

# 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)

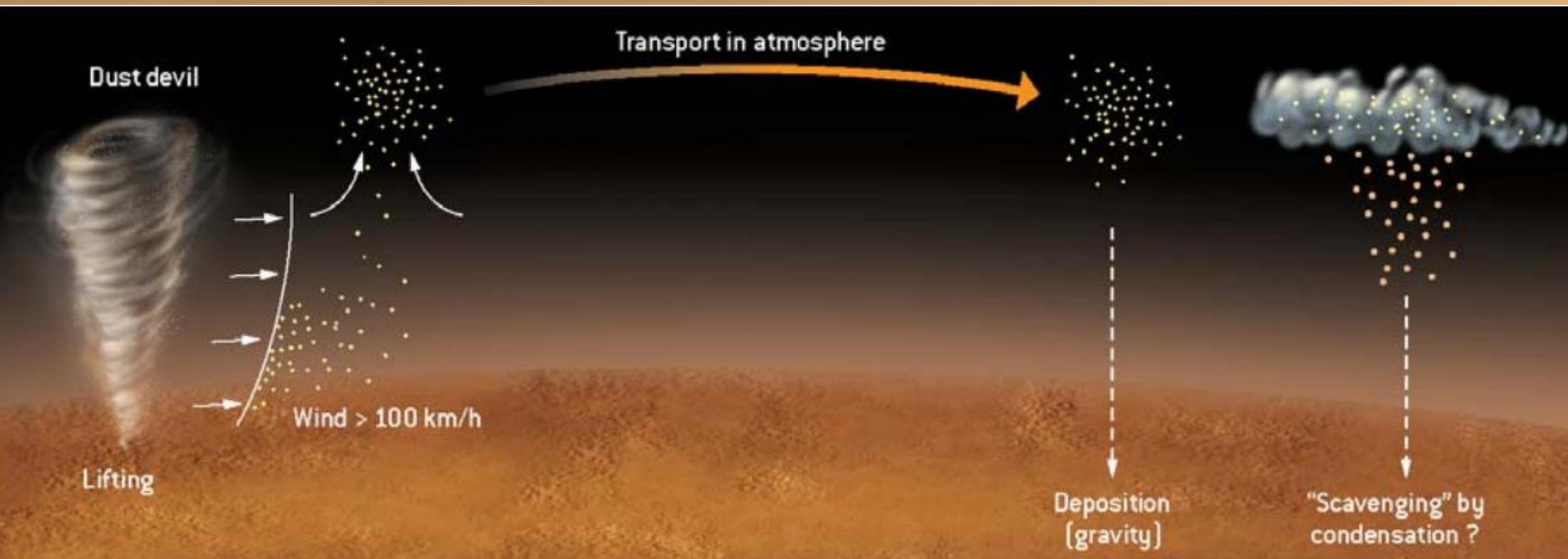
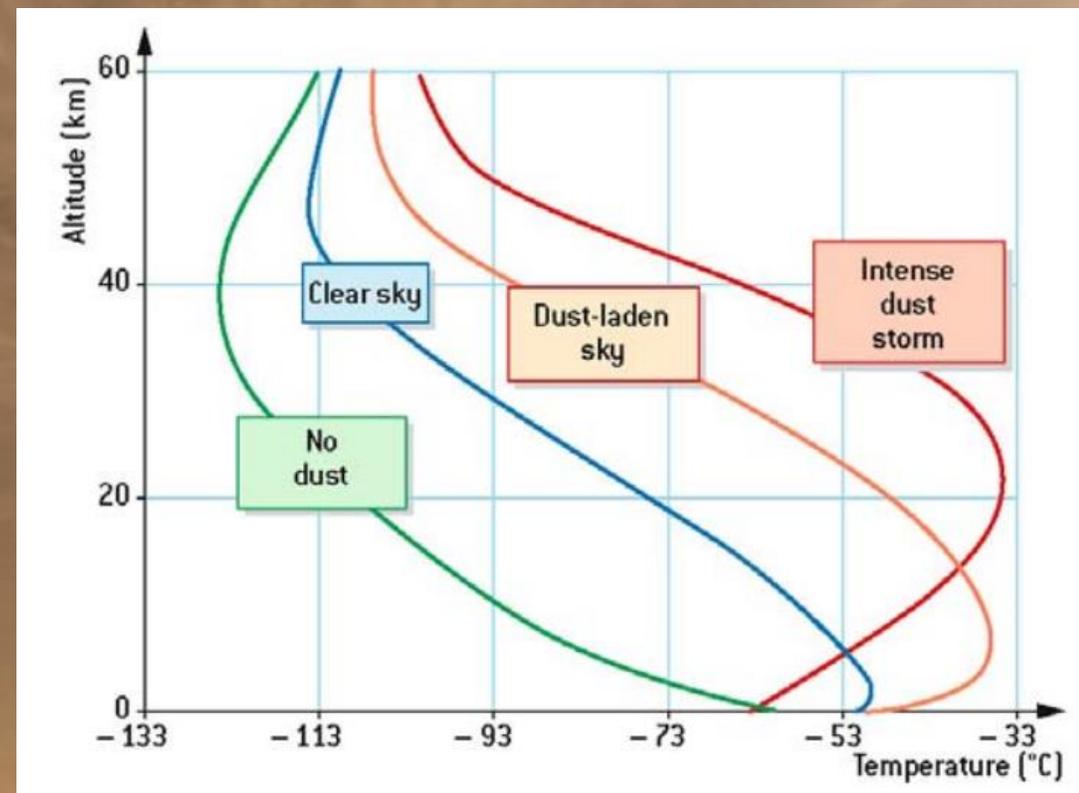
<sup>1</sup> *Институт космических исследований  
РАН, Москва, 117997, Россия*

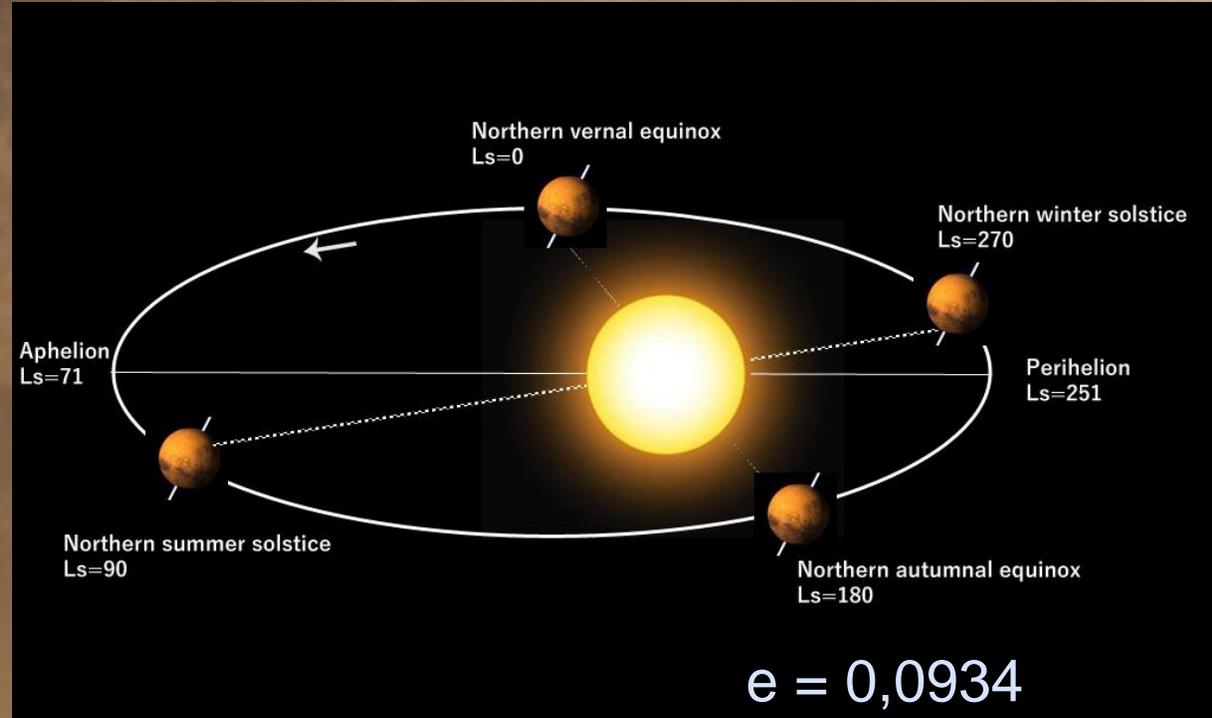
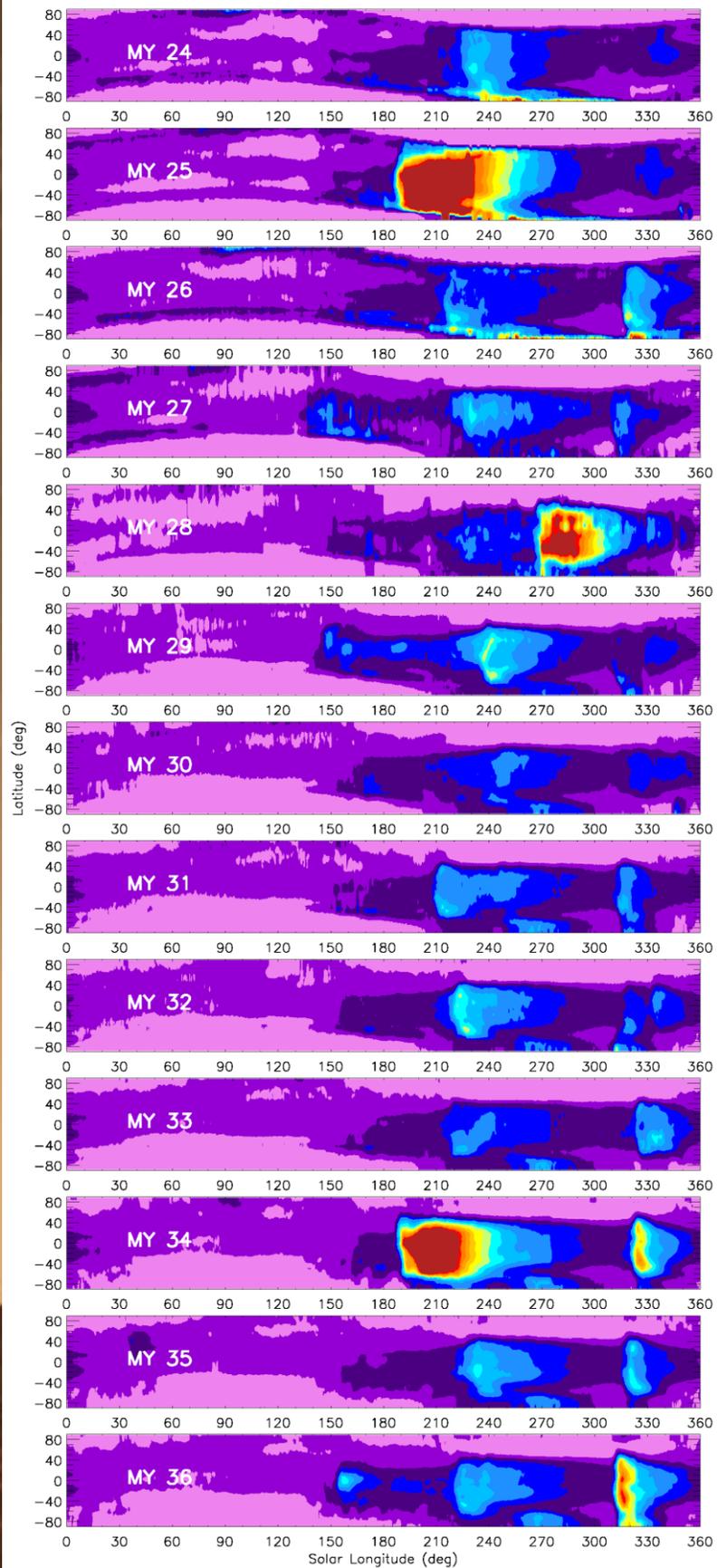
<sup>2</sup> *LATMOS/CNRS, 11, boulevard  
D'Alembert, 78280 Guyancourt, France*



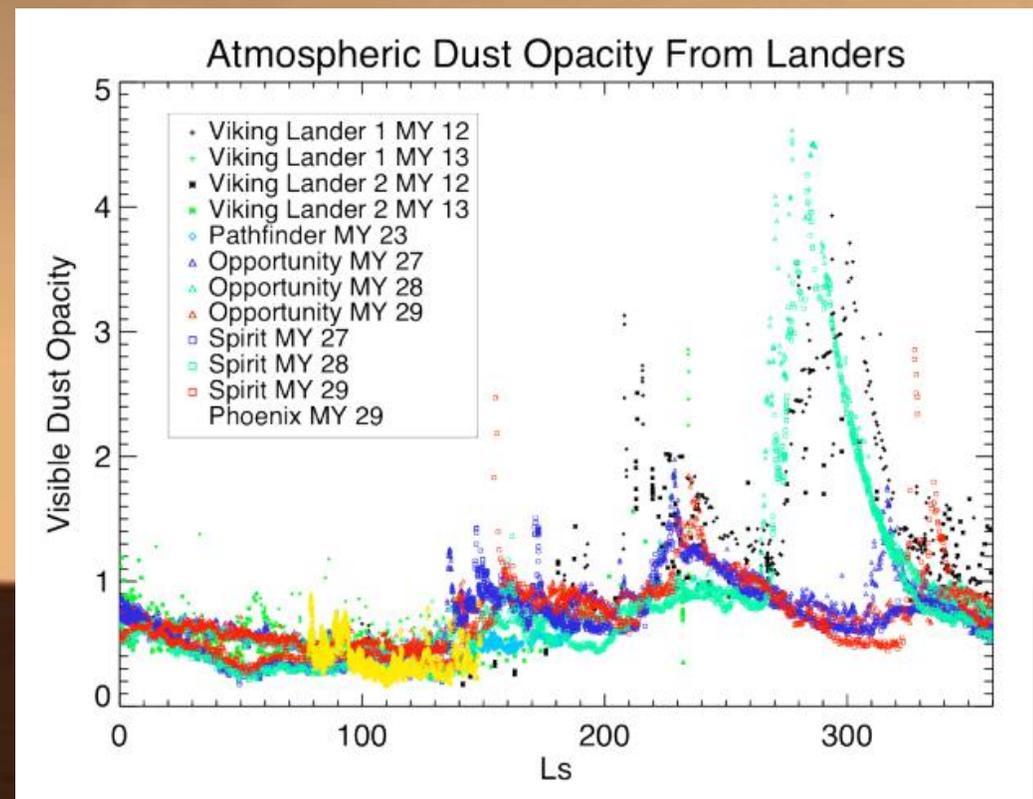
# Пыль и лед в атмосфере Марса

- 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

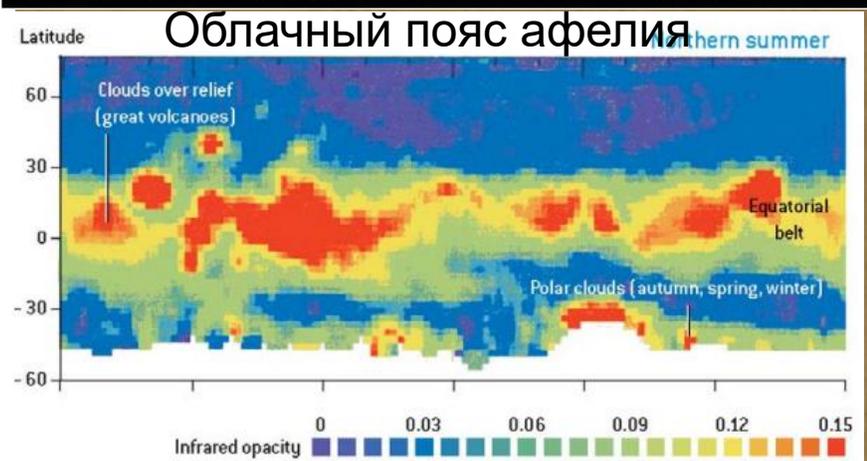
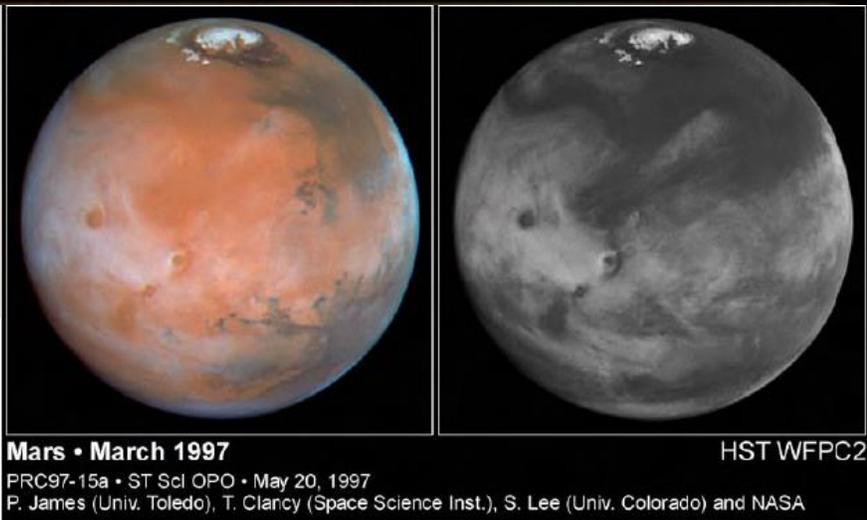
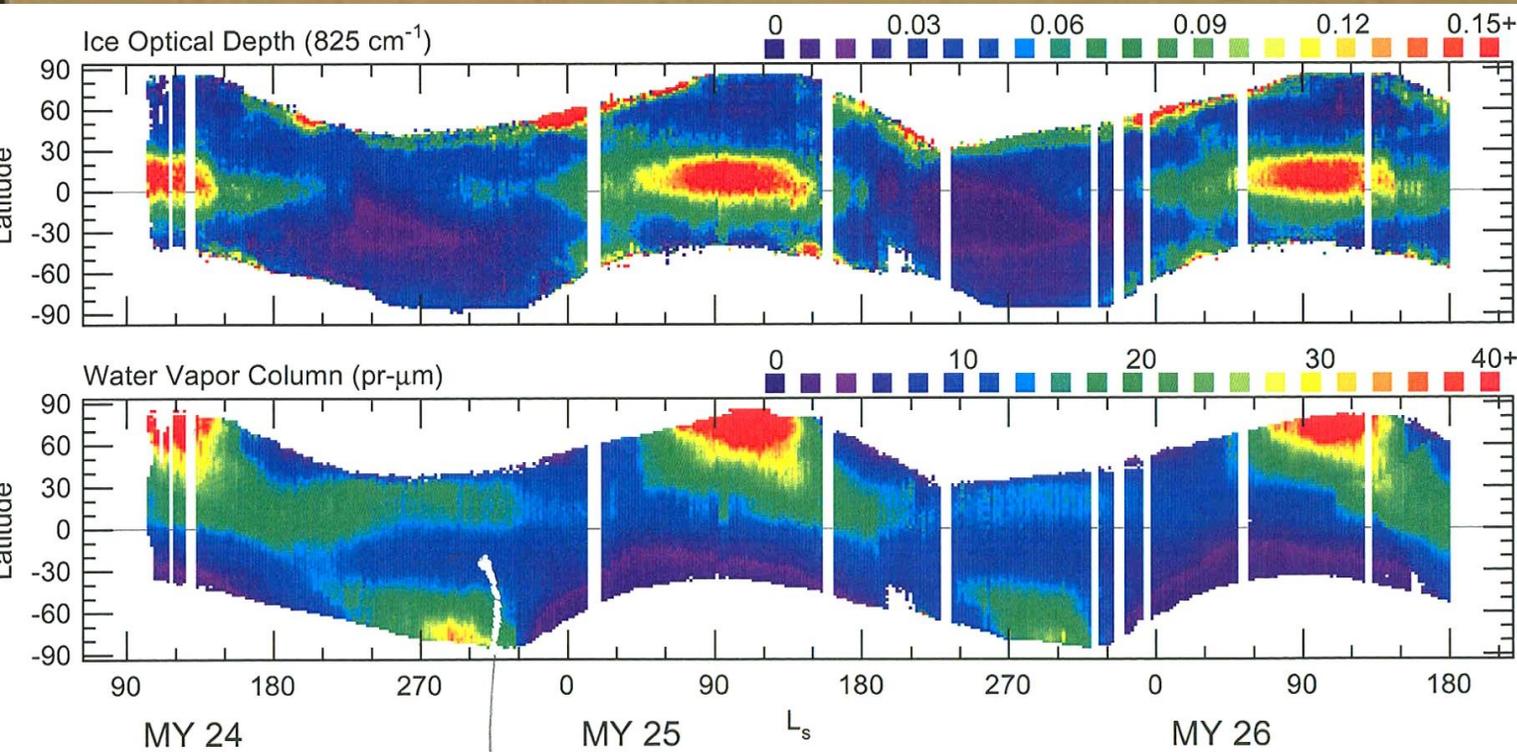


Montabone et al., 2015; Kahre et al., 2017

# Облака водяного пара

облачный пояс афелия, полярный вихорик

Сезонный цикл TES/MGS Smith 2004

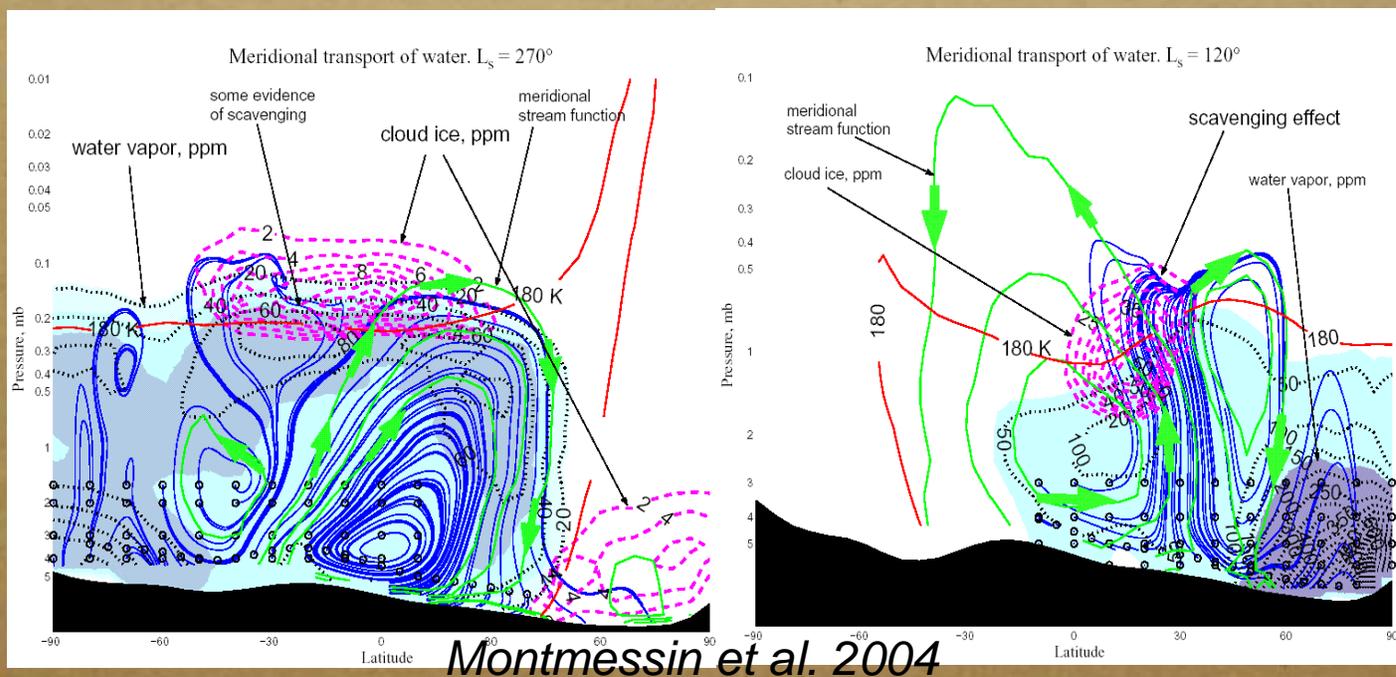


Прямая связь с водяным циклом и конденсацией воды:

- 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

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

Tao Ruan<sup>1</sup>, R. M. B. Young<sup>1,2</sup>, S. R. Lewis<sup>3</sup>, L. Montabone<sup>1,4</sup>, A. Valeanu<sup>1</sup>, and P. L. Read<sup>1</sup>

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

**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

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



Icarus  
Volume 388, December 2022, 115239



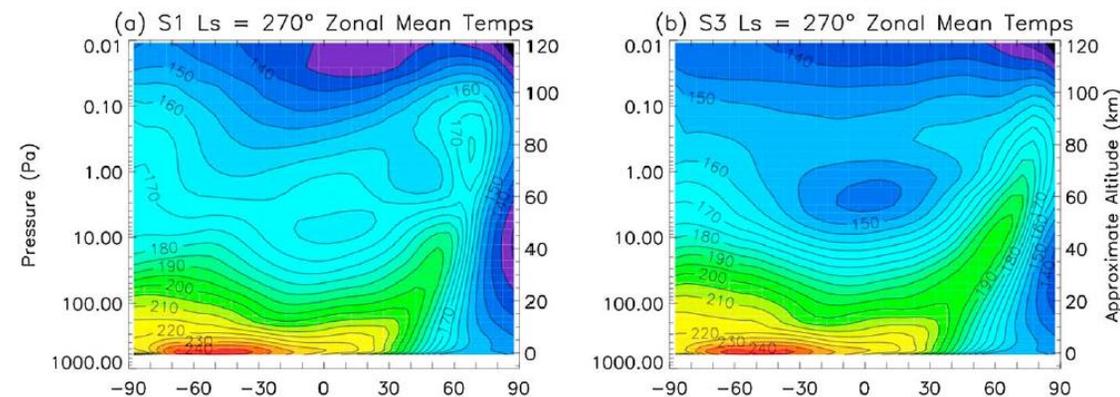
### Impact of the coagulation of dust particles on Mars during the 2018 global dust storm

T. Bertrand<sup>a,b</sup>, M.A. Kahre<sup>b</sup>, R. Urata<sup>c</sup>, A. Määttänen<sup>d</sup>, F. Montmessin<sup>e</sup>, R.J. Wilson<sup>b</sup>, M.J. Wolff<sup>f</sup>

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

Scott D. Guzewich<sup>1</sup>, Anthony D. Toigo<sup>2</sup>, Mark I. Richardson<sup>3</sup>, Claire E. Newman<sup>3</sup>, Elsayed R. Talaat<sup>2</sup>, Darryn W. Waugh<sup>4</sup>, and Timothy H. McConnochie<sup>5</sup>

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



Planetary and Space Science 208 (2021) 105346

Contents lists available at ScienceDirect



Planetary and Space Science

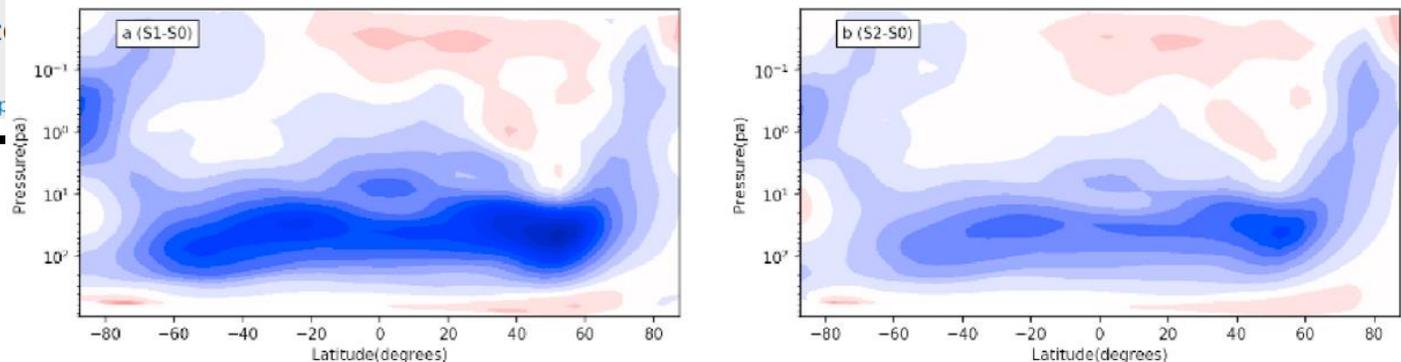
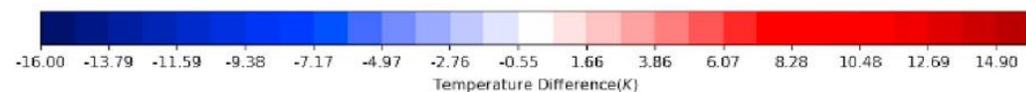
journal homepage: [www.elsevier.com/locate/planets](http://www.elsevier.com/locate/planets)

### Effect of dust particle size on the climate of Mars

Yemeng Wang<sup>a</sup>, Kim-Chiu Chow<sup>a,b,\*</sup>, Jing Xiao<sup>a,b</sup>, Chi-Fong Wong<sup>a</sup>

<sup>a</sup> State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau

<sup>b</sup> CNSA Macau Center for Space Exploration and Science, Macau



MCS/MRO, Kleinböhl et al., 2013

# 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

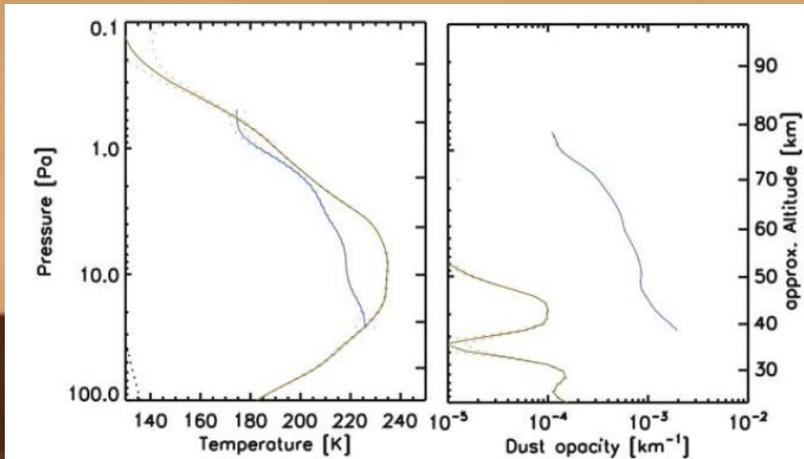
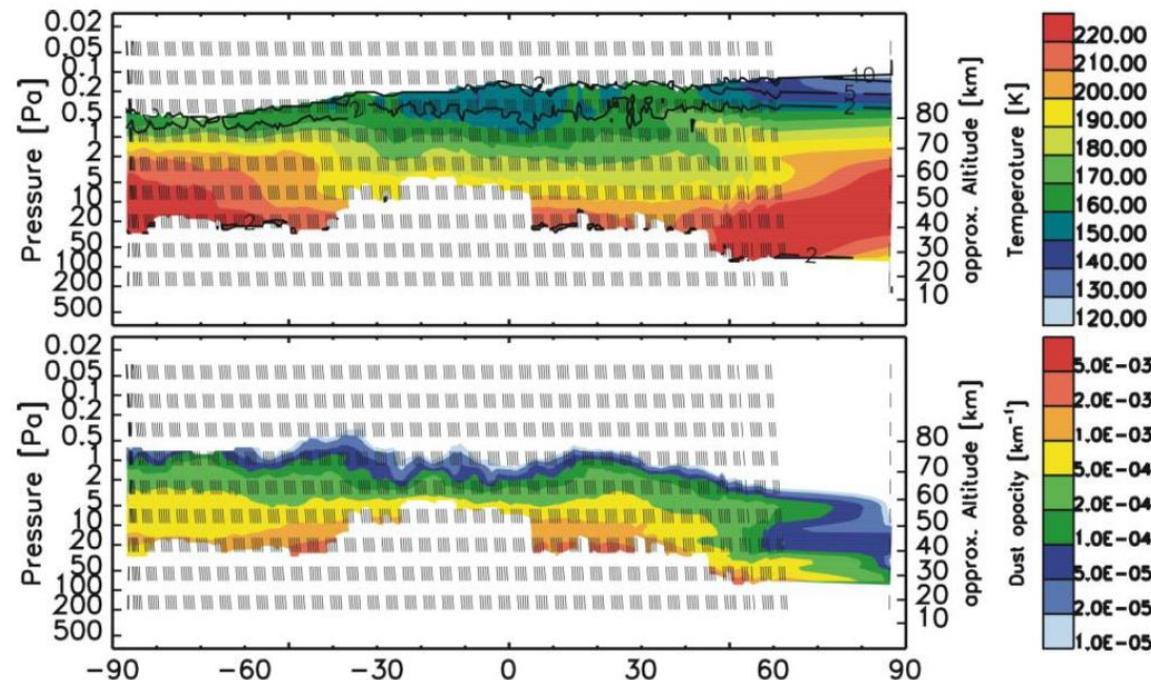


Fig. 2: Individual temperature (left) and dust (right) profiles representative for southern high latitudes (blue) and northern high latitudes (brown) on July 12, 2007.

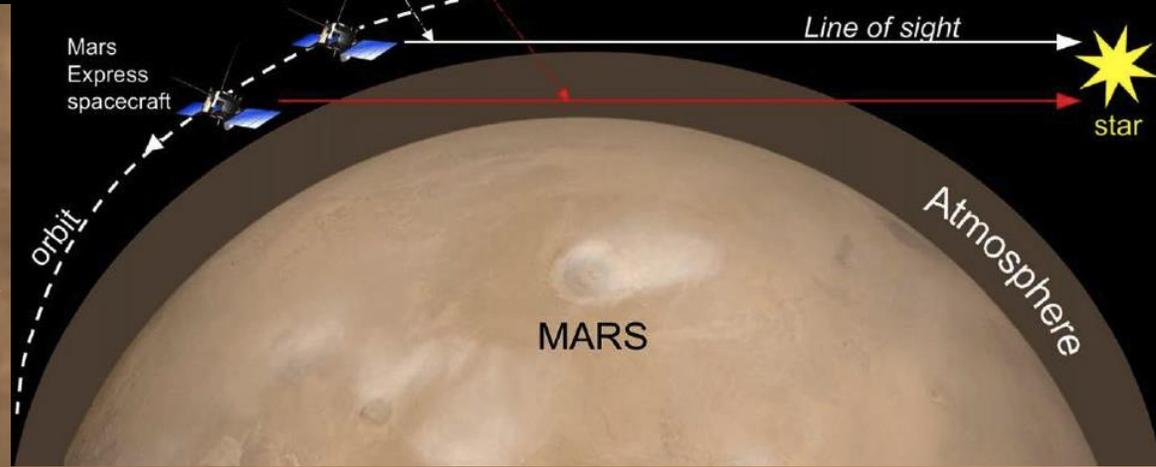


MCS/MRO,  
Kleinbohl et  
al., 2014



# СПИКАМ Марс-Экспресс

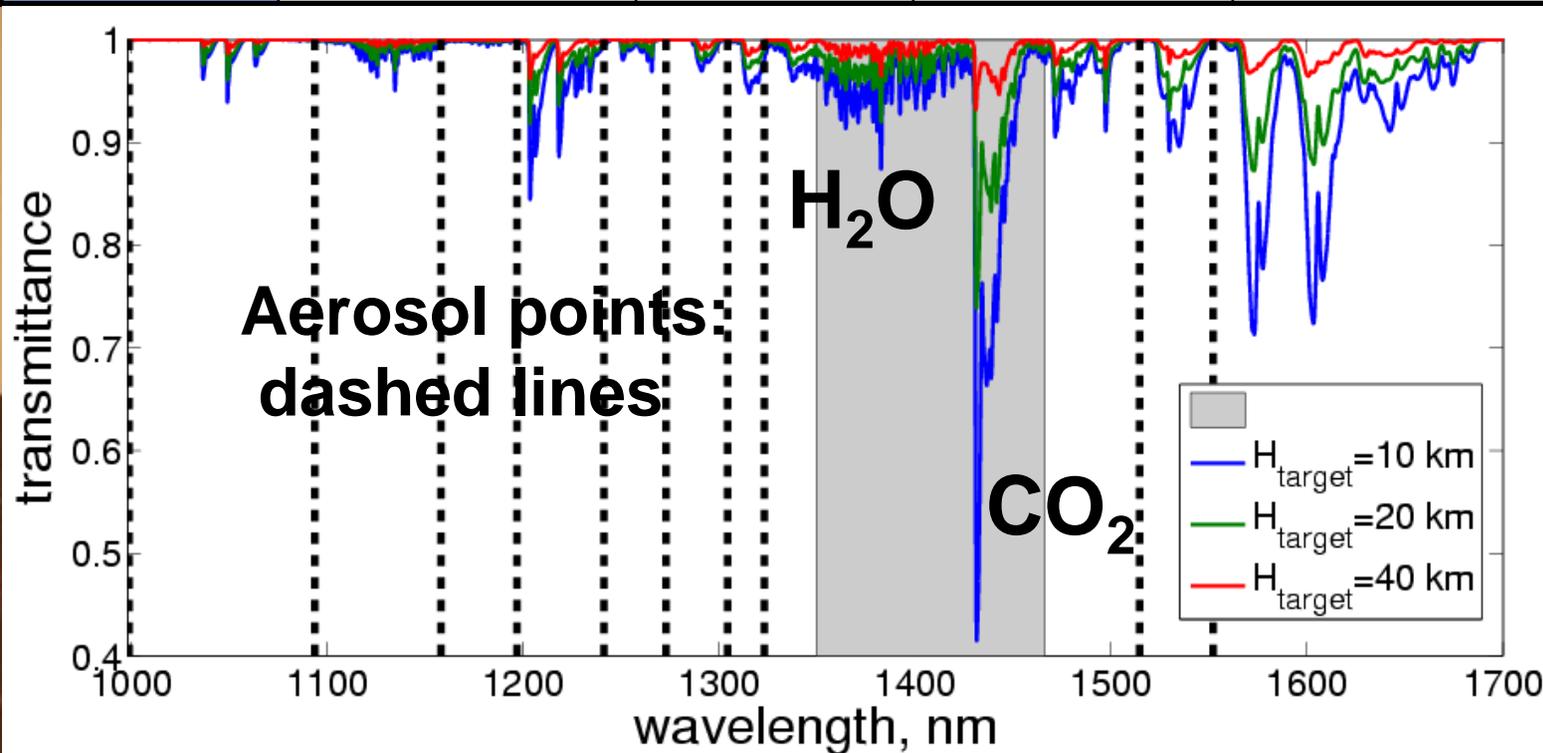
2004-2024



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

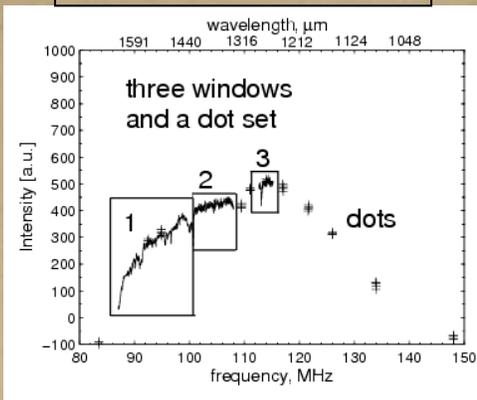
## Occultations:

- Self-calibrated
- H<sub>2</sub>O density from 1.38 μm band
- Atmospheric density from 1.43 μm CO<sub>2</sub> band
- Aerosol extinction profiles and particle size distribution with 10 spectral points outside gaseous absorption bands

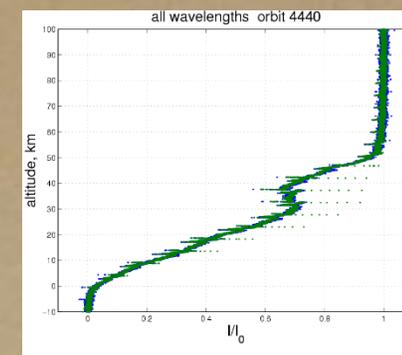
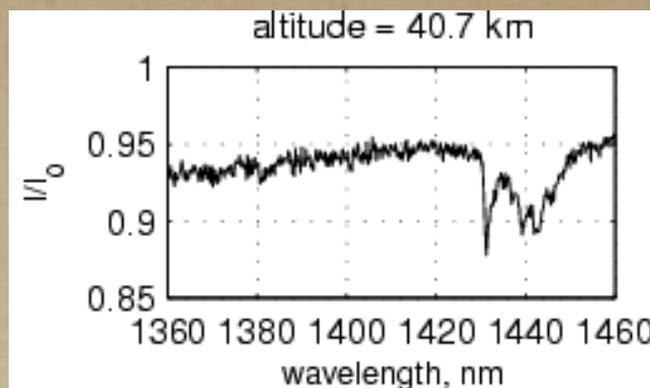


# Схема обработки данных

## Raw spectra



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

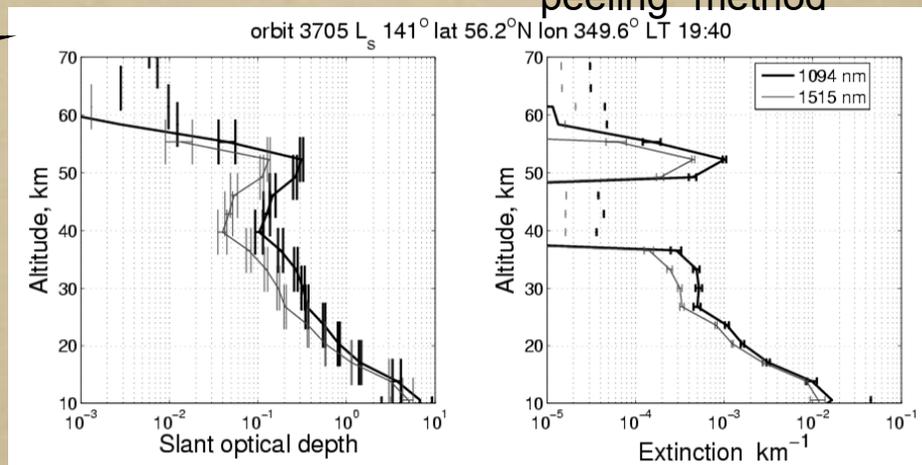


## aerosols

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

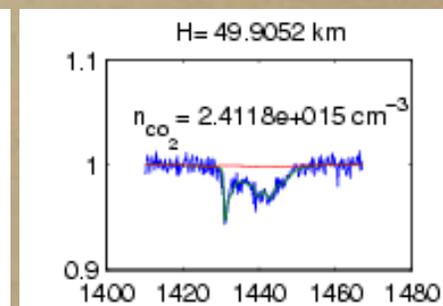
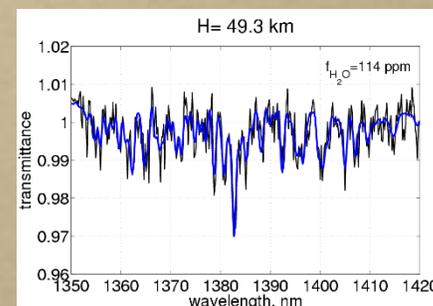
$\tau$  – slant optical depth

Extinction using “onion peeling” method



## gaseous species

- 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



$\text{H}_2\text{O}$  density

$\text{CO}_2$  density

$\text{H}_2\text{O}$  mixing ratio

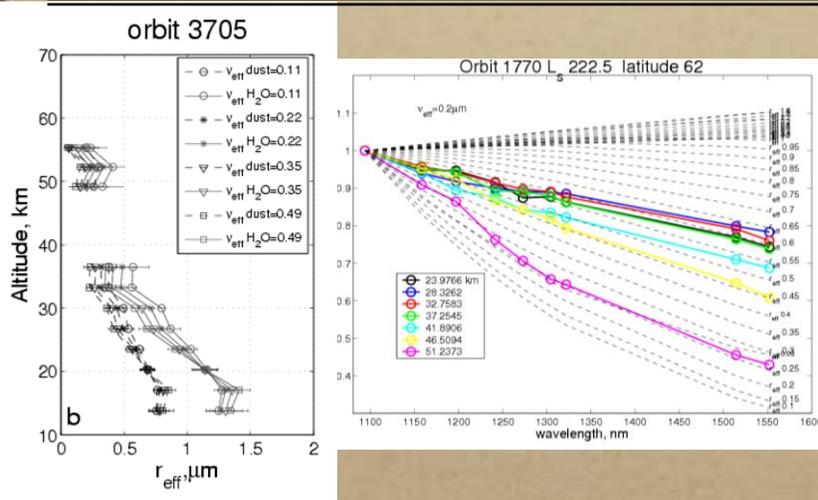
Maltagliati et al., 2011,2013; Fedorova et al., 2009;2018; 2021

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  $\mu\text{m}$

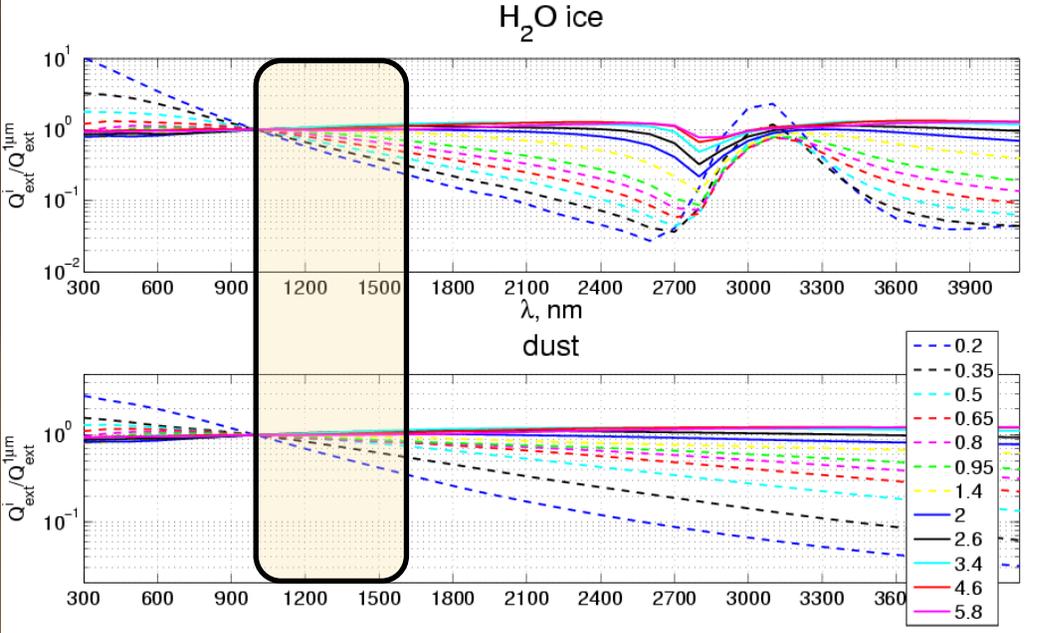
## Particle size distribution

Modeling:

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



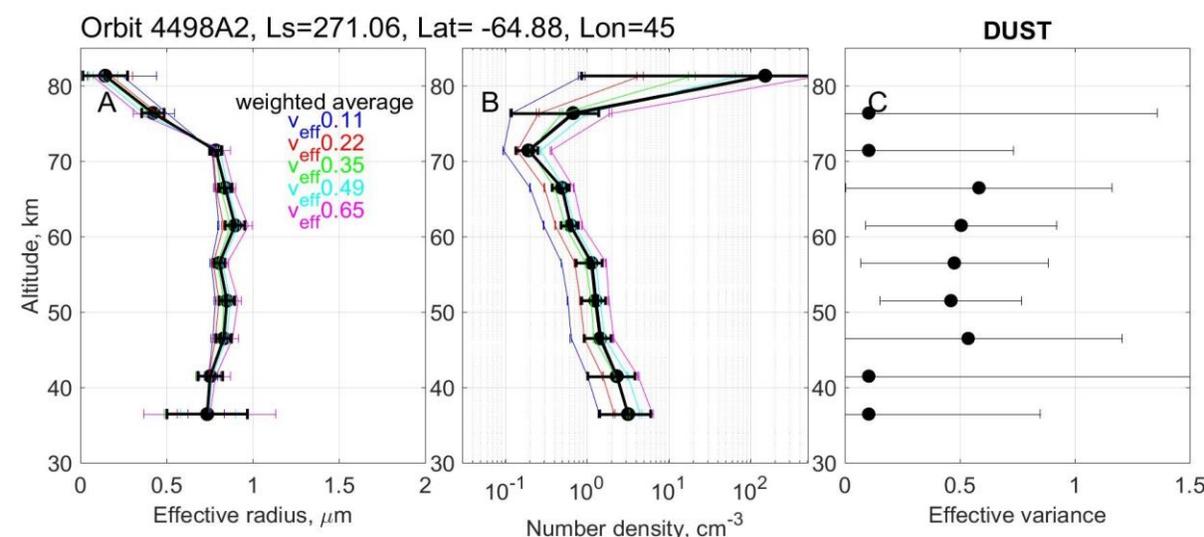
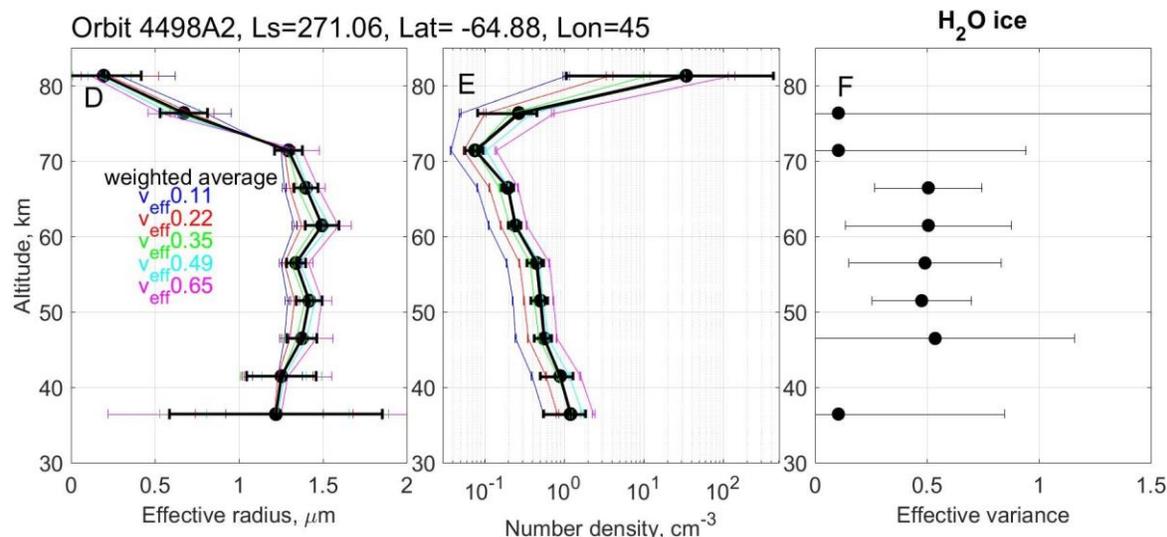
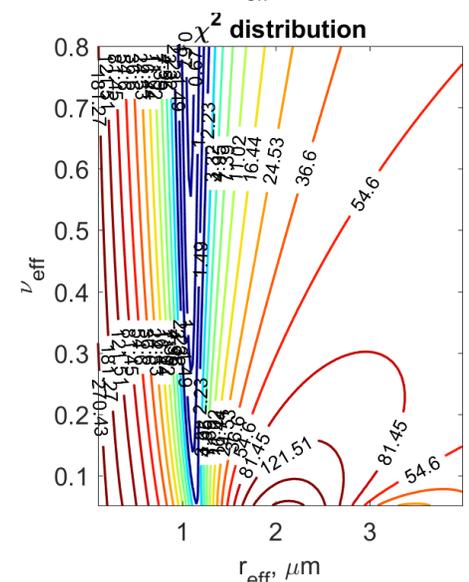
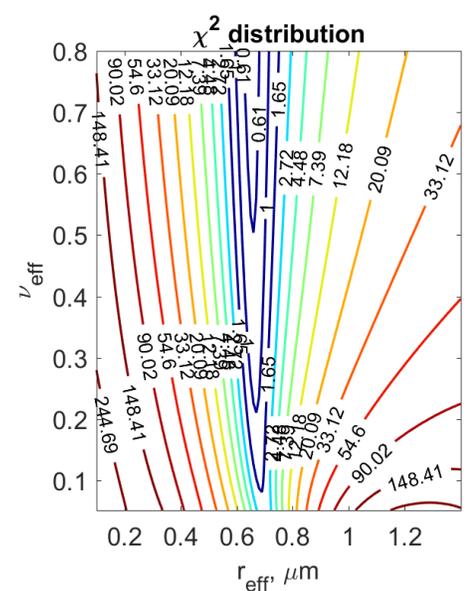
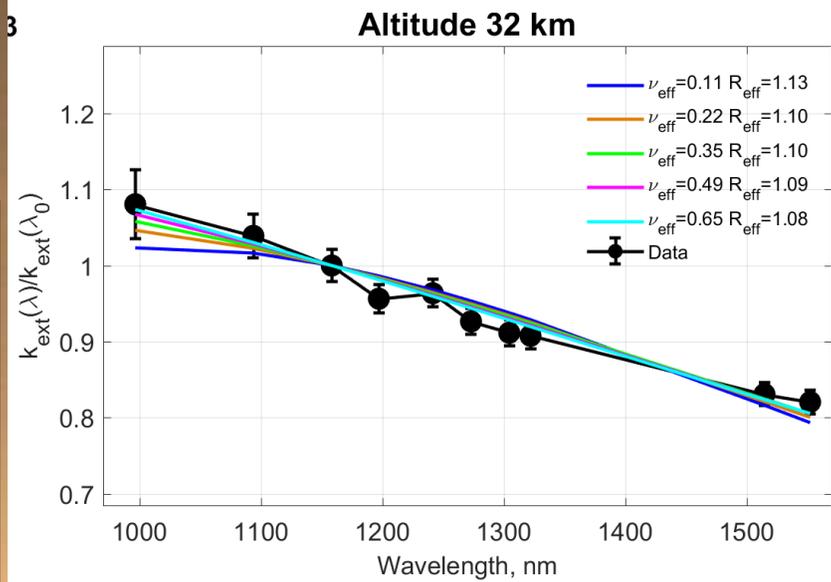
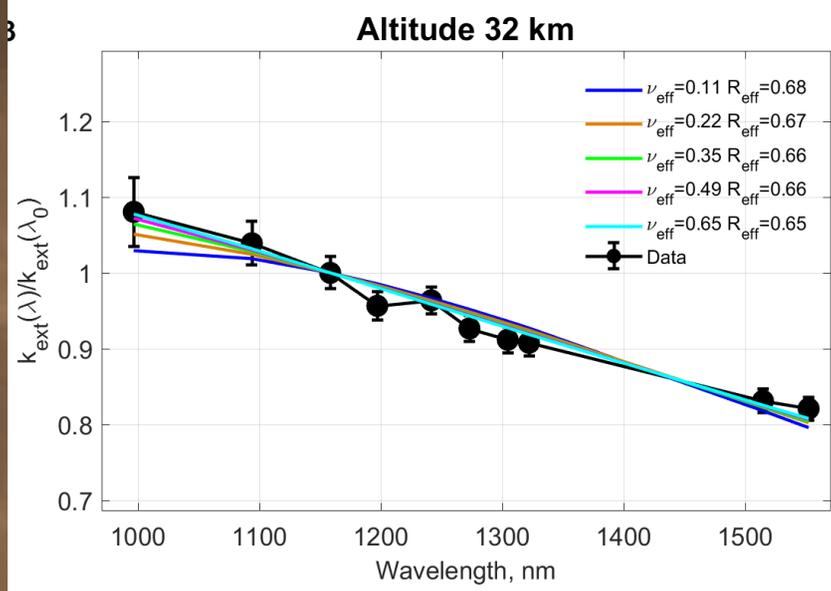
Fedorova et al., 2009;2014



Пыль или H<sub>2</sub>O лед?

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

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



# 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](http://www.elsevier.com/locate/icarus)



Solar infrared occultation observations by SPICAM experiment on Mars-Express: Simultaneous measurements of the vertical distributions of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and aerosol

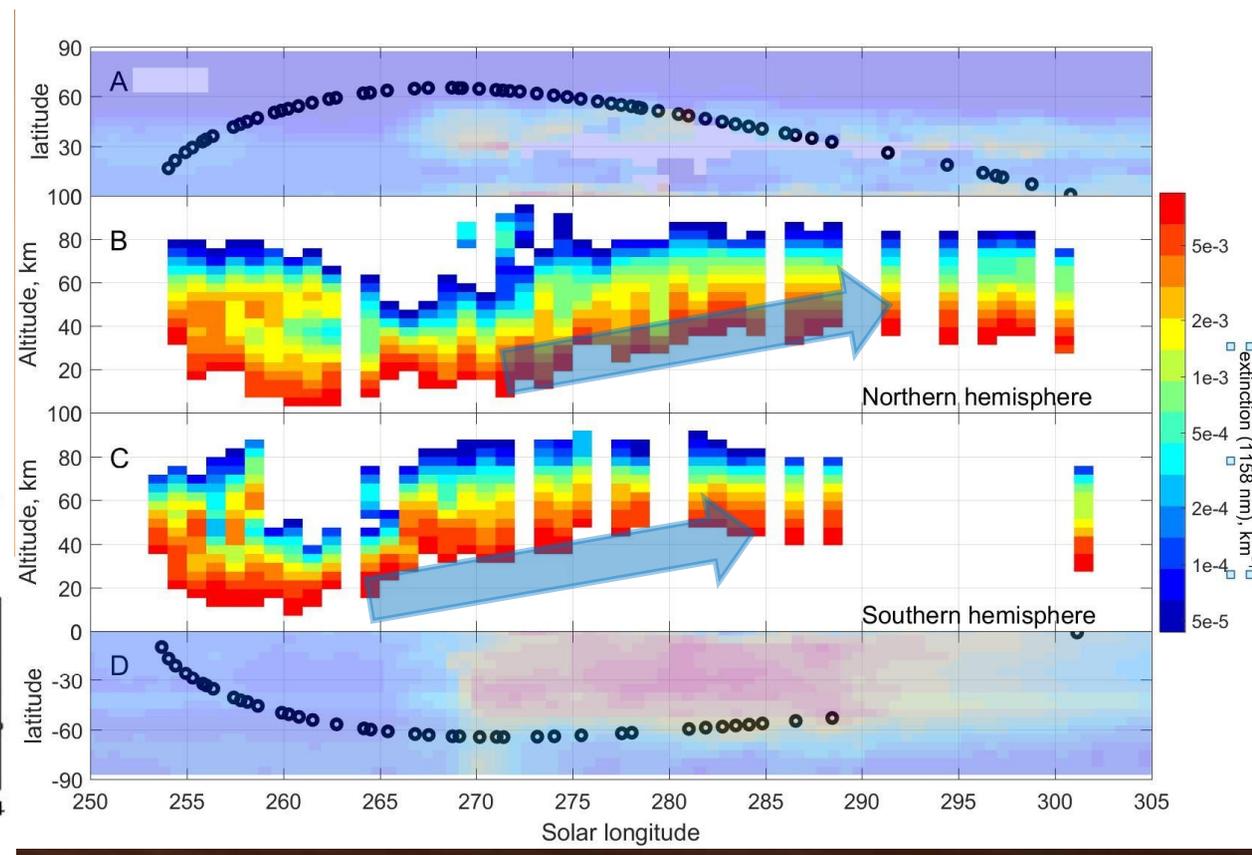
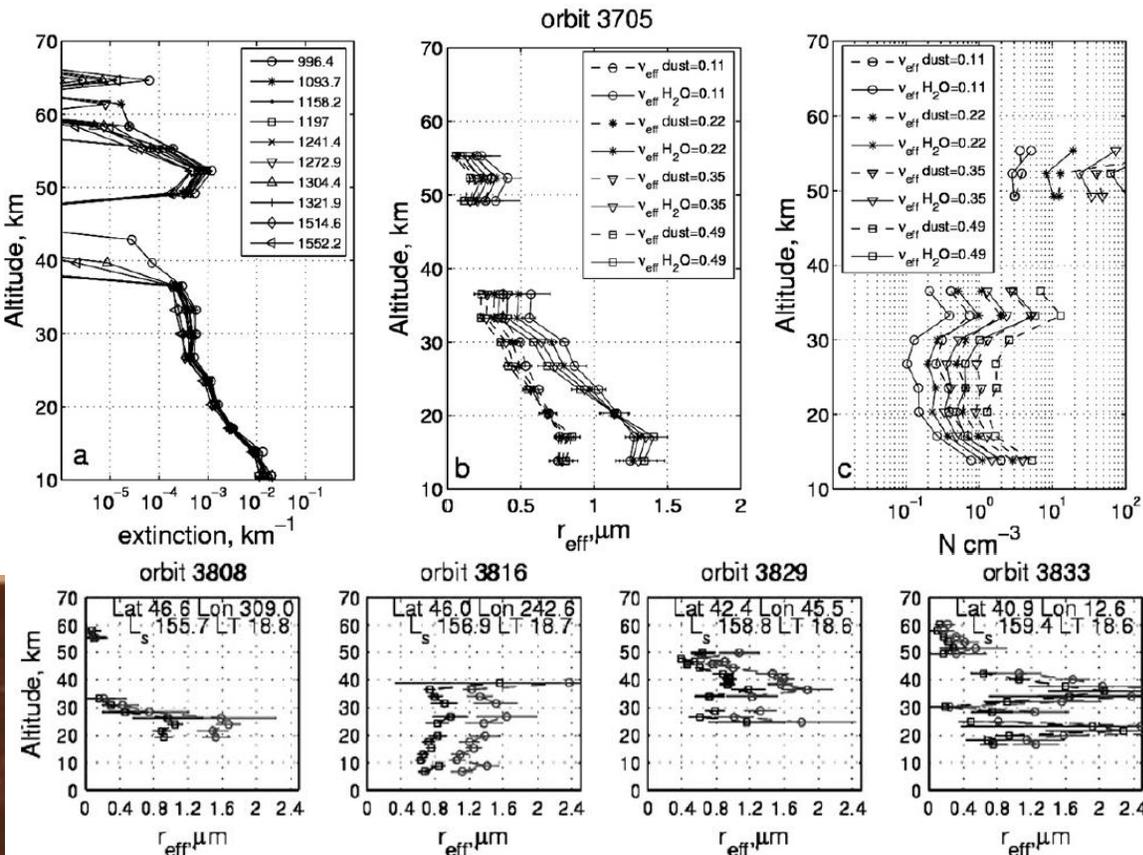
A.A. Fedorova<sup>a,\*</sup>, O.I. Korablev<sup>a</sup>, J.-L. Bertaux<sup>b,c</sup>, A.V. Rodin<sup>a,d</sup>, F. Montmessin<sup>b,c</sup>, D.A. Belyaev<sup>a</sup>, A. Reberac<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup> Space Research Institute (IKI), 84/32 Profsoyuznaya, 117997 Moscow, Russia  
<sup>b</sup> Service d'Aéronomie du CNRS, BP 3, 91371, Verrières-le-Buisson, France  
<sup>c</sup> Institut Pierre Simon Laplace, Université de Versailles-Saint-Quentin, 78 Saint Quentin en Yvelines, France  
<sup>d</sup> 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<sup>a,\*</sup>, O.I. Korablev<sup>a</sup>, F. Montmessin<sup>b,c</sup>, J.-L. Bertaux<sup>b,c</sup>, D.S. Betsis<sup>a</sup>, F. Lefèvre<sup>b,c</sup>

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

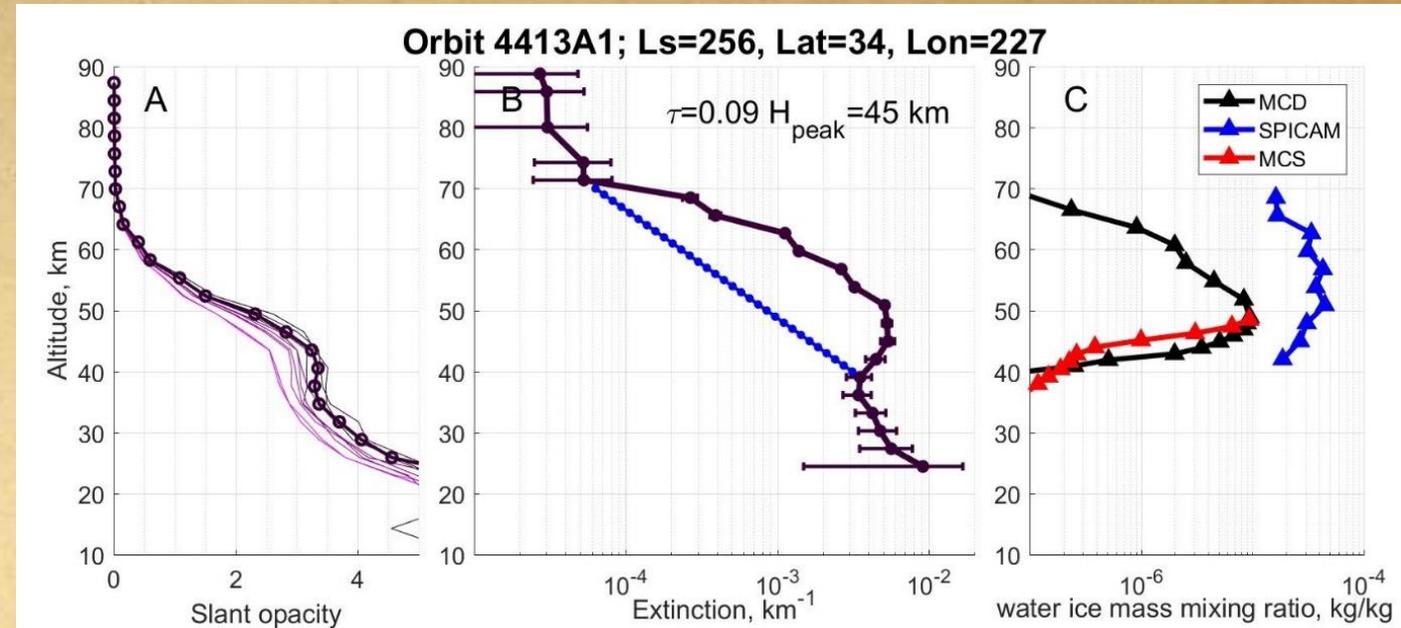


Сезонный тренд в пылевую бурю

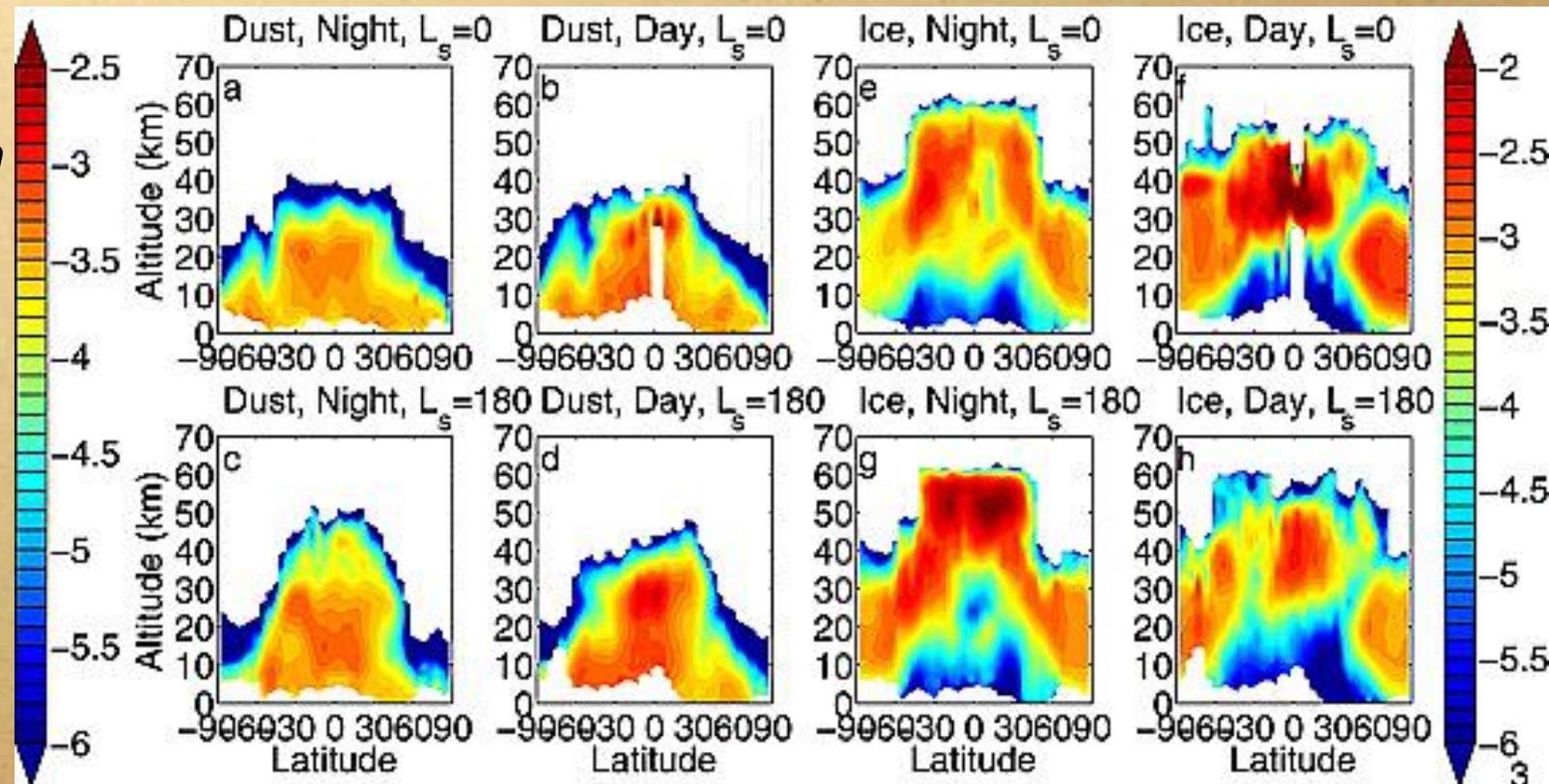


# По профилям экстинкции (ослабления): наблюдаемые слои – облака льда?

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



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



Mars Reconnaissance Orbiter

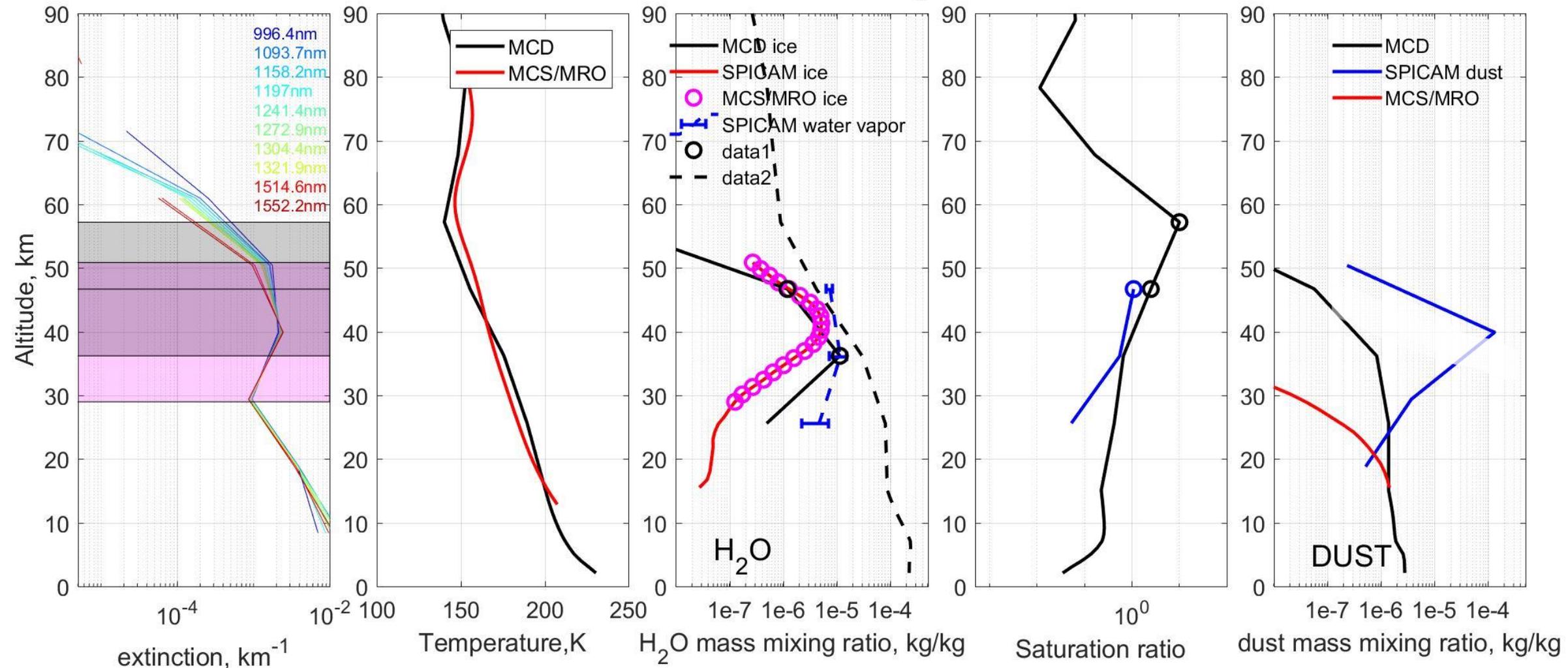
# Является ли слой облаком водяного льда?



## 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  $S_2 > 1$ .

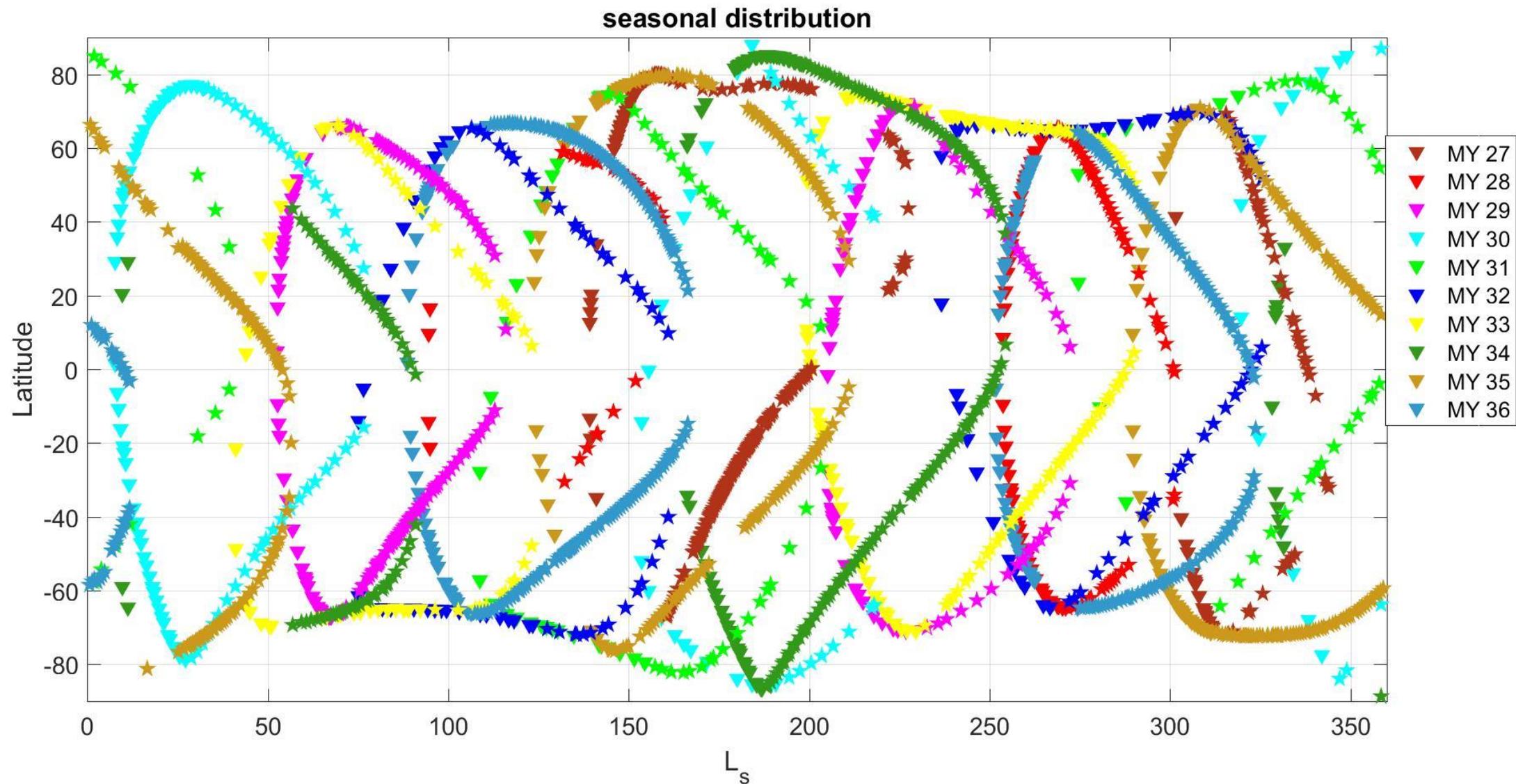
Orbit 13202 N1 Ls=135.6 Lat=38.54 Long=90.26 LT SPICAM=19.01 LT MCS=17.258



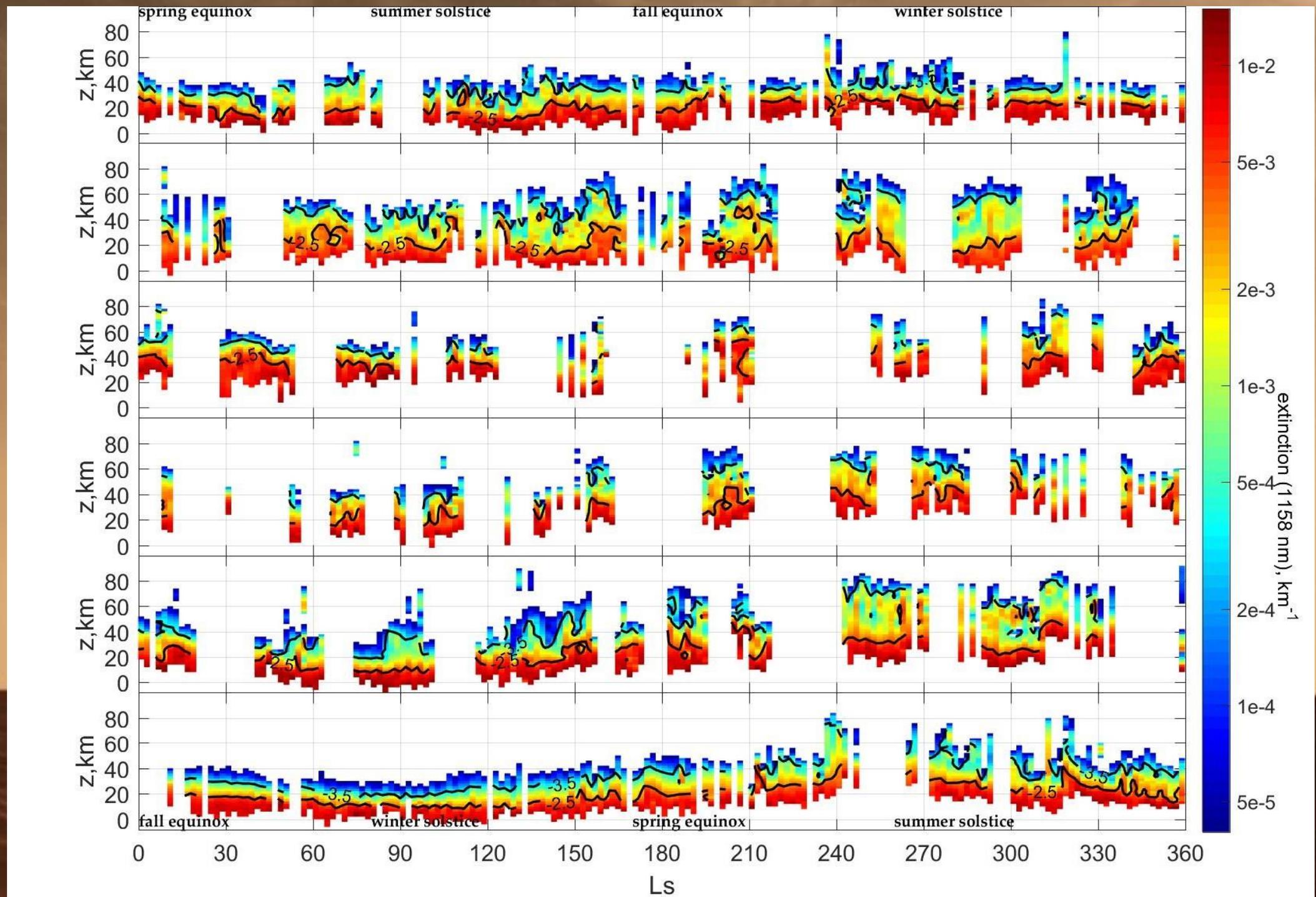
# Наблюдение

## Пространственное и сезонное распределение

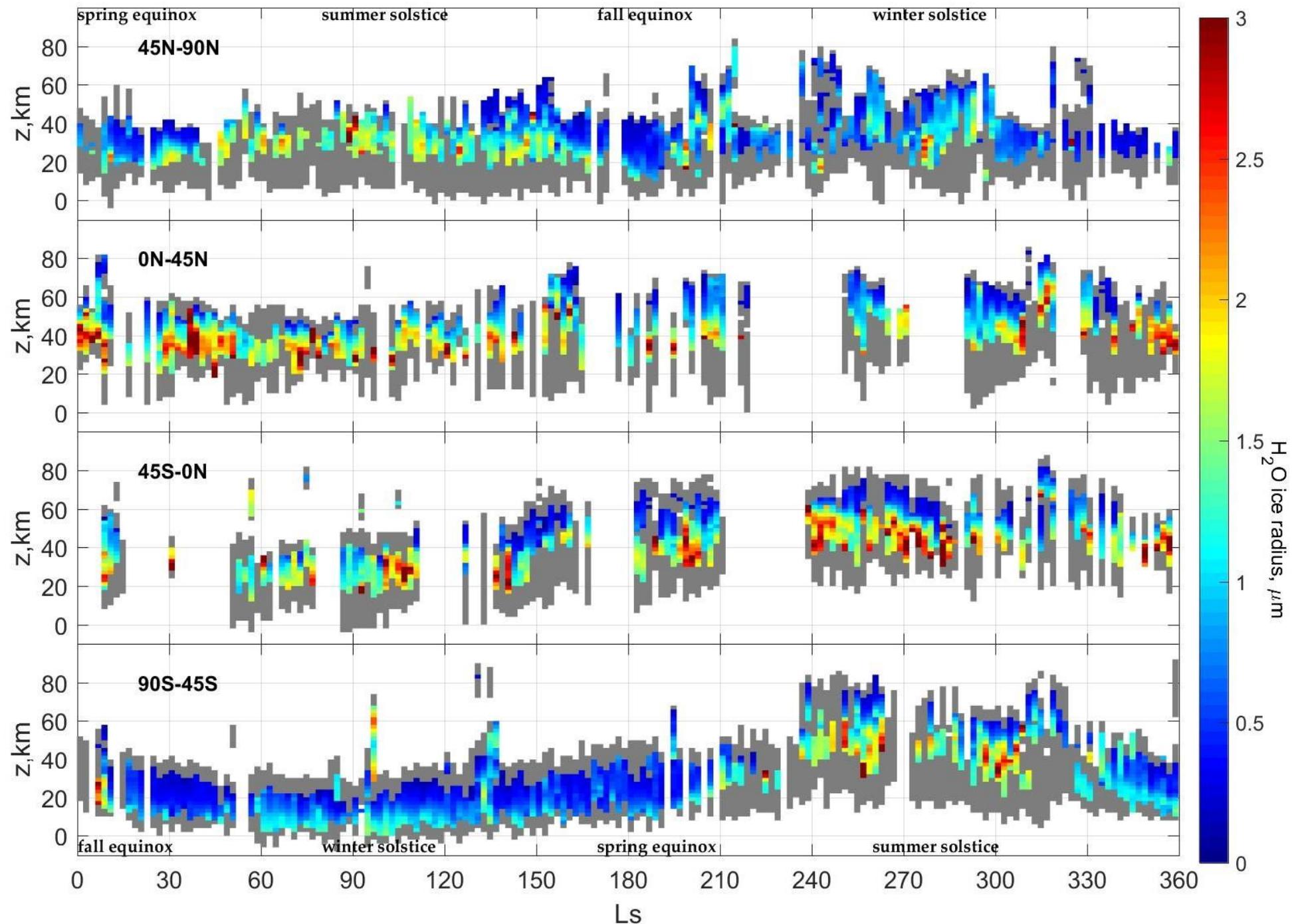
10 марсианских лет наблюдений (MY27-36)



# Экстинкции за период 28-36 марсианского года: сезонный тренд

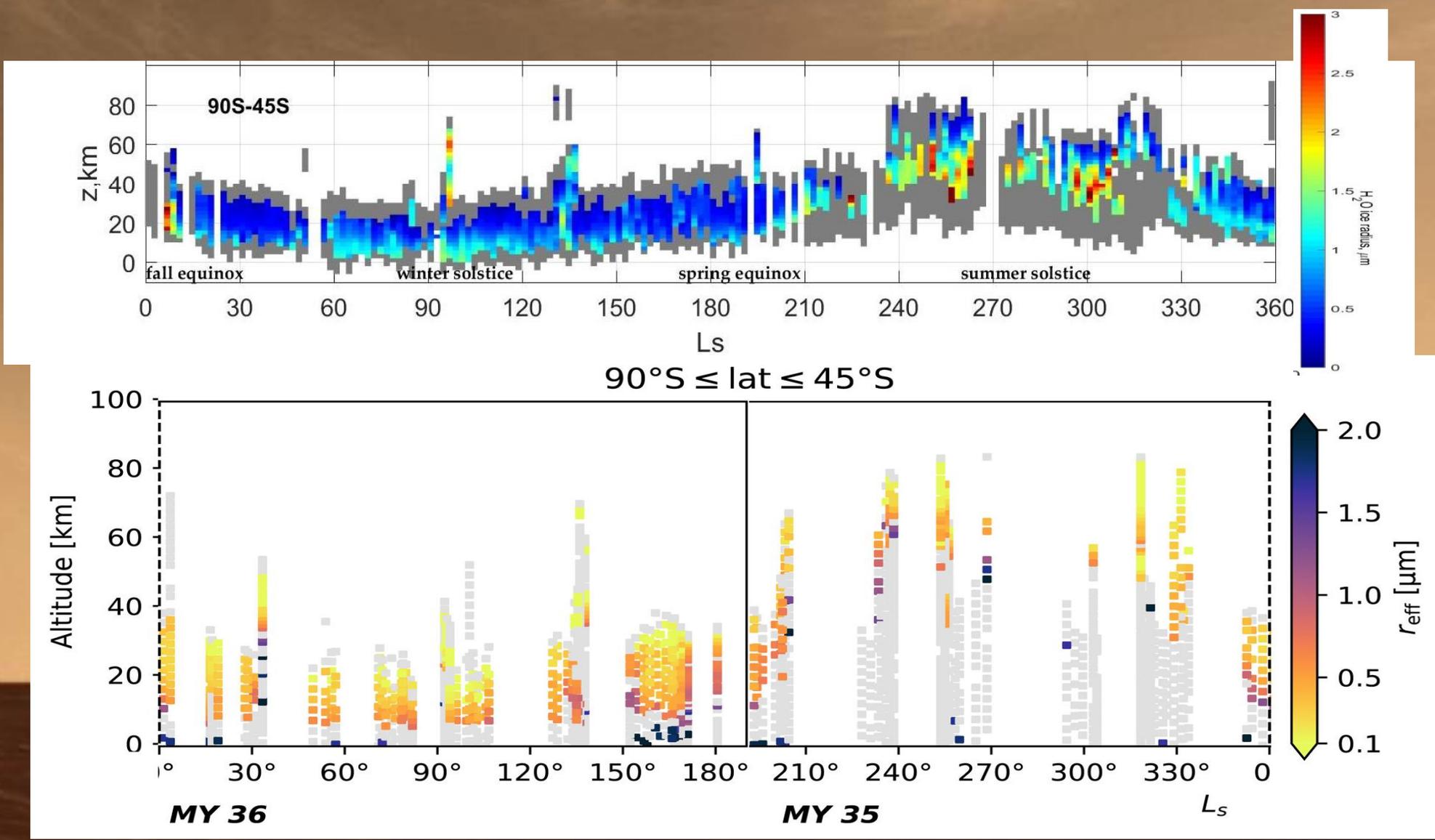


## Распределение водяного льда по размерам: сезонный тренд (MY28-MY36)

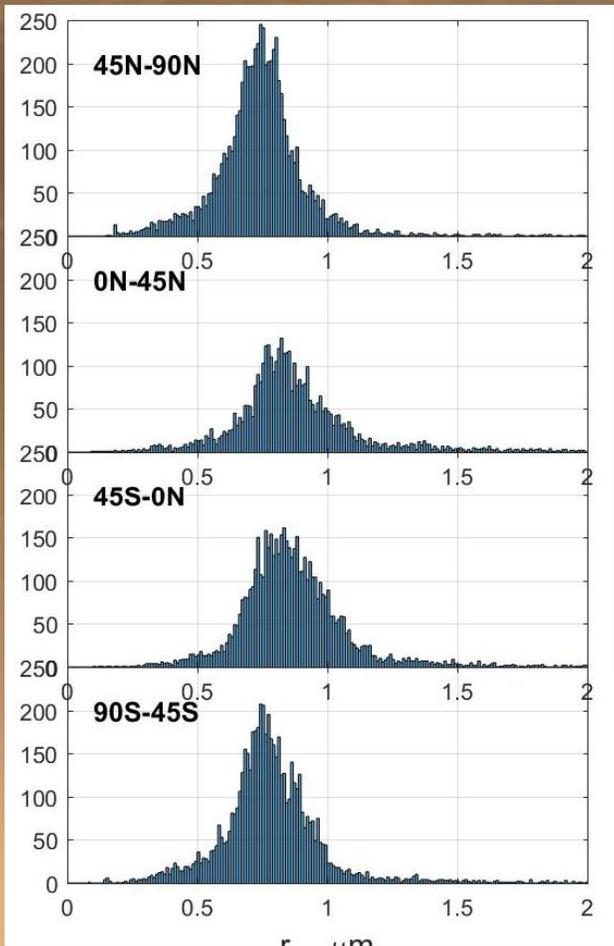
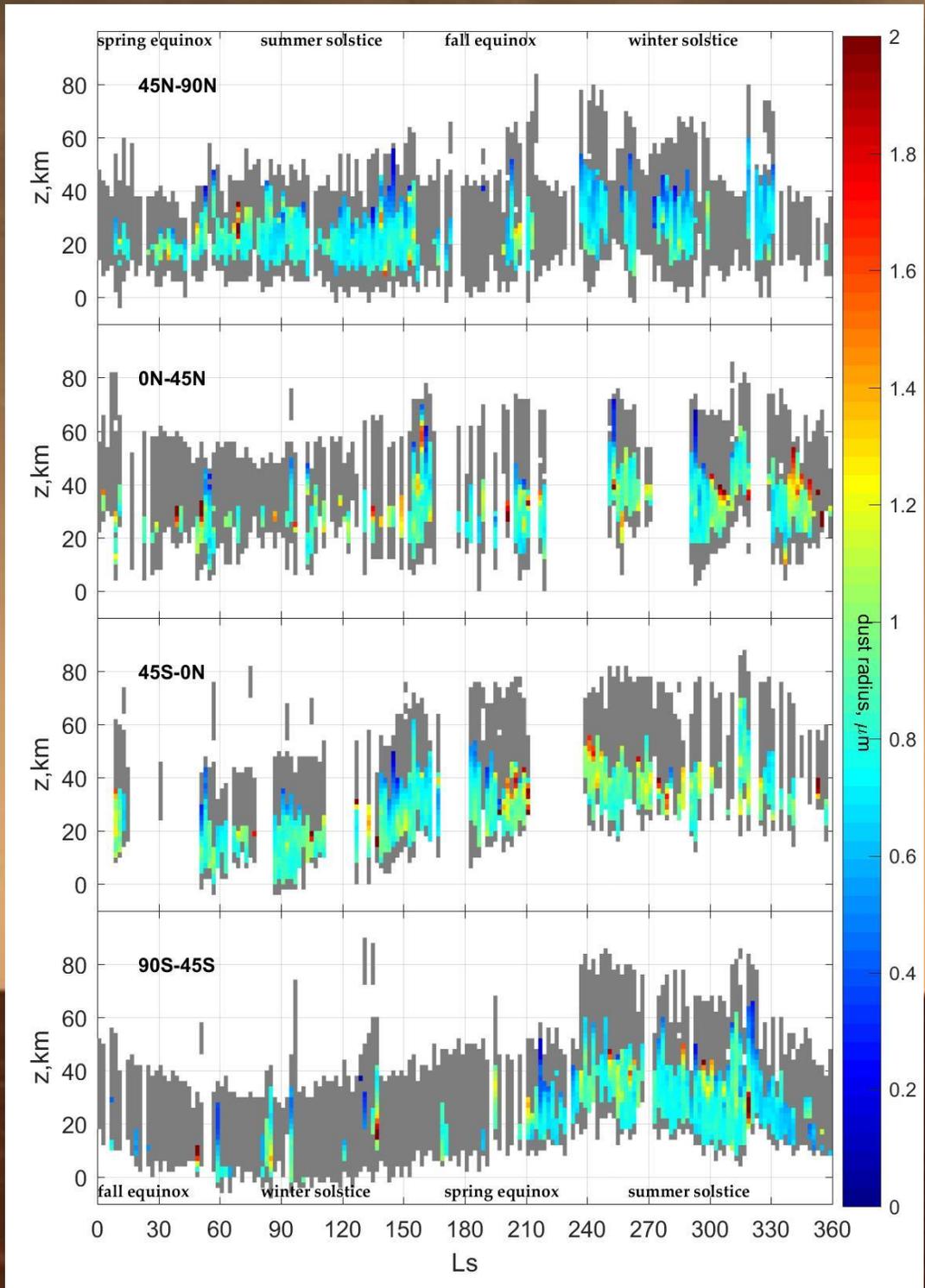


## Распределение водяного льда по размерам: сезонный тренд (MY28-MY36)

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)

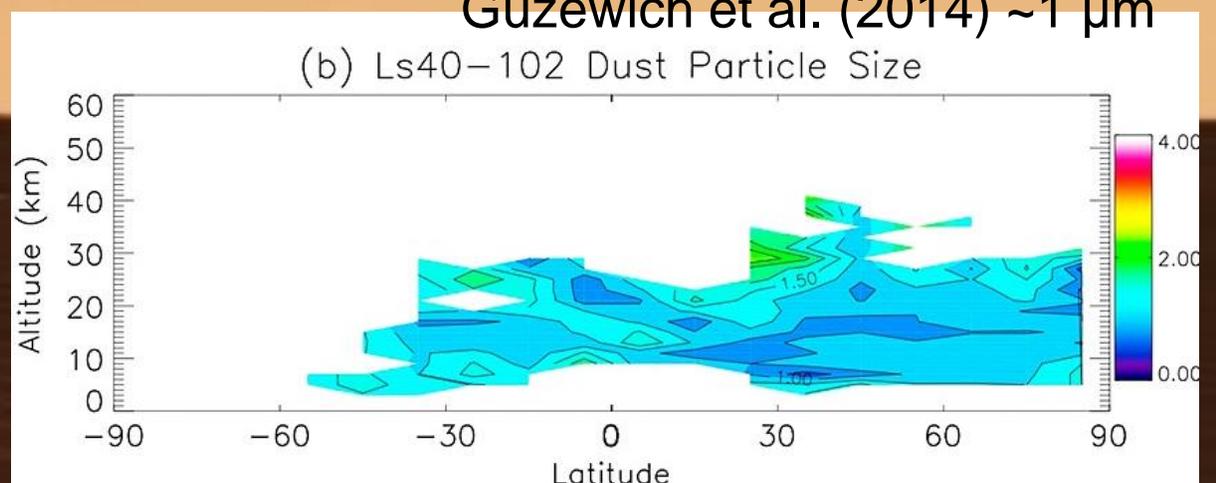


$r_{\text{eff}} \sim 0.7-0.85$  мкм с  
меньшими частицами  
на высоких широтах

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

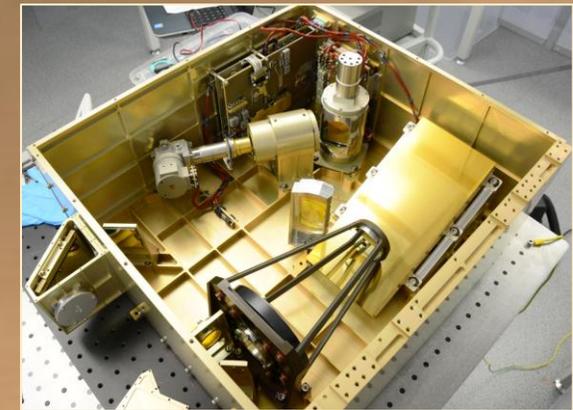
TIRVIM и MIR разделяют в наблюдениях водяной лед и пыль по полосе льда 3 мкм

## TIRVIM, Fourier

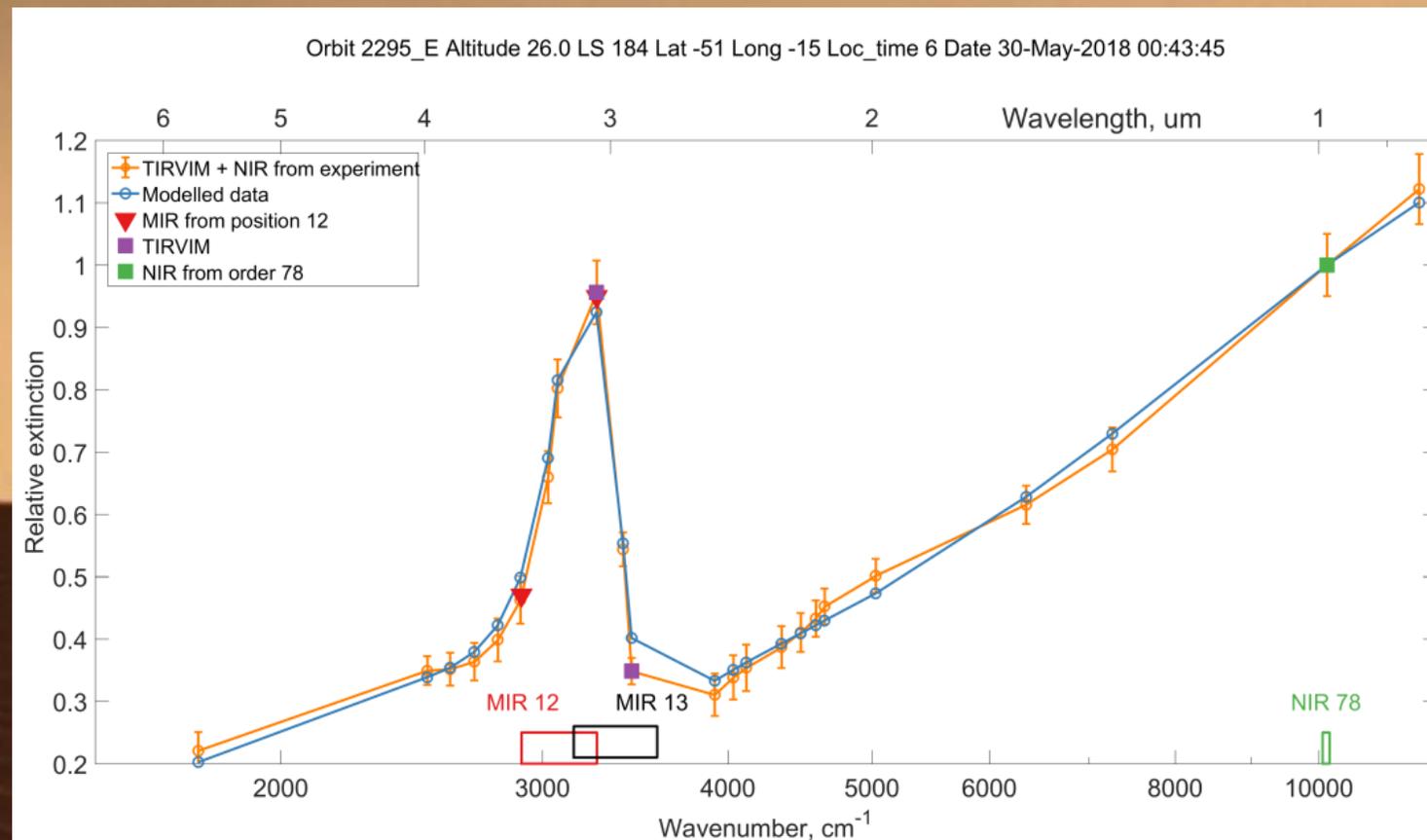
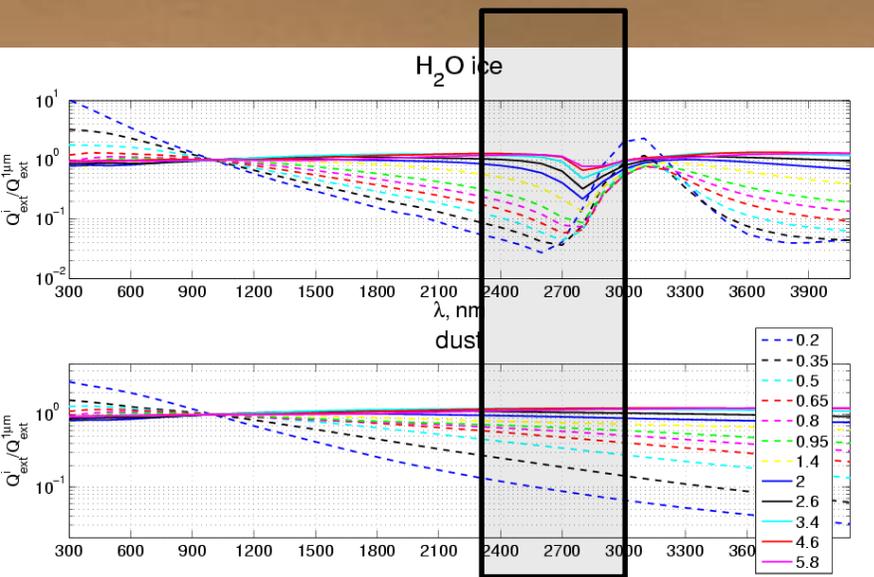


- Spectral range 1.7 – 17  $\mu$  (580–5800  $\text{cm}^{-1}$ )
- $\Delta\nu \sim 0.13 \text{ cm}^{-1}$  (Sun), 0.8  $\text{cm}^{-1}$  (Mars)
- Operation modes: Nadir and Solar Occultation
- FOV:  $\varnothing 2.5^\circ$

## MIR, echelle+cross-dispersion



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



Luginin et al. (2020; 2024)

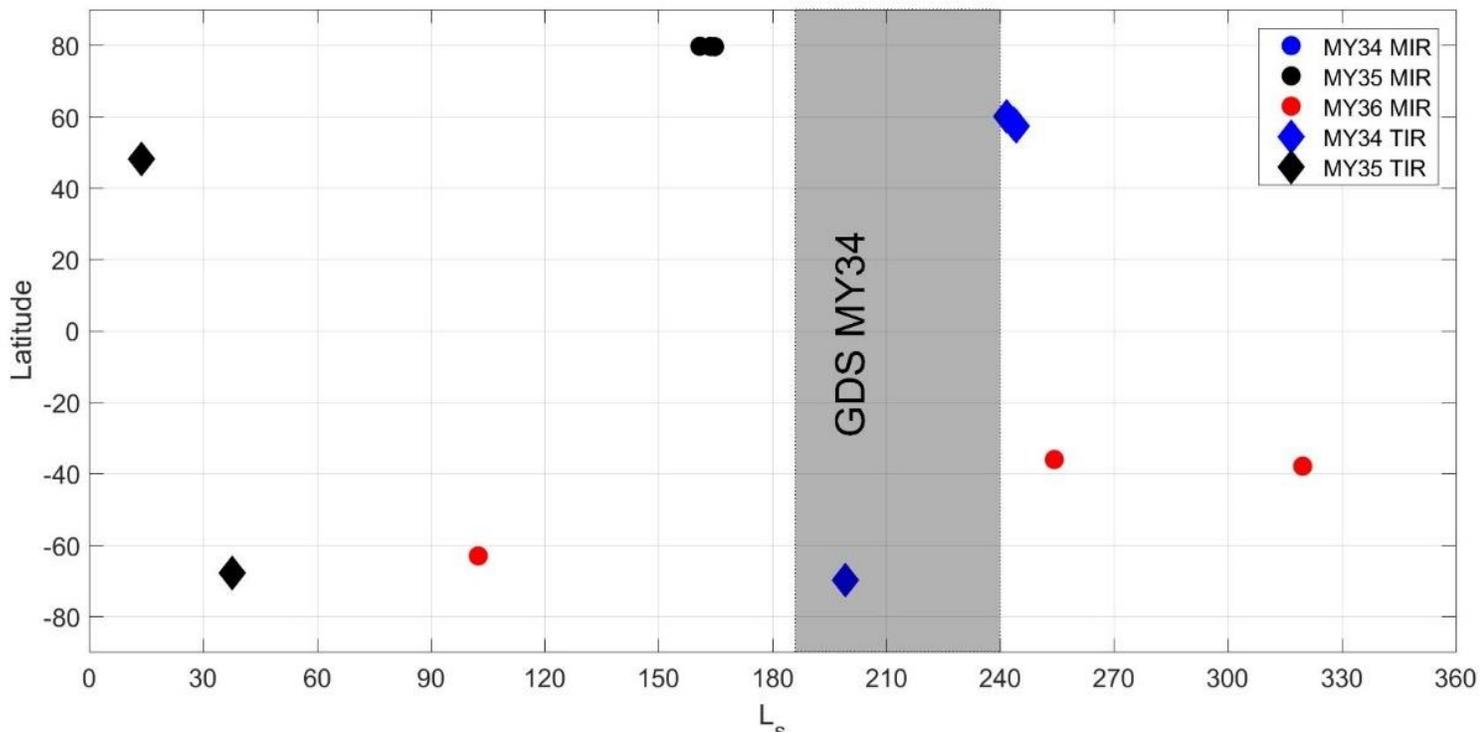
# Совместные наблюдения с ACS TGO

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!*