

АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТ: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ФИЗТЕХЕ И ИКИ РАН

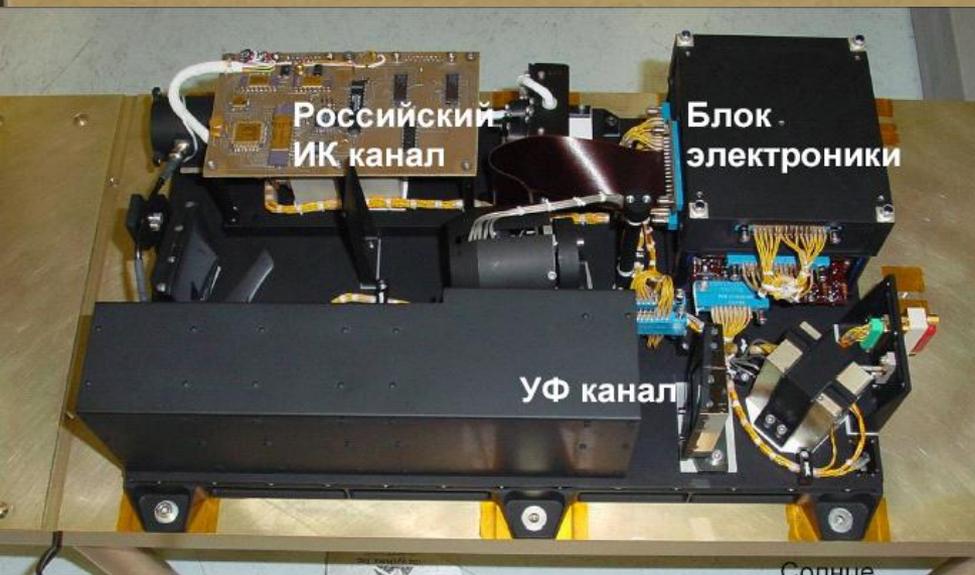
**Постановление № 220 Правительства
Российской Федерации**

Ведущий ученый В. А. Краснопольский

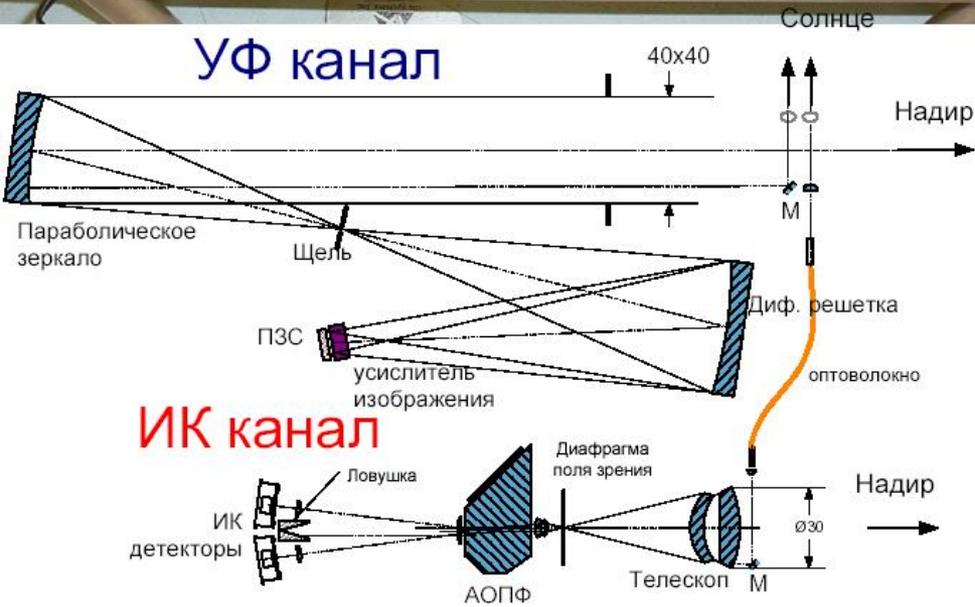
Основные направления исследований

- Анализ и интерпретация наблюдений со спутников «Марс Экспресс» и «Венера Экспресс»
- Наземная спектроскопия Венеры и Марса
- Трёхмерные модели циркуляции в атмосферах Марса, Венеры и Титана и фотохимические модели этих атмосфер
- Подготовка новых планетных миссий (ЭкзоМарс) и разработка и изготовление новых приборов для планетных исследований

Марс-Экспресс: СПИКАМ ИК (Korablev et al 2006)



СПИКАМ- многофункциональный спектрометр для исследования атмосферы Марса, в том числе методом наблюдений затмений Солнца и звезд.
Кооперация: Франция, Россия, Бельгия, США
Российский вклад в СПИКАМ – функционально законченный канал – спектрометр ближнего ИК излучения.

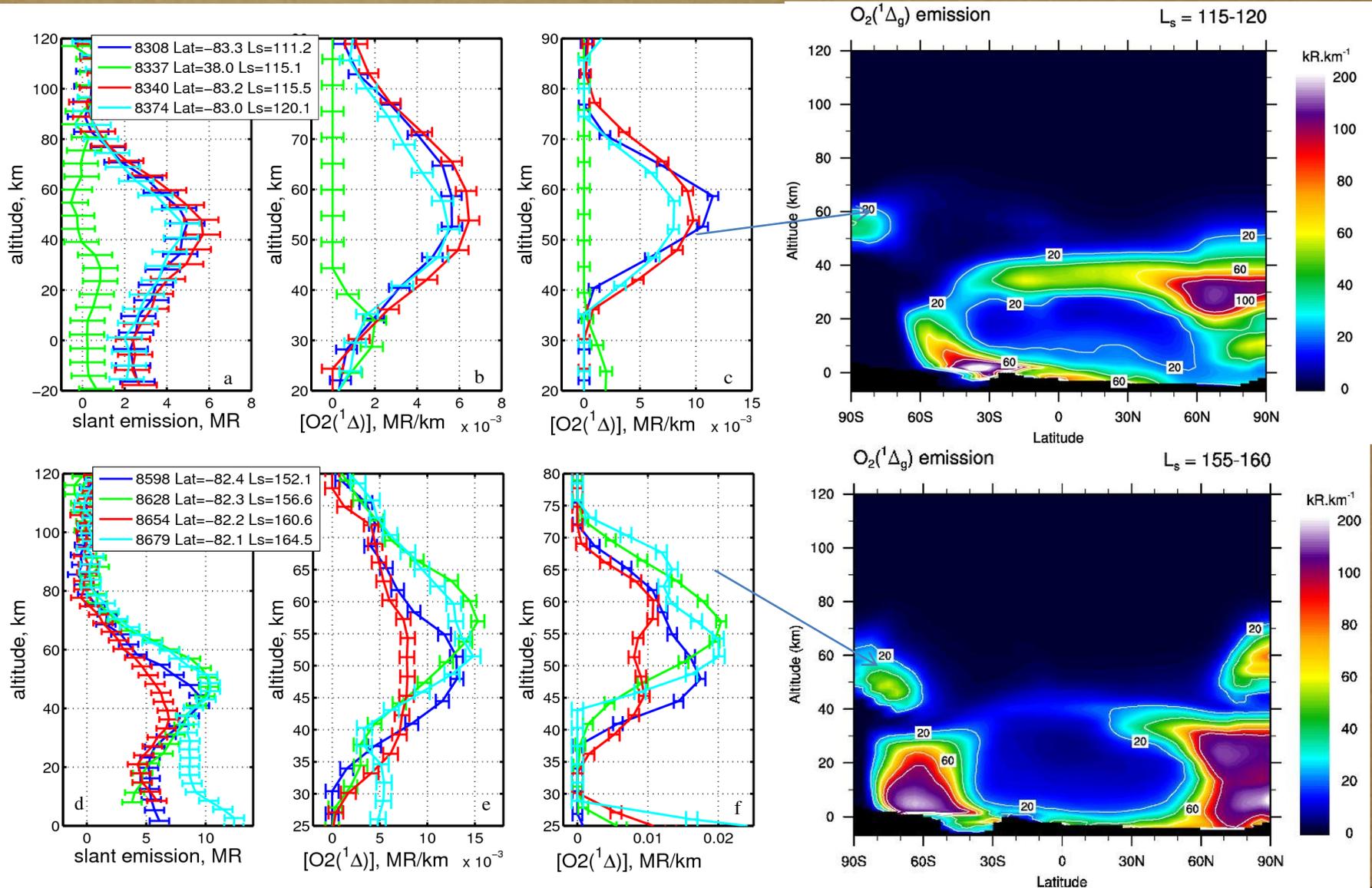


Основные характеристики спектрометра СПИКАМ

	УФ канал	ИК канал
Спектральный диапазон, нм	118-320	1000-1700
Спектральное разрешение, нм	0.9	0.5-1.2
Угловое разрешение, мрад надир затмения	0.2x1 0.2	17.5 1.5
Масса	4.9 кг	
Объем информации	30 Мбит на орбиту	

The O₂ nightglow in the martian atmosphere by SPICAM

Fedorova, A. A.; Lefèvre, F.; Guslyakova et al., *The O₂ nightglow in the martian atmosphere by SPICAM onboard of Mars-Express, Icarus, Volume 219, Issue 2, p. 596-608, 2012.*



Water vapour vertical profiles in MY 29 and supersaturation in the middle atmosphere



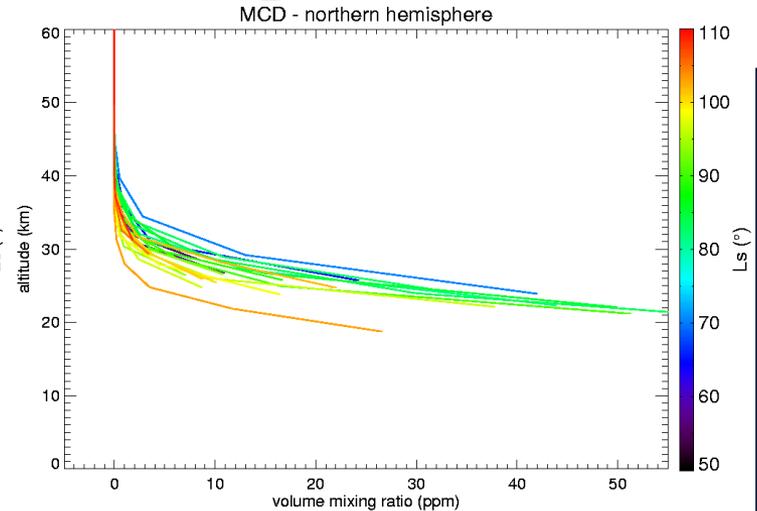
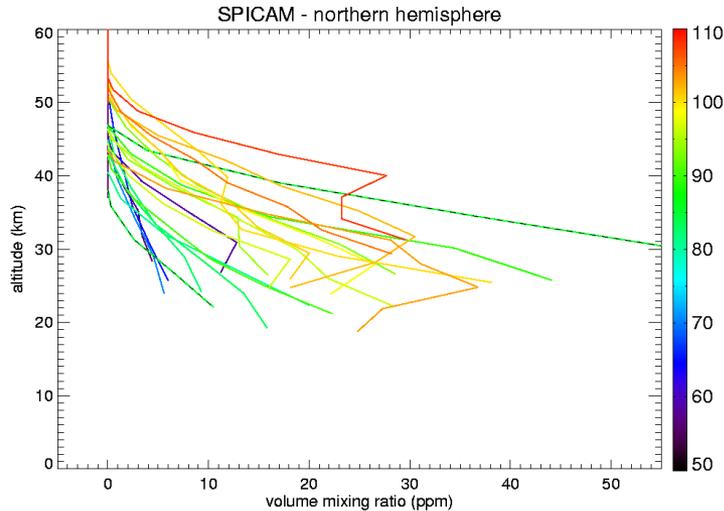
L. Maltagliati, F. Montmessin, A. Fedorova et al. Evidence of water vapor in excess of saturation in the atmosphere of Mars, *Science* 333, 1868-1871
Maltagliati L., F. Montmessin, O. Korablev et al., Annual survey of water vapor vertical distribution and water-aerosols coupling in the Martian atmosphere observed by SPICAM/MEx solar occultations, *Icarus*, Volume 223, Issue 2, p. 942-962, 2013

northern
spring-
summer

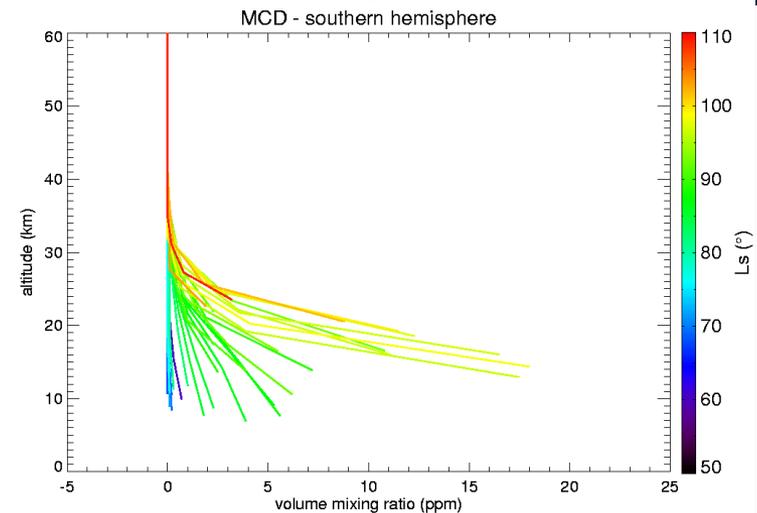
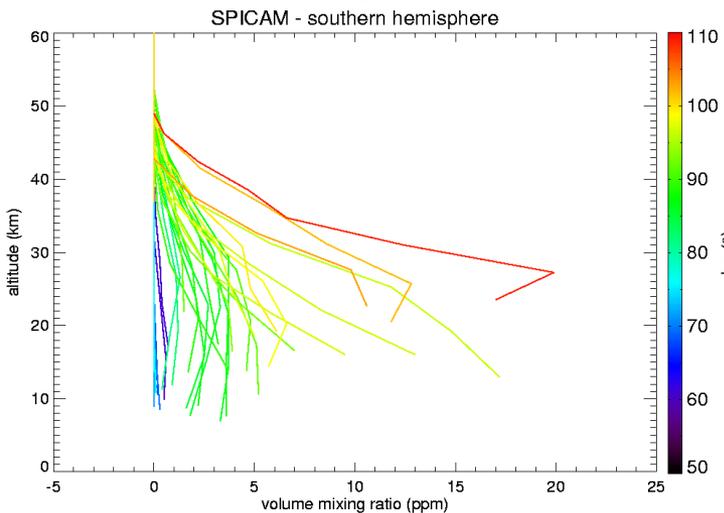
SPICAM data

GCM predictions

north



south

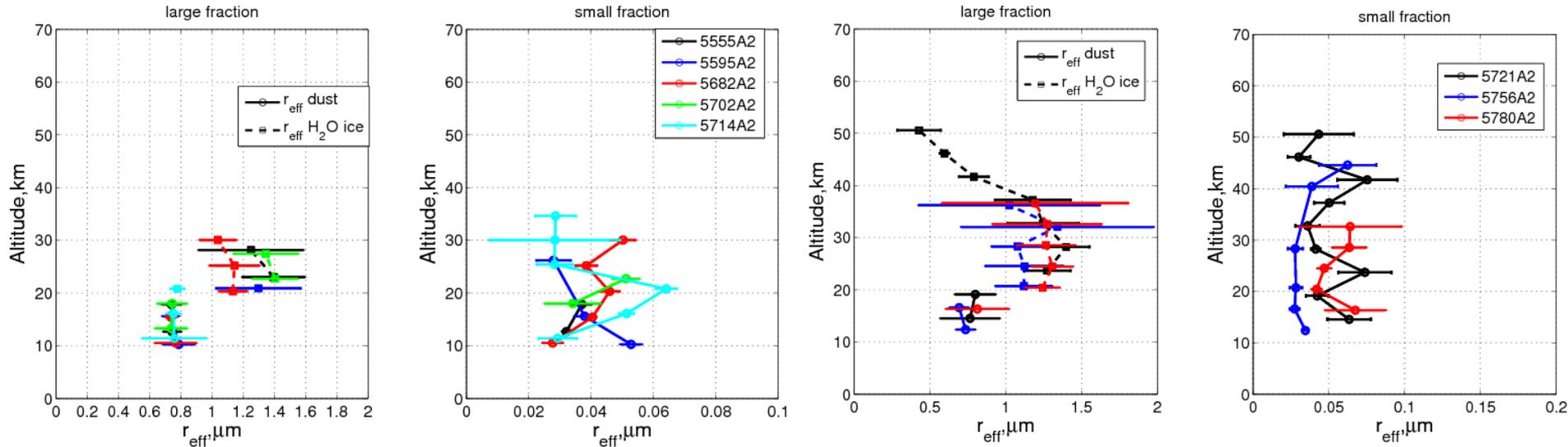


Evidence for a bimodal size distribution of aerosol particles on Mars by SPICAM/MEX

A.A. Fedorova, F. Montmessin, A.V. Rodin et al. Evidence for a bimodal size distribution for the suspended dust particles on Mars, submitted to *Icarus*, 2013

>60°N

<60°N



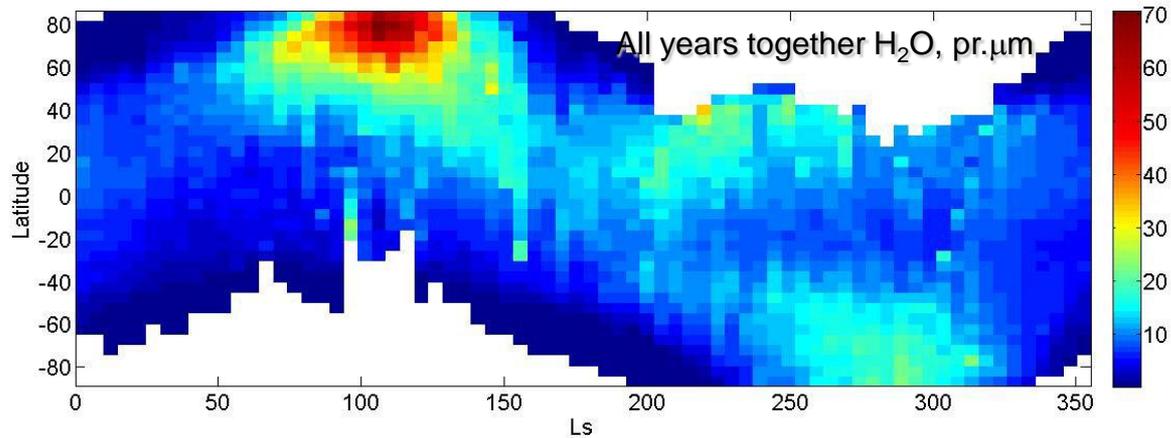
	$r_1, \mu\text{m}$	$r_2, \mu\text{m}$	$r_3, \mu\text{m}$	N_1, cm^{-3}	N_2, cm^{-3}	N_3, cm^{-3}	H_1, km	H_2, km
Northern hemisphere								
>60N	0.75	1.12	0.039	0.4-2	0.04-0.1	200-10 ⁴	30	30-35
(Ls=65-85)	±0.02	±0.32	±0.006					
<60N	0.77	1.25	0.048	0.8-1.5	0.01-0.3	2 10 ⁰ - 5 10 ³	40	50
(Ls=86-93)	±0.05	±0.12	±0.012					

Maximal altitude (large mode) <30-40 km; (small mode) <30-50 km

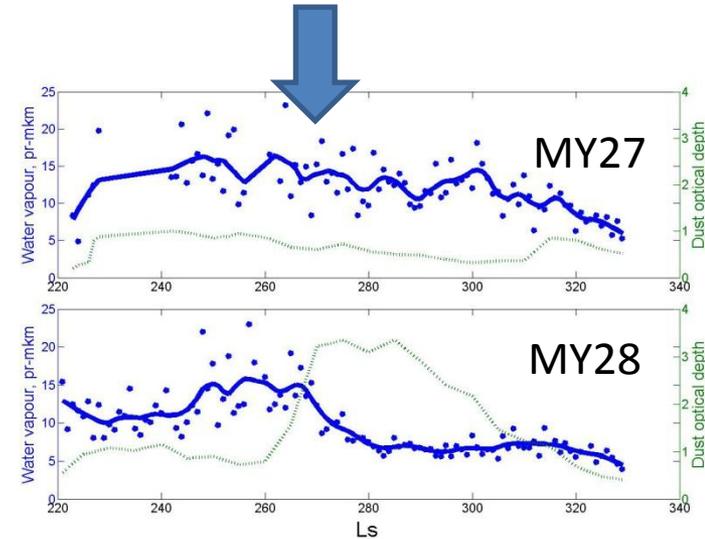
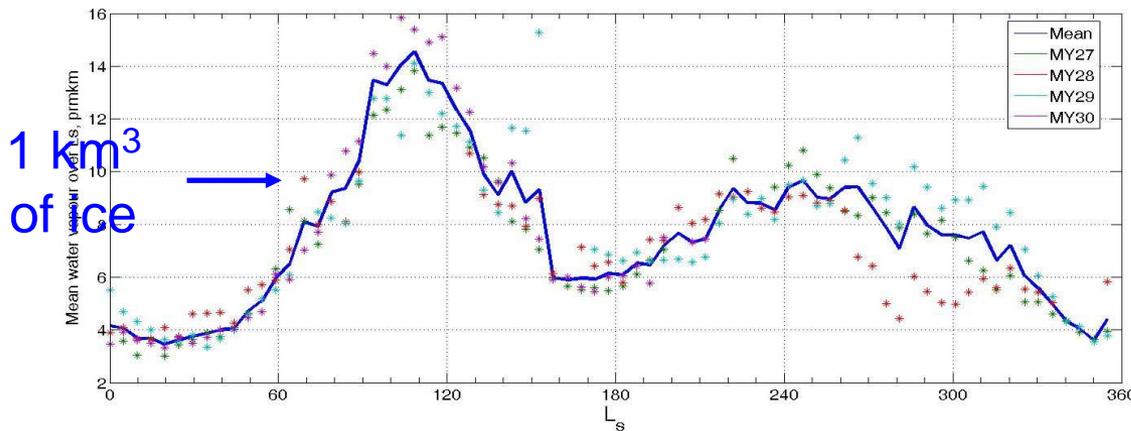
Small mode: $r_{\text{eff}}=40\text{-}50 \text{ nm}$, $N\sim 200\text{-}10^4 \text{ cm}^{-3}$

r_1 is large mode dust radius; r_2 is large mode H₂O cloud radius; r_3 is small mode radius;

Annual water vapor cycle by SPICAM IR (Trokhimovsky et al. 2012)



Example of water vapour loss during global dust storm at MY28 (seasonal dependence for H₂O averaged on latitude stripe (-45:-55))

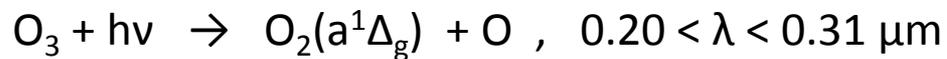


- Good dataset of four Martian years for further analysis
- “Nothing” else to add to the retirement algorithm
- New solar spectra, resulted in more than 10 % increase of water vapour abundance for polar cap, and up to 20% increase for other areas.
- For the first time water vapour map for MY27 with dust-aerosol (years 28 and 29 coming up soon), to be compared with GCM and other instruments results.

Summary

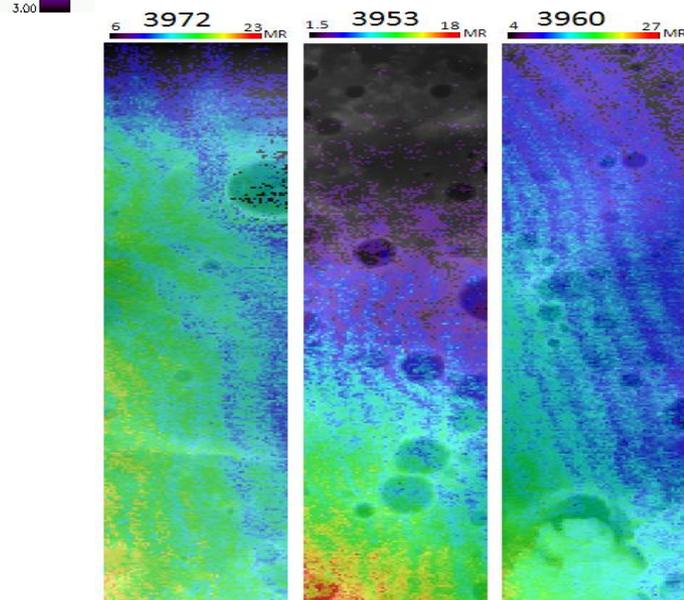
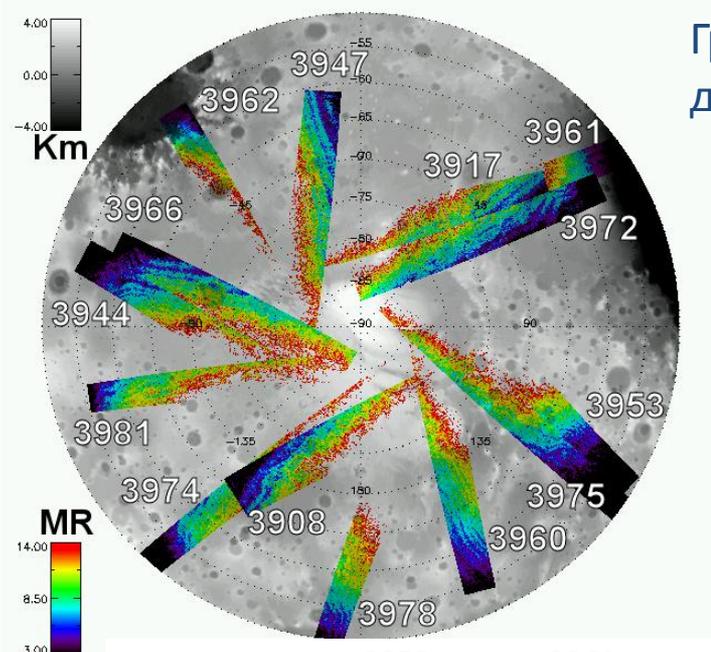
Гравитационные волны в атмосфере Марса на картах дневного свечения O_2 1.27 мкм

$\phi = 55-75^\circ S$, $Ls = 170-182^\circ$

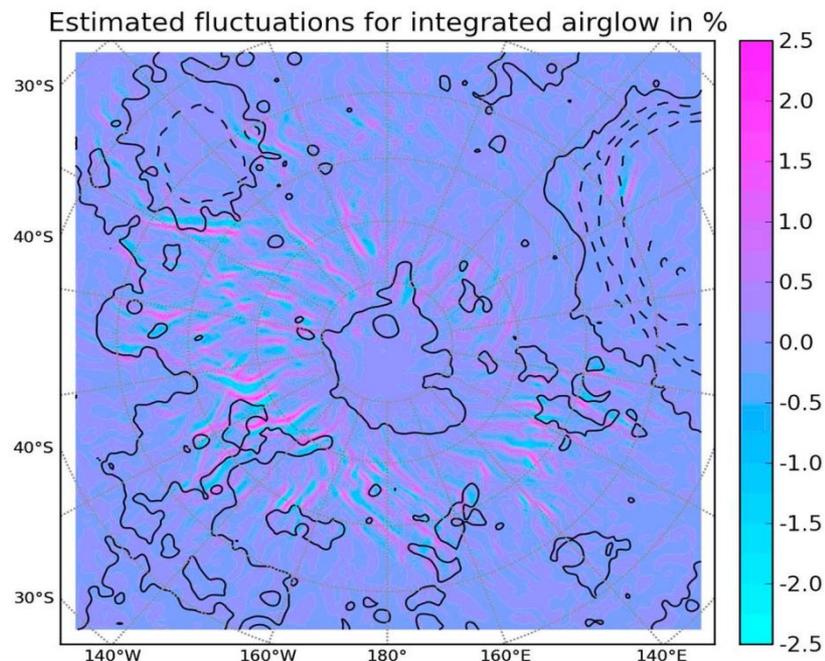


Обнаружены впервые.

Основным триггером гравитационных волн в высоких широтах южного полушария является топография.



Изображения эмиссии O_2 , полученные гиперспектрометром ОМЕГА, наложены на альтиметрию MOLA MGS.



Амплитуда гравитационных волн. Наложено на топографию. Результат мезомасштабного моделирования GCM

SPICAV VIS-IR AOTF spectrometer (Korablev et al. 2009)

Short-wavelength range Long-wavelength range

Spectral range

0.65–1.05 μm

1.05–1.7 μm

Spectral resolution

7.8 cm^{-1} (1600)

5.2 cm^{-1} (1500)

FOV

2 ° circular (0.07° in occultation mode)

AOTF

TeO₂, Two actuators, Aperture 6 x 4mm², 2°

Detector

Two bicolor diodes (Hamamatsu K3413-05)



M. Science modes:

■ Nadir:

- day side (**H₂O above clouds**, clouds top variations, polarization);
- night side (0.9-1.3 μm windows, **H₂O near the surface**, O₂¹Δ_g at 1.27 μm)

■ Solar occultations (atmospheric structure above the clouds, clouds properties, particle size, extinction from 0.7 to 1.7 μm)

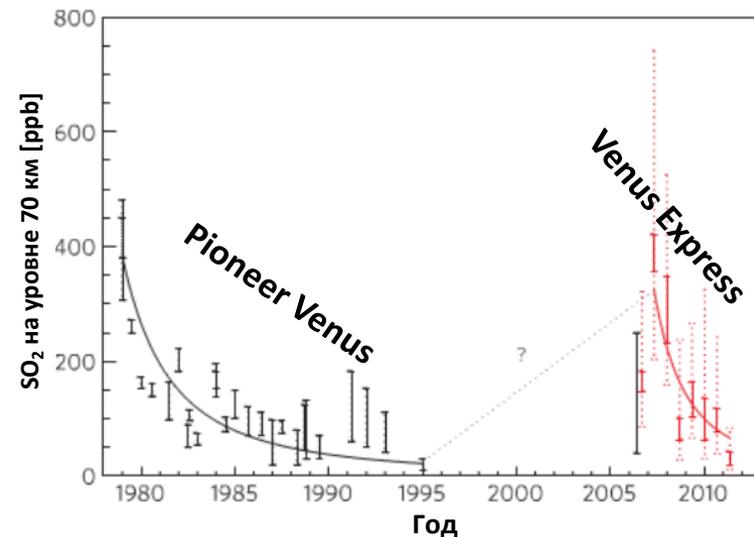
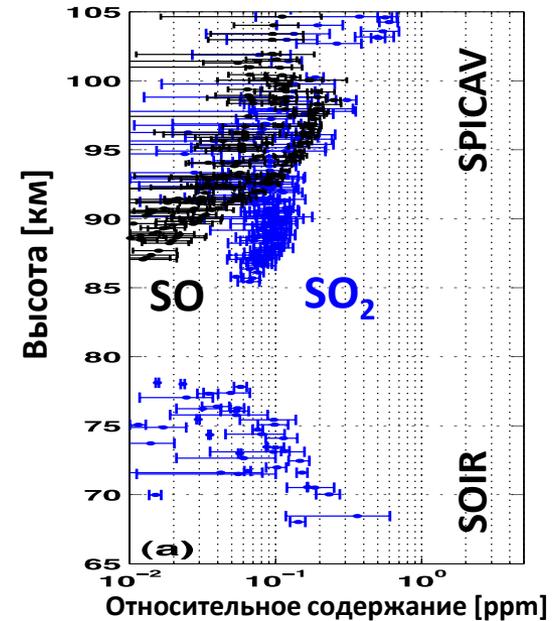
■ Limb (O₂¹Δ_g emission at 1.27 μm , cloud structure)

Измерения содержания окисей серы над облаками Венеры (орбитальный аппарат «Венера Экспресс»)

1. Солнечное просвечивание прибором SPICAV/SOIR (по спектрам 200-240 нм и 4 мкм).
 - вертикальное распределение содержания SO и SO₂;
 - “X”-образная структура SO&SO₂ в верхнем слое => фотохимия между SO и SO₂.
2. Измерения в надир прибором SPICAV (по спектрам 200-240 нм).
 - широтное распределение содержания SO₂ по уровню верхней границы облаков (убывает к полюсам);
 - годовое распределение содержания SO₂ (эволюция повторяет данные Pioneer Venus 1980-1990 гг.)

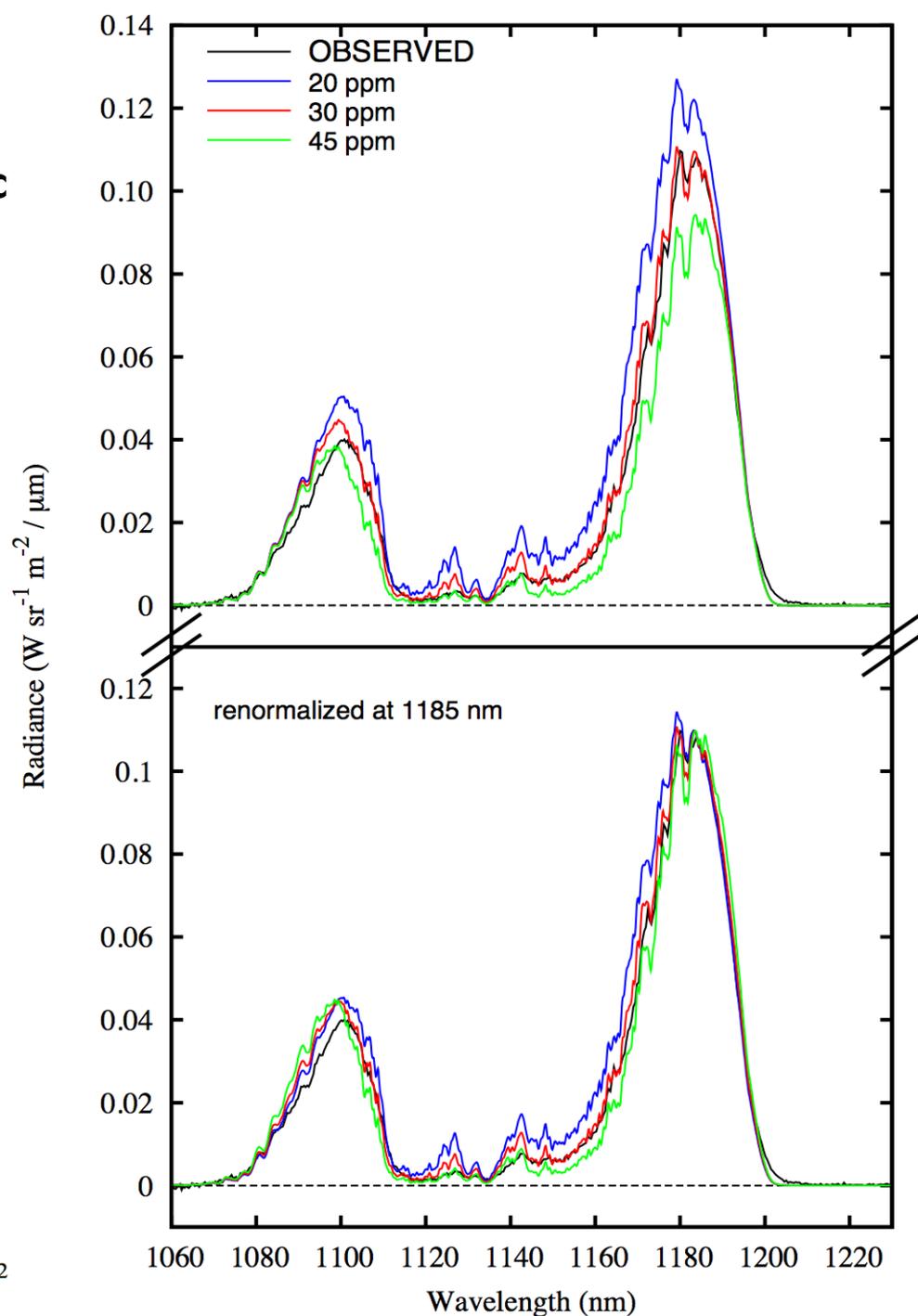
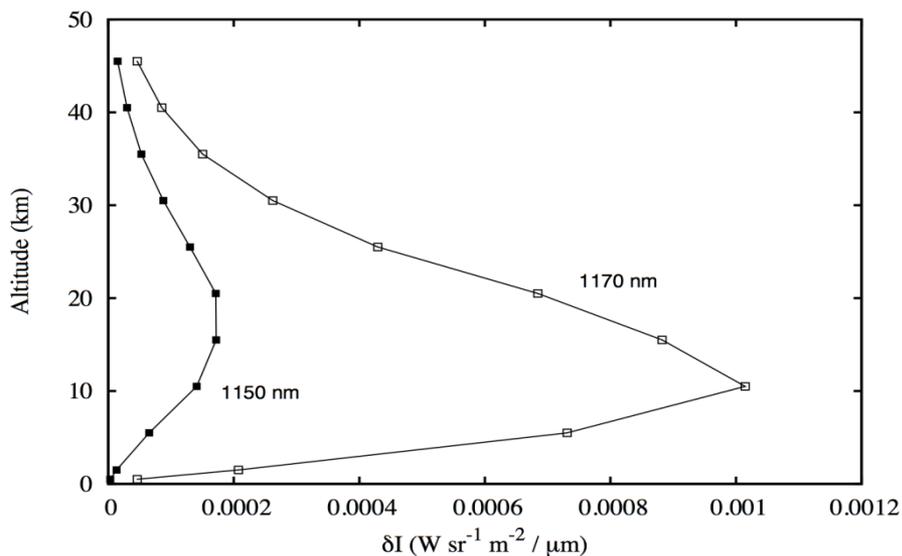
Публикации:

- 1) Belyaev et al., 2012. Vertical profiling of SO₂ and SO above Venus' clouds by SPICAV/SOIR solar occultations. **Icarus, 2012.**
- 2) Zhang X. et al., 2012. Sulfur chemistry in the middle atmosphere of Venus. **Icarus, 2012.**
- 3) Marcq et al., 2013. Variations of sulphur dioxide at the cloud top of Venus's dynamic atmosphere. **Nature Geoscience, 2013.**

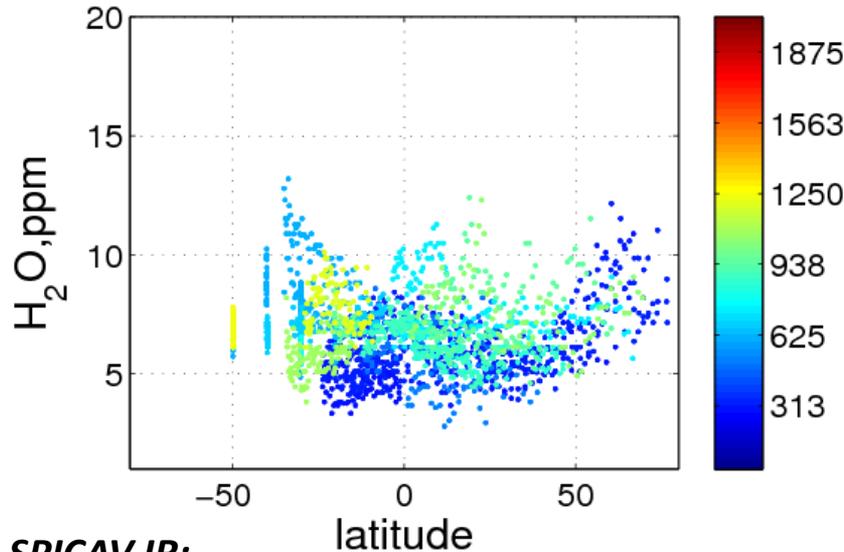


**Bezard B., Fedorova A., Bertaux J.-L.
et al.. The 1.10- and 1.18- μm
nightside windows of Venus observed
by SPICAV-IR aboard Venus Express,
Icarus 216, 173-183, 2011.**

- $\text{H}_2\text{O} \sim 30^{+10}_{-5}$ ppm near the surface from 5 to 25 km
 - Larger abundances yield too much absorption in some regions of the H_2O band
 - $\Rightarrow \text{H}_2\text{O}$ likely uniform from 0 to 40 km as predicted by chemical models (e.g. Krasnopolsky 2007)



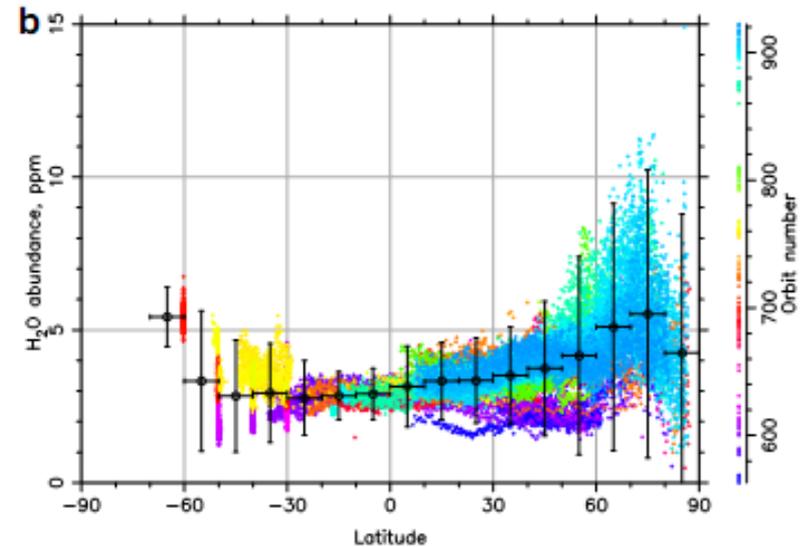
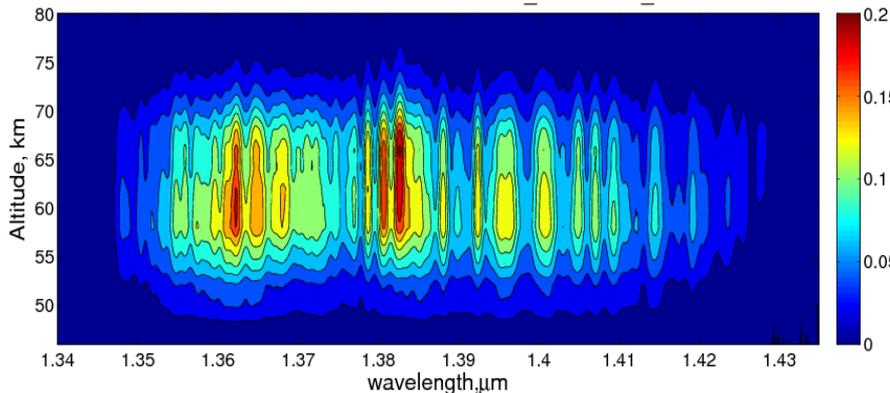
Vertical distribution of H₂O above and within the upper clouds (Fedorova et al. 2012)



SPICAV IR:

1.38 μm 55-68 km, with uniform distribution mixing ratio varies from 4-12 ppm

SZA=30 EMI=0 H=72 km TP=30_lat aerosol_standard



VIRTIS H, Cottini et al., 2012

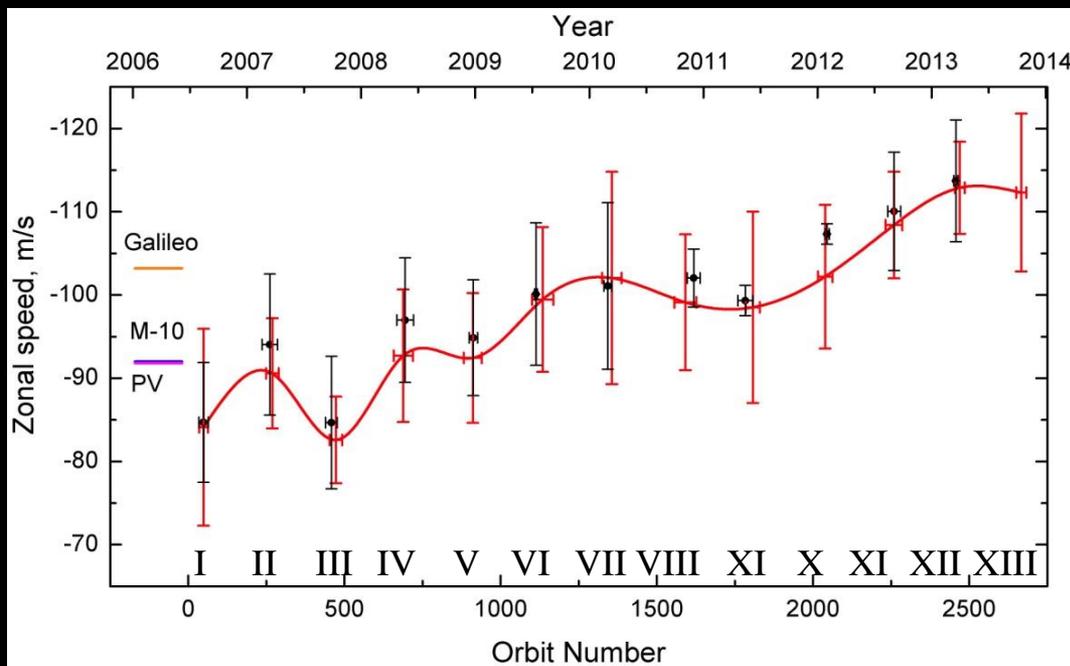
from 2.56 μm 68-70 km, uniform distribution with mixing ratio 3-4 ppm

The altitude range of the spectral sensitivity to water vapor profile in 1.38 μm is very wide: 55-70 km

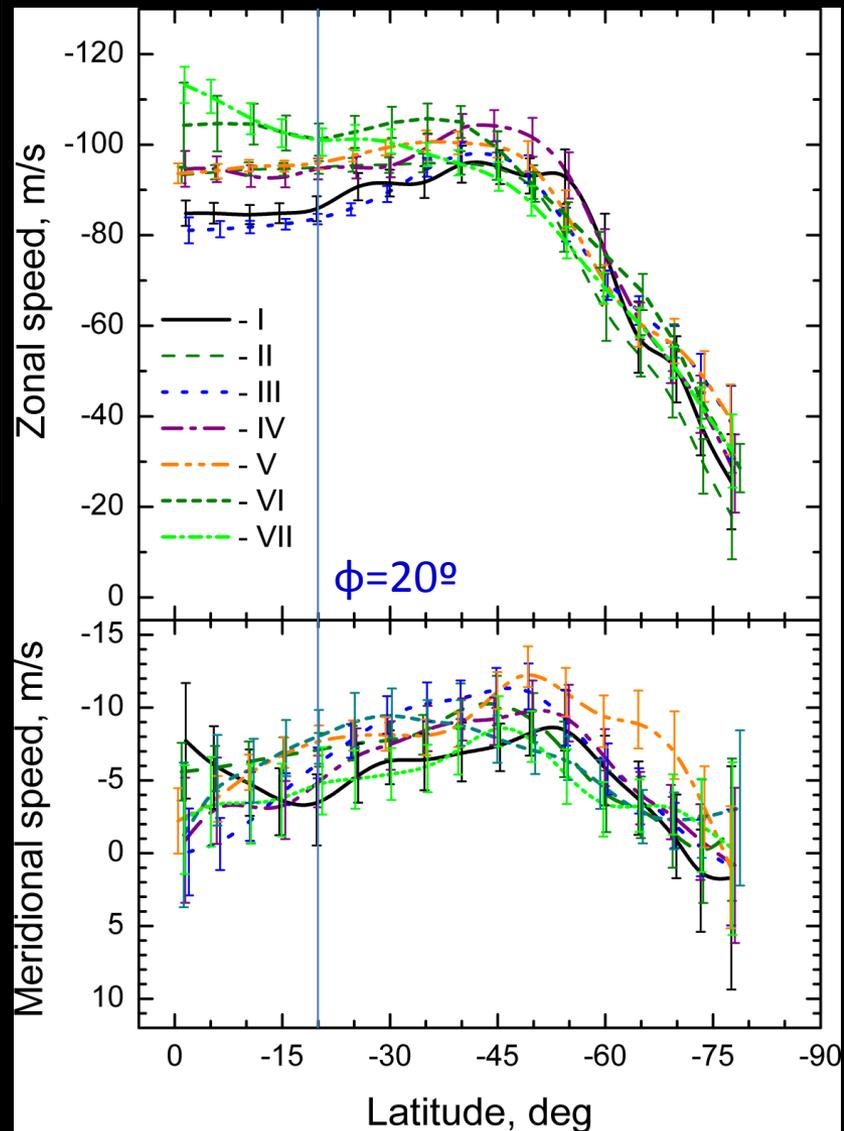
Located to 5-8 km below $\tau=1$ level

The band looks to be more sensitive to water distribution within a lower layer of the upper clouds where a gradient of water should be strong than to the water distribution above the cloud top level

Long-term trend: acceleration of the mean flow from 2006 to 2013



Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging
 Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V. *et al.*,
Icarus 226 (2013) 140–158

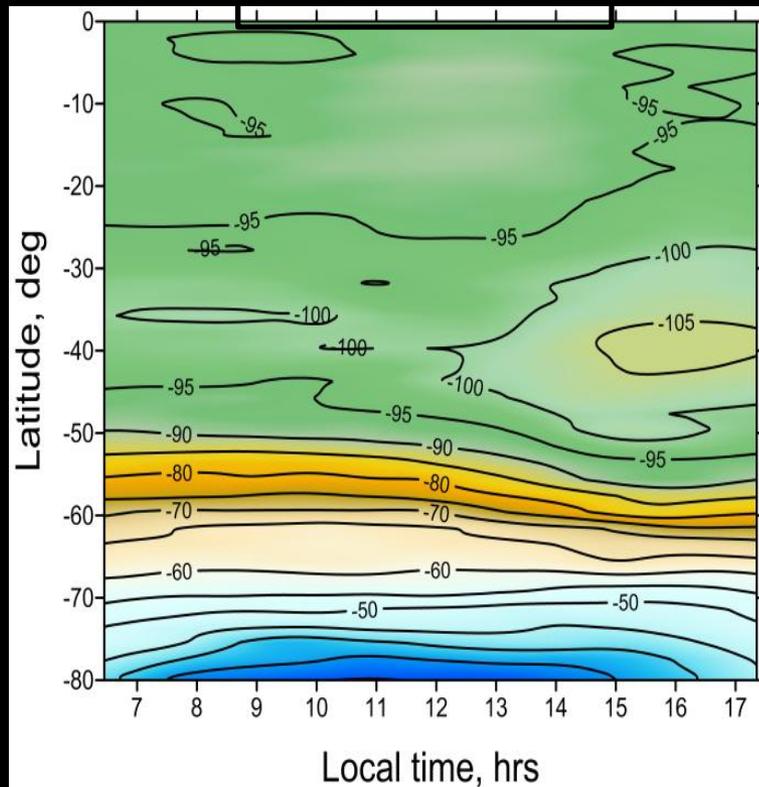


- Long-term variations of the mean zonal winds at $20^{\circ} \pm 2.5^{\circ}S$ over the mission time. Black are the season of observation averages derived by manual and red are automated (solid line) methods.
- Mean zonal (top) and meridional (bottom) wind profiles for cloud tracking seasons I-VII (color codes in the upper panel). Error bars show 99.73% confidence interval (3). The standard deviation of zonal component varies from 12-17 m/s in the low latitudes to 25-34 m/s at $60^{\circ} S$. The standard deviation of meridional component is in the range 11-14 m/s.

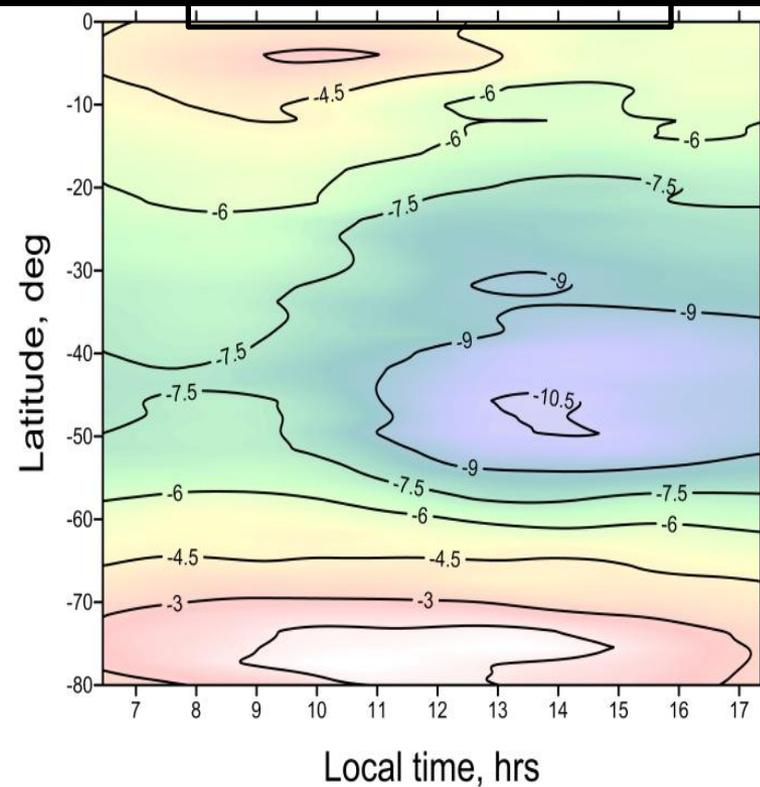
Diurnal variations of the mean flow

Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging
Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V. *et al.*, *Icarus* 226 (2013) 140–158

Zonal component



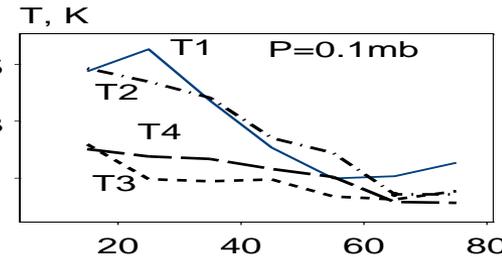
Meridional component



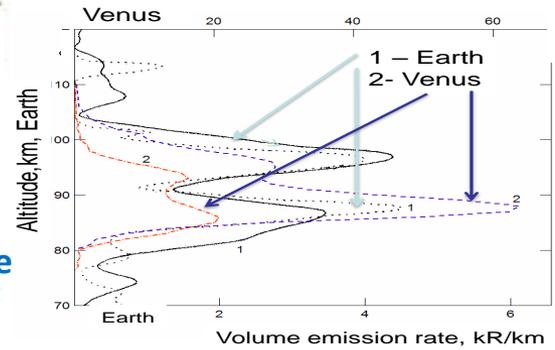
Complete coverage of the day side in the Southern hemisphere by the VMC UV imaging enables the study of diurnal variations of the mean wind pattern and search for solar locked features in the zonal and meridional wind components. The zonal wind field in figure shows semi-diurnal variations with minimum speed close to noon (11-14 h) and maxima in the morning (8-9 h) and in the evening (16-17 h). The meridional component clearly peaks in the early afternoon (13-15h) at 40-50°S. The minimum of the meridional wind speed is located at low latitudes in the morning (8-11h) (Khatuntsev *et al.*, *Icarus* 226 (2013) 140–158).

O₂ night glow in the Venus atmosphere from VIRTIS –M observations and circulation at mesopause *(Zasova et al.)*

1) Northern hemisphere (limb observations)



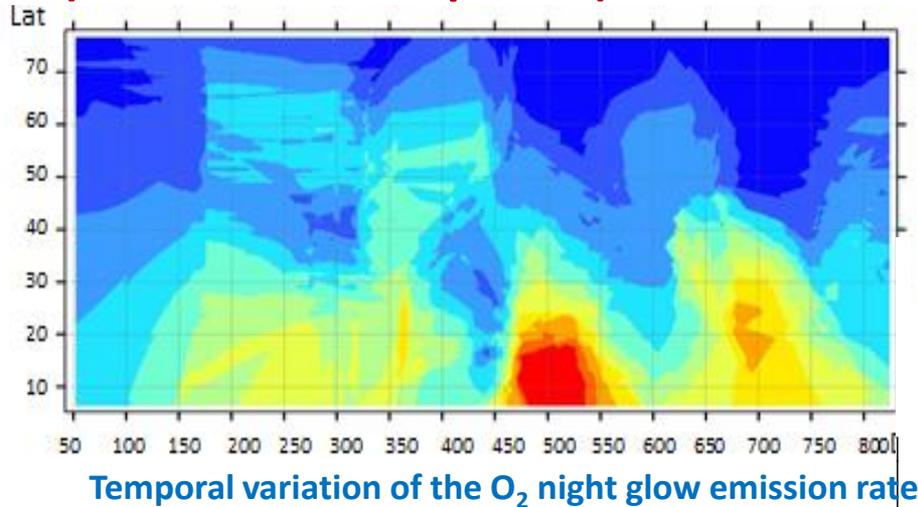
Amplitudes of the thermal tide vs. latitude



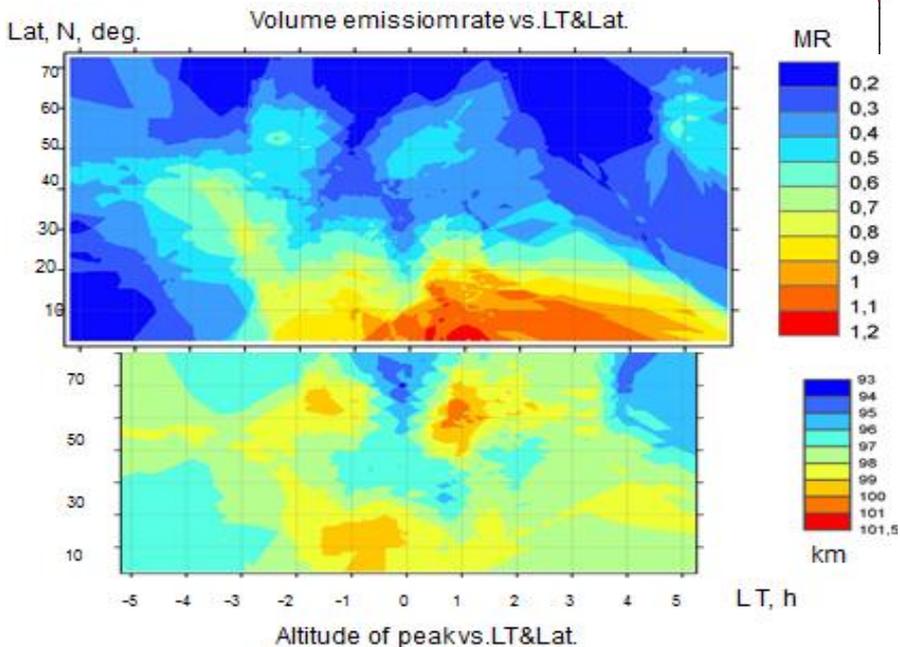
Gravity waves revealed in the O₂ intensity vertical profiles near Venus and Earth mesopause

Temporal variation of the O₂ night glow in the Northern hemisphere has periodic character. Emission rate decreases with increasing latitude. Maximum emission at low latitude is shifted to morning.

From the O₂ night glow observations in Northern hemisphere : SS-AS and ZRC (zonal retrograde circulations) and thermal tides and gravity waves may give input in observed dynamics at mesopause levels



Temporal variation of the O₂ night glow emission rate

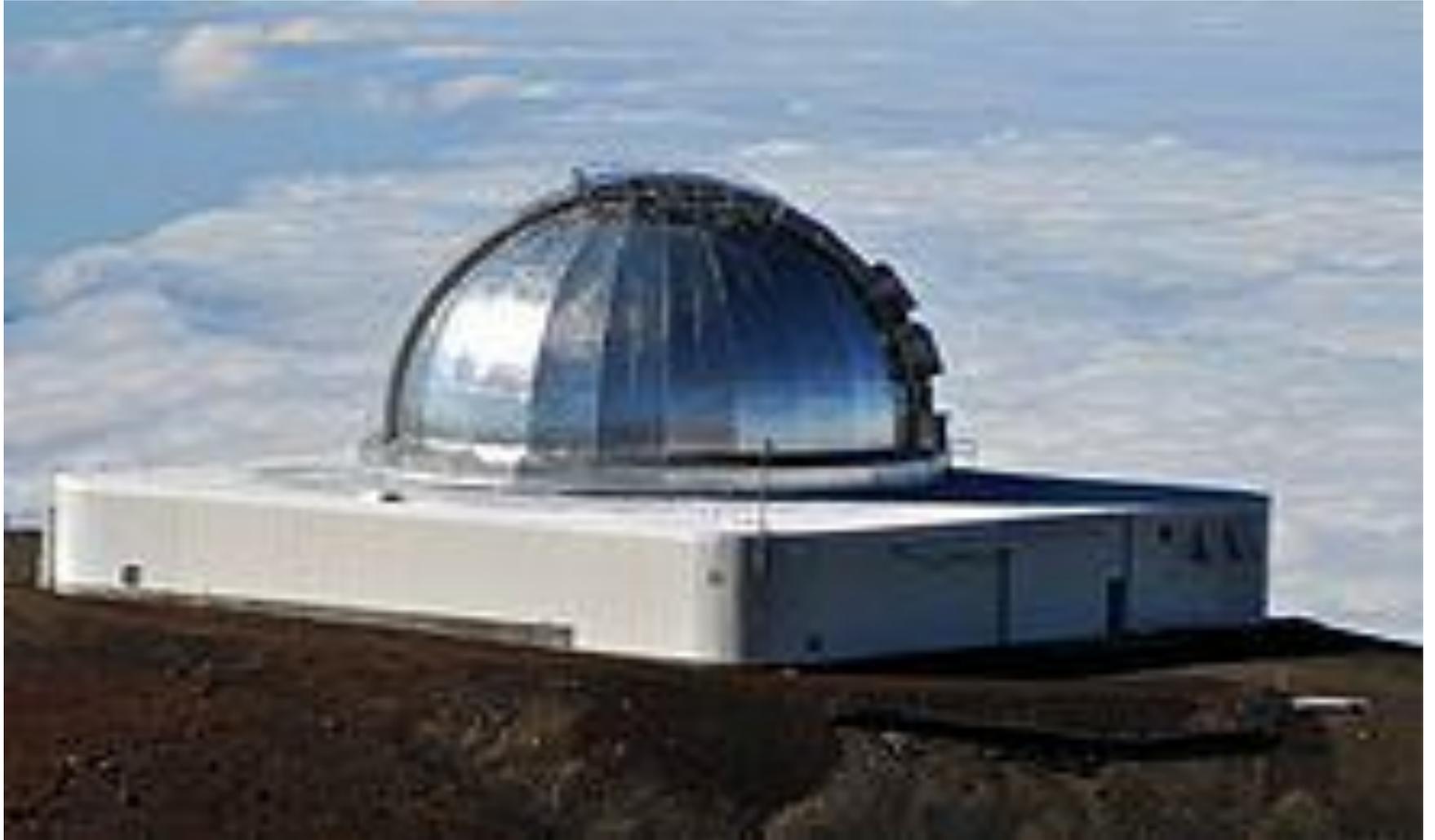


Volume emission rate vs. LT & Lat. Altitude of peak vs. LT & Lat.

Наземные наблюдения Марса и Венеры

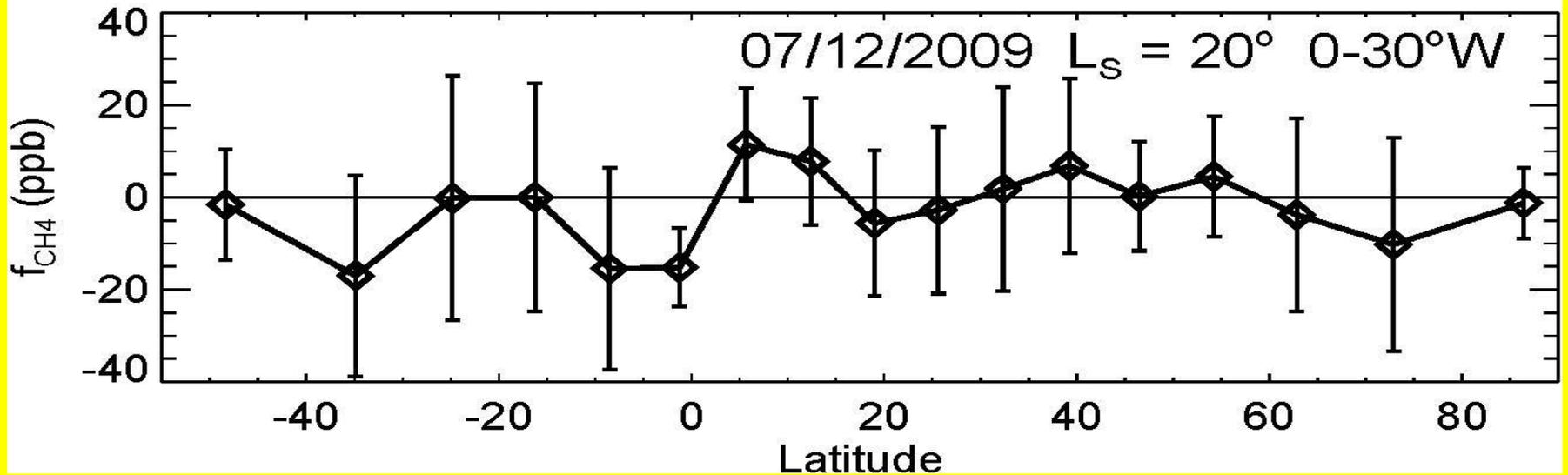
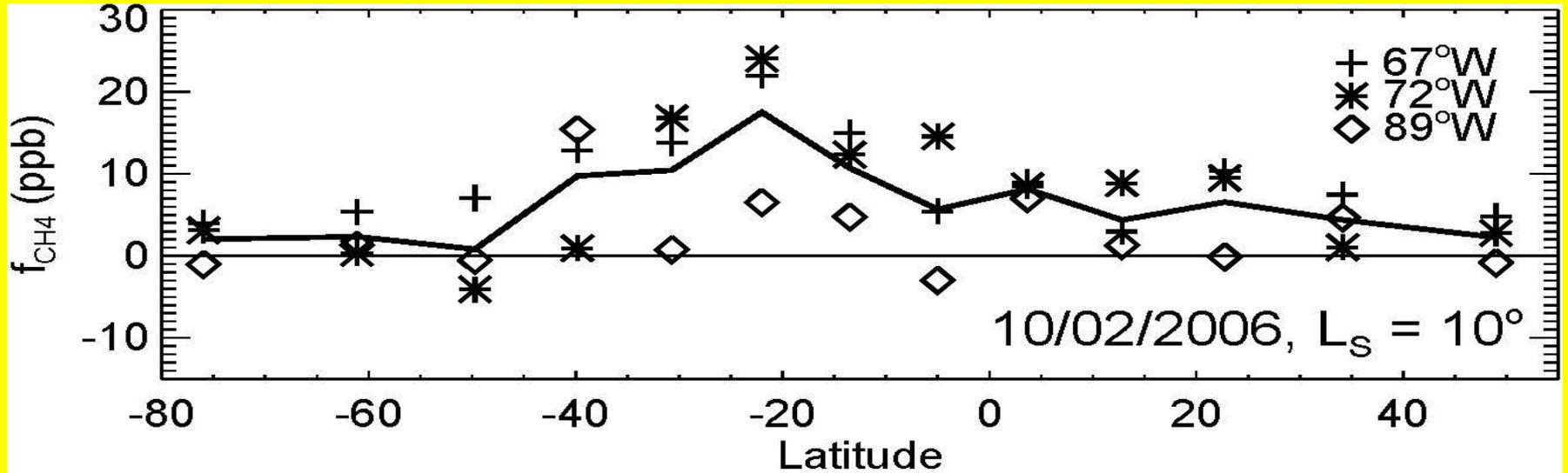
- NASA IRTF, Гавайи, гора Мауна Кеа, 4.2 км, $P = 0.6$ бар, $H_2O = 2$ мм
- Телескоп $D = 3$ м, спектрограф CSHELL, область спектра 1.08 – 5.6 μm , $\nu/\delta\nu = 40\ 000$

NASA Infrared Telescope Facility

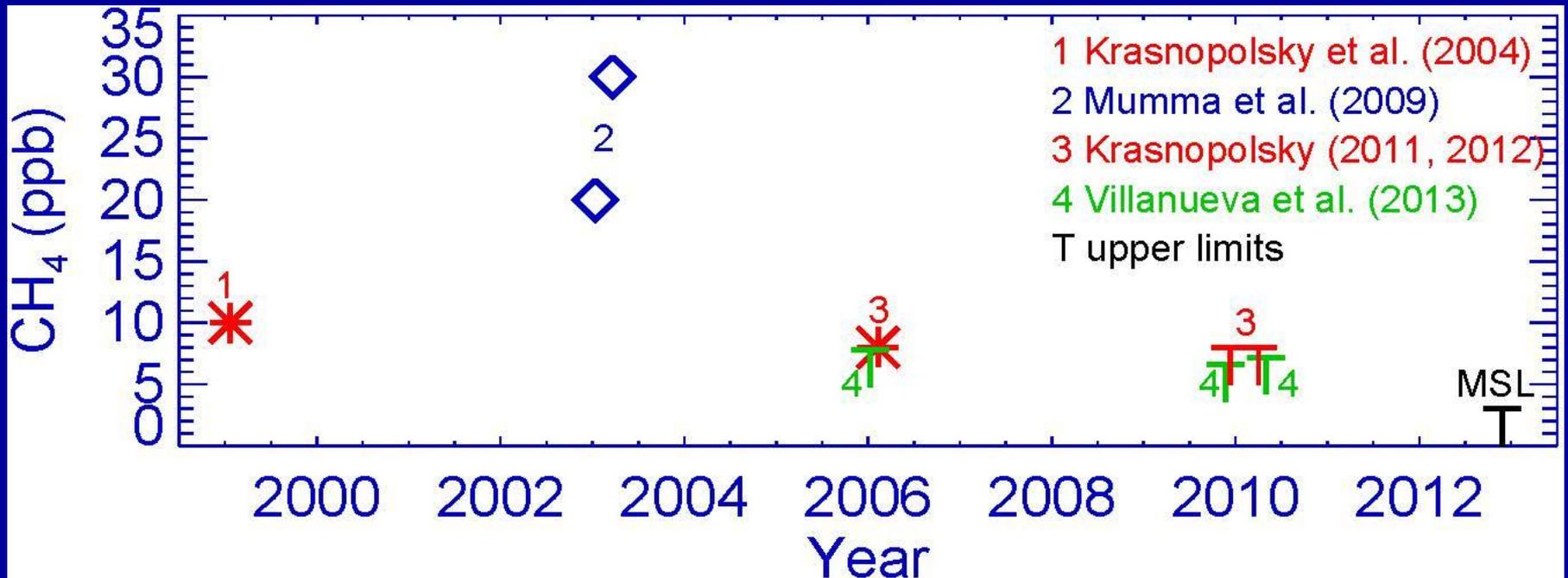


Search for methane on Mars

(Krasnopolsky 2012a)



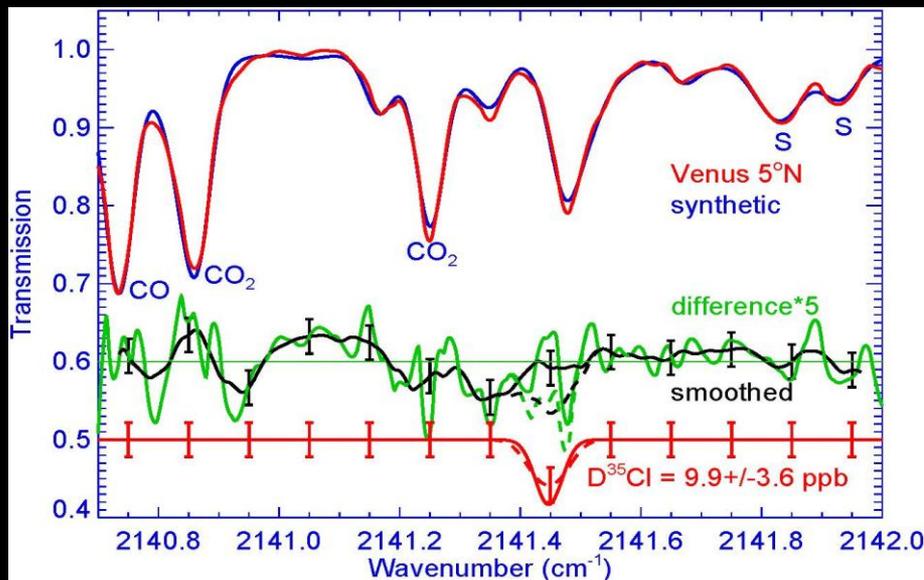
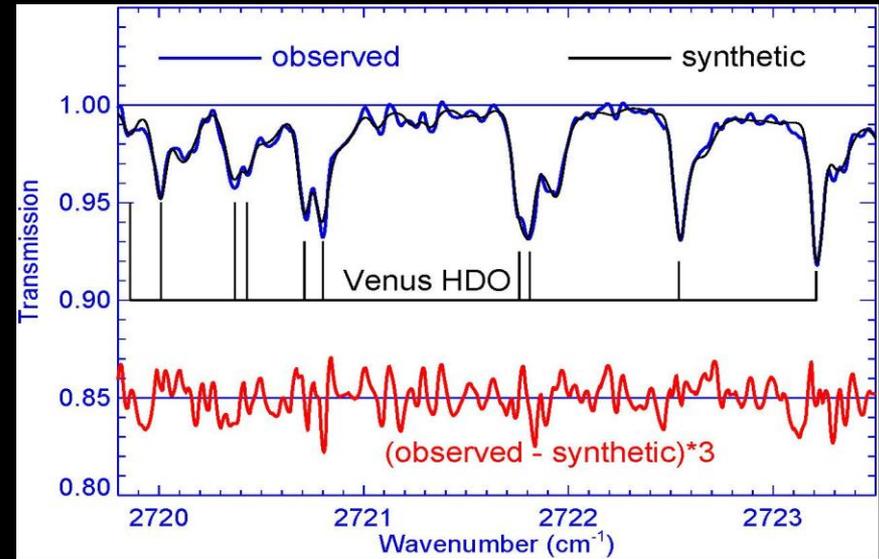
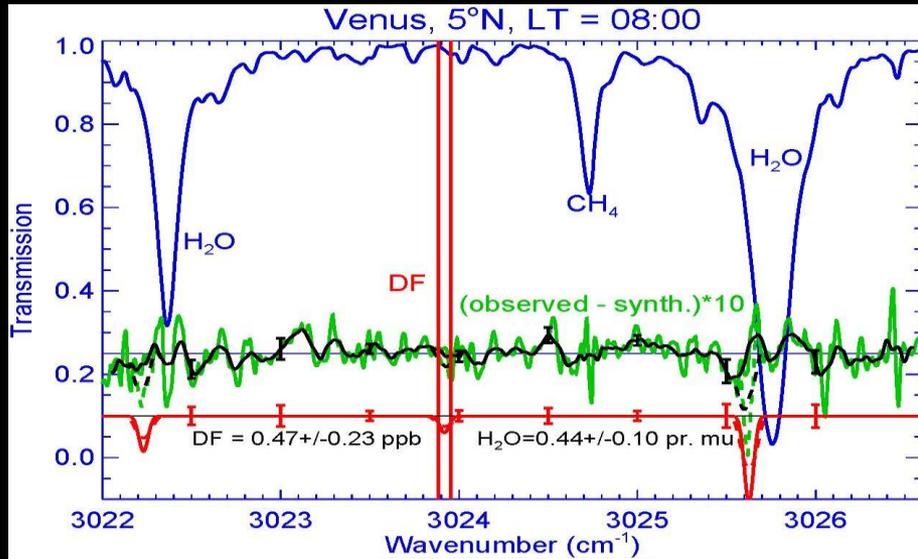
Ground-based and MSL observations of methane on Mars



MSL observations of methane neither contradict nor support the ground-based observations

$C_2H_6 < 0.2$ ppb; $SO_2 < 0.3$ ppb (Kr2012)

D/H in H₂O, HCl, and HF on Venus (Krasnopolsky, Belyaev et al. 2013)

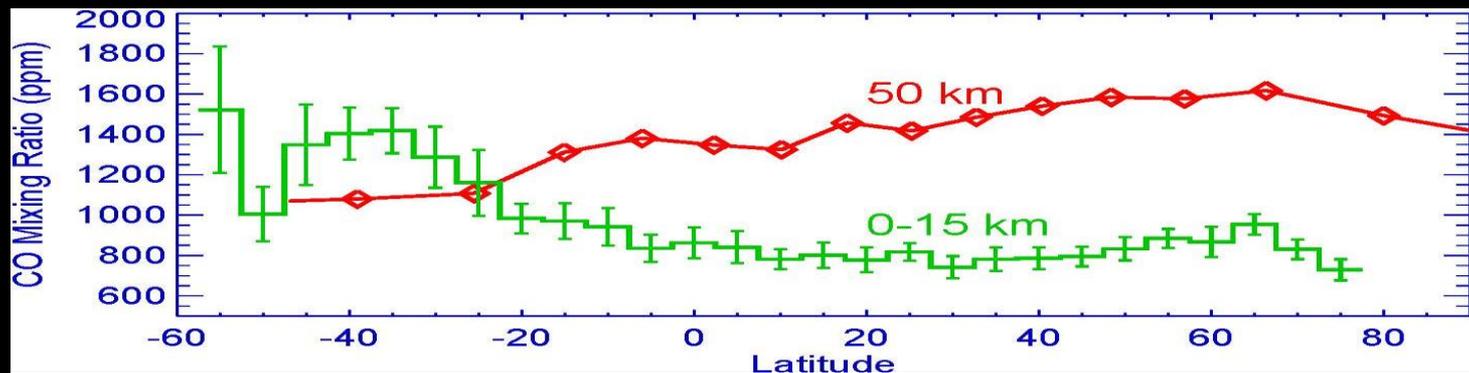
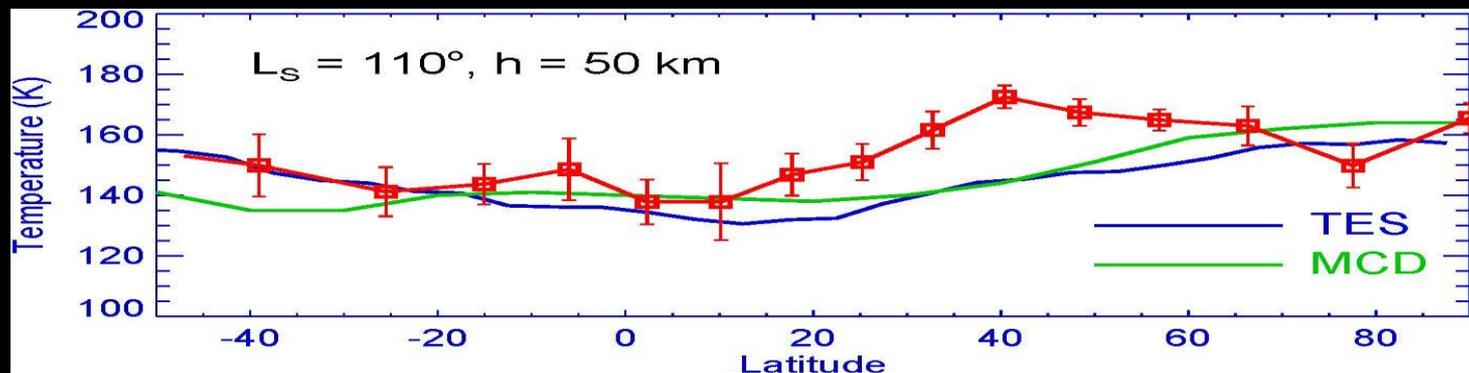
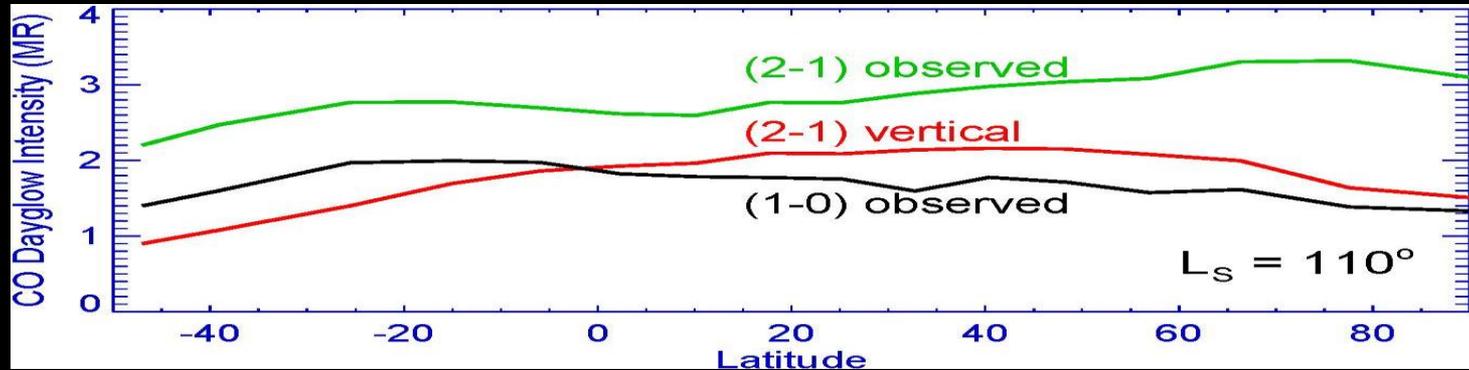


D/H = 95 ± 15 in H₂O

D/H = 190 ± 50 in HCl

D/H = 420 ± 200 in HF

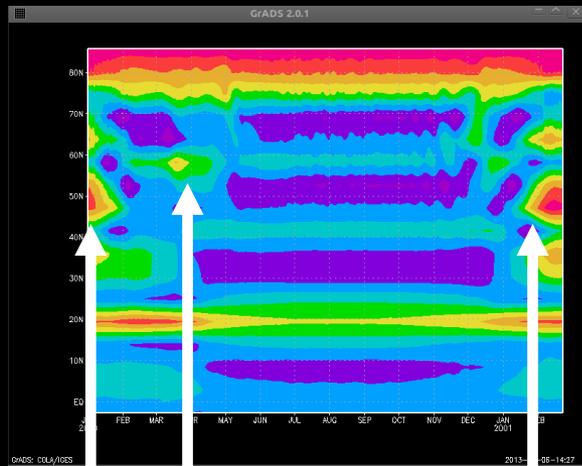
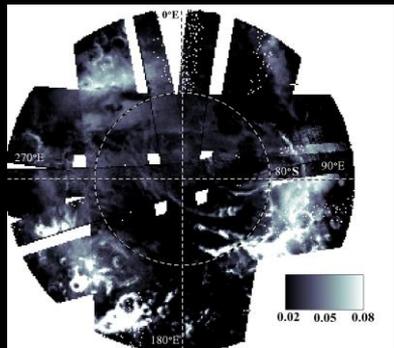
CO dayglow at 4.7 μm on Mars: Variations of T and CO at 50 km (Krasnopolsky 2013d)



Численное моделирование планетных атмосфер

Марс

Всплески амплитуды стационарных волн при $L_s = 60^\circ$ и 145°



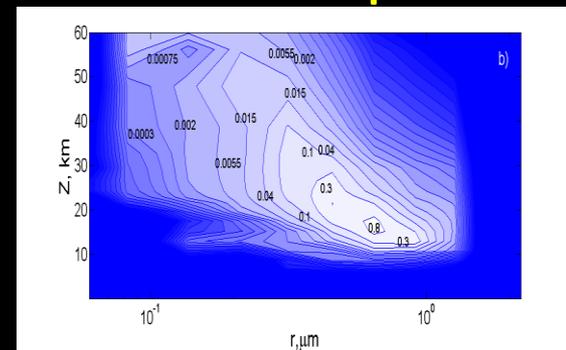
Венера

негидростатическая модель общей циркуляции

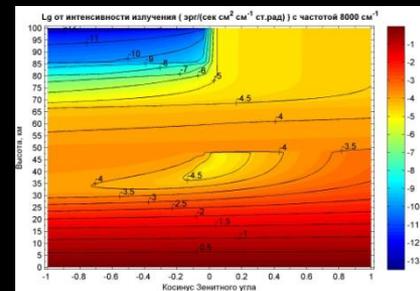
Суперротация

Подсолнечно-противосолнечная циркуляция на 110 км

Микрофизика облаков и аэрозолей

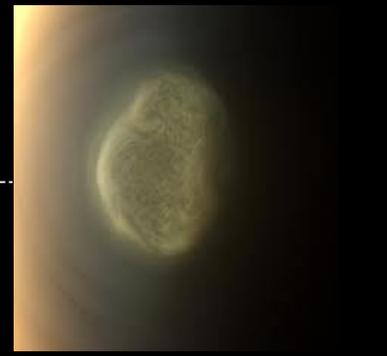
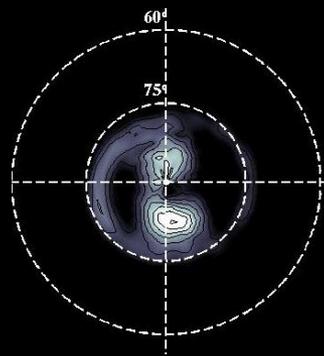
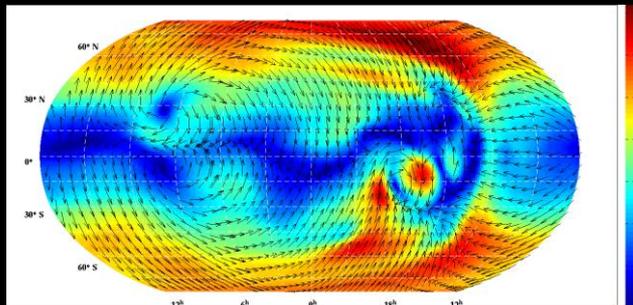
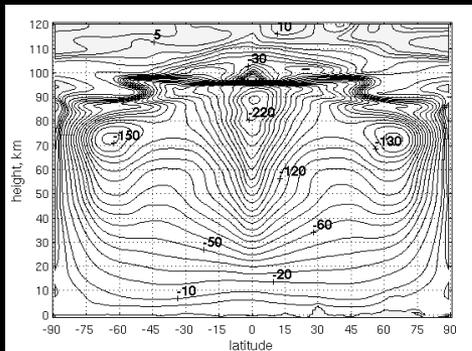


Новый метод расчета переноса излучения

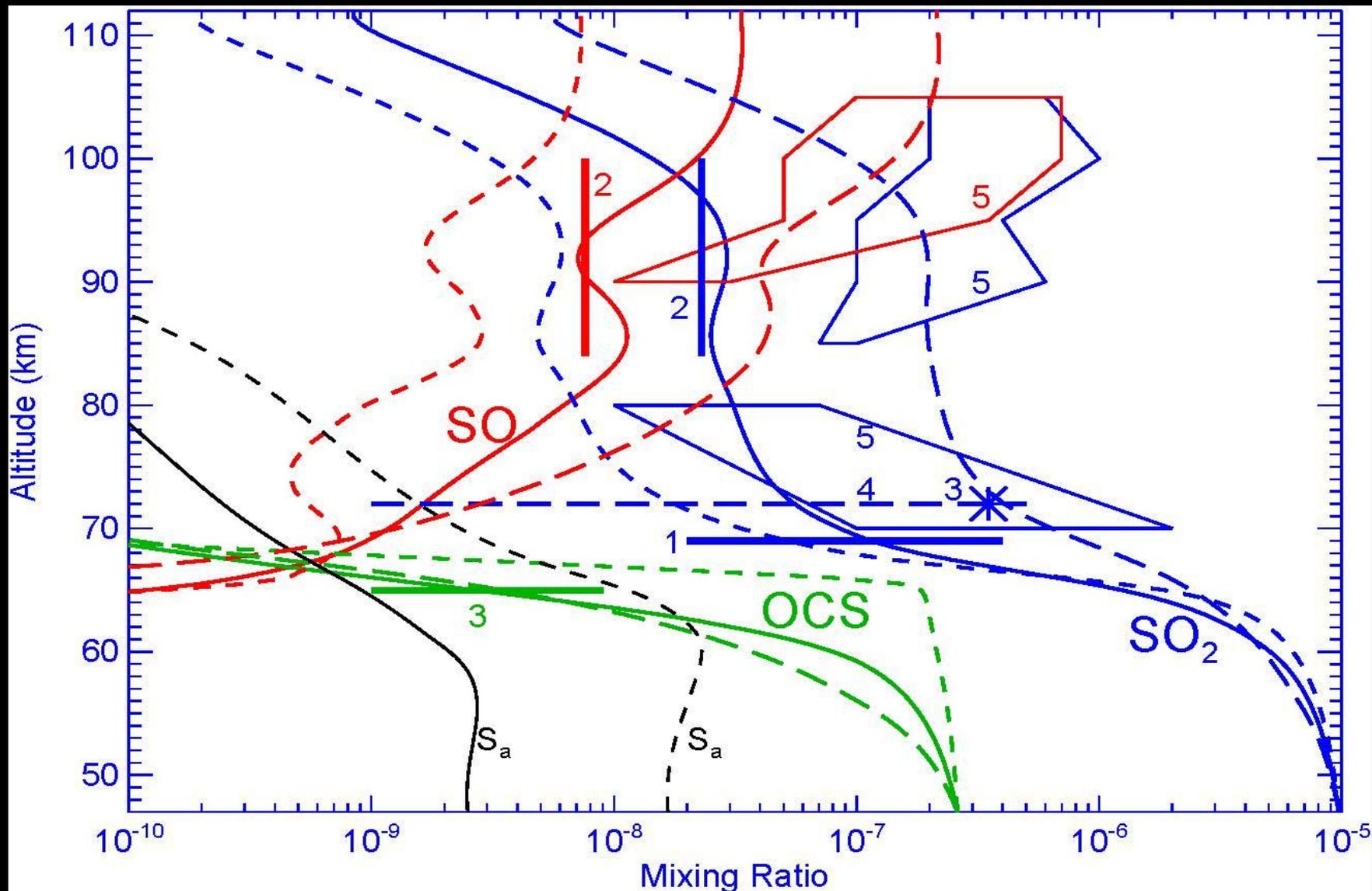


Титан

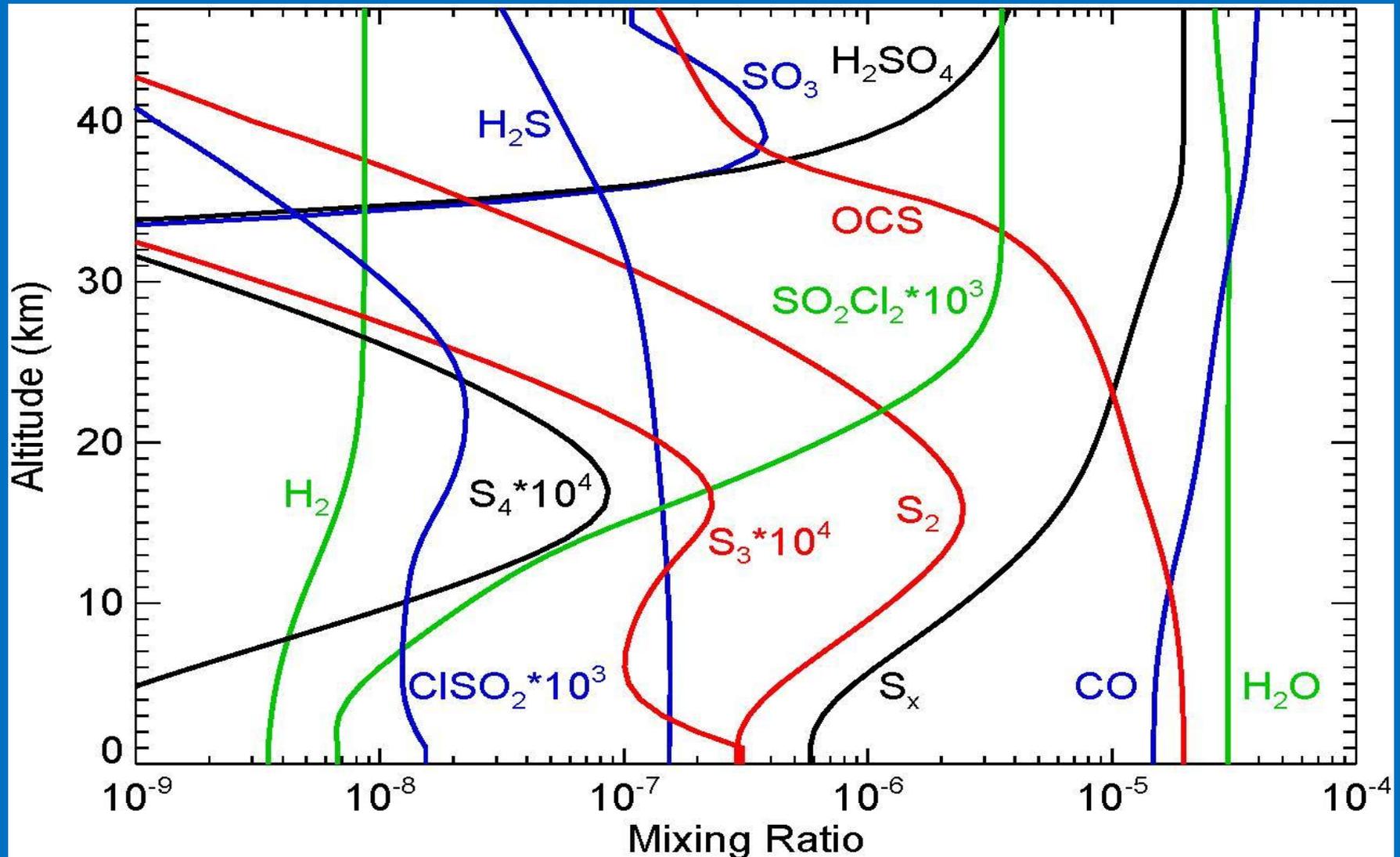
суперротация и полярные вихри



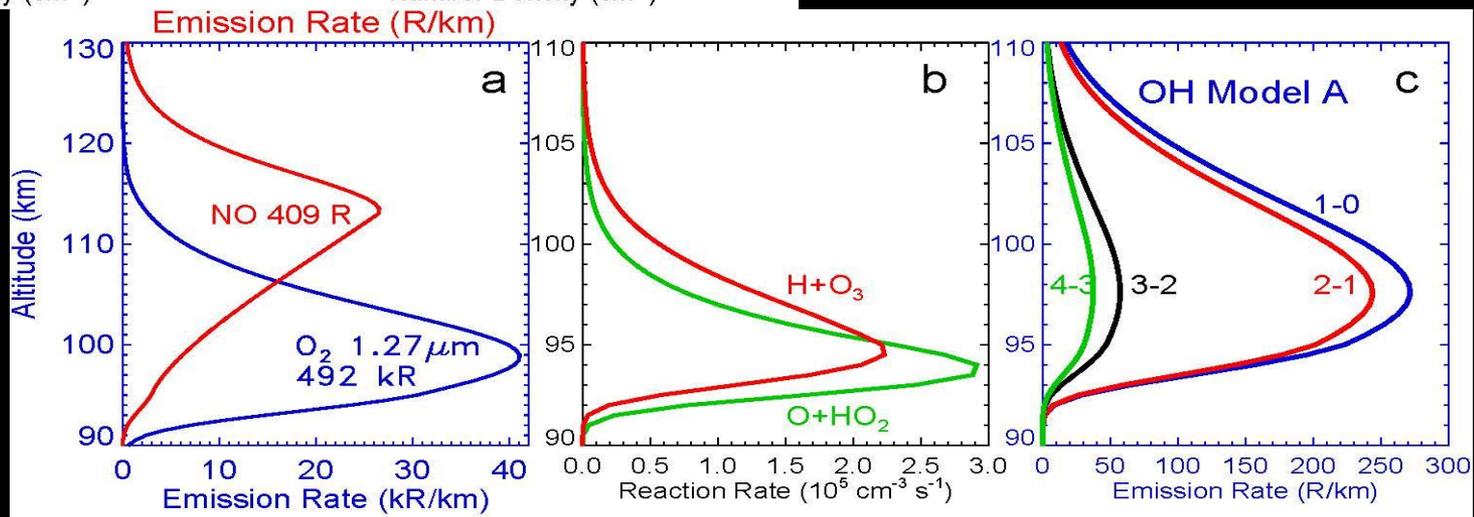
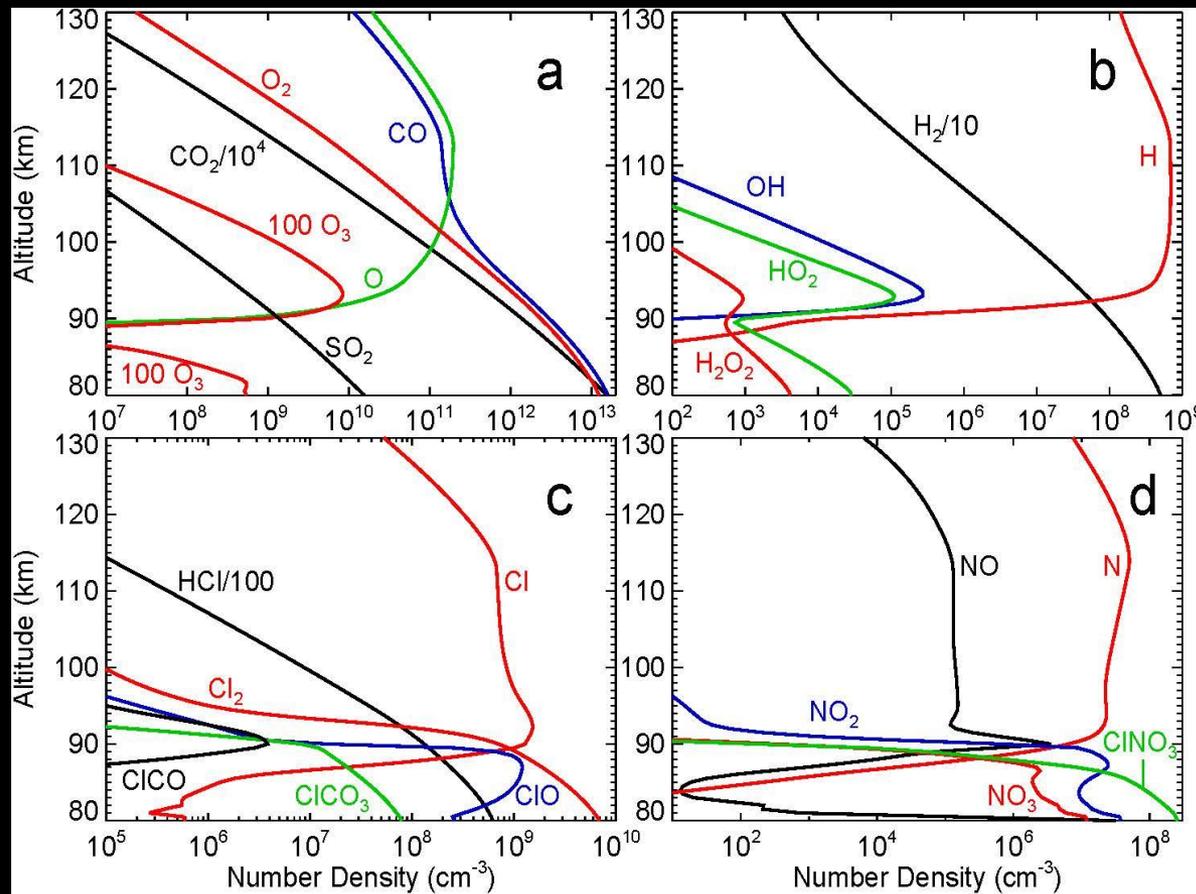
Photochemical model for Venus middle atmosphere (Krasnopolsky 2012c): calculated and observed variations of SO₂, SO, OCS, and S_a



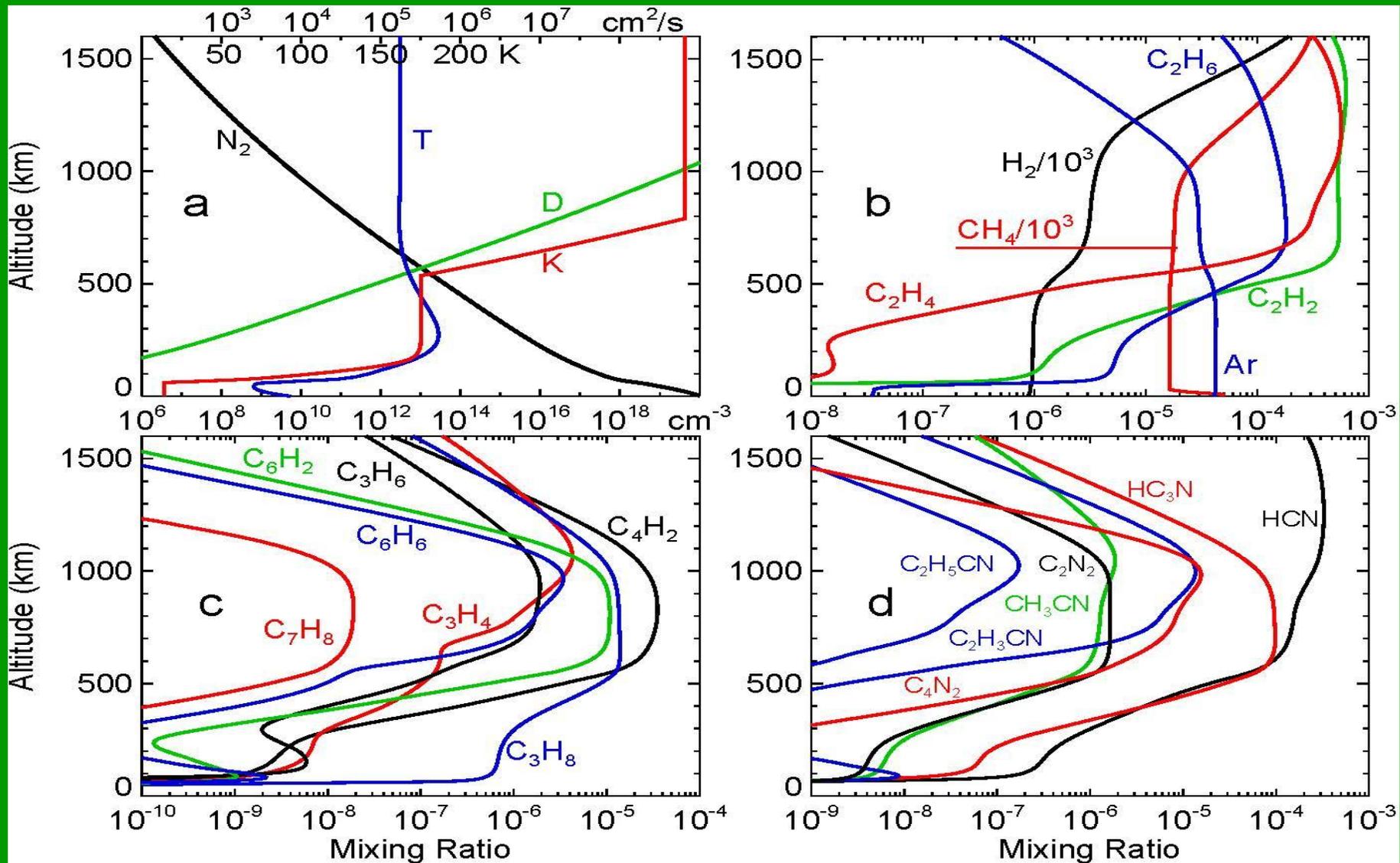
Chemical kinetic model for Venus lower atmosphere (Krasnopolsky 2013b)



Nighttime Atmosphere and Night Airglow on Venus (Krasnopolsky 2013c)



Photochemical model for Titan: 83 neutral and 33 ion species (Krasnopolsky 2012d)





Гетеродинный спектрометр ИК диапазона

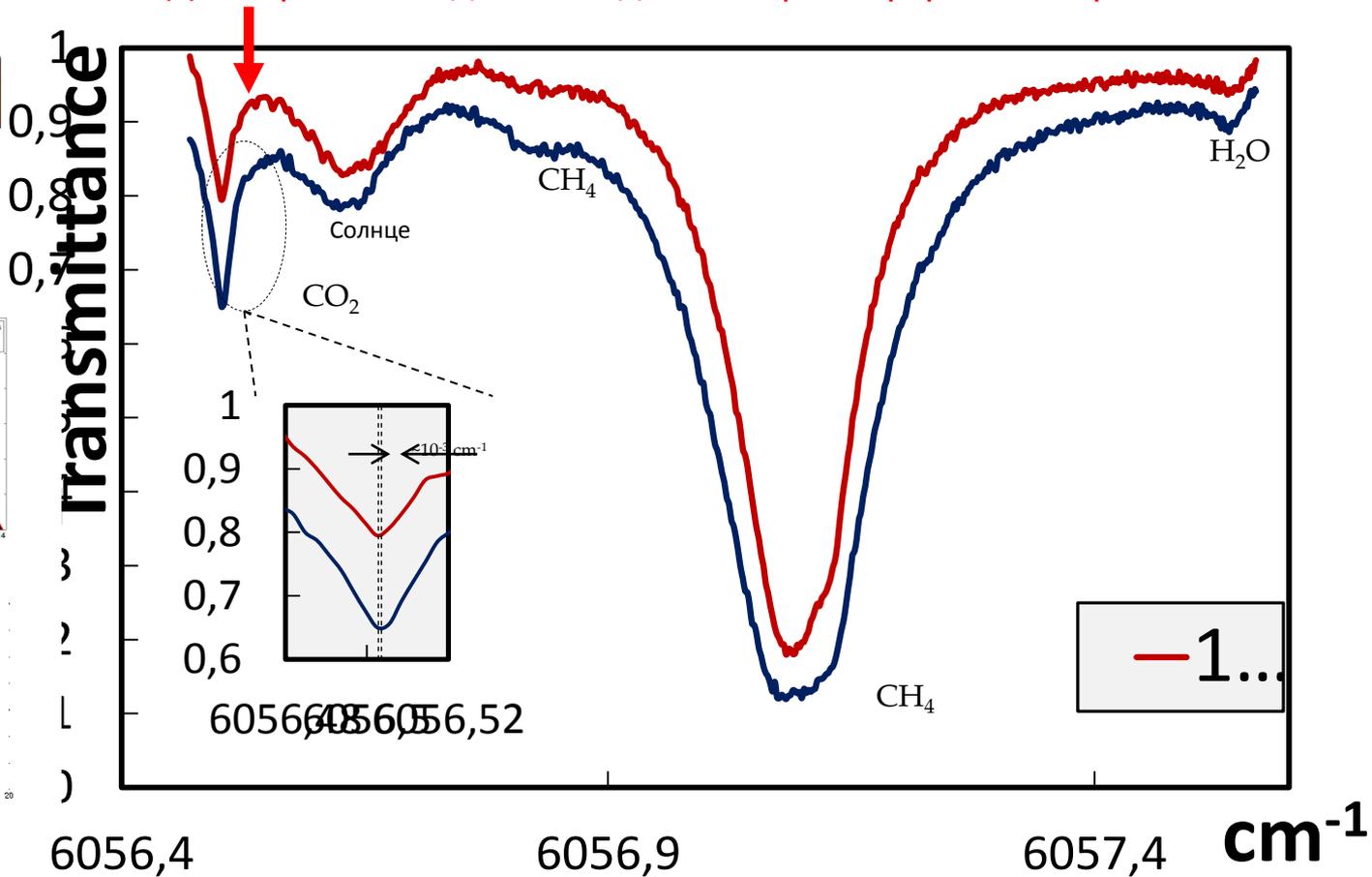
Простой, компактный спектрометр для солнечных затмений с разрешающей силой $\sim 10^8$

Метод предложен для реализации в проекте EхоMars 2018 (прибор М-ДЛС)

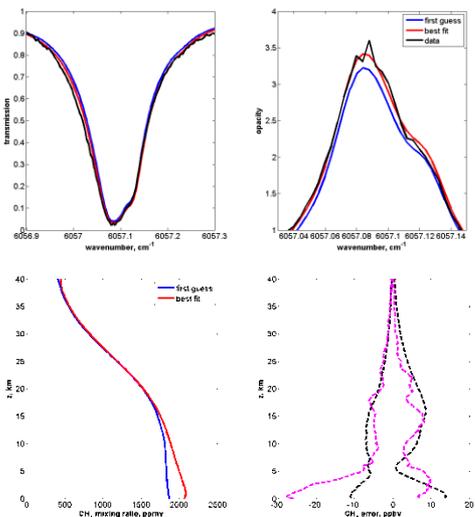


Спектр пропускания атмосферы над Москвой

Доплеровский сдвиг вследствие стратосферного ветра?



Восстановление профиля метана



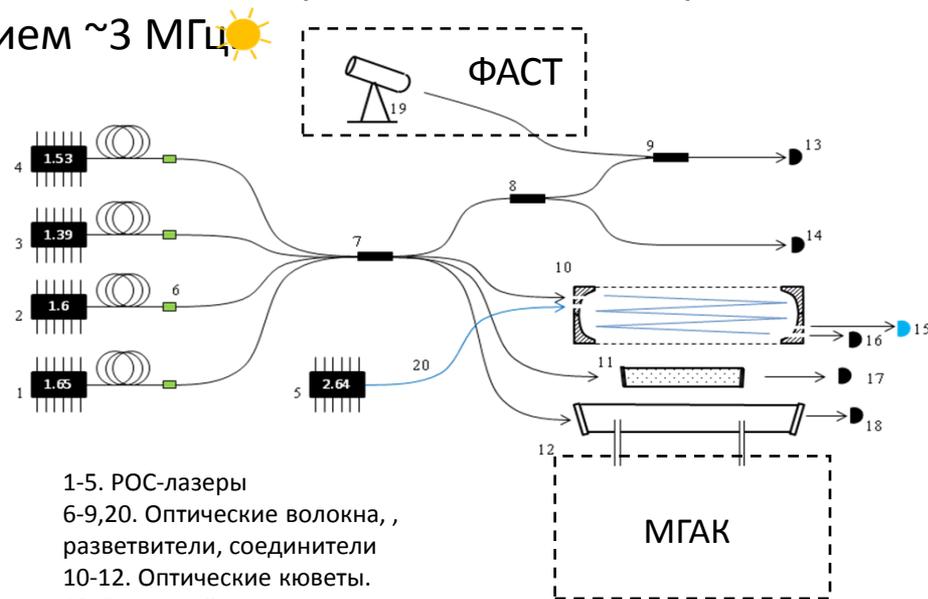
Прибор М-ДЛС для посадочной платформы «ЭкзоМарс» 2018 г.

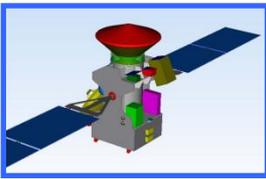
Многоканальный лазерный спектрометр с возможностью гетеродинирования
Спектральный диапазон 1.3 – 1.8 и 2.7-3.3 мкм

- Активные измерения в многопроходной оптической кювете, открытой в окружающую атмосферу, с эффективной длиной оптического пути не менее 10 м.
- Активные измерения в многопроходной кювете системы ICOS с эффективной длиной оптического пути около 1 км
- Активные измерения в замкнутой кювете, соединенной с пиролитической ячейкой МГАК, с эффективной длиной оптического пути около 20 см. Методика совпадает с отработанной для посадочного аппарата «Фобос-Грунт»
- Пассивные измерения на открытой трассе солнечного просвечивания гетеродинным приемником со спектральным разрешением ~ 3 МГц 

Научные задачи: H_2O , HDO ,
 C^{13}O , CH_4 , ветер

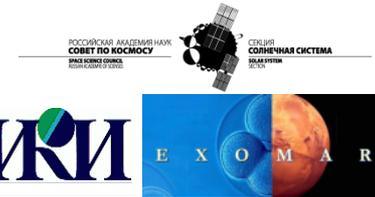
Ожидаемая чувствительность
по метану существенно
превышает возможности SAM



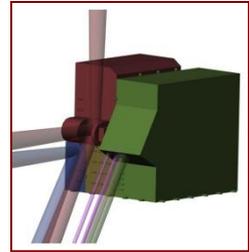


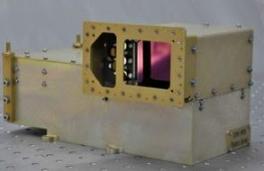
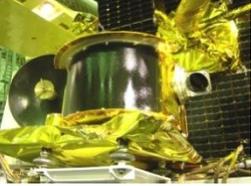
ЭкзоМарс: Trace Gas Orbiter

Российские приборы: ACS



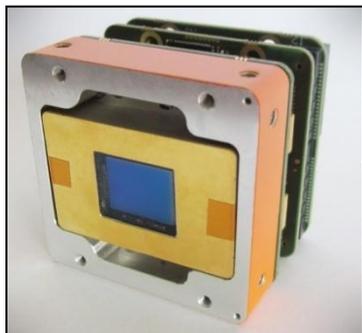
Atmospheric Chemistry Suite (ACS) – Комплекс приборов для изучения химического состава атмосферы и климата. Состоит из трех спектрометров и системы сбора научной информации. Масса: 33.3 кг.



Название	Описание прибора	Прототип
ACS-NIR	Эшелле-спектрометр (ближний ИК: 0.7-1.7 мкм, R~20000) для мониторинга и измерения вертикальных профилей CO, H ₂ O, O ₂ , исследования дневного свечения O ₂ , поиска ночных свечений. Масса: 3.5 кг. Энергопотребление: 15 Вт.	Русалка (МКС) 
ACS-MIR	Эшелле-спектрометр (средний ИК: 2.2-4.4 мкм, R>50000). Измерения метана, отношения D/H, поиск малых составляющих, исследования аэрозоля. Масса: 12 кг. Энергопотребление: 20 Вт.	ТИММ (Ф-Г) 
ACS-TIRVIM	Фурье-спектрометр (2-17 мкм, 0.2 см ⁻¹). Мониторинг трехмерных полей температуры, аэрозоля, картирование и детектирование малых составляющих. Масса: 12 кг. Энергопотребление: 20 Вт.	АОСТ (Ф-Г) 

NIR: Near-IR Echelle/AOTF spectrometer

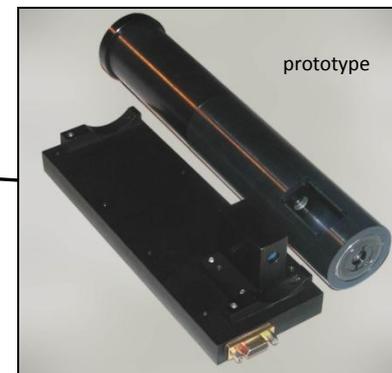
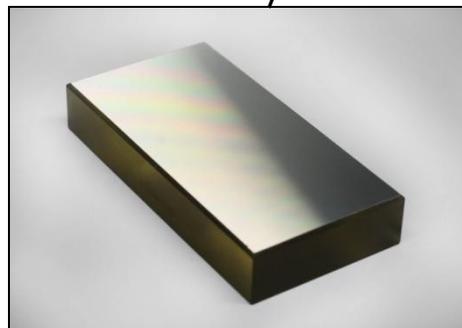
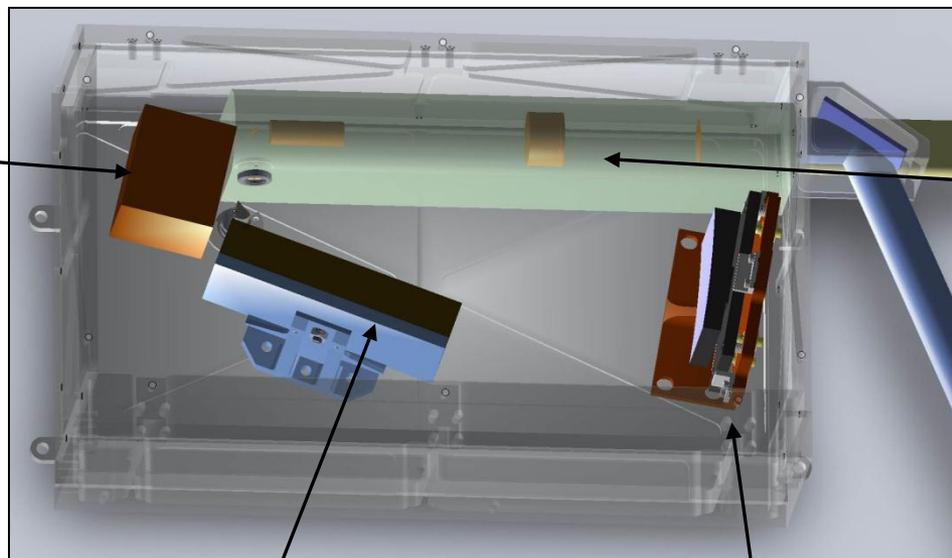
- Spectral range: 0.7 – 1.6 μm
- Spectral resolving power: $\sim 20\,000$
- Operation modes: Nadir, Solar Occultation
- FOV: 30 x 0.3 mrad
- Mass / Power / Data rate: 3.5 kg / 15 W / 0.5 Gbit/day



XSW-640: High resolution cooled shortwave infrared (SWIR) module

- TE1 cooled InGaAs array
- 640 x 512 pixels
- 0.4 to 1.7 μm bandwidth (extended)
- 20 μm pixel pitch
- 50 Hz framerate

RGL/Newport catalogue
echelle grating 24.35 gr/mm

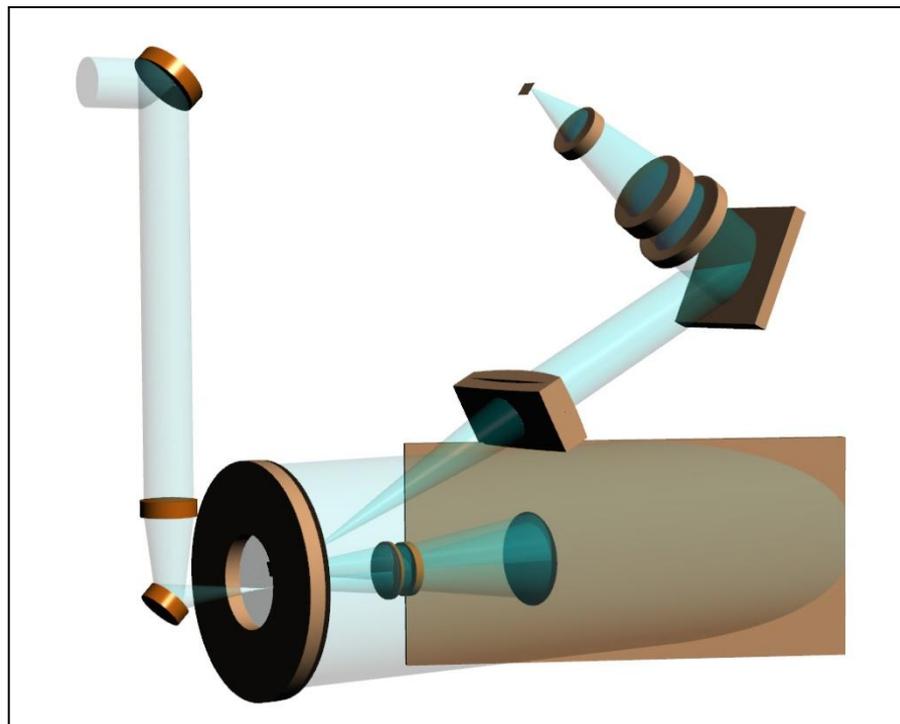


Telescope+AOTF block
• custom TeO₂ AOTF
• bandpass 70 cm⁻¹

Collimator: Diamond turned
off-axis aluminum parabolic
mirror F=200 mm on a stress-
relief mount

MIR: Mid-IR Echelle/cross-dispersion

- Spectral range: 2.4 – 4.2 μm
- Instantaneous coverage: 230-300 nm ranges per measurement
- Spectral resolving power: >50 000
- FOV: 0.1 x 2.9 mrad
- Aperture ratio 1:3
- Mass/ Power / Data: 12 kg / 20 W / 1.2 Gbit per day
- Size 460 x 200 x 440 mm
- Operation modes: Solar Occultation
- Operation rate 2 images/s

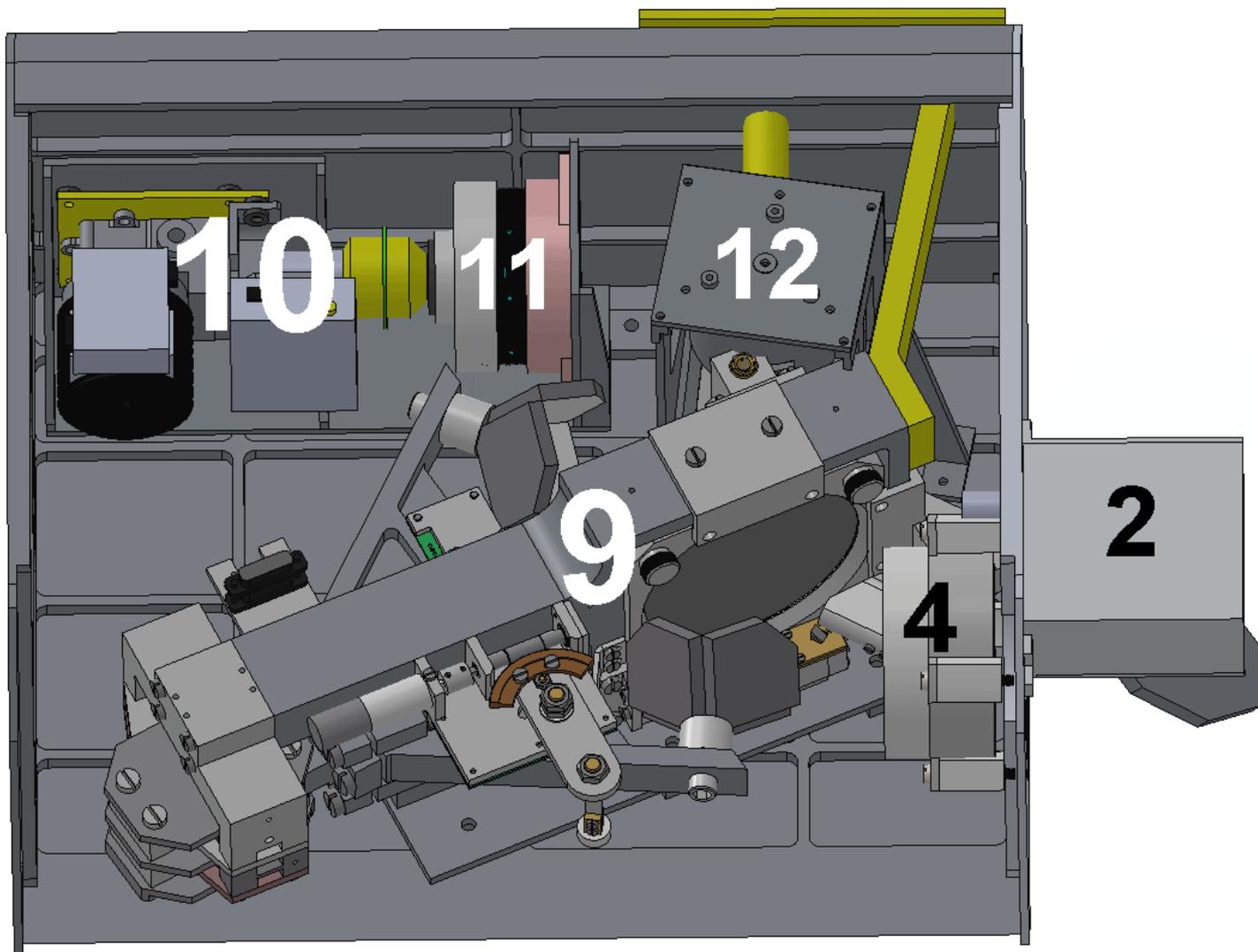


200 gr/mm grating

3 gr/mm echelle grating

TIRVIM overview continued

- 2 – Scanner module
- 4 – Blackbody unit
- 9 – Interferometer
- 10 – Stirling cooler
- 11 – ZnSe aspheric lens unit
- 12 – Dichroic & parabolic mirror unit



- Ремонт и оснащение помещений лаборатории на ФизТехе
- Курс лекций «Спектроскопия и фотохимия планетных атмосфер»
- Наземные наблюдения на NASA IRTF:
Марс: январь и май 2012
Венера: март и август 2012, октябрь 2013