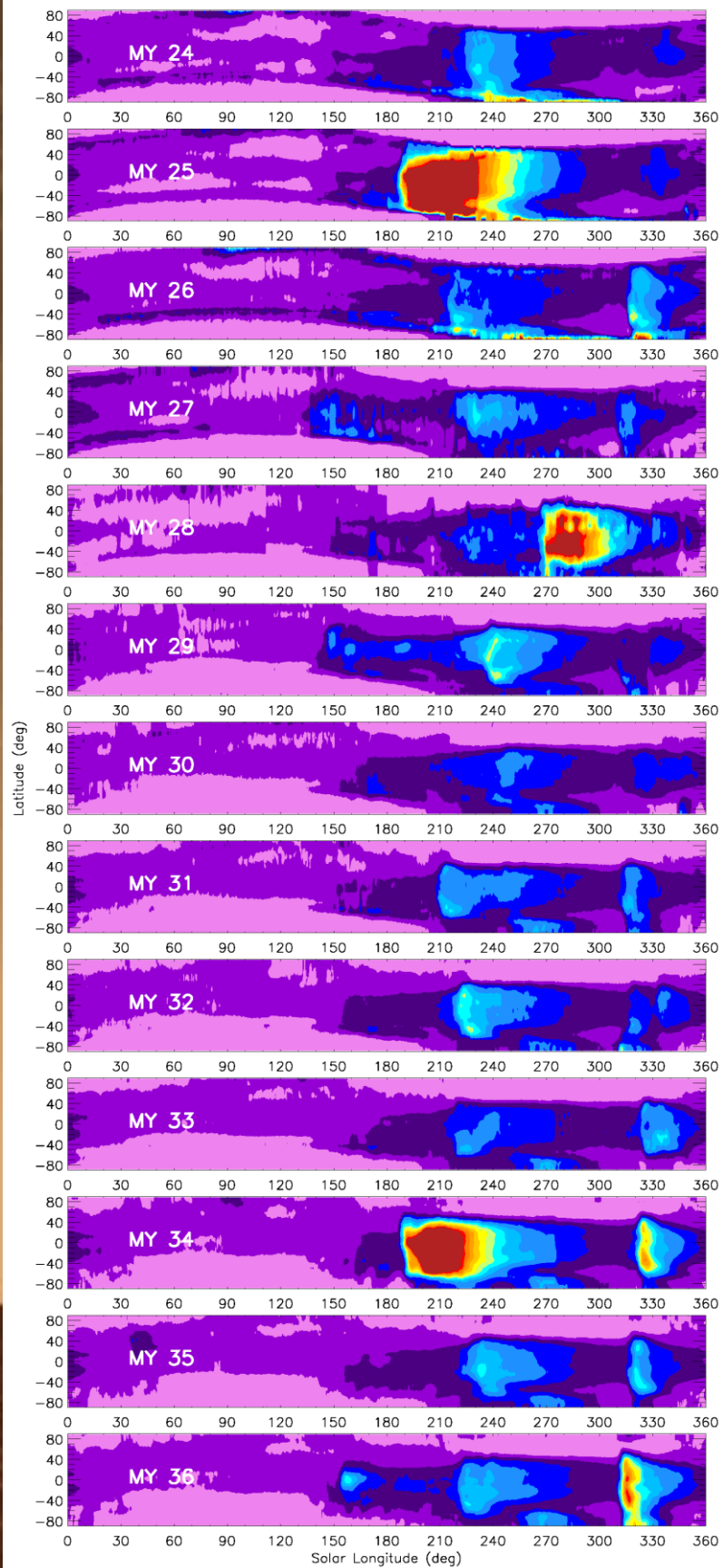
² *LATMOS/CNRS, 11, boulevard
D'Alembert, 78280 Guyancourt, France*



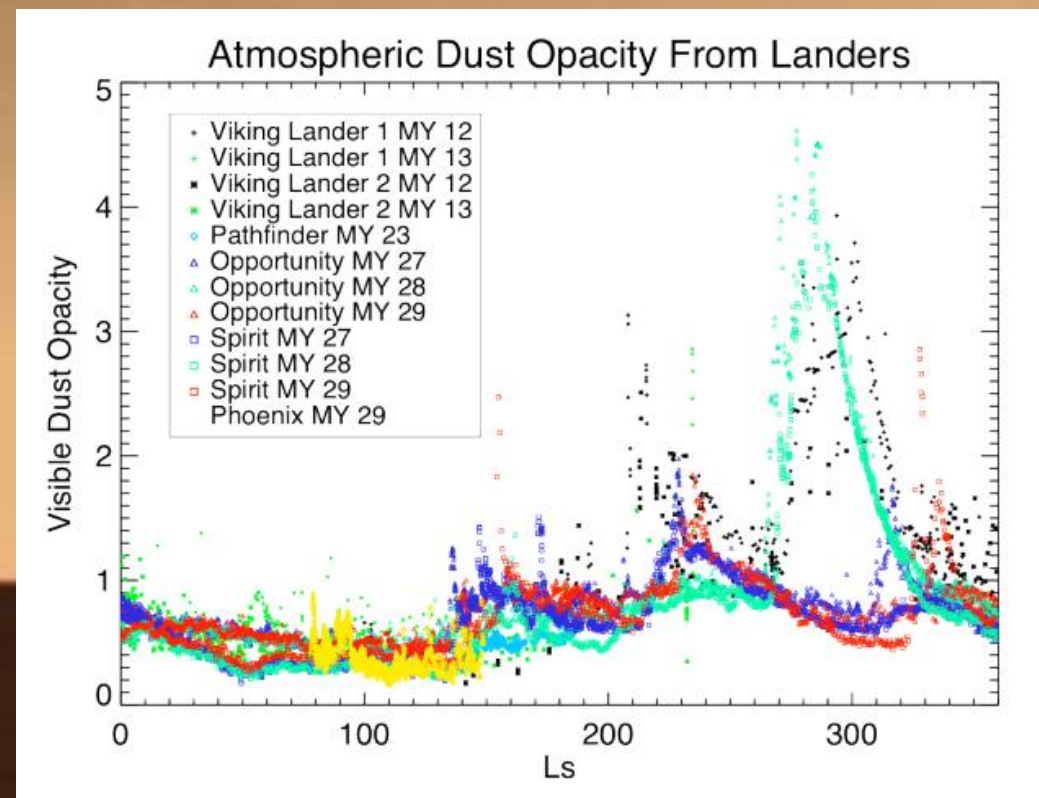
Пыль и лед в атмосфере Марса

- Источник пыли - реголит: сильное влияние на температуру (как пыль пустыни)
- Ядра конденсации для водяного пара.
- Ледяные частицы (H_2O , CO_2): конденсация (аналог перистых облаков)
- Динамический перенос, седиментация, вертикальное распределение;





Пылевой цикл Марса

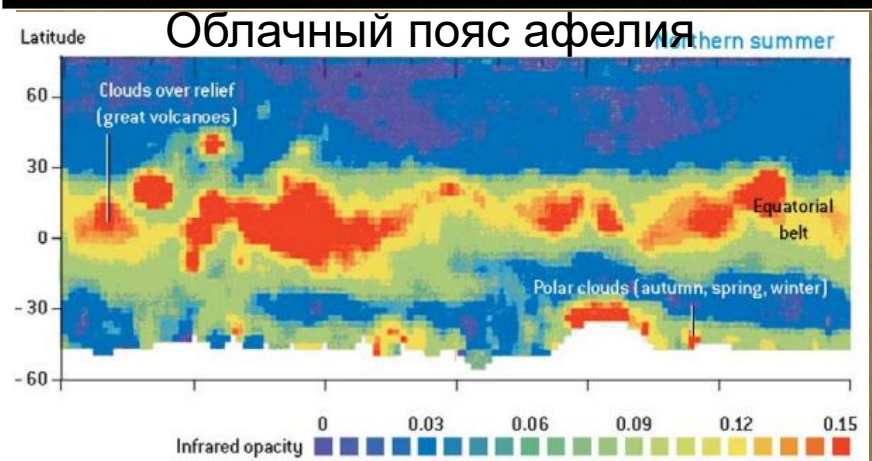
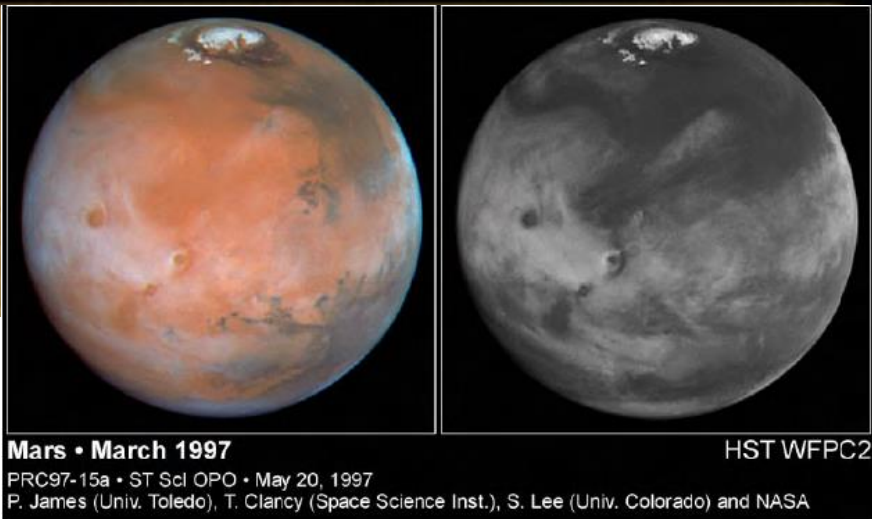
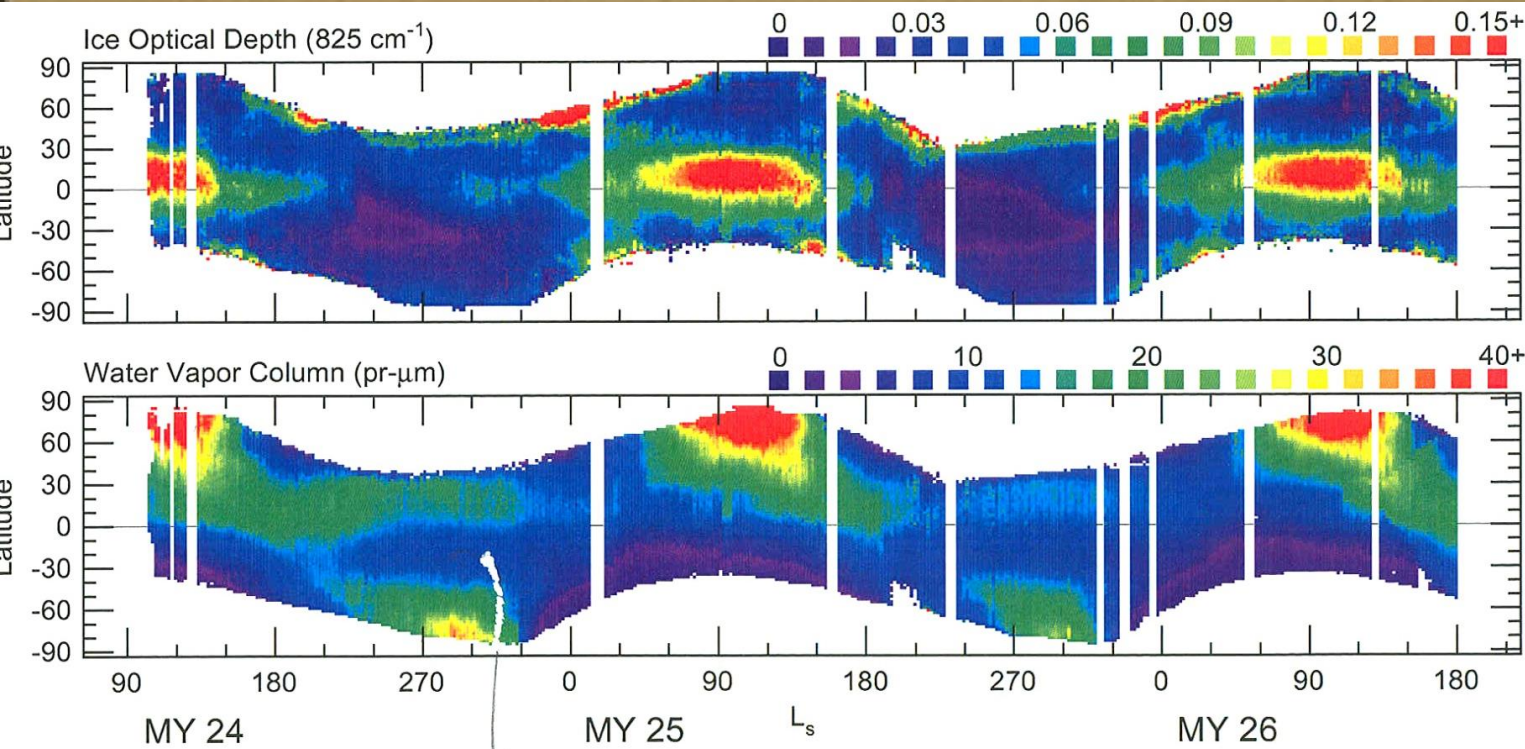


Montabone et al., 2015; Kahre et al., 2017

Облака водяного пара

облачный пояс афелия, полярный вихорик

Сезонный цикл TES/MGS Smith 2004

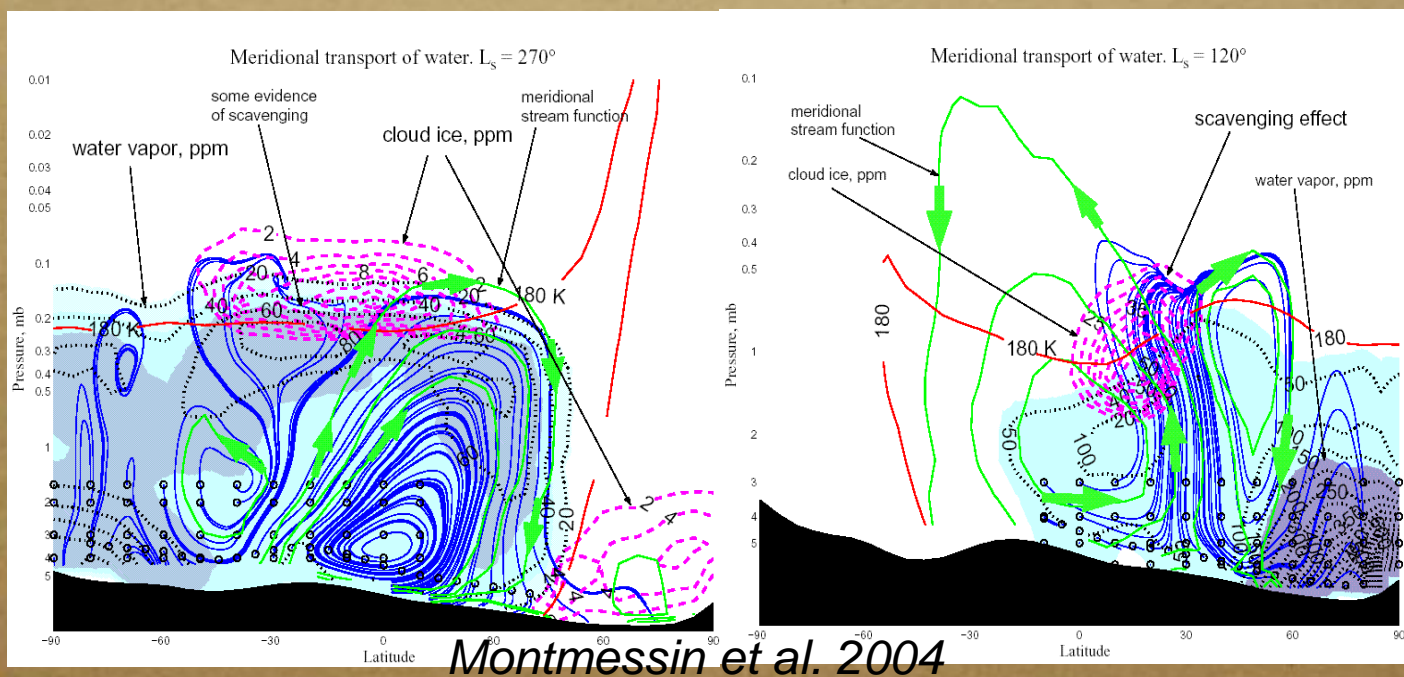


Прямая связь с водяным циклом и конденсацией воды:

- Холодный афелий – высота облаков 10-20 км
- Теплый перигелий – высота облаков 40-60 км

Clancy et al. 1996; Montmessin et al. 2004

Образование облаков из водяного льда влияют на радиационный баланс атмосферы, перенос летучих веществ и фотохимию.



Вертикальное распределение и размеры частиц

Earth and Space Science

RESEARCH ARTICLE

10.1029/2021EA001869

Key Points:

- Assimilation of atmospheric measurements of Mars into a global circulation model is extended to include limb profiles of dust opacity
- Combining nadir and limb profiles of dust opacity enables more accurate recovery of dust vertical structure

Assimilation of Both Column- and Layer-Integrated Dust Opacity Observations in the Martian Atmosphere

Tao Ruan¹, R. M. B. Young^{1,2}, S. R. Lewis³, L. Montabone^{1,4}, A. Valeanu¹, and P. L. Read¹

¹Department of Physics, Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics, University of Oxford, Clarendon Laboratory, Oxford, UK, ²Department of Physics & National Space Science and Technology Center, UAE University, Al Ain, United Arab Emirates, ³School of Physical Sciences, The Open University, Milton Keynes, UK, ⁴Space Science Institute, Boulder, CO, USA

JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: PLANETS, VOL. 118, 980–993, doi:10.1002/jgre.20084, 2013

The impact of a realistic vertical dust distribution on the simulation of the Martian General Circulation

Scott D. Guzewich,¹ Anthony D. Toigo,² Mark I. Richardson,³ Claire E. Newman,³ Elsayed R. Talaat,² Darryn W. Waugh,⁴ and Timothy H. McConnochie⁵

Received 8 February 2013; revised 5 April 2013; accepted 20 April 2013; published 20 May 2013.



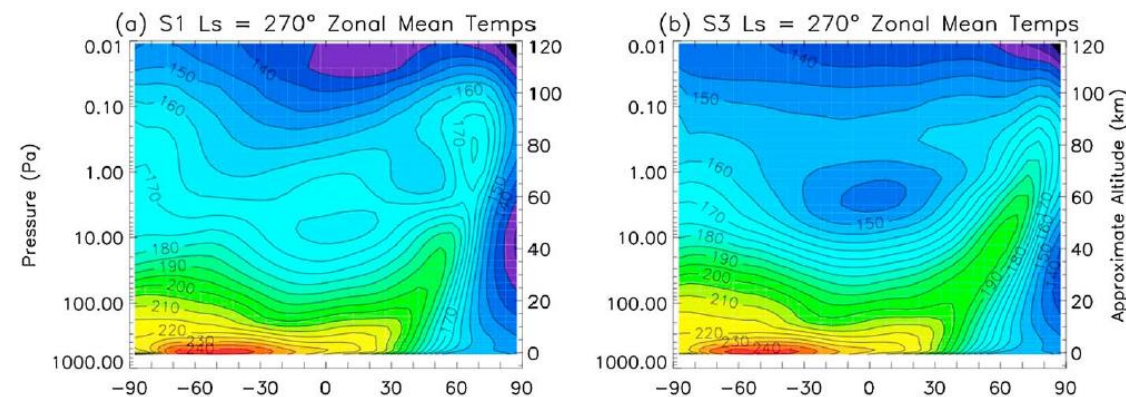
Icarus

Volume 388, December 2022, 115239



Impact of the coagulation of dust particles on Mars during the 2018 global dust storm

T. Bertrand^{a,b}, M.A. Kahre^b, R. Urata^c, A. Määttänen^d, F. Montmessin^e, R.J. Wilson^b, M.J. Wolff^f



Planetary and Space Science 208 (2021) 105346

Contents lists available at ScienceDirect



Planetary and Space Science

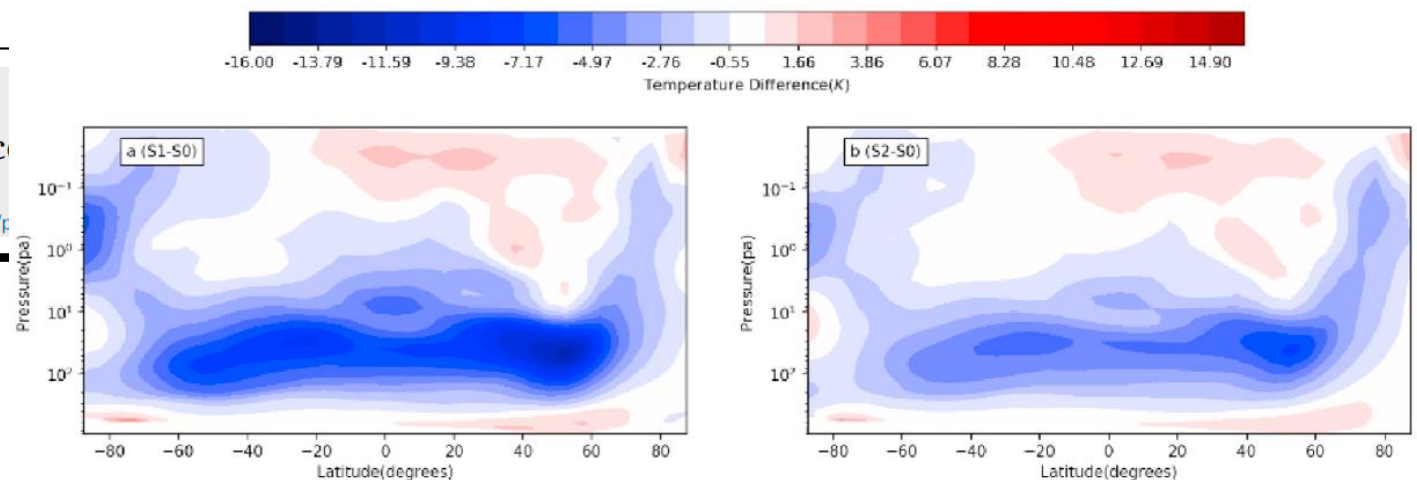
journal homepage: www.elsevier.com/locate/jgr

Effect of dust particle size on the climate of Mars

Yemeng Wang^a, Kim-Chiu Chow^{a,b,*}, Jing Xiao^{a,b}, Chi-Fong Wong^a

^a State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau

^b CNSA Macau Center for Space Exploration and Science, Macau



Вертикальное распределение и размеры частиц

КА: Viking Orbiters, Mars Odyssey, Mars-Express, Mars Reconnaissance Orbiter, MOM, MAVEN. Trace Gas Orbiter

КА	Эксперимент	Годы	Местное время	Высоты, км	Природа аэрозоля	Хар-ки аэрозоля
Марс-Экспресс	SPICAM UV и IR	2004-2024 (IR)	Утро вечер, затмения	0-70	нет	Размеры частиц Численная плотность, mmr
	OMEGA	2004-2012	Дневные лимбы	0-50	Пыль, лед	Размеры частиц, Численная плотность, mmr
MRO	CRISM	2006-2024	Дневные лимбы	0-50	Пыль, лед	Размеры частиц Численная плотность, mmr
	Mars Climate Sounder	2006-2024	Ночь, день, лимбы	0-70	Пыль, лед	Непрозрачность к плотности, массовый коэф-т перемешивания (mmr)
Trace Gas Orbiter	ACS	2018-2024	Утро вечер, затмения	0-80	Пыль, лед	Размеры частиц, численная плотность, mmr
	NOMAD	2018-2024	Утро вечер, затмения	0-80	Пыль, лед	Размеры частиц, численная плотность, mmr

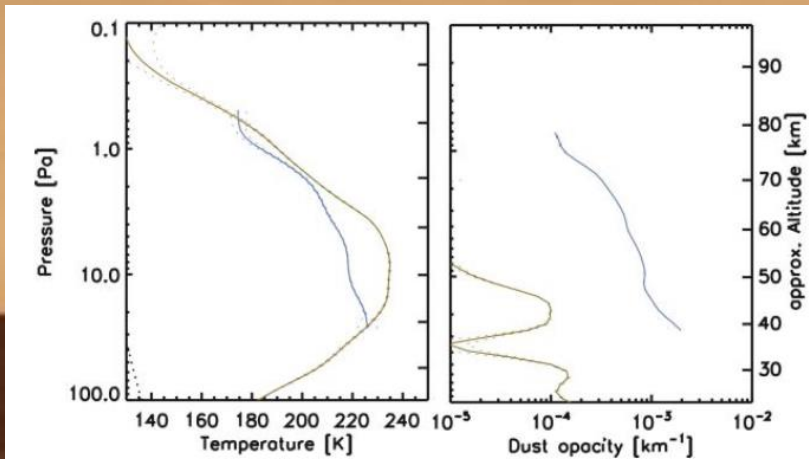
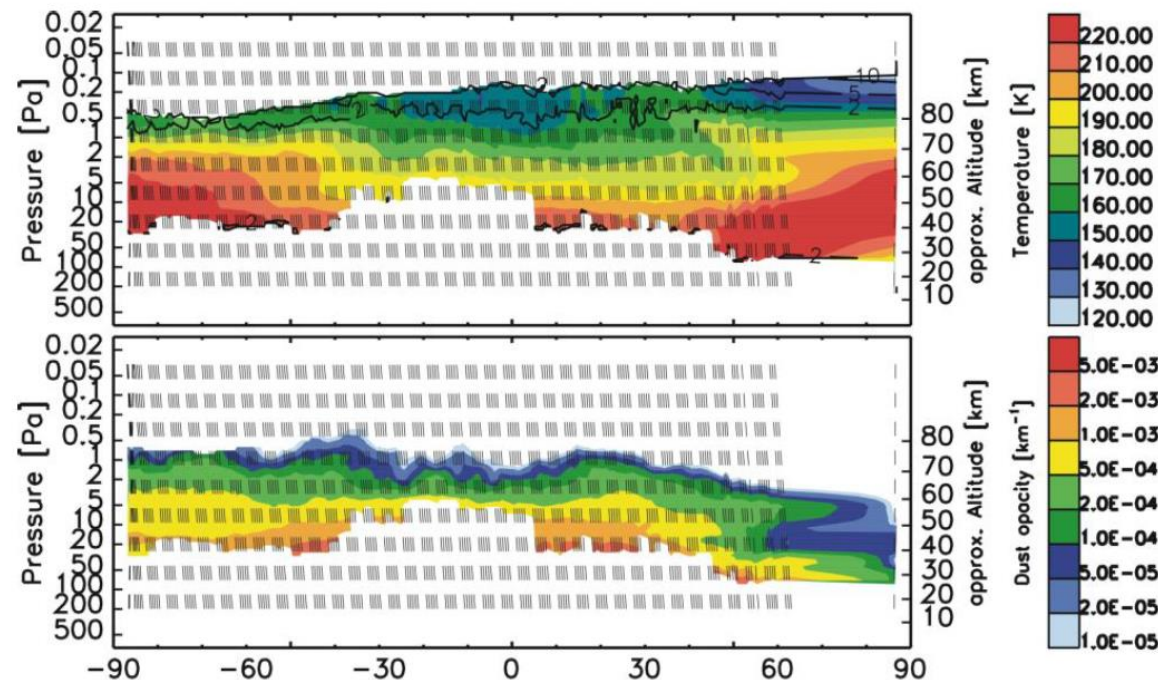
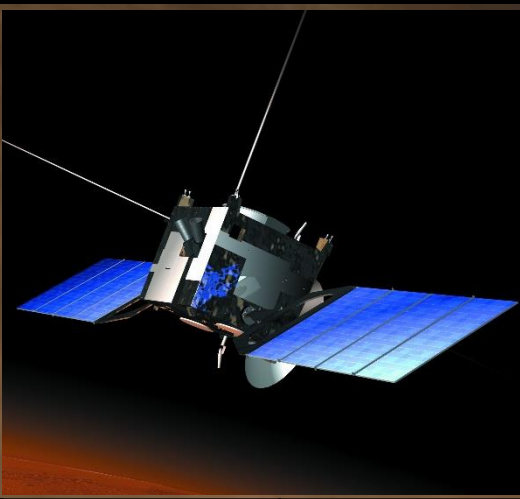


Fig. 2: Individual temperature (left) and dust (right) profiles representative for southern high latitudes (blue) and northern high latitudes (brown) on July 12, 2007.

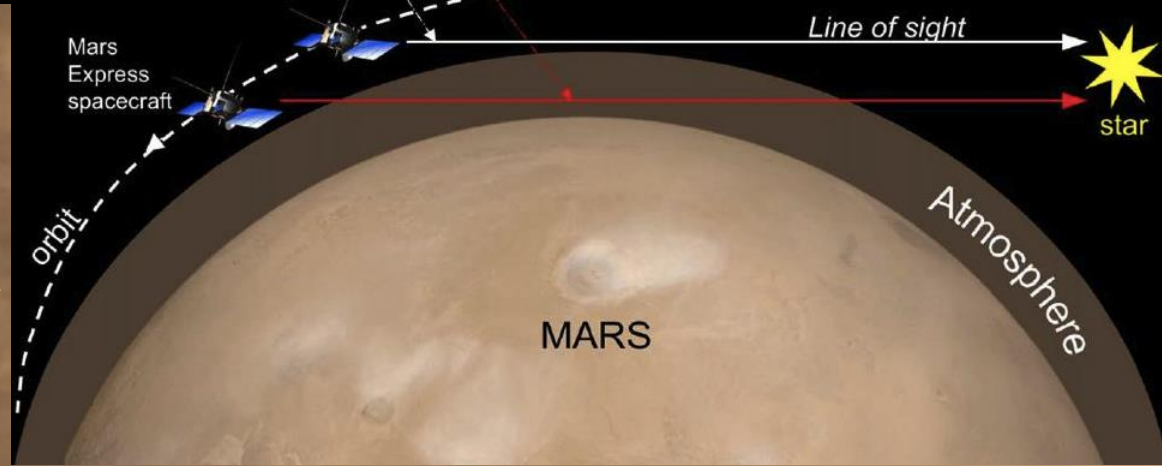


MCS/MRO,
Kleinbohl et
al., 2014



СПИКАМ Марс-Экспресс

2004-2024



Channel	Modes	Spectral range	Spectral resolution	Species in SO
UV	Nadir Occultations	118-320 nm	>100	Aerosols, CO ₂ , O ₃
Near-IR	nadir Occultations	1-1.7 μm	~2000	Aerosol, CO ₂ , H ₂ O

Occultations:

- Self-calibrated
- H₂O density from 1.38 μm band
- Atmospheric density from 1.43 μm CO₂ band
- Aerosol extinction profiles and particle size distribution with 10 spectral points outside gaseous absorption bands

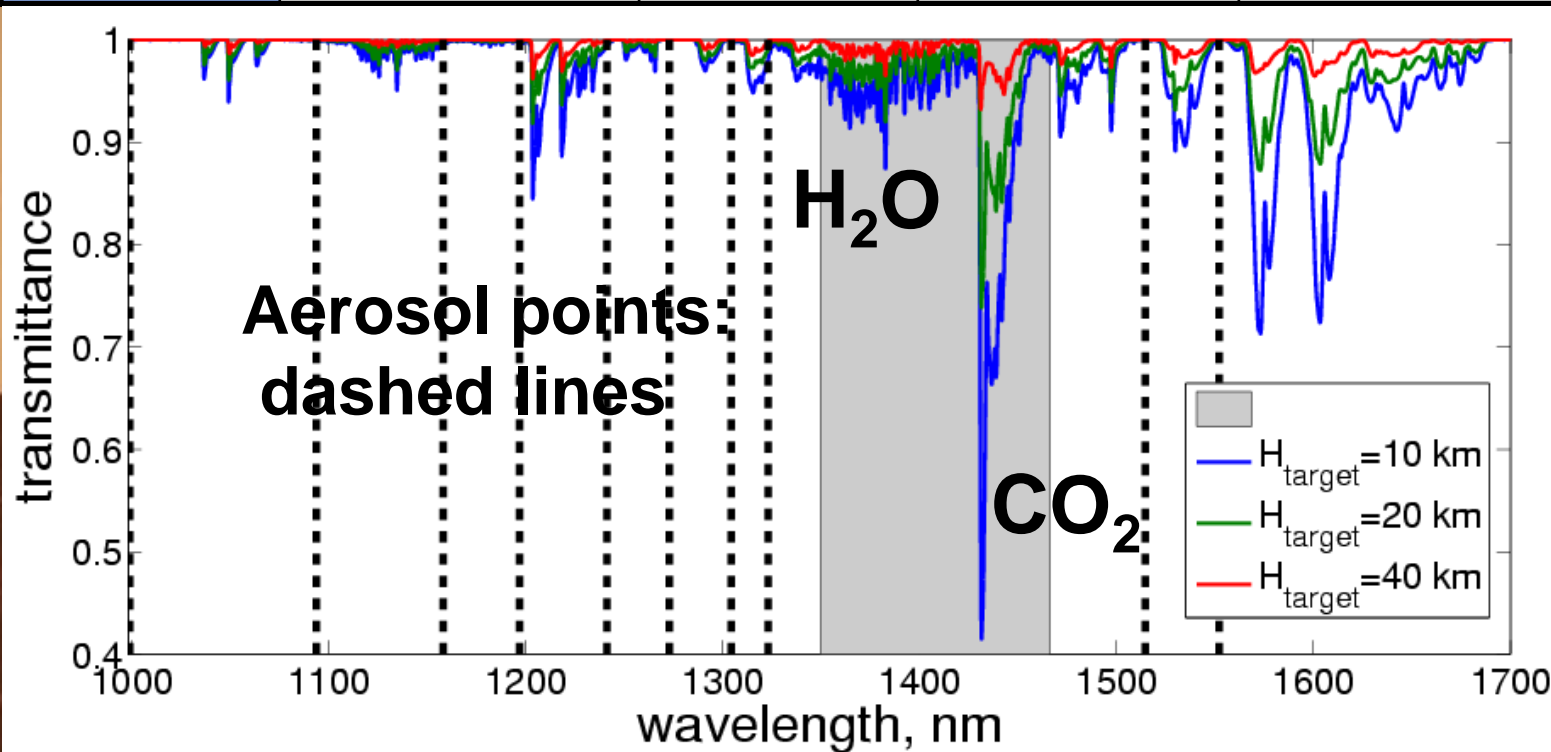
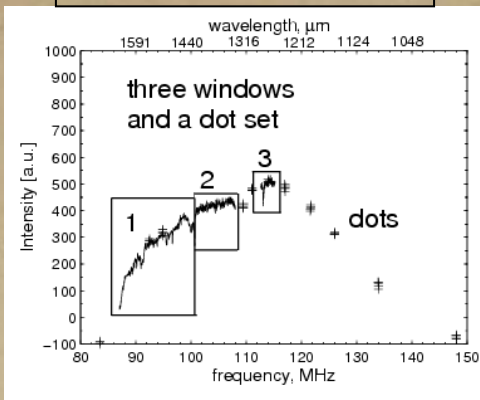
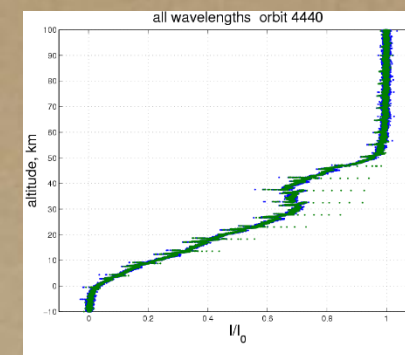
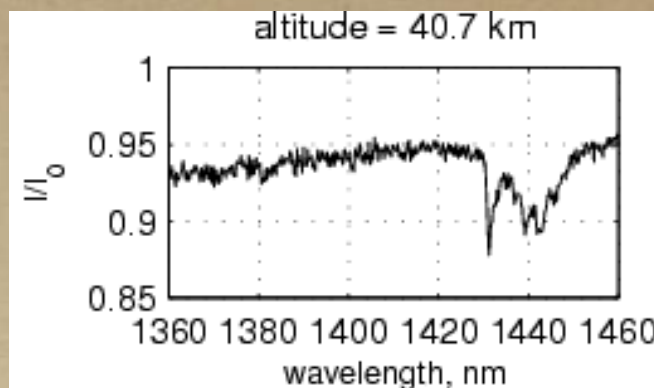


Схема обработки данных

Raw spectra



Using the solar spectrum outside the atmosphere, the transmittance can be obtained $T(z) = I(z)/I_{sun}(z)$



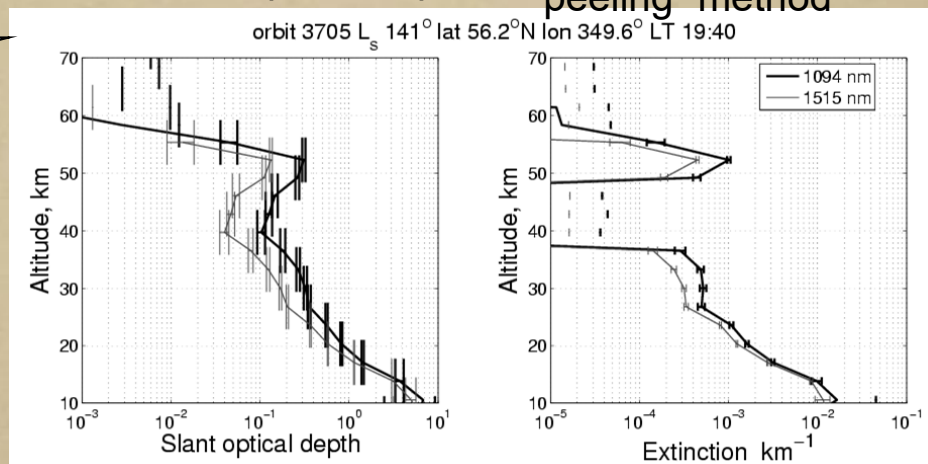
aerosols

gaseous species

$$I/I_0 = \exp(-\tau)$$

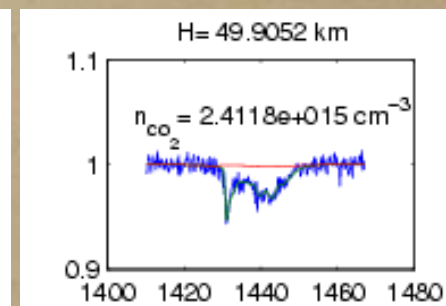
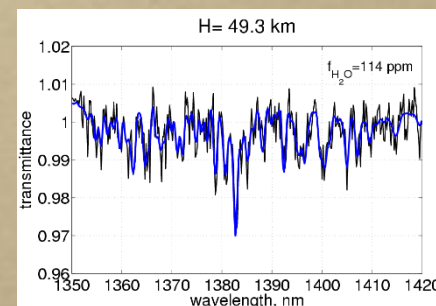
τ – slant optical depth

Extinction using “onion peeling” method



- 1) a) HITRAN (Rothman et al., 2021)
b) Temperature-pressure profile from the Martian Climate Database (MCD 5.3 Millour et al., 2021)
- 2) gaseous local density by inversion method
- 3) Continuum normalized using aerosol opacity profile

10 spectral points outside gaseous bands: 0.99, 1.09, 1.16, 1.19, 1.24, 1.28, 1.30, 1.32, 1.51, 1.55 μm



H₂O density

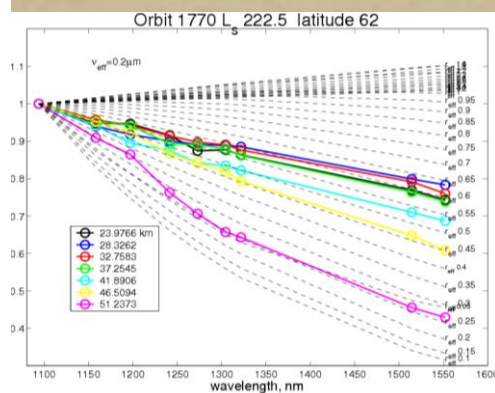
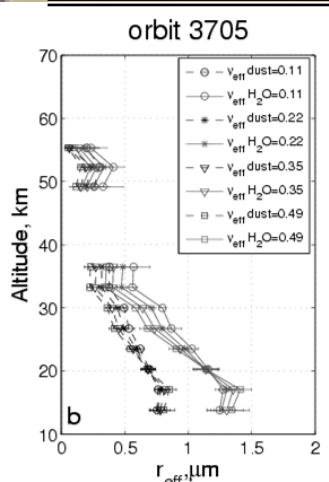
CO₂ density

H₂O mixing ratio

Particle size distribution

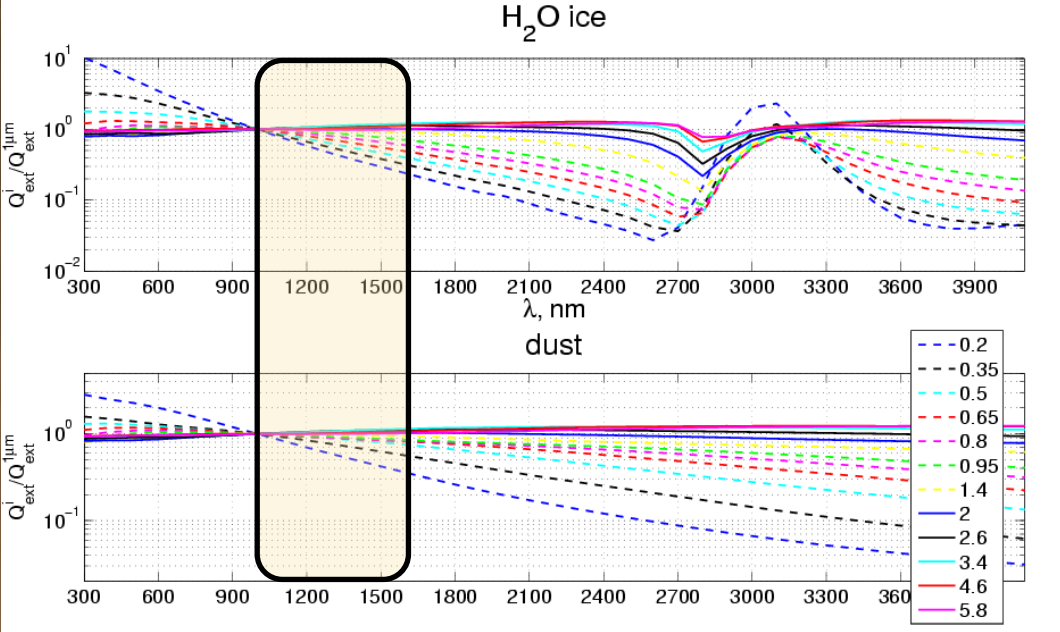
Modeling:

- 1) The Mie theory
- 2) Refractive index for dust and water ice
- 3) A log-normal distribution
- 3) Relation of $\sigma_{ext}(\lambda)/\sigma_{ext}(\lambda_0)$



Fedorova et al., 2009;2014

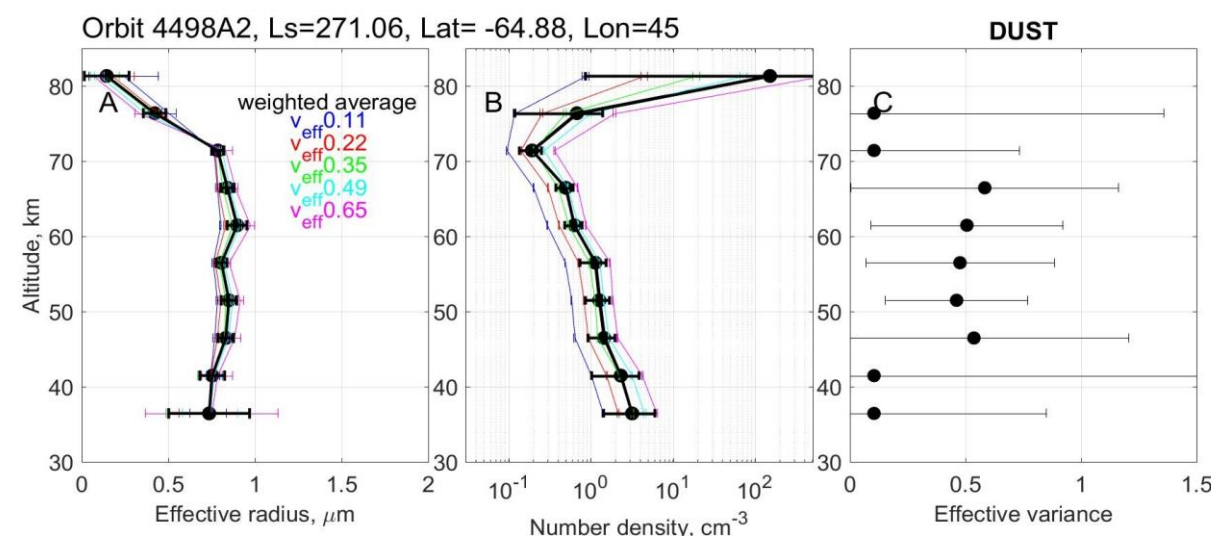
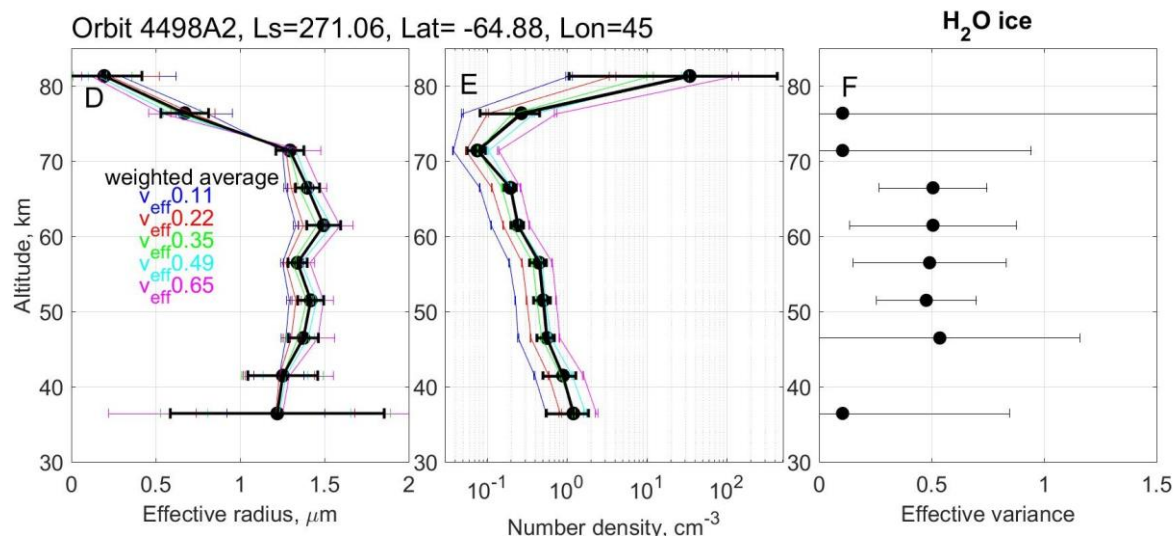
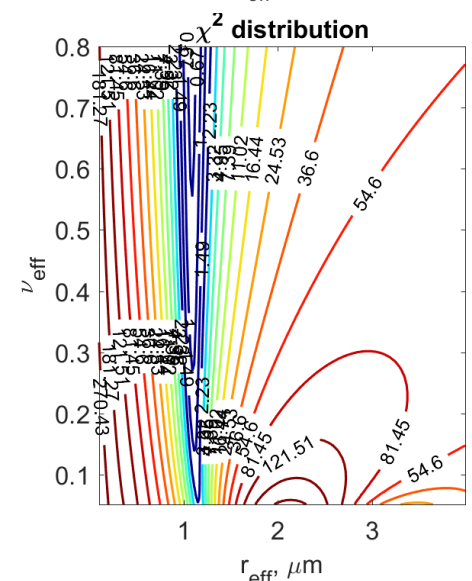
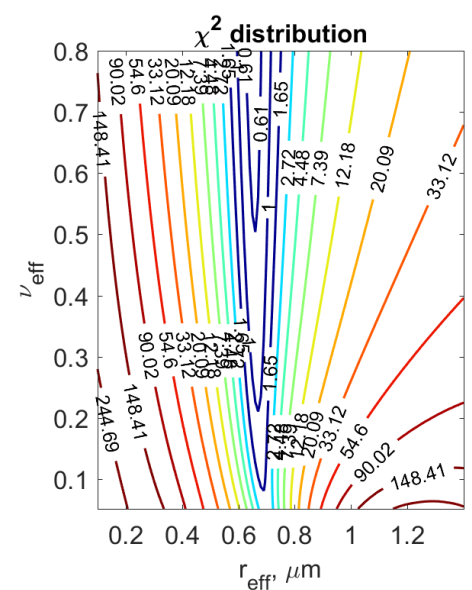
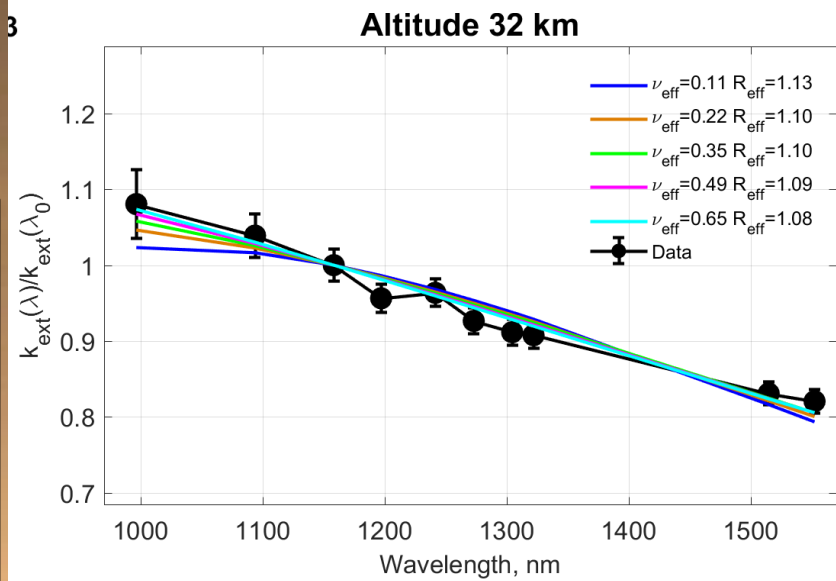
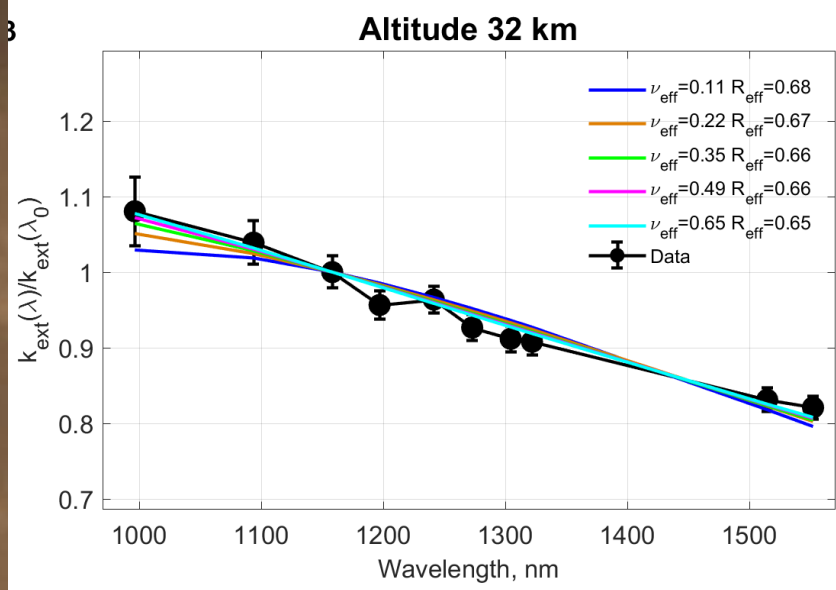
Maltagliati et al., 2011,2013; Fedorova et al., 2009;2018; 2021



Пыль или H₂O лед?

$$n(r) = \frac{\text{Const}}{r} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln r - \ln r_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g}\right)$$

$$r_{\text{eff}} = r_g \exp\left(\frac{5}{2} \ln^2 \sigma_g\right)$$



Предыдущие работы по СПИКАМ ИК

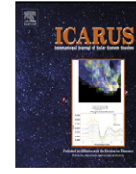
Icarus 200 (2009) 96–117



Contents lists available at ScienceDirect

Icarus

www.elsevier.com/locate/icarus



Icarus 415 (2024) 116030

Contents lists available at ScienceDirect

Icarus

journal homepage: www.elsevier.com/locate/icarus



Solar infrared occultation observations by SPICAM experiment on Mars-Express: Simultaneous measurements of the vertical distributions of H₂O, CO₂ and aerosol

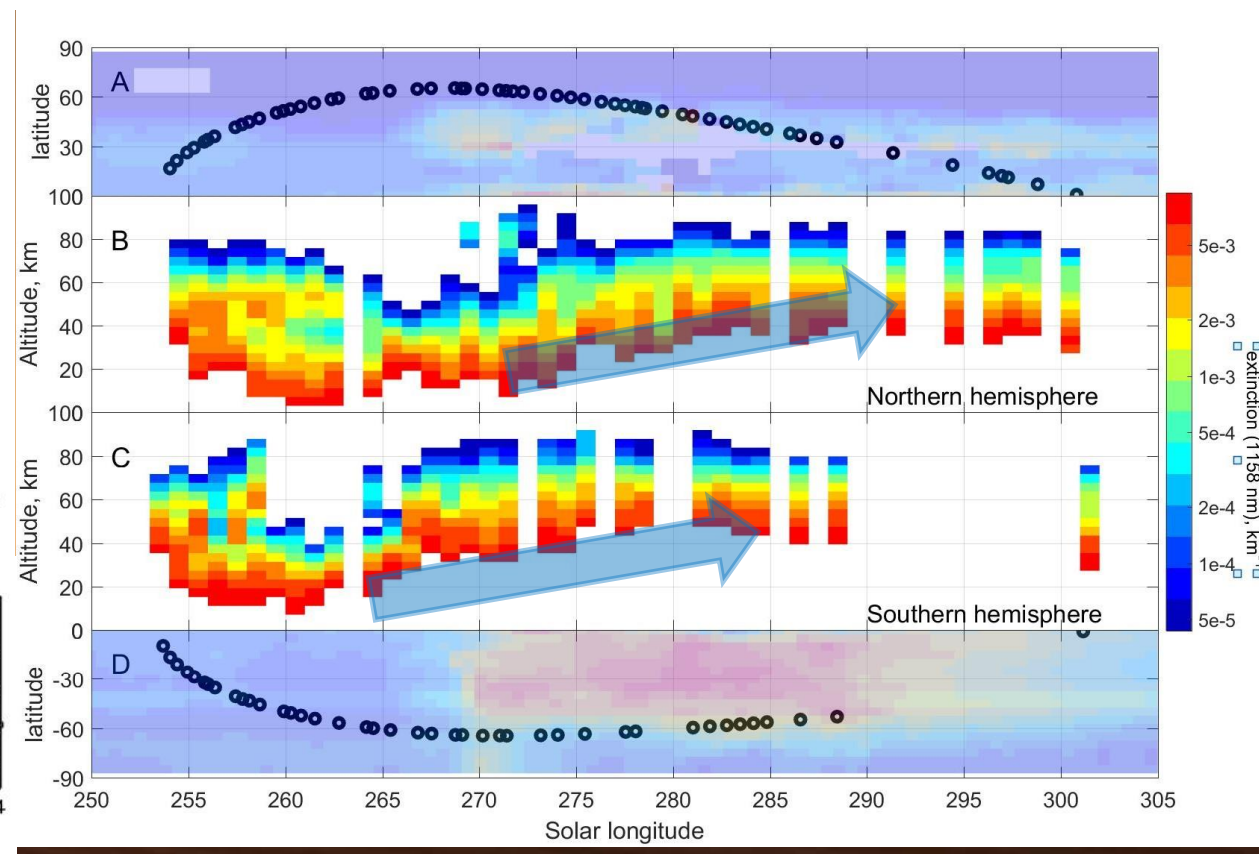
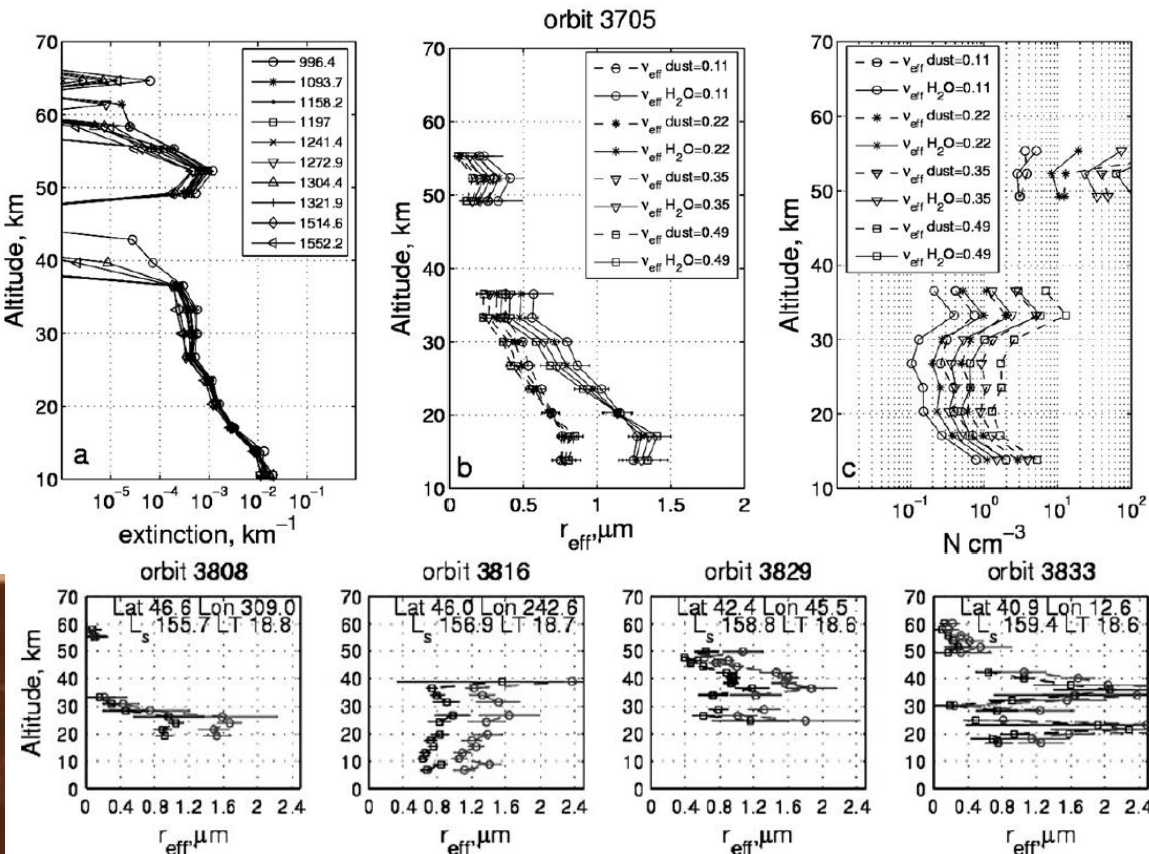
A.A. Fedorova^{a,*}, O.I. Korablev^a, J.-L. Bertaux^{b,c}, A.V. Rodin^{a,d}, F. Montmessin^{b,c}, D.A. Belyaev^a, A. Reberac^{b,c}

^a Space Research Institute (IKI), 84/32 Profsoyuznaya, 117997 Moscow, Russia
^b Service d'Aéronomie du CNRS, BP 3, 91371, Verrières-le-Buisson, France
^c Institut Pierre Simon Laplace, Université de Versailles-Saint-Quentin, 78 Saint Quentin en Yvelines, France
^d Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy dr. 9, 141700 Dolgoprudnyi, Russia

Distribution of atmospheric aerosols during the 2007 Mars dust storm (MY 28): Solar infrared occultation observations by SPICAM

A.A. Fedorova^{a,*}, O.I. Korablev^a, F. Montmessin^{b,c}, J.-L. Bertaux^{b,c}, D.S. Betsis^a, F. Lefèvre^{b,c}

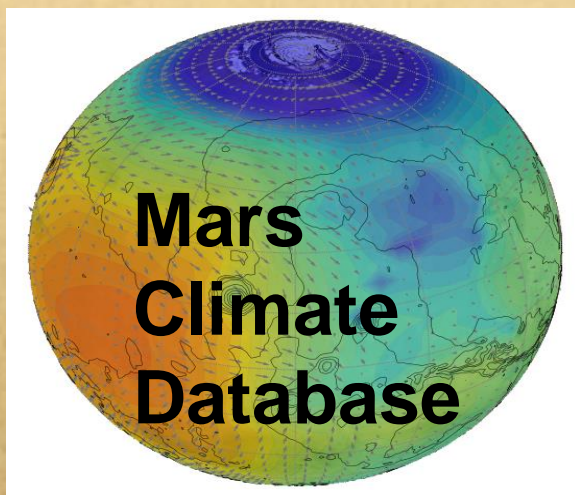
^a Space Research Institute (IKI), 84/32 Profsoyuznaya, 117997 Moscow, Russia
^b CNRS LATMOS, 11 bd d'Alembert, 78280 Guyancourt, France
^c LATMOS/IPSL, UVSQ Université Paris-Saclay, Sorbonne Université, CNRS, 11 bd d'Alembert, 78280 Guyancourt, France



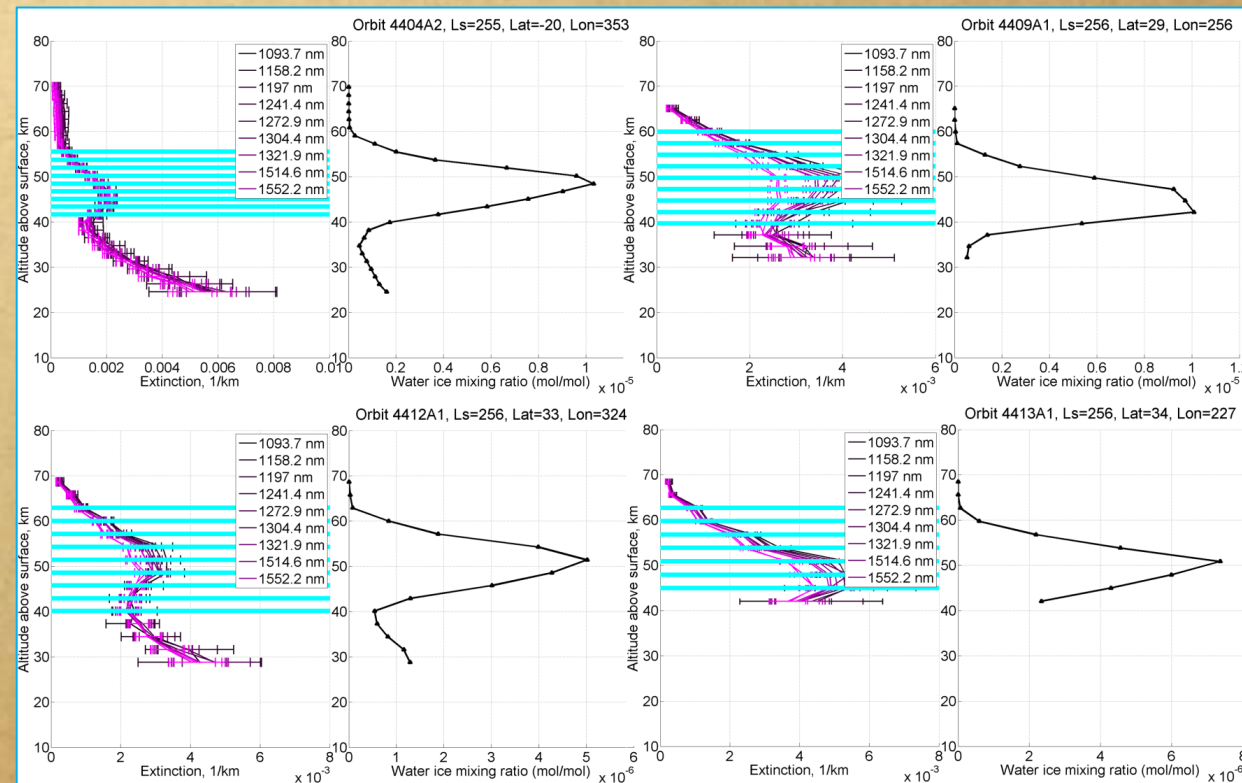
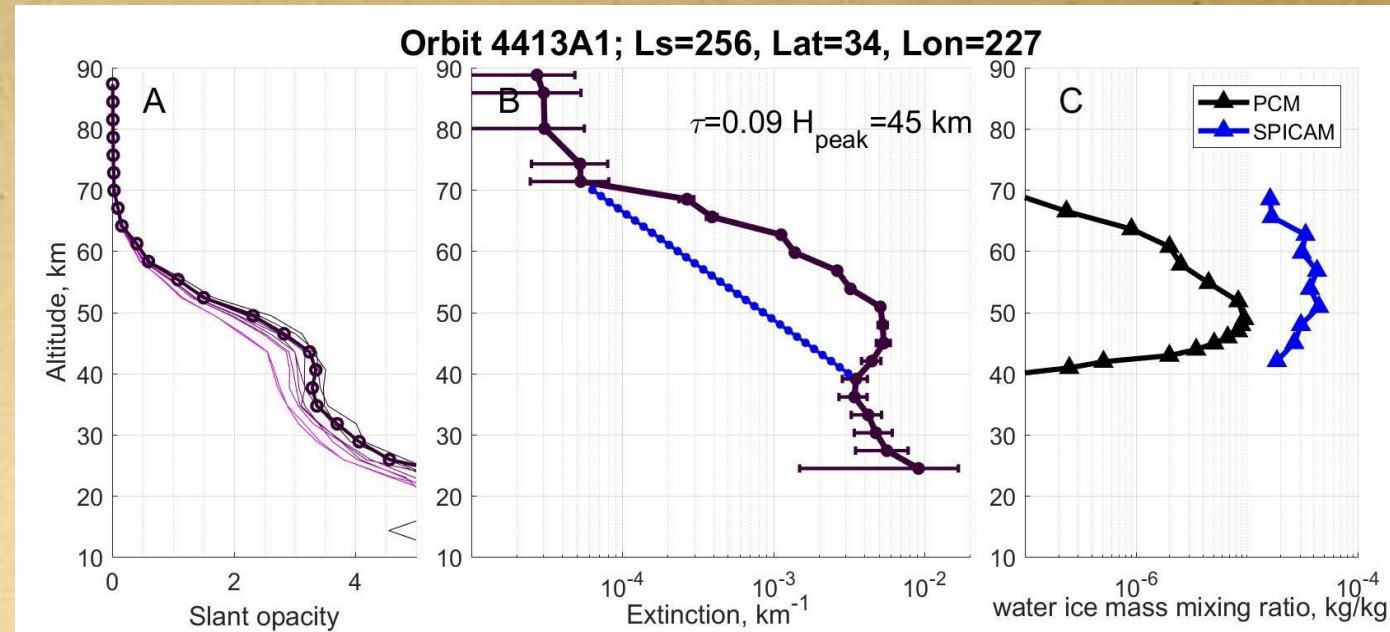
Сезонный тренд в пылевую бурю

По профилям экстинкции (ослабления): наблюдаемые слои – облака льда?

- Профиль экстинкции (или профиль оптической толщины на луче зрения)
Слой может указывать на облако
- Сравнение с моделью общей циркуляции (Mars GCM)

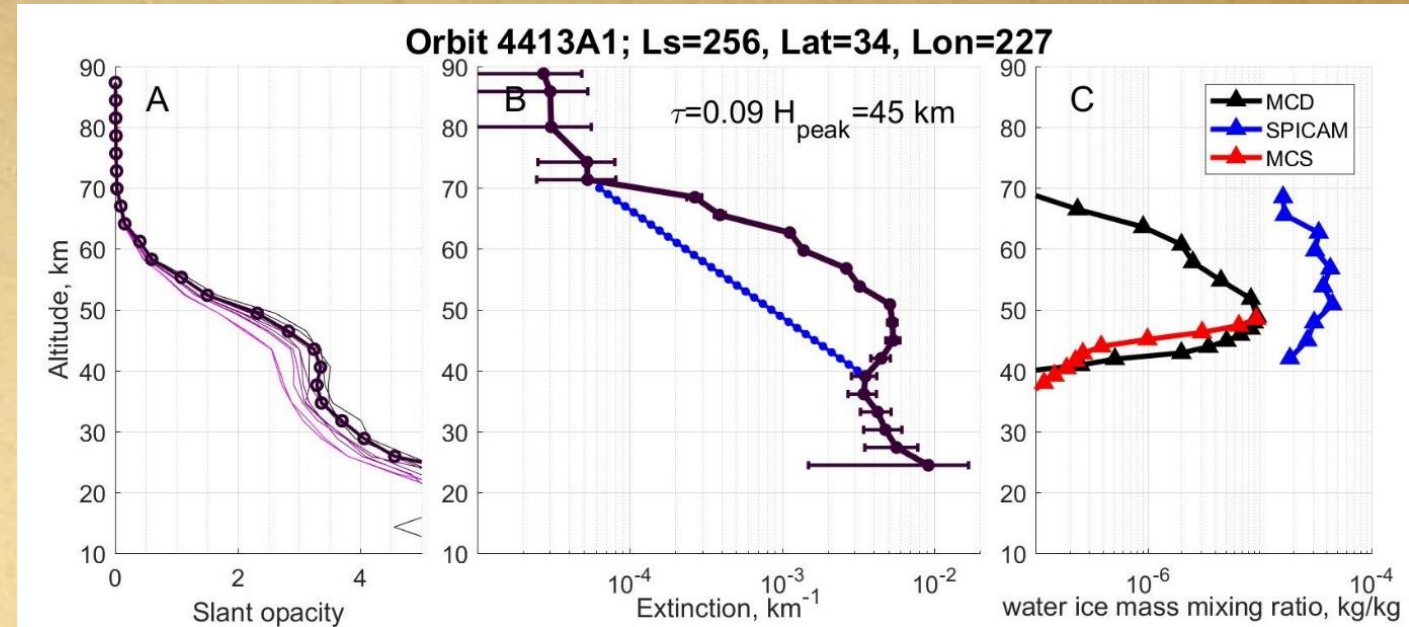


Planetary Climate Model
Mars Climate Database version 5.3, 6.1
<http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mars/access.html>

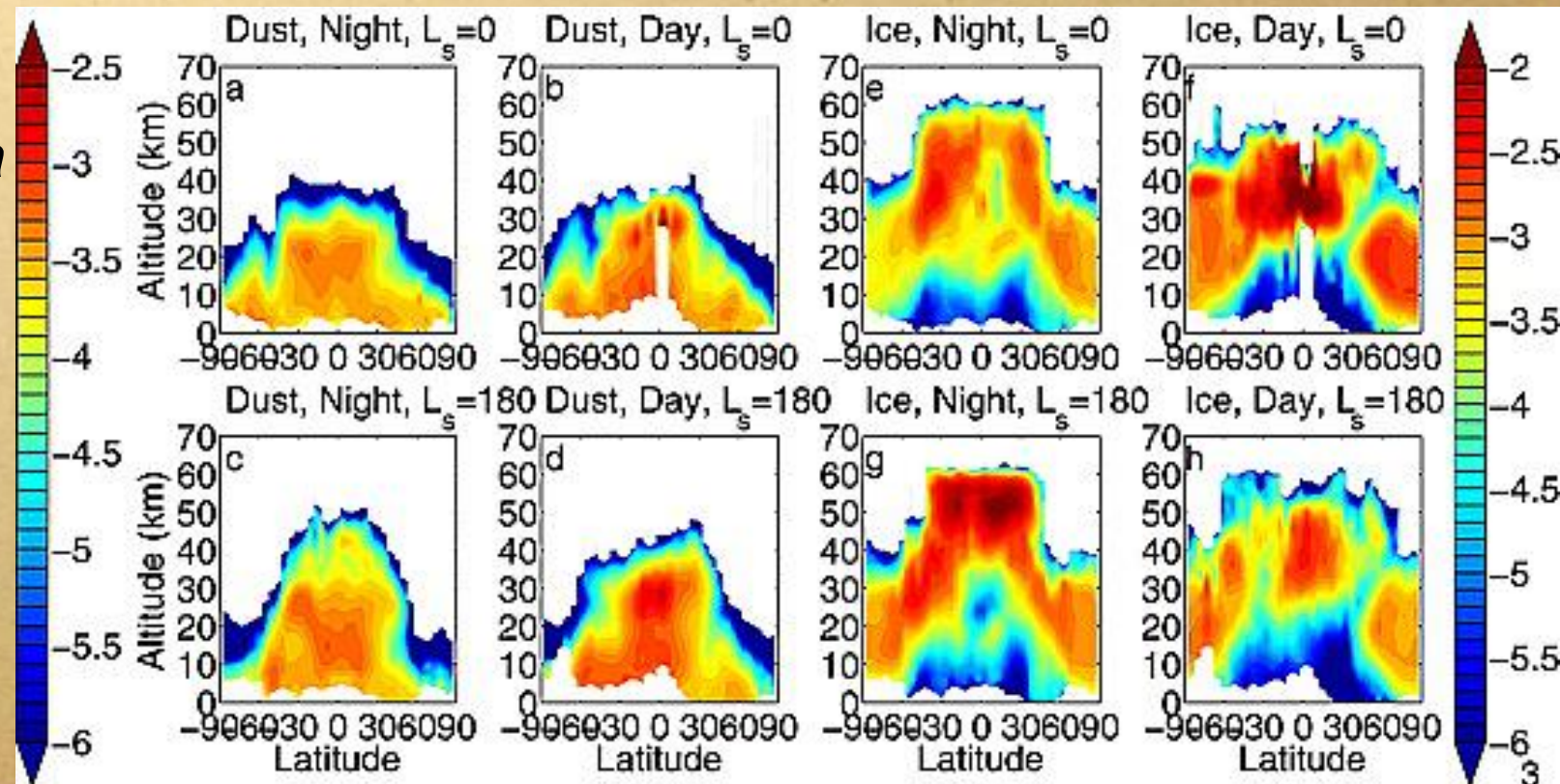


По профилям экстинкции (ослабления): наблюдаемые слои – облака льда?

Профиль экстинкции (или профиль оптической толщины на луче зрения)
Слой может указывать на облако



**Mars Climate
Sounder
(MCS)**
с 2006 года



Mars Reconnaissance Orbiter

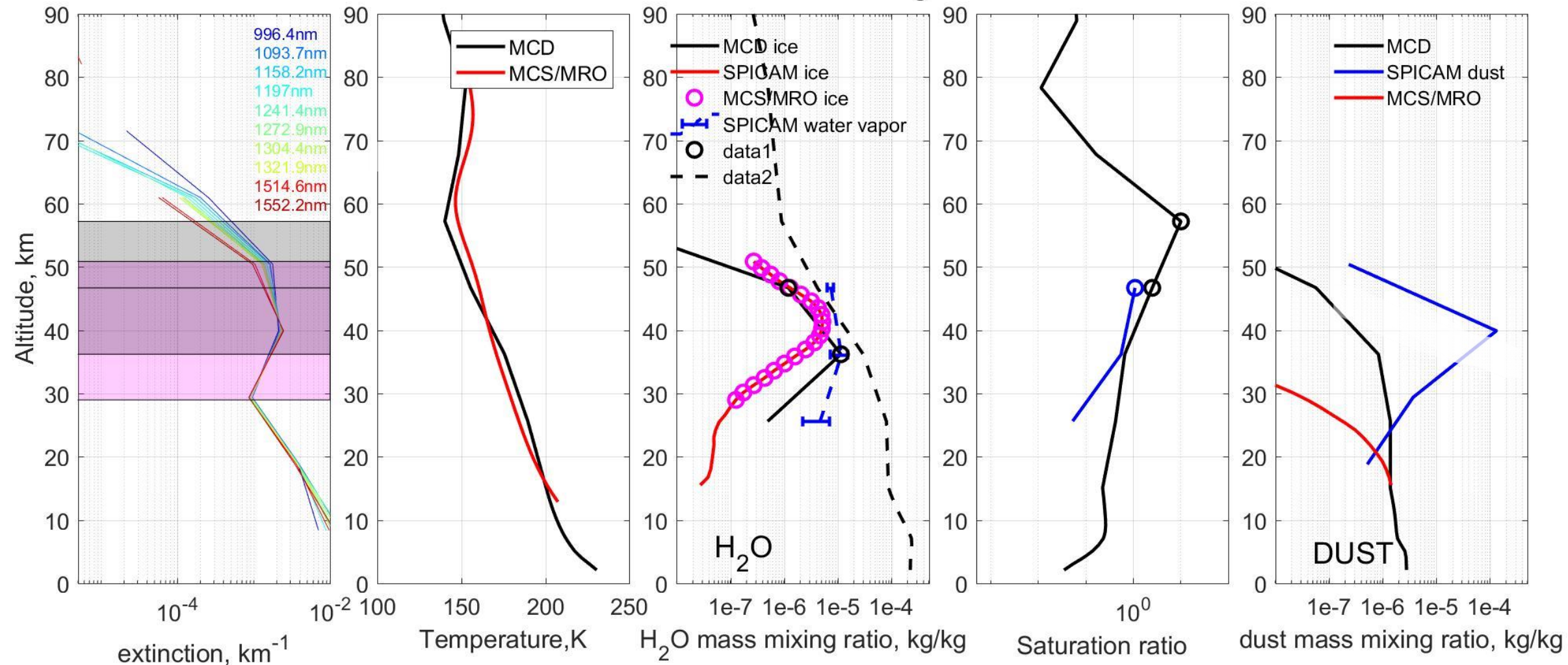
Является ли слой облаком водяного льда?



Критерии:

- 1) По данным MCS: $MMR_{H_2Oice} > 4 \times MMR_{dust}$
- 2) По модели MCD: $MMR_{H_2Oice} > 4 \times MMR_{dust}$
- 3) Насыщение водяного пара в MCD $S_1 > 1$
- 4) Насыщение водяного пара по SPICAM H_2O и температурам MCS $S_2 > 1$.

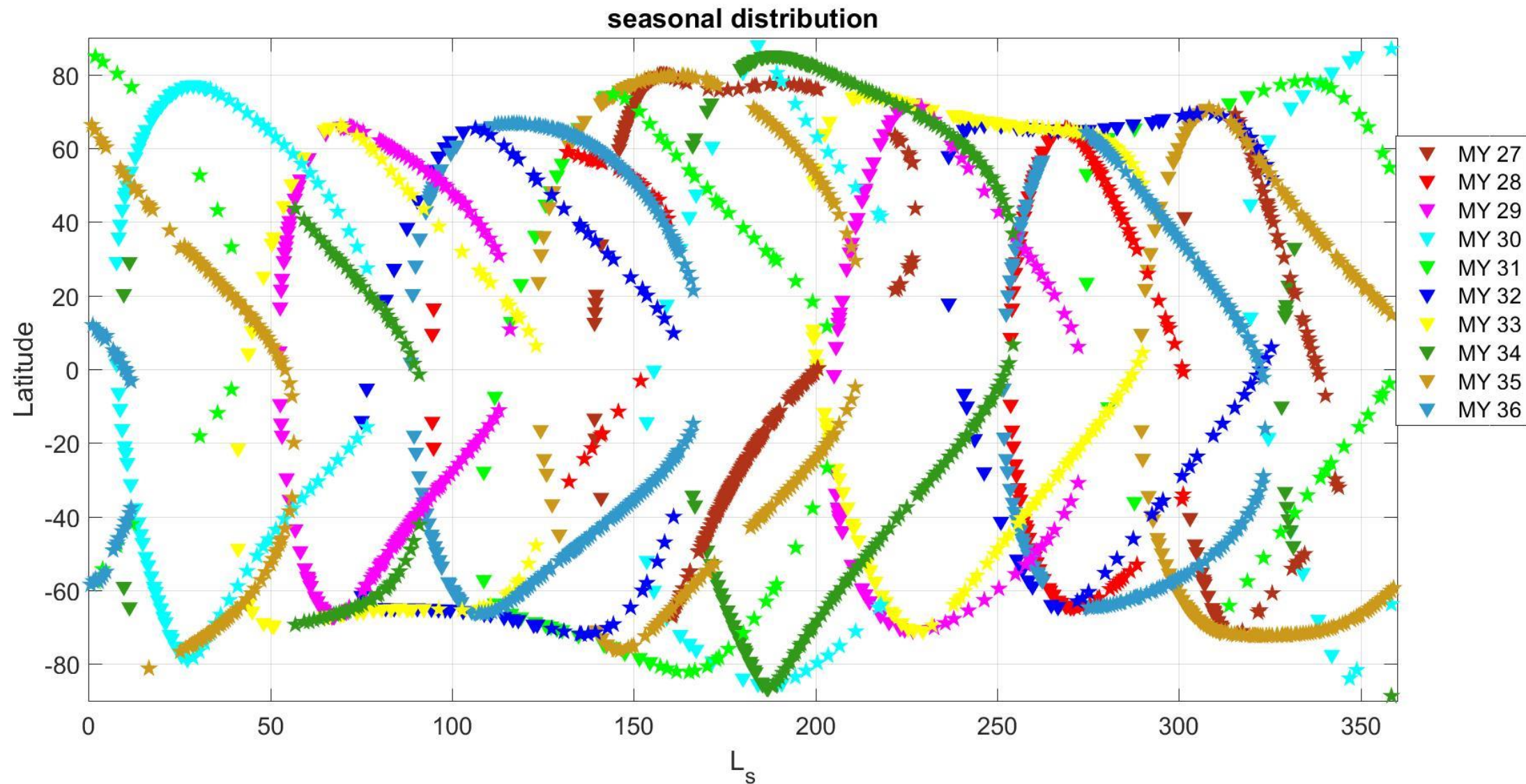
Orbit 13202 N1 Ls=135.6 Lat=38.54 Long=90.26 LT SPICAM=19.01 LT MCS=17.258



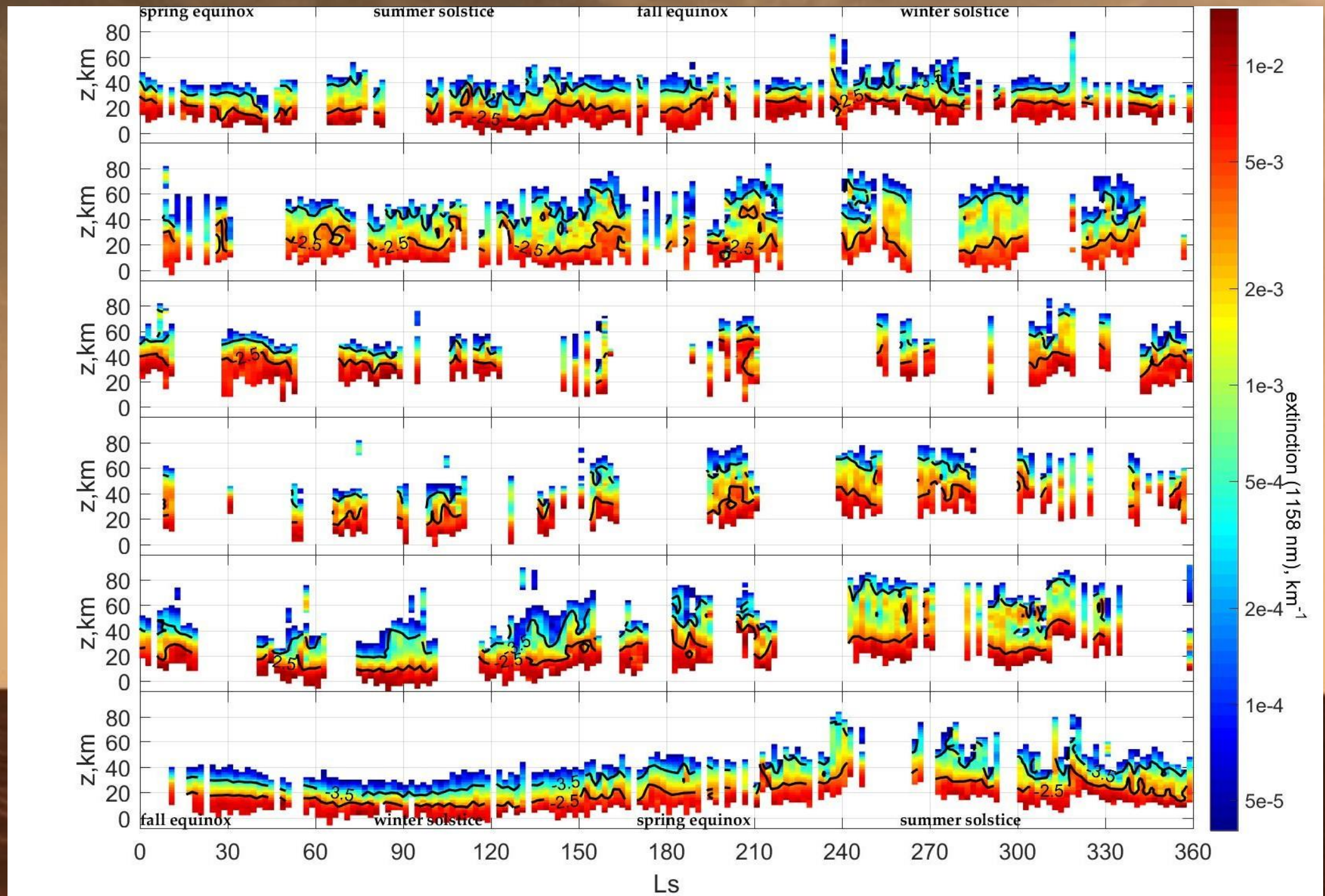
Наблюдение

Пространственное и сезонное распределение

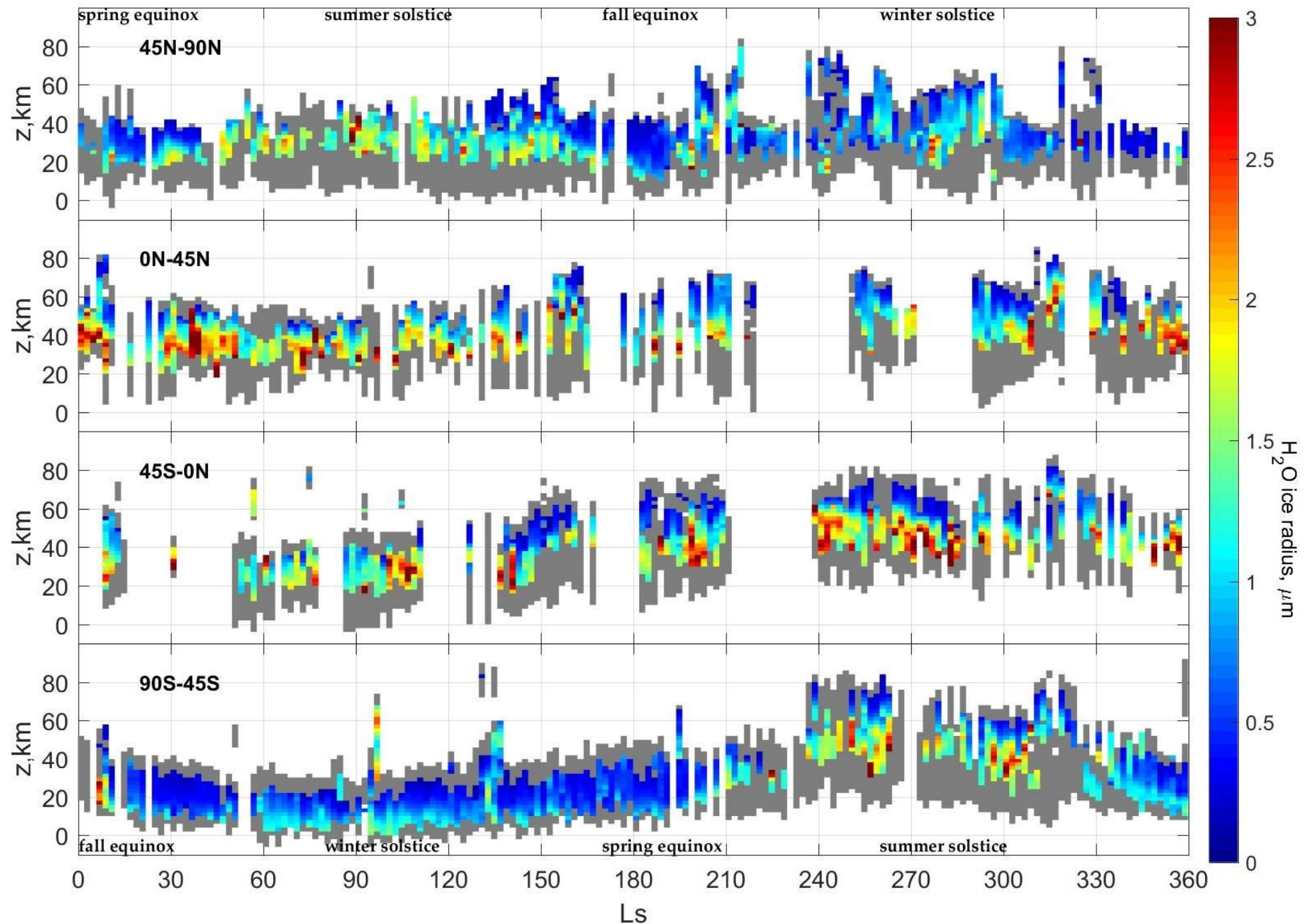
10 марсианских лет наблюдений (MY27-36)



Экстинкции за период 28-36 марсианского года: сезонный тренд

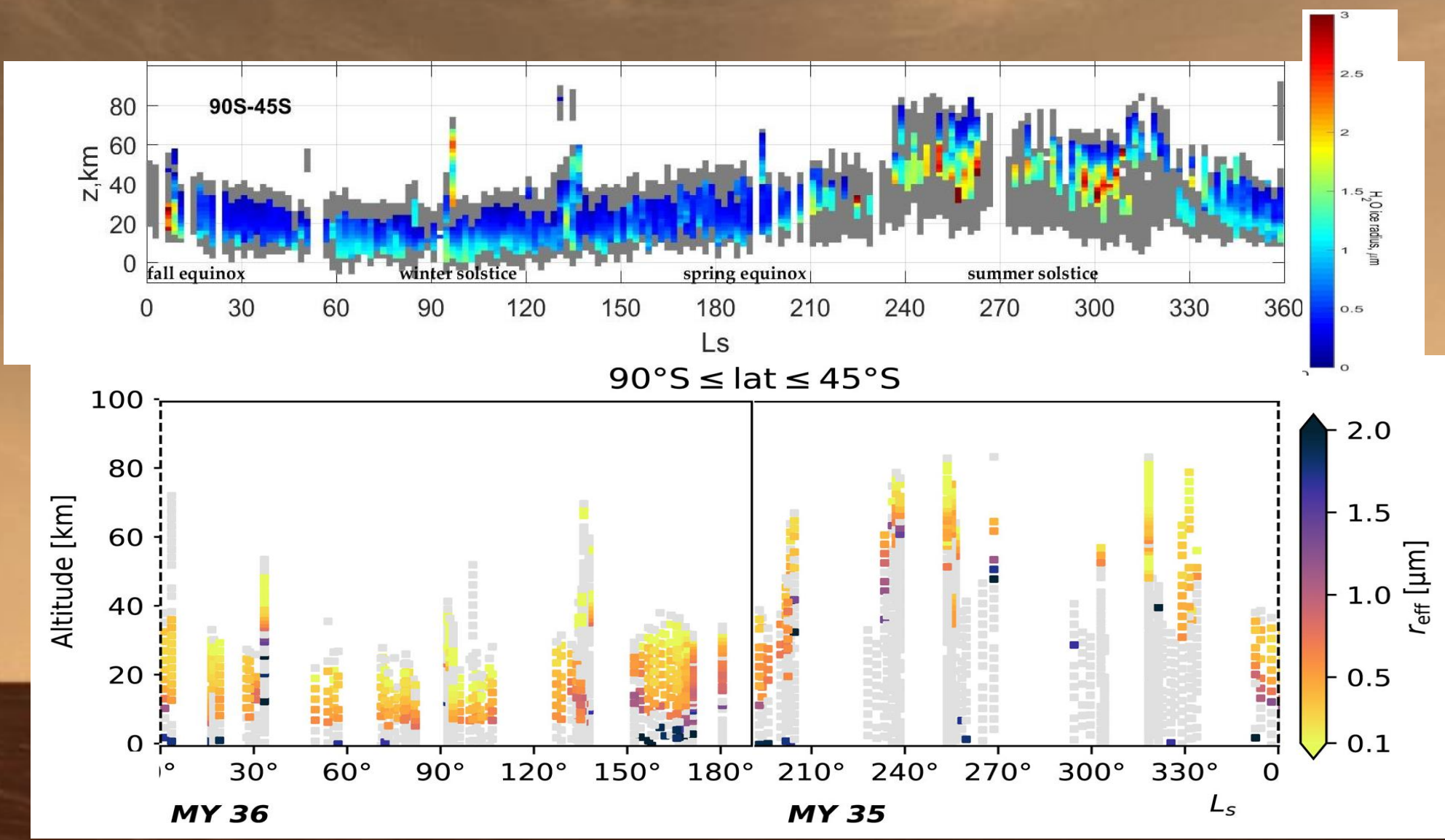


Распределение водяного льда по размерам: сезонный тренд (MY28-MY36)

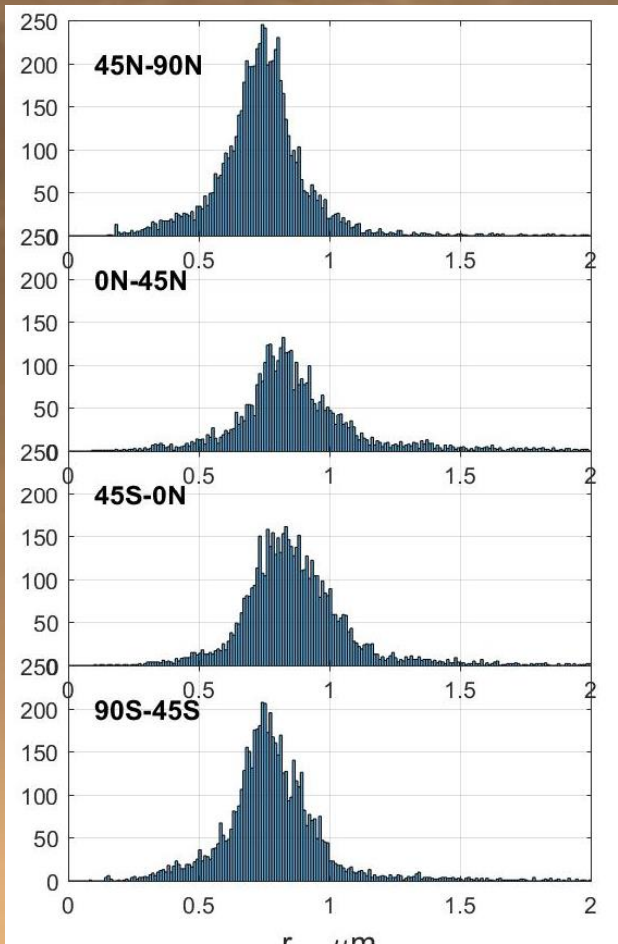
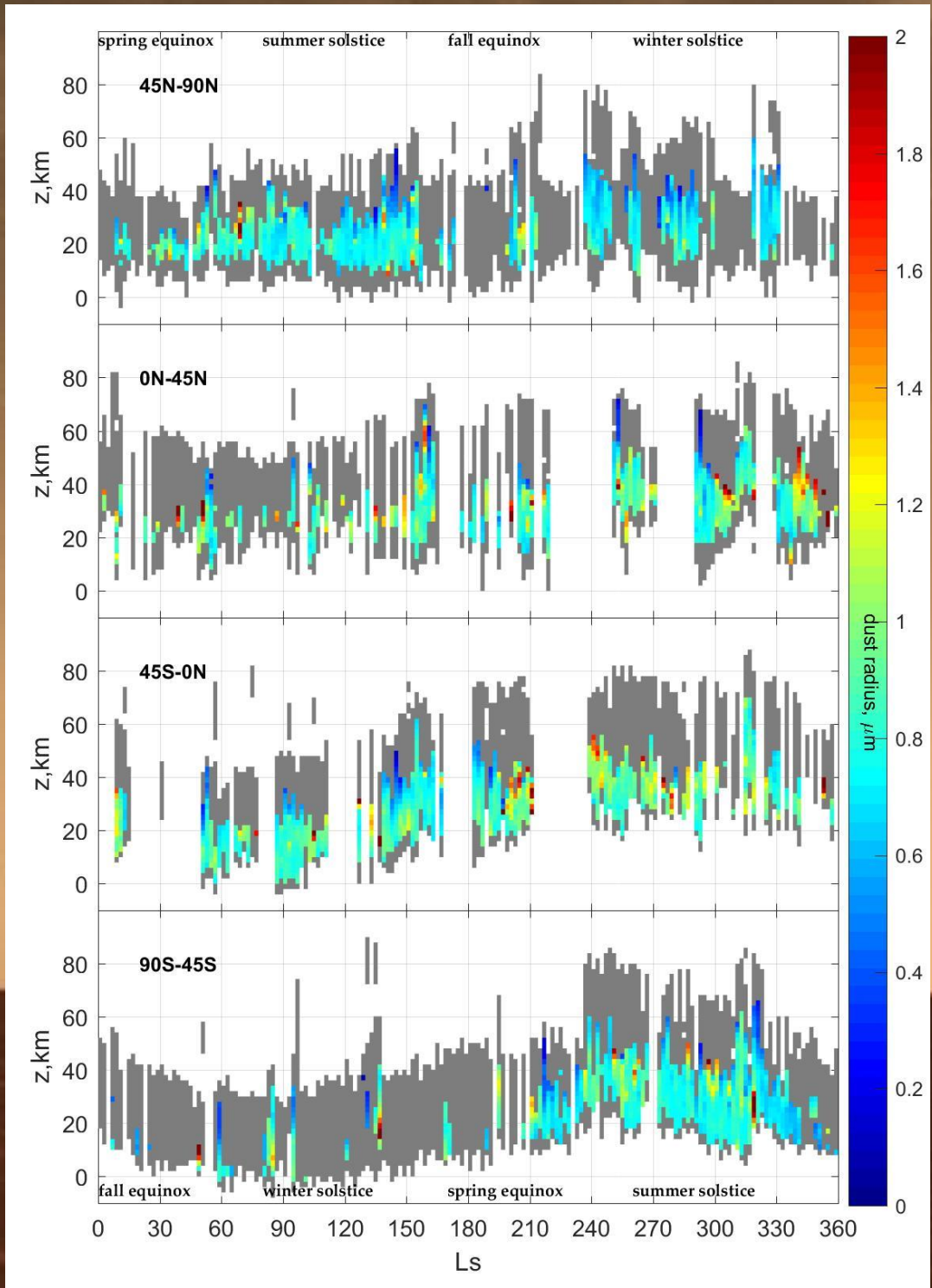


Распределение водяного льда по размерам: сезонный тренд (MY28-MY36)

Водяной лед в высоких южных широтах
Сравнение данных СПИКАМ ИК и ACS-MIR (Stcherbinine et al. (2022))



Распределение пыли по размерам: сезонный тренд (MУ28-MУ36)

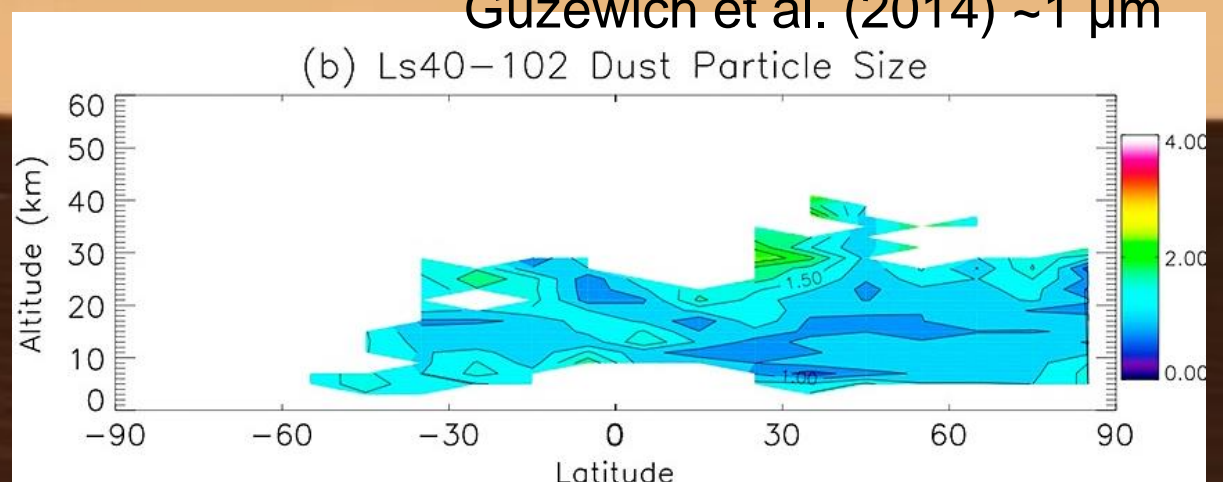


$r_{\text{eff}} \sim 0.7-0.85$ мкм с
меньшими частицами
на высоких широтах

Распределение не такое
широкое как по данным
TGO

Luginin et al. (2020),
Stolzenbach et al. (2023a,b)

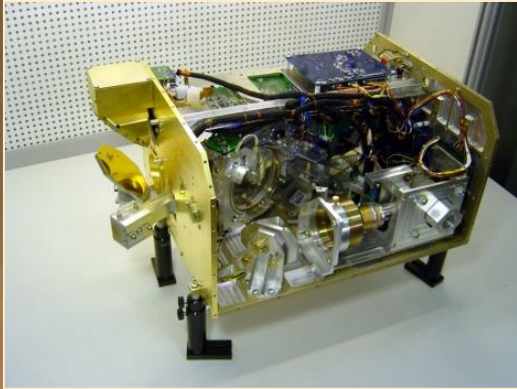
Лимбовые наблюдения CRISM,
Guzewich et al. (2014) $\sim 1 \mu\text{m}$



Валидация с ACS/TGO

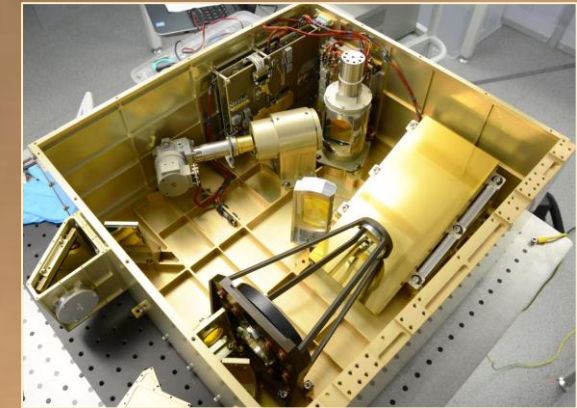
TIRVIM и MIR разделяют в наблюдениях водяной лед и пыль по полосе льда 3 мкм

TIRVIM, Fourier

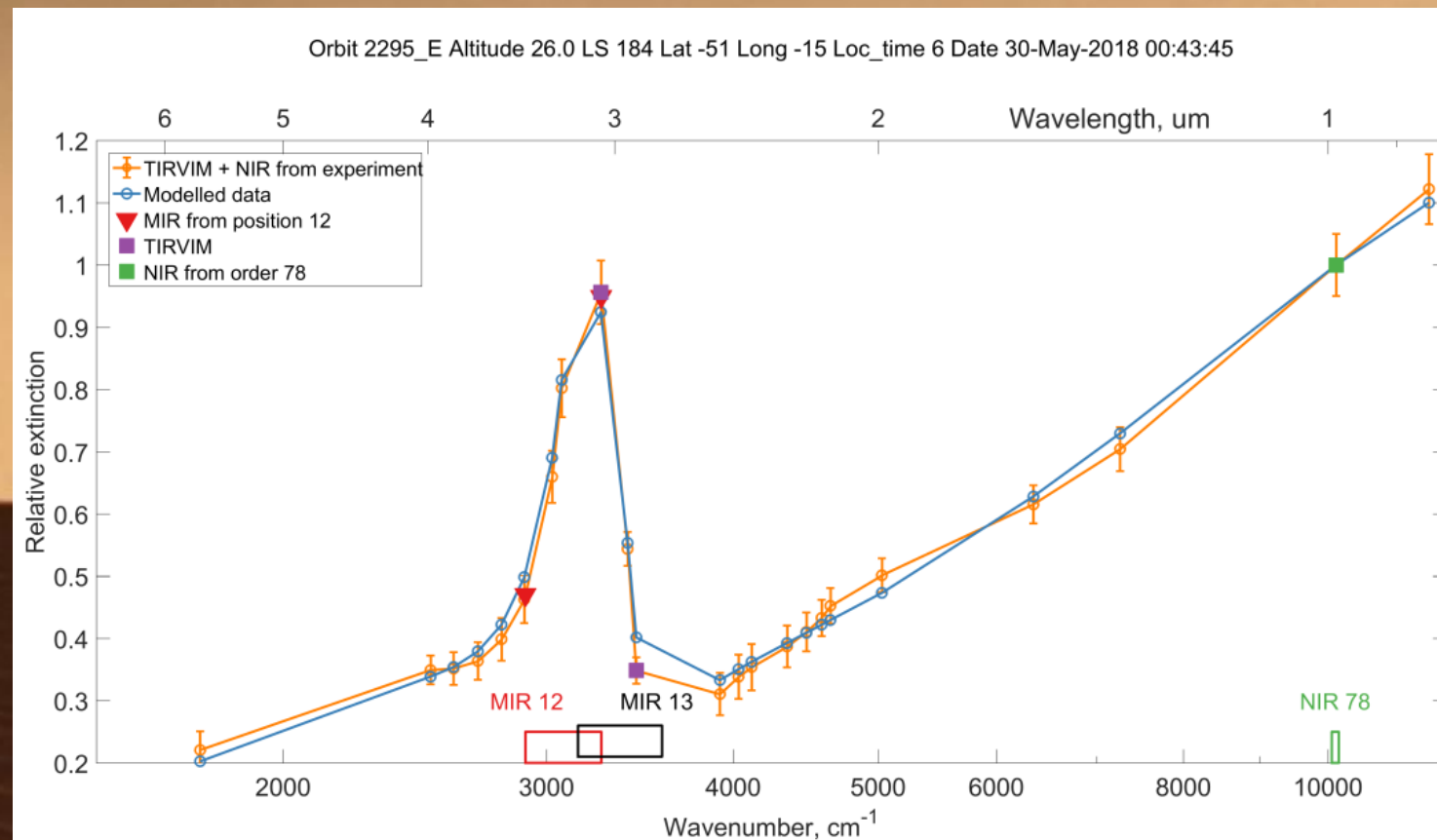
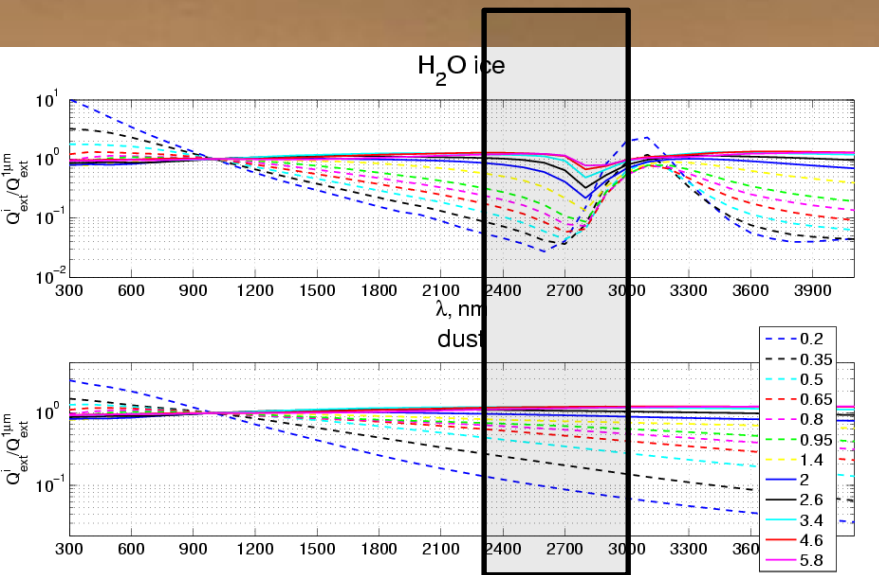


- Spectral range 1.7 – 17 μ (580–5800 cm^{-1})
- $\Delta\nu \sim 0.13 \text{ cm}^{-1}$ (Sun), 0.8 cm^{-1} (Mars)
- Operation modes: Nadir and Solar Occultation
- FOV: $\varnothing 2.5^\circ$

MIR, echelle+cross-dispersion



- Spectral range 2.3 – 4.2 μ
- $\lambda/\Delta\lambda \sim 50\,000$
- Operation modes: Solar Occultation
- FOV: $0.23^\circ \times 0.02^\circ$



Luginin et al. (2020; 2024)

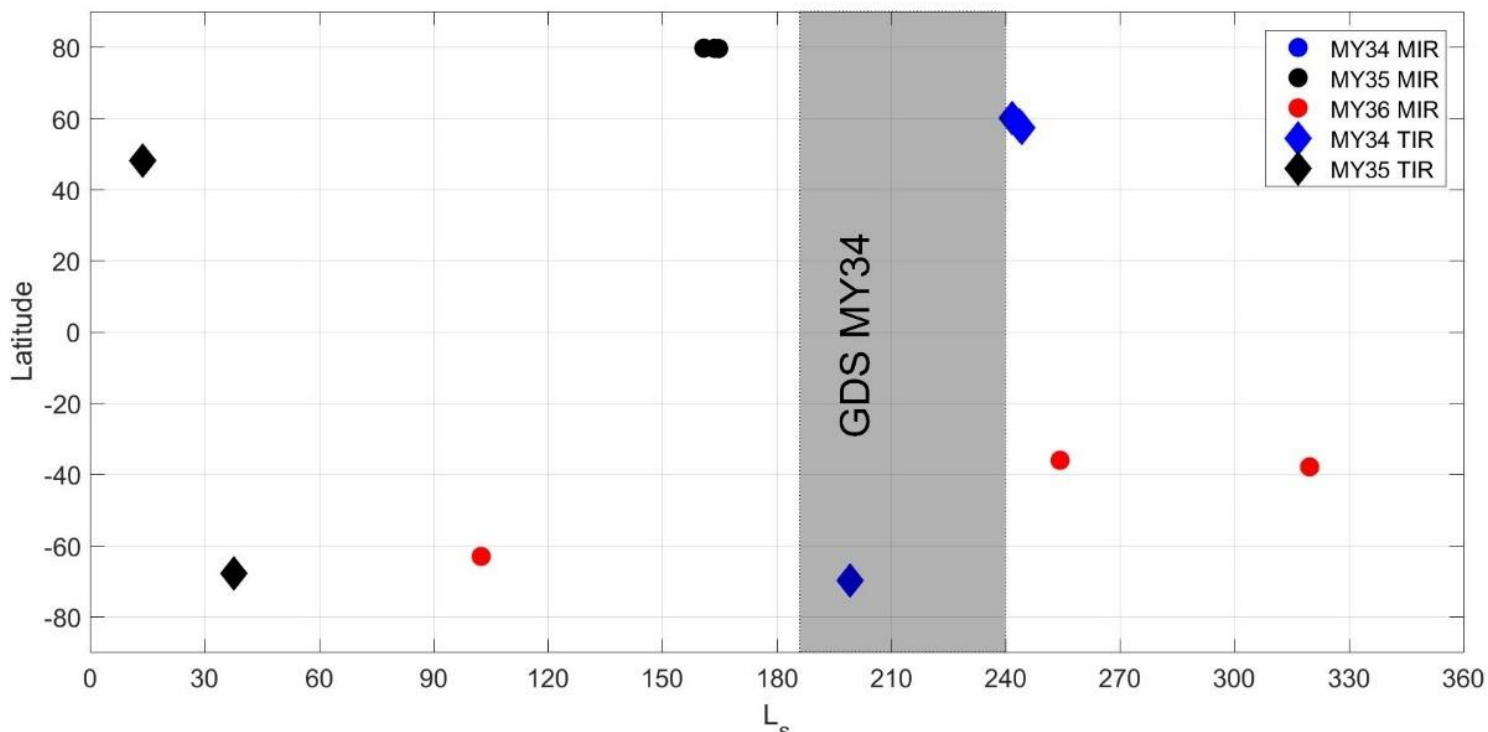
Совместные наблюдения с ACS TGO

MY	SPICAM-orbit	SP-Longitude	SP-Latitude	SP-Local-time	SP-Ls	SP-FOV, km	ACS-orbit	ACS-longitude	ACS-Latitude	ACS-local-time	ACS-Ls	ACS-instrument
34	18322	156.2	-70.0	19.6	199.2	5.5	2610	158.0	-70.0	19.6	199.2	TIR
	18558	144.7	60.0	15.1	241.6	3	3488	137.1	57.7	15.2	243.6	TIR
	18569	107.2	58.0	15.3	243.7	3	3464	109.2	55.8	15.5	242.4	TIR
	18573	60.6	57.2	15.4	244.4	3	3478	65.1	57.2	15.3	243.1	MIR
	18573	60.6	57.2	15.4	244.4	3	3516	50.7	59.0	15.0	245.1	TIR
35	19353	173.5	48.0	18.4	13.8	5.5	6326	178.0	50.9	18.6	15.8	TIR
	19530	66.3	-68.1	15.2	37.7	2.4	6881	72.0	-66.1	15.5	36.8	TIR
	20467	23.3	79.6	20.9	163.7	1.9	10235	24.8	79.9	20.9	163.7	MIR

TIRVIM+NIR – SPICAM IR
MIR+NIR (p12,13) -SPICAM IR

Collocated:

2 deg of Ls
 4 deg of latitude
 10 deg of longitude local
 time no more than one hour



Заключение



- Рассмотрен весь массив данных солнечных затмений эксперимента СПИКАМ ИК на КА Марс-Экспресс с 28 по 36 марсианский год (2006-2022)
- Основной проблемой при интерпретации данных СПИКАМ по аэрозолю Марса была невозможность разделение вклада льда и пыли в ослабление излучения
- Привлечение данных MCS/MRO и результатов модели циркуляции MCD, позволили решить этот вопрос.
- Получены сезонные и широтные тренды размеров частиц, относительной концентрации и массового коэф-та перемешивания для водяного льда и пыли в атмосфере
- Пылевые частицы показали однородное распределение по размерам с высотой с эффективным радиусом $\sim 0.75-8$ мкм
- Хорошее согласие с одновременными измерениями ACS TGO на индивидуальных профилях и с сезонно-широтными распределениями MCS и MCD по *mmr*



Thank you for your attention!