

CO₂ облака в мезосфере Марса по данным солнечного просвечивания научного комплекса АЦС

М. Лугинин¹, Н. Игнатьев¹, А. Федорова¹, А. Трохимовский¹,
Д. Беляев¹, Ф. Монмессан², О. Кораблев¹

¹ Институт космических исследований РАН, Москва

² LATMOS, Гюйанкур, Франция

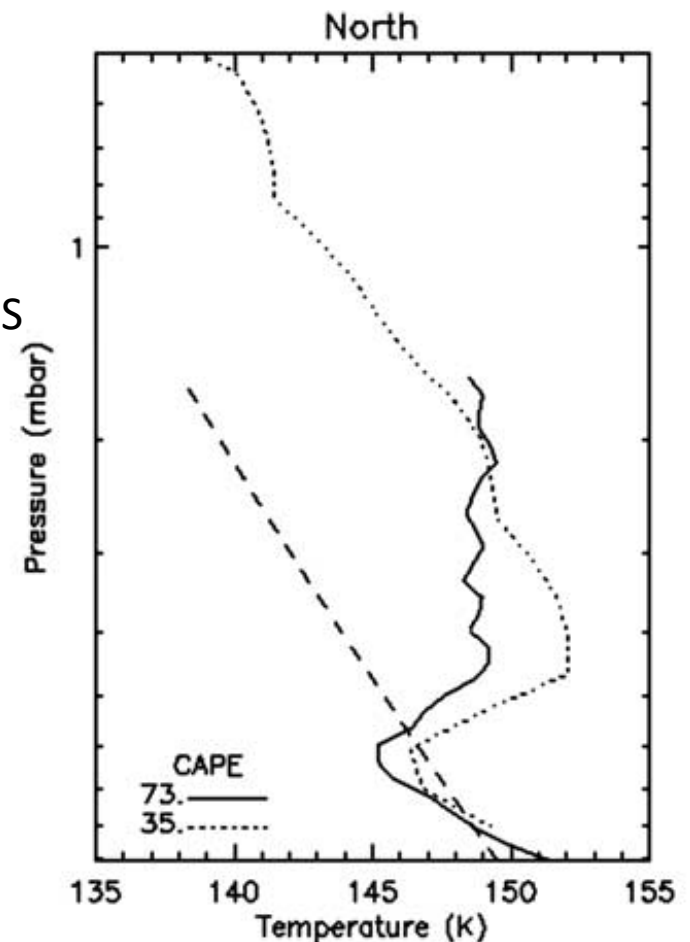
Современные проблемы дистанционного
зондирования Земли из космоса

Секция «Дистанционное зондирование планет Солнечной системы»

12 ноября 2024 | Москва

Наблюдения полярных CO₂ облаков

- Каждый марсианский год ~30% атмосферной массы конденсируется, образуя сезонные полярные шапки
- Полярные CO₂ облака образуются во время полярной ночи -> прямые наблюдения затруднены
- Полярные CO₂ облака на высотах < 30 км
 - Непрямые наблюдения:
 - Детектирование больших величин аэрозольной опт. толщины на 0-25 км приборами MGS TES и MRO MCS
 - Отражения сигнала лазера на высотах 0-20 км (MGS MOLA, Neumann et al., 2003)
 - Наблюдение температуры ниже температуры замерзания CO₂ на высотах <30 км [наблюдения в тепловом ИК «Маринер-9» и «Викинг», радио просвечивания MGS, MGS TES, MRO MCS, (Kieffer et al., 1976; Hinson and Wilson, 2002; Colaprete et al., 2003; Hayne et al., 2012, 2014)]



Радио просвечивания MGS
Colaprete et al. 2003

Наблюдения мезосферных CO₂ облаков

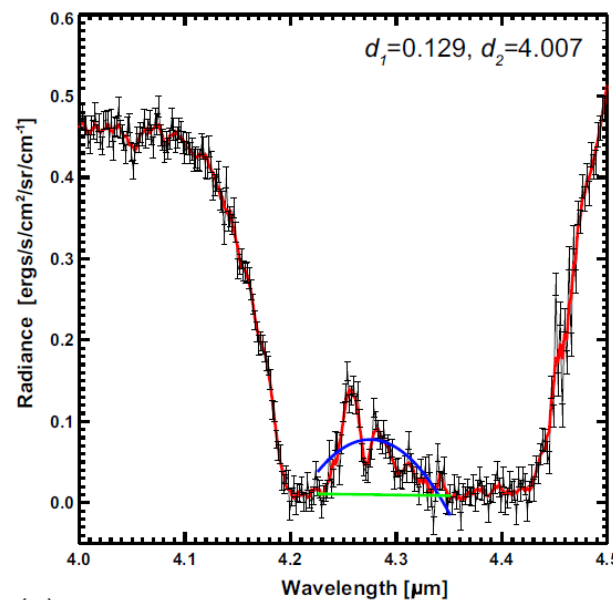
Лимбовые наблюдения OMEGA

- Мезосферные CO₂ облака детектированы на высотах 50–100 km
- Наблюдения аэрозольных слоёв голубого цвета: спускаемый аппарат Mars Pathfinder, MGS MOC, OMEGA/Mars Express (Schofield et al., 1997, Clancy et al., 2007)
- Наблюдение температуры ниже температуры замерзания CO₂: спускаемый аппарат Mars Pathfinder, CRISM/MRO, THEMIS/Mars Odyssey, SPICAM, PFS, OMEGA, HRSC на борту «Марс-Экспресса», IUVS/MAVEN (Clancy et al., 2019; Vincendon et al., 2011; McConnochie et al., 2010; Montmessin et al., 2006; Aoki et al., 2018; Määttänen et al., 2010; Montmessin et al., 2007; Scholten et al., 2010; Jiang et al., 2019)

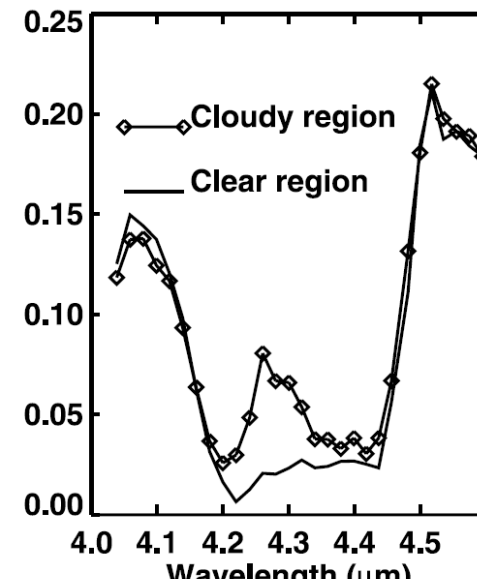


- Спектральное детектирование из данных надирных снимков OMEGA (Montmessin et al., 2007) и PFS (Aoki et al., 2018)
- Пик рассеянного солнечного излучения CO₂ облаками на высотах 80 км в спектральном диапазоне с насыщенным поглощением CO₂ газа

Надирный спектр PFS
Aoki et al., 2018



Надирный спектр OMEGA
Montmessin et al., 2007

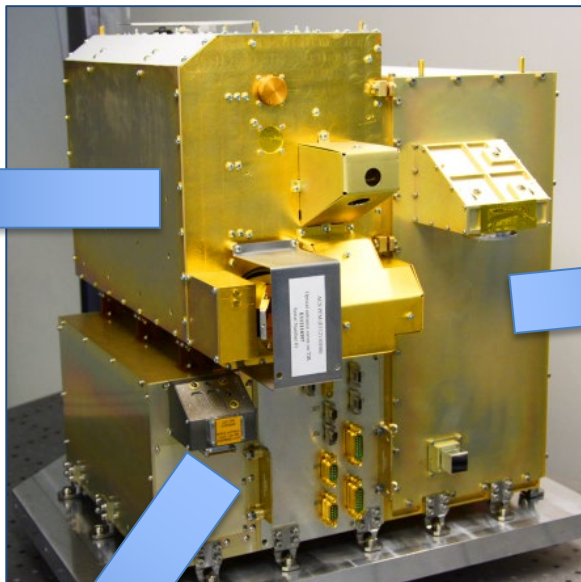


АЦС — Atmospheric Chemistry Suite

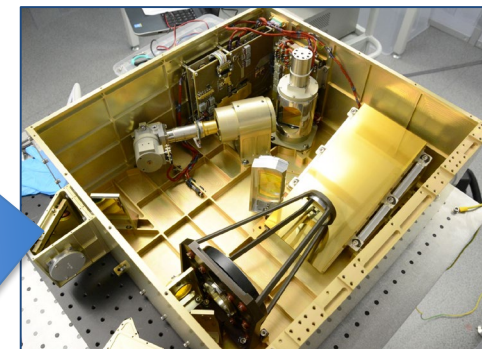
ТИРВИМ — Фурье-спектрометр



- Спектр. диапазон 1.7 – 17 мкм (580–5800 cm^{-1})
- $\Delta\nu \sim 0.13 \text{ cm}^{-1}$ (Sun), 0.8 cm^{-1} (Mars)
- Режимы наблюдения: солнечное просвечивание (2 – 6 мкм) и надир
- Поле зрения: $\text{Ø}2.5^\circ$

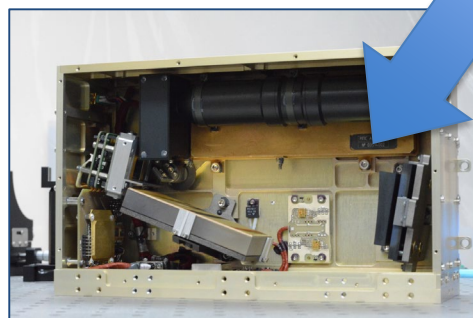


МИР — эшелле + скрещенная дисперсия



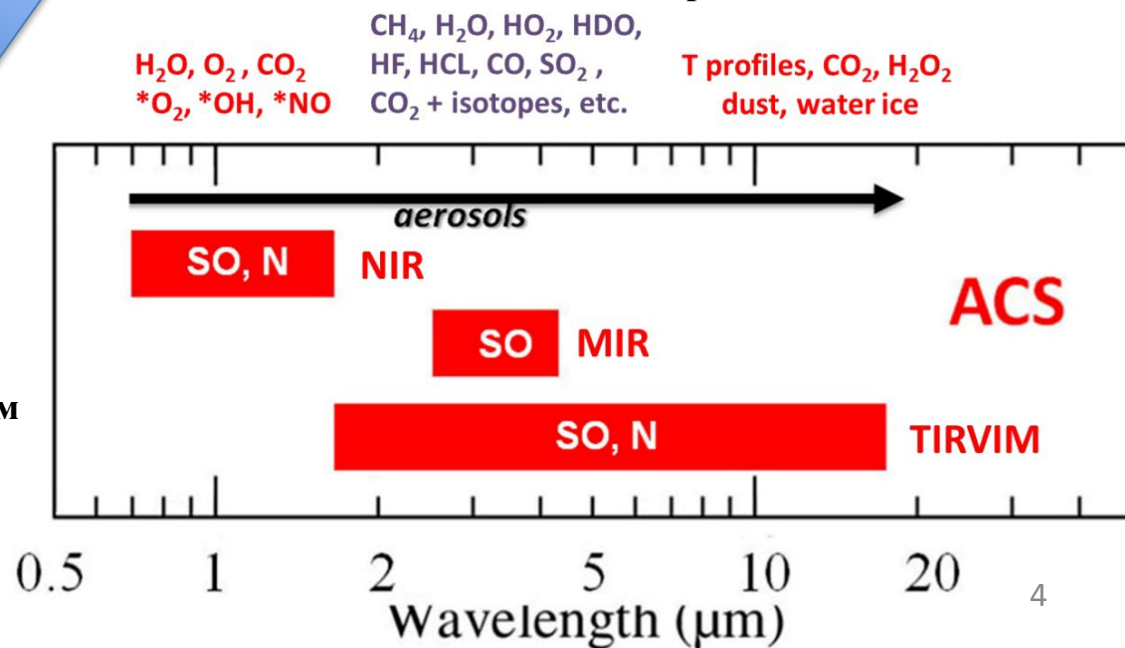
- Спектр. диапазон: 2.3 – 4.2 мкм
- $\lambda/\delta\lambda \sim 50\,000$
- Режим наблюдения: солнечное просвечивание
- Поле зрения: $0.23^\circ \times 0.02^\circ$

НИР — эшелле + АОПФ



- Спектр. диапазон: 0.73 – 1.6 мкм
- $\lambda/\delta\lambda \sim 25\,000$
- Режимы наблюдения: солнечное и надир
- Поле зрения: $0.3^\circ \times 0.02^\circ$ просвечивание

Dust and water ice during 2018 GDS from TIRVIM + NIR:
Luginin et al., 2020



Наблюдение CO₂ облаков в полосе 2.7 мкм

Набор данных

солнечного просвечивания

L_s 166° 34-го МГ – L_s 115 35-го МГ (2 Дек 2019)

НИР: 826 одновременных наблюдений

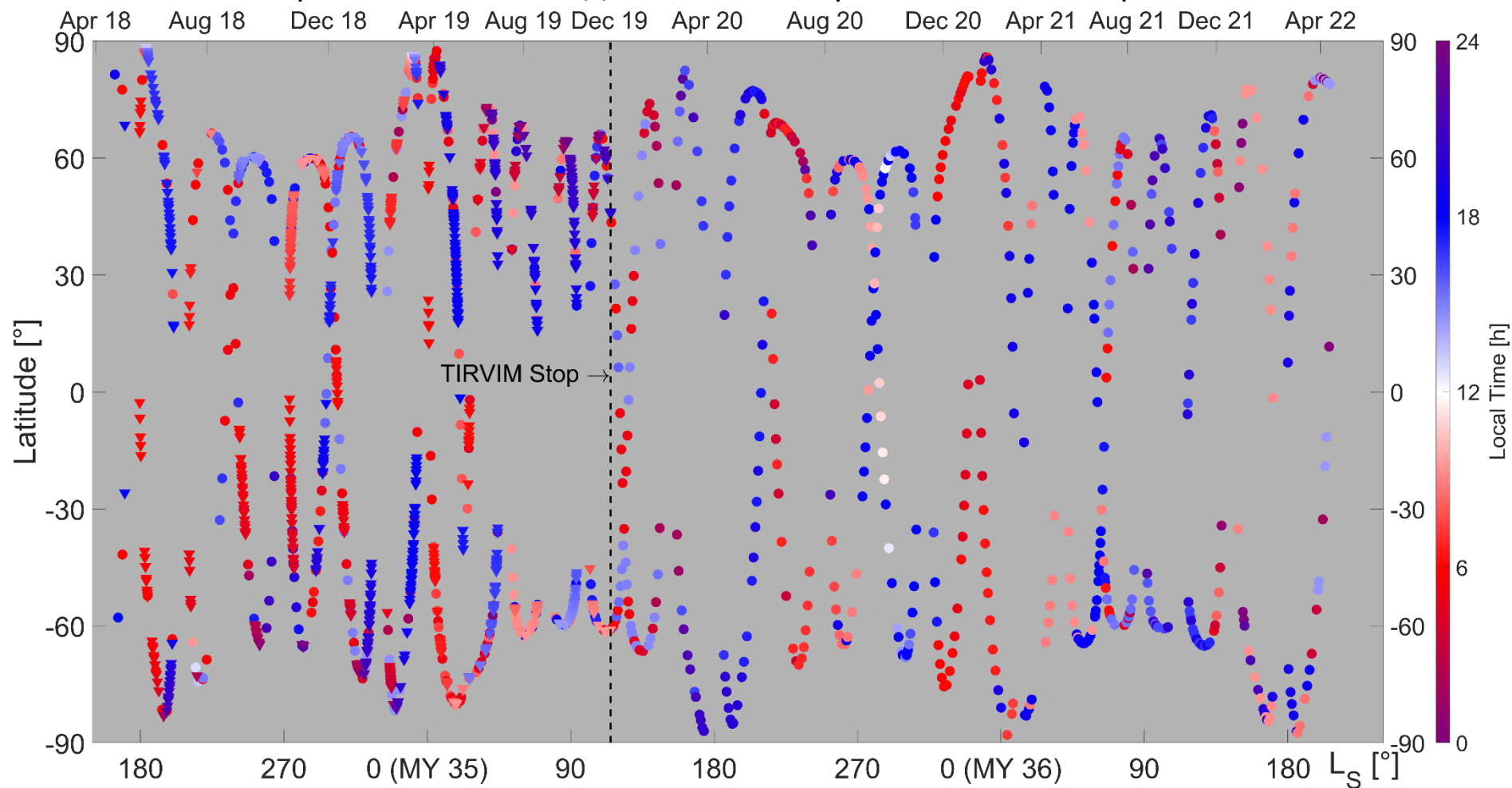
просвечивания (положение вторичного зеркала №4)

L_s 164 34-го МГ — L_s 206 36-го МГ (Апрель 2022)

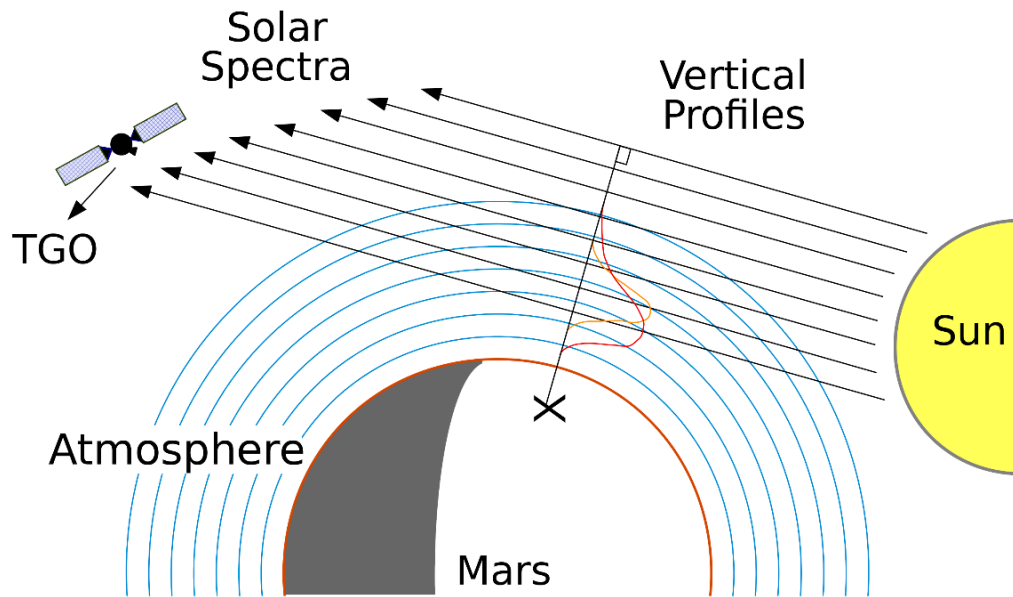
НИР: 791 simultaneous observations

111 одновременных наблюдений **ТИРВИМа** and **МИРа**

Всего **1663** различных наблюдений в геометрии солнечного просвечивания



Метод



$$1) \quad T(\lambda) = \frac{I_A(\lambda)}{I_0(\lambda)}$$

1*) Коррекция газового поглощения
CO₂ в полосе 2.7 мкм: $T(\lambda) \rightarrow T_{aer}(\lambda)$

$$2) \quad \tau_\lambda = -\ln(T(\lambda))$$

3) “Очистка луковицы” — обратное преобразование Абеля



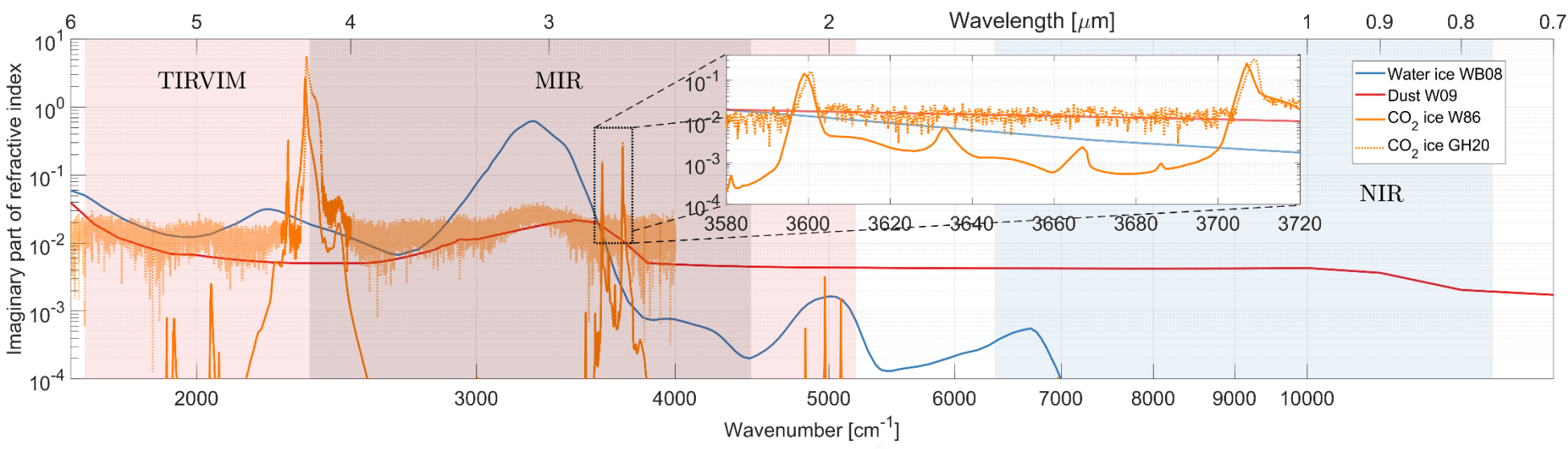
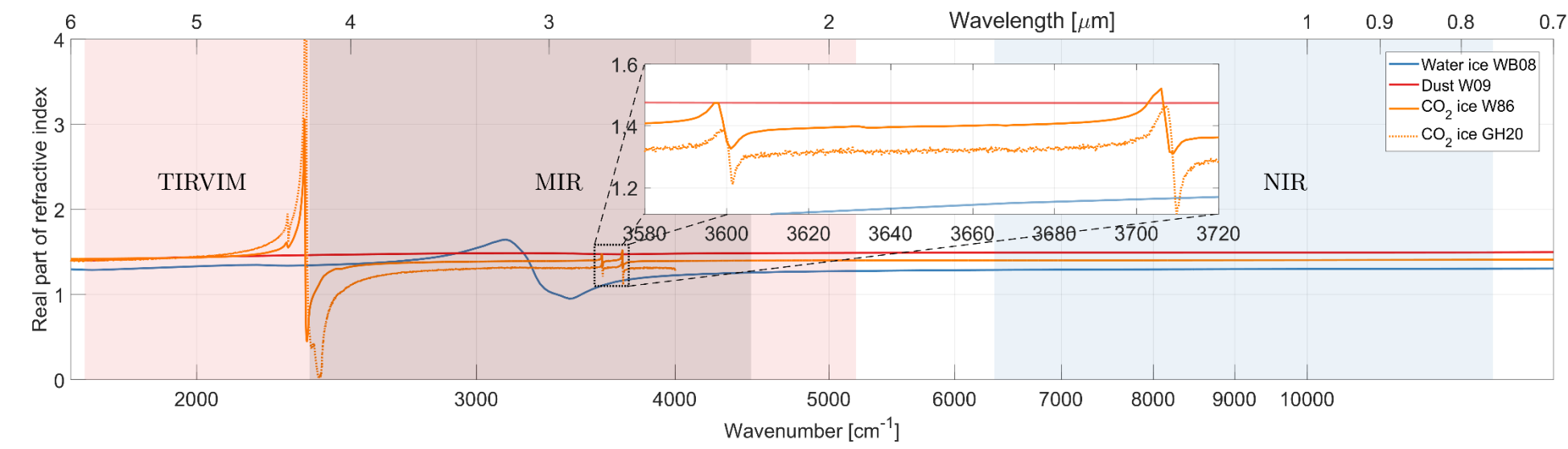
$$k_{ext}(\lambda)$$

4) Подгонка модели под кривую спектральной зависимости

коэффициента ослабления аэрозоля

Восстановленные значения эфф. радиуса, счетной концентрации, массовой концентрации

Коэффициент преломления водяного льда, пыли и CO₂ льда



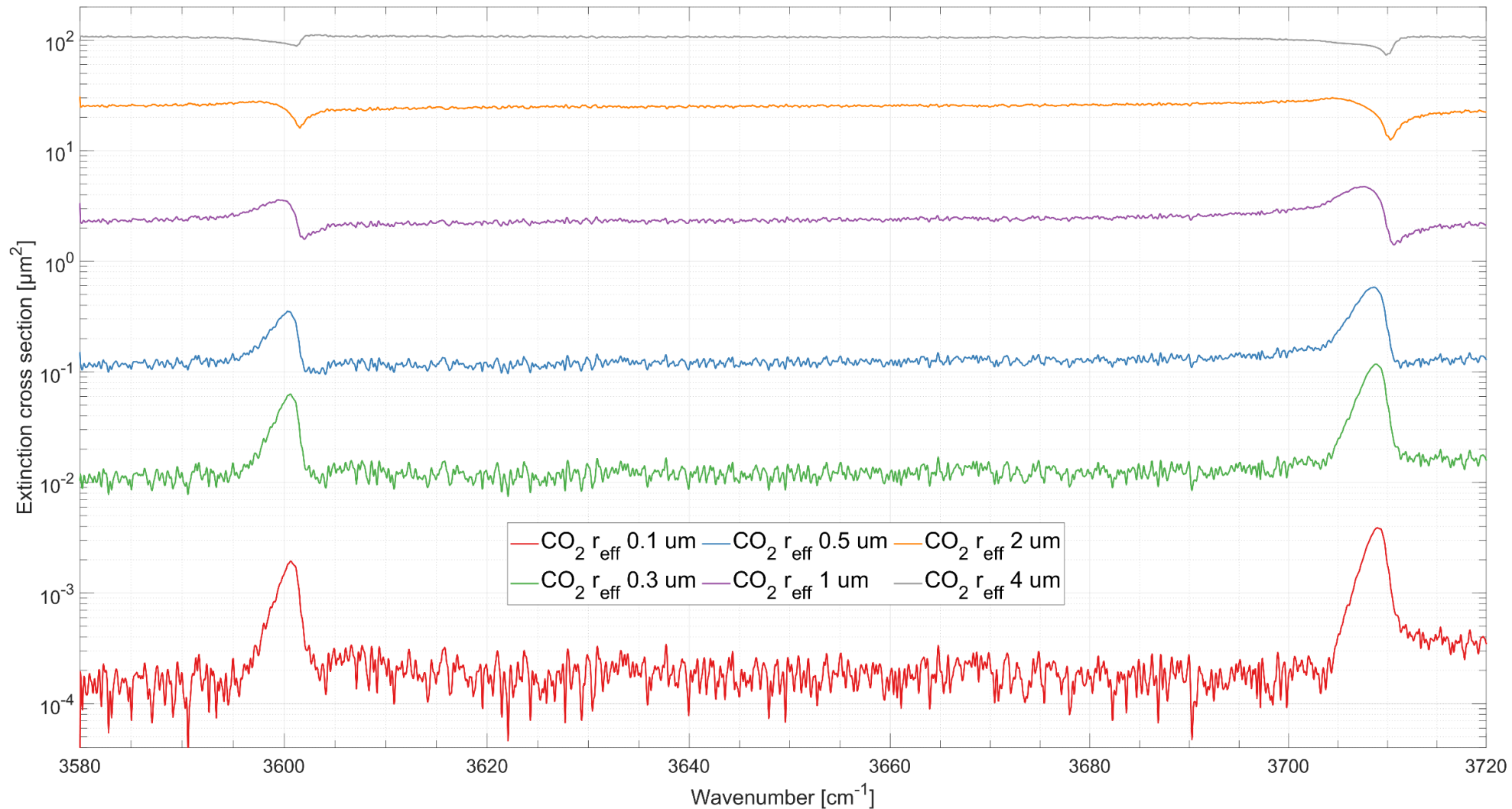
Warren, 1986 — компиляция различных источников по CO₂, 2.7 мкм — Wood and Rouk (1982), $\delta\nu = 4 \text{ cm}^{-1}$, T=80 K
 Gerakines and Hudson, 2020: CO₂ лед при 70 K, $\delta\nu = 0.2 \text{ cm}^{-1}$:

Водяной лед @ 266 K = Warren, Brandt – 2008; @ 130-210 K = Clapp, Worsnop, Miller – 1995

Пыль = Wolff et al. 2009

Модели аэрозольного ослабления CO₂ льда

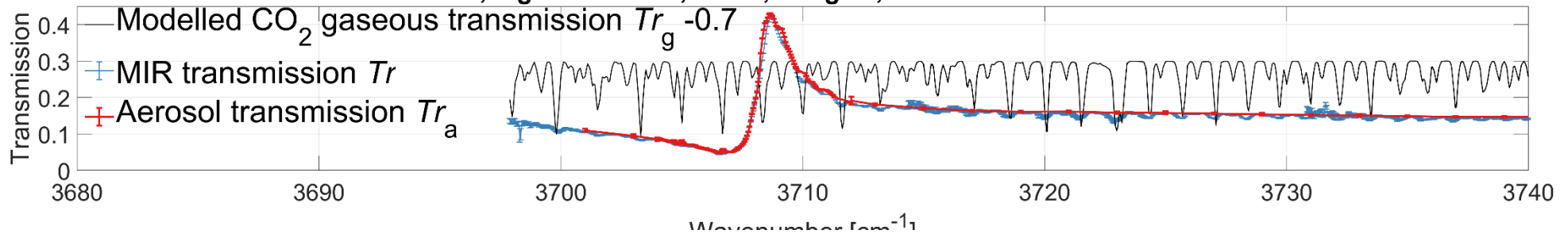
Extinction cross section of CO₂ particles calculated for 0.1 effective variance



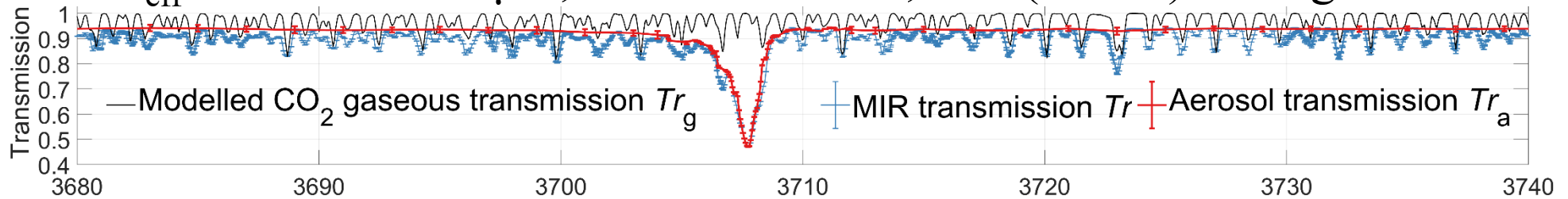
Примеры полосы поглощения CO₂ льда: пропускание МИРа

$$r_{\text{eff}} = 1.76 \pm 0.06 \mu\text{m}, N = 0.16 \pm 0.01 \text{ cm}^{-3}, m = (8.0 \pm 0.3) \cdot 10^{-12} \text{ g/cm}^3$$

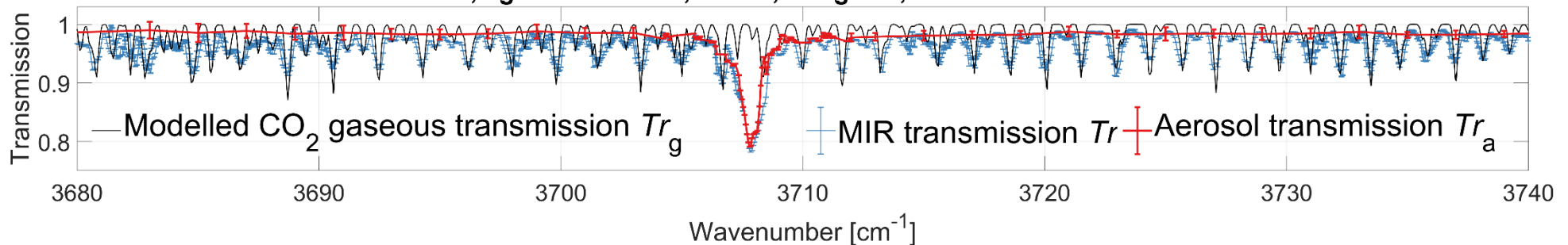
Orbit #009192, ingress. Ls 121, Lat -5, Long 18, Local Time 18 h. Altitude 62.5 km



$$r_{\text{eff}} = 0.23 \pm 0.02 \mu\text{m}, N = 10 \pm 1 \text{ cm}^{-3}, m = (10 \pm 1) \cdot 10^{-13} \text{ g/cm}^3$$

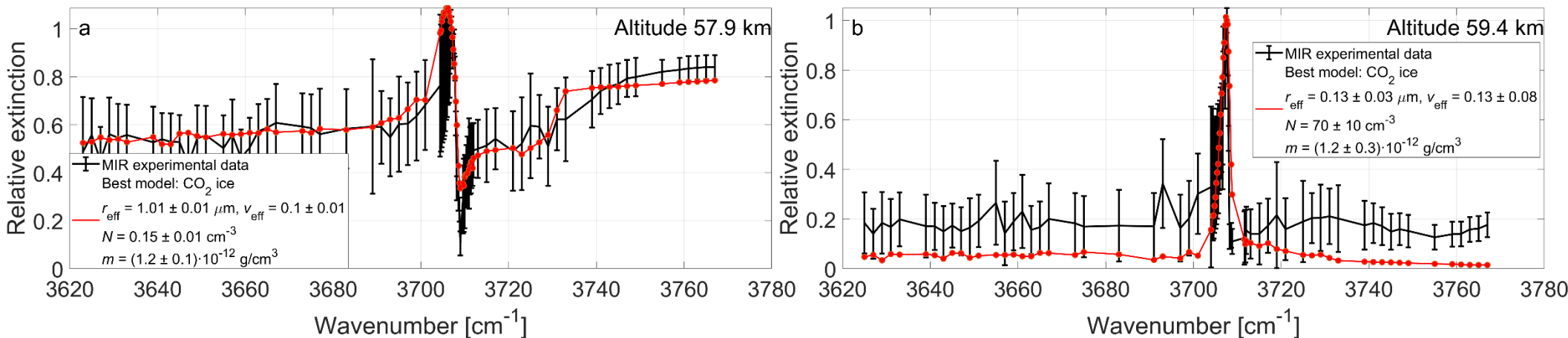


$$r_{\text{eff}} < 0.1 \mu\text{m}, N = 70 \pm 10 \text{ cm}^{-3}, m = (6 \pm 1) \cdot 10^{-13} \text{ g/cm}^3$$

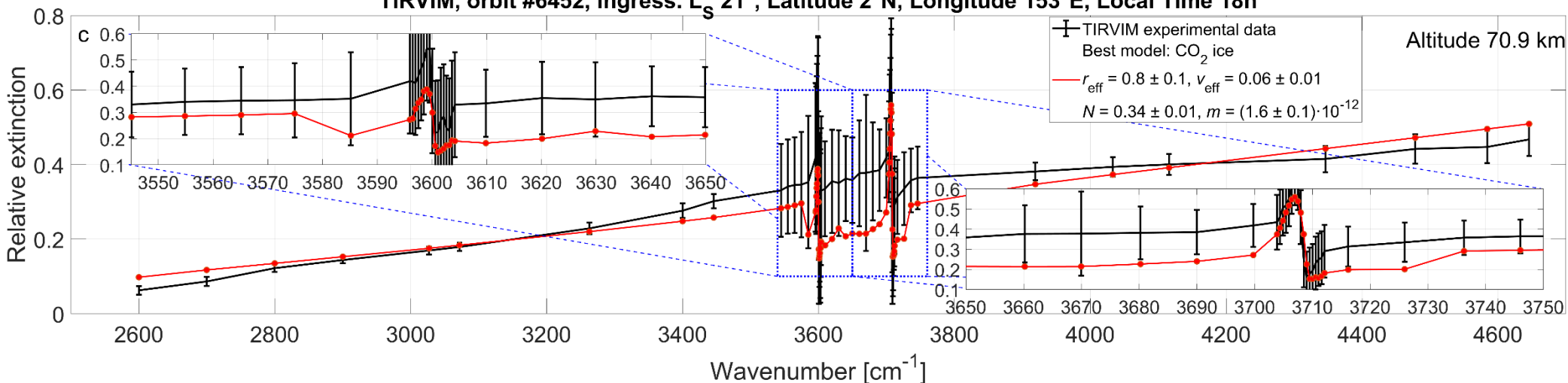


Примеры полосы поглощения CO₂ льда : эксперимент и модели

MIR, orbit #015965, egress, L_s 62°, Latitude 42°S, Longitude 314°E, Local Time 8h

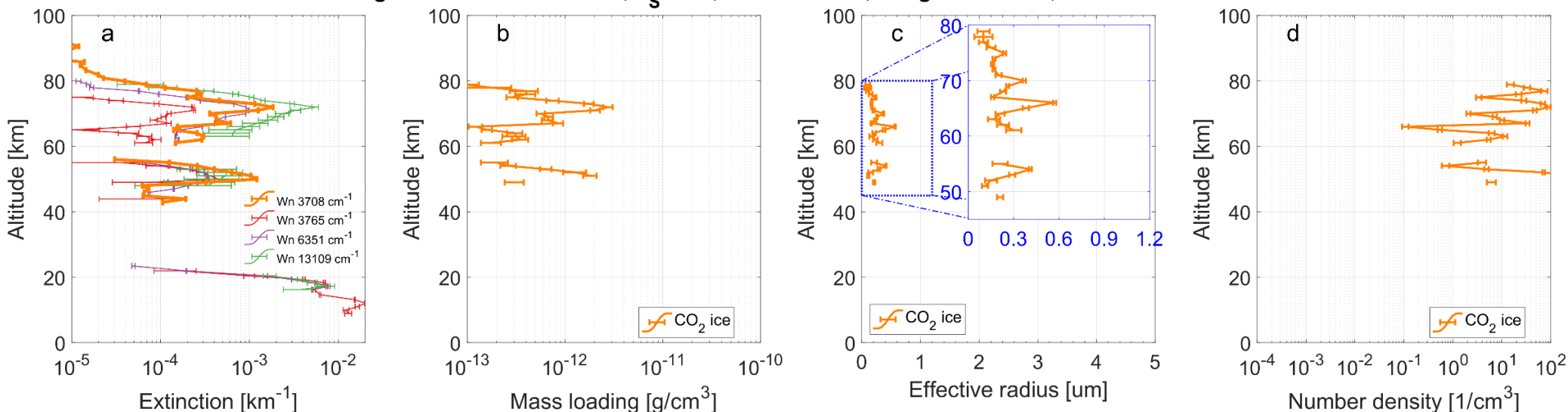


TIRVIM, orbit #6452, ingress, L_s 21°, Latitude 2°N, Longitude 153°E, Local Time 18h

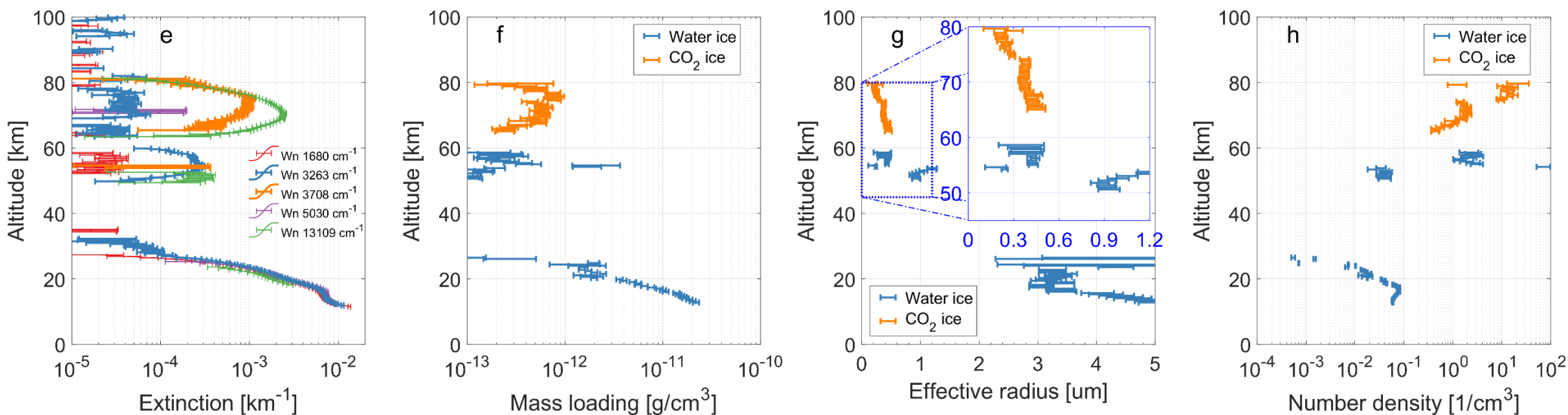


Одновременное наблюдение сеанса 5401_E ТИРВИМом и МИРом

MIR egress occultation #5401, L_s 338°, Latitude 50°N, Longitude 256°E, Local Time 7h



TIRVIM egress occultation #5401, L_s 338°, Latitude 50°N, Longitude 256°E, Local Time 7h

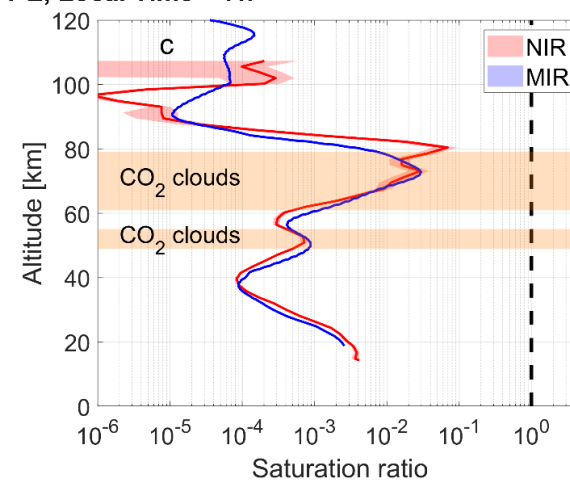
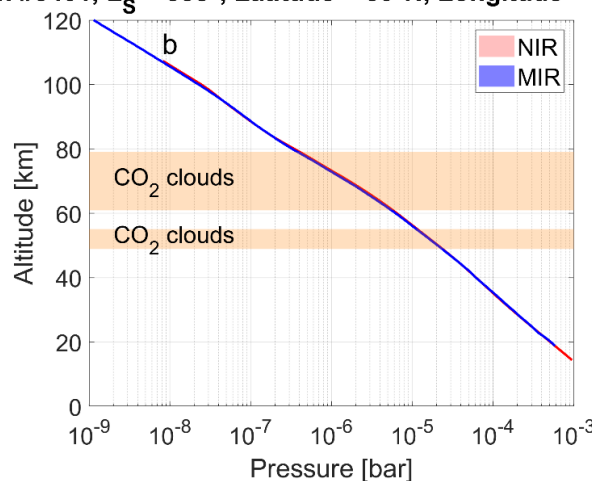
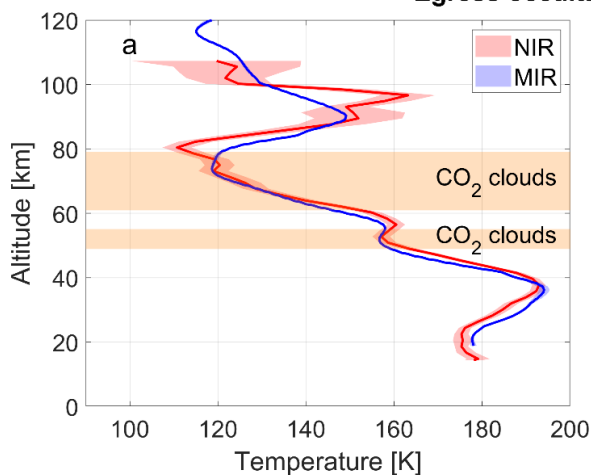


Анализ состояния насыщения CO₂ газа при детектировании CO₂ облаков

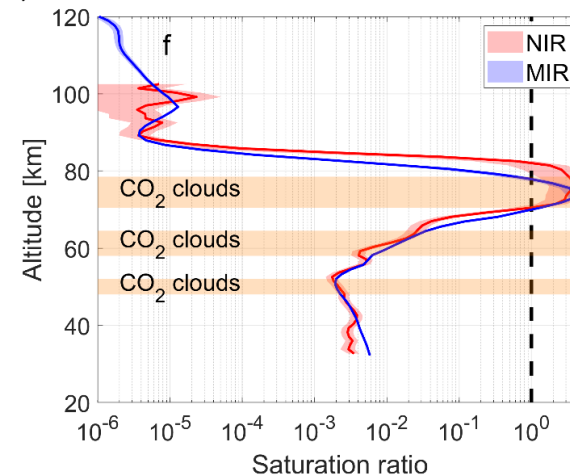
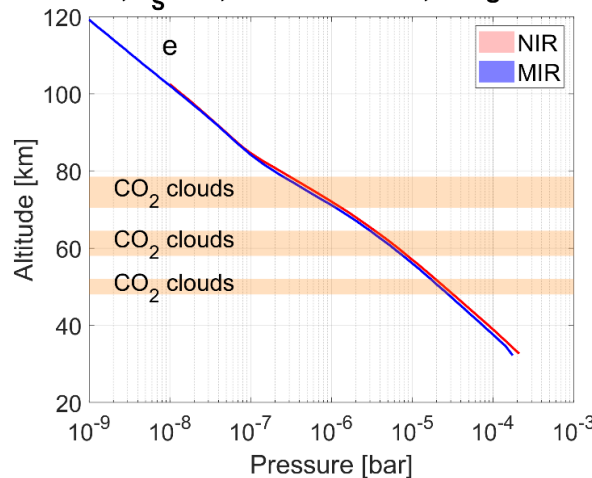
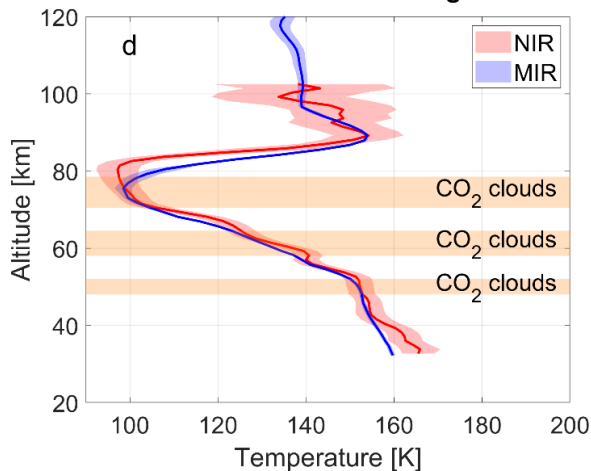
$$S = \frac{P}{P_{sat}(T)} \quad \log_{10} P_{sat}(T) = \left[A + \frac{B}{T + C} + \frac{D}{T + E} \right]$$

$A = 6.760959$ $B = -1284.07$ $C = -4.718$ $D = 1.256e - 4$ $E = -143.15$

Egress occultation #5401, L_s = 338°, Latitude = 50°N, Longitude = -104°E, Local Time = 7h



Ingress occultation #14501, L_s = 7°, Latitude = 12°N, Longitude = 13°E, Local Time = 18h



Статистика наблюдения мезосферных CO₂ облаков

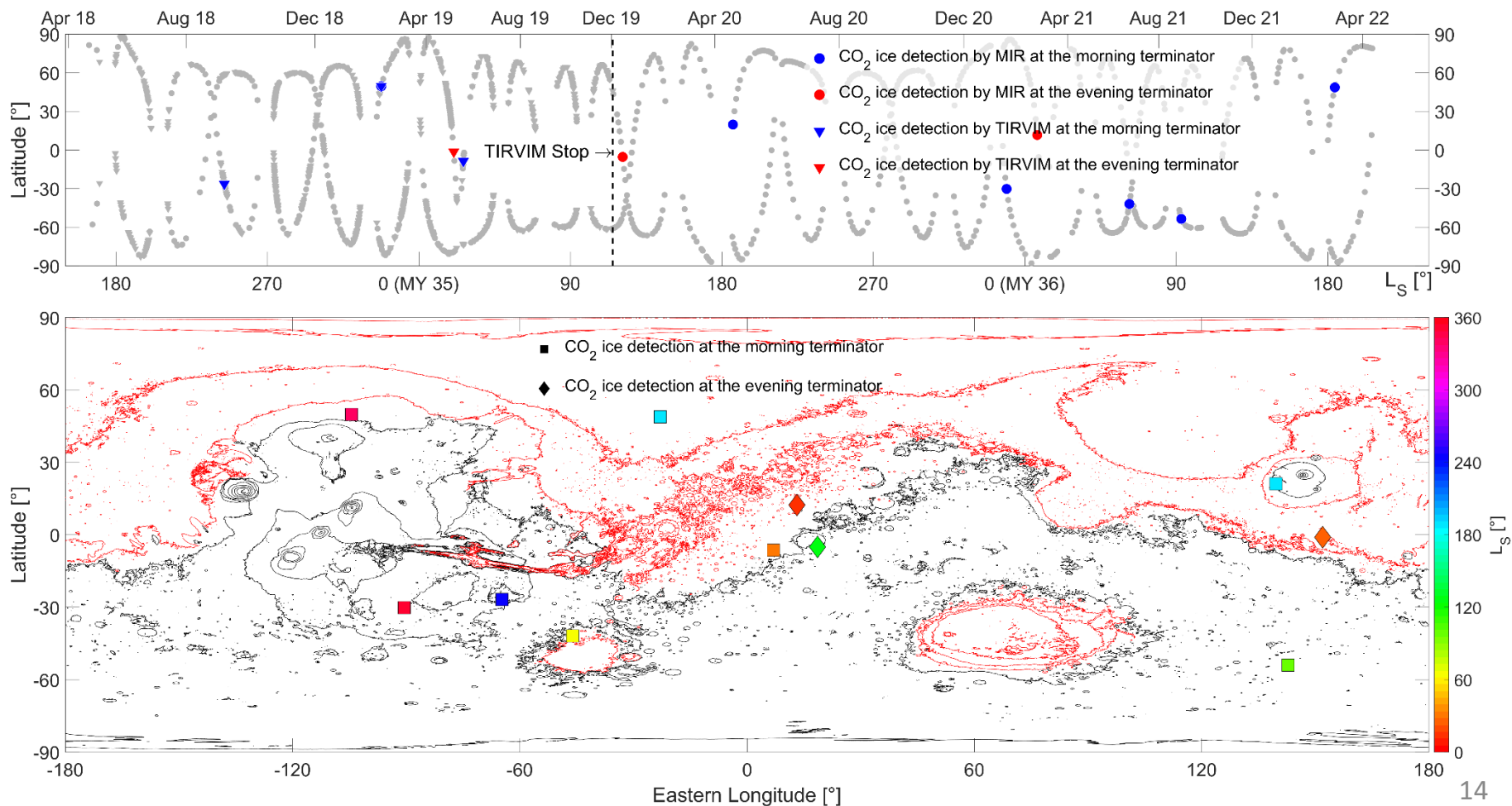
ТИРВИМ: проанализировано 910 сеансов
солнечного просвечивания

МИР : 864 сеансов солнечного просвечивания
(положение вторичного зеркала №4)

1663 различных наблюдений



11 детектирований CO₂ облаков



Свойства детектированных мезосферных CO₂ облаков

- $r_{\text{eff}} = 0.1\text{--}2.2$ мкм, медиана 0.6 мкм
- $H = 39\text{--}90$ км
- $\tau = 5 \times 10^{-4}\text{--}4 \times 10^{-2}$ на 0.8 мкм и 2.7 мкм
- ТИРВИМ: полосы поглощения водяного и сухого льда
В 2 из 5 случаев одновременно CO₂ и H₂O облака
- $S \geq 1$ в 5 из 19 случаев CO₂ облаков (26 %)
- $S < 0.1$ в 9 из 19

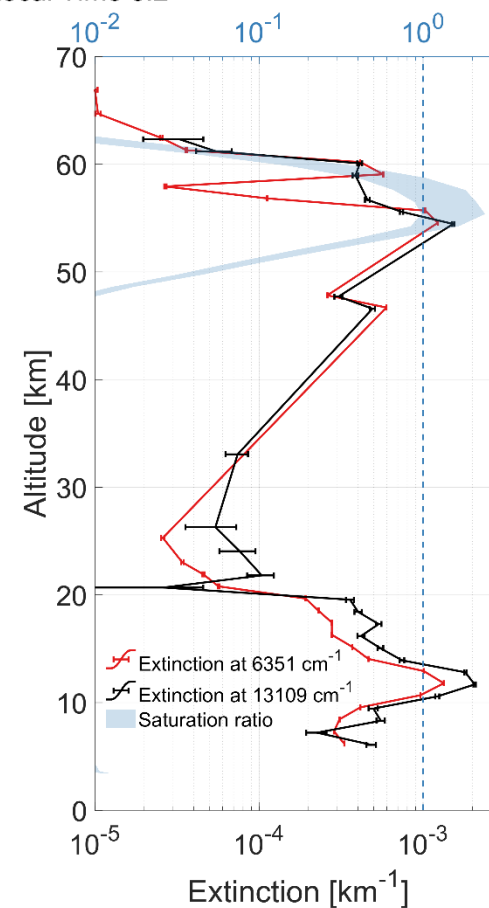
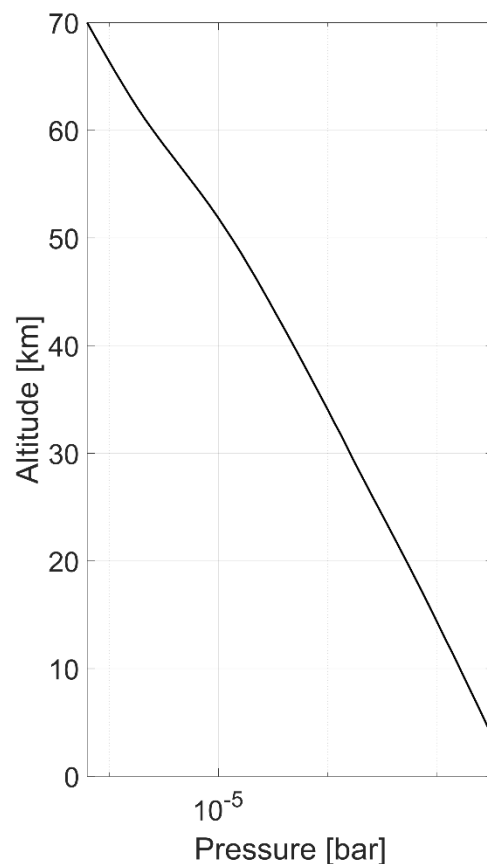
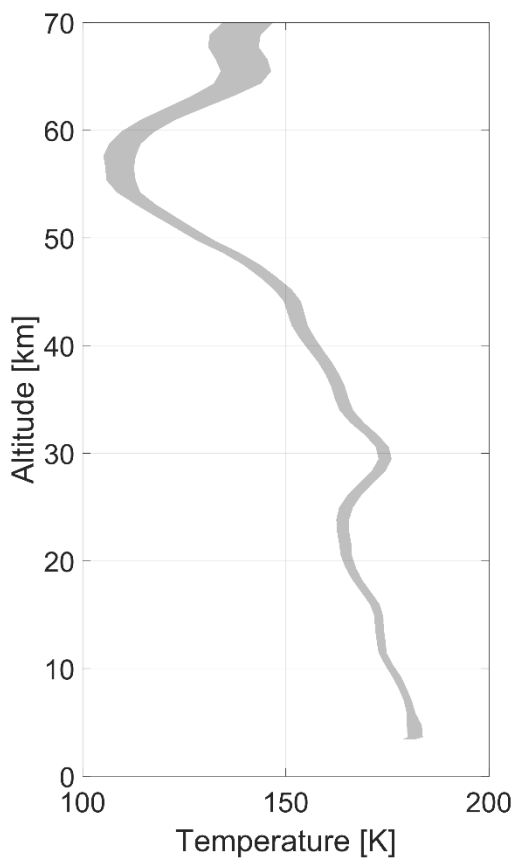
Occultation	Channel	L_s [°] (MY)	Latitude	Eastern Longitude	Local time [h]	H [km]	r_{eff} [μm]	N [cm ⁻³]	M [10 ⁻¹⁴ g/cm ³]	S_{max} NIR; S_{max} MIR	$\tau \times 10^{-3}$	H ₂ O ice
3502_E	TIRVIM	244.4 (34)	27°S	-65°	5.2	72-82	0.6-0.7-0.8	0.02-0.1-0.3	5-20-30	0.08; -	3; 4	✓
5401_E	MIR	337.6 (34)	50°N	-104°	6.8	49-55	0.1-0.2-0.4	0.7-6-200	20-60-200	[7; 9]·10 ⁻⁴	4; 3	?
	61-79					0.1-0.2-0.6	0.1-10-90	7-40-300	0.07, 0.03	17; 25	X	
	47-56					— ¹	— ¹	— ¹	— ¹		✓	
	65-80					0.2-0.4-0.5	0.4-2-20	20-50-100	0.07; 0.03	10; 22	X	
6452_I	TIRVIM	20.7 (35)	1°S	152°	18.0	59-78	0.2-0.8-0.9	0.03-0.3-5	6-80-200	10; -	18; 21	X
6602_E	TIRVIM	26.4 (35)	6°S	7°	6.1	76-86	0.1-0.15-0.21	10-40-500	20-100-200	1; -	7; 9	X
9192_I	MIR	121.0 (35)	5°S	19°	17.9	55, 57 ²	2.2, 1.0 ²	0.03, 0.4 ²	200, 200 ²	0.03; 0.02	4; 3	?
						62-70	0.1-0.8-1.9	0.1-2-600	70-500-1000	0.8; 0.02	40; 37	?
10738_E	MIR	186.5 (35)	21°N	140°	6.1	50-65	0.1-0.1-0.3	3-20-60	20-30-40	[8; 3]·10 ⁻³	3; 6	X
						72-74	0.2-0.25-0.3	0.2-0.2-0.6	2-2-3	0.2; 0.06	[5; 8]·10 ⁻²	X
						79-90	0.1-0.1-0.3	0.3-30-70	2-10-40	1; 0.3	3; 0.6	X
14059_E	MIR	349.1 (35)	30°S	-91°	5.8	45-62	0.13-0.16-0.4	0.4-10-30	6-20-60	[2; 2]·10 ⁻³	7; 20	X
14501_I	MIR	7.3 (36)	12°N	13°	18.1	48-52	0.1-0.2-0.3	5-13-70	30-50-60	[5; 5]·10 ⁻³	2; 4	?
						58-65	0.1-0.11-0.23	5-40-100	8-40-50	0.2; 0.3	2; 1	X
						71-79	0.1-0.16-0.3	0.3-4-20	3-5-10	4; 4	0.5; 0.8	X
15965_E	MIR	62.1 (36)	42°S	-46°	7.4	53-59	0.13-1-1.1	0.02-0.2-70	15-25-80	0.1; 0.07	3; 3	X
16825_E	MIR	92.9 (36)	54°S	143°	8.7	58-63	0.1-1.9-2.2	0.1-0.3-70	4-500-2000	0.3; 20	29; 31	X
19076_E	MIR	184.1 (36)	49°N	-23°	6.1	39-54	0.1 ³	40-50-60 ³	20-30-40 ³	[3; 4]·10 ⁻⁴	5; 3	X
						69-76	0.1 ³	30-70-100 ³	20-40-60 ³	0.05; 0.09	5; 4	X
						80-84	0.1 ³	16-20-40	10-13-20	1; 0.3	1; 0.5	X

Детектирование CO_2 облаков с помощью профилей P , T и аэрозольной экстинкции

Детектирование CO₂ облаков по данным НИР

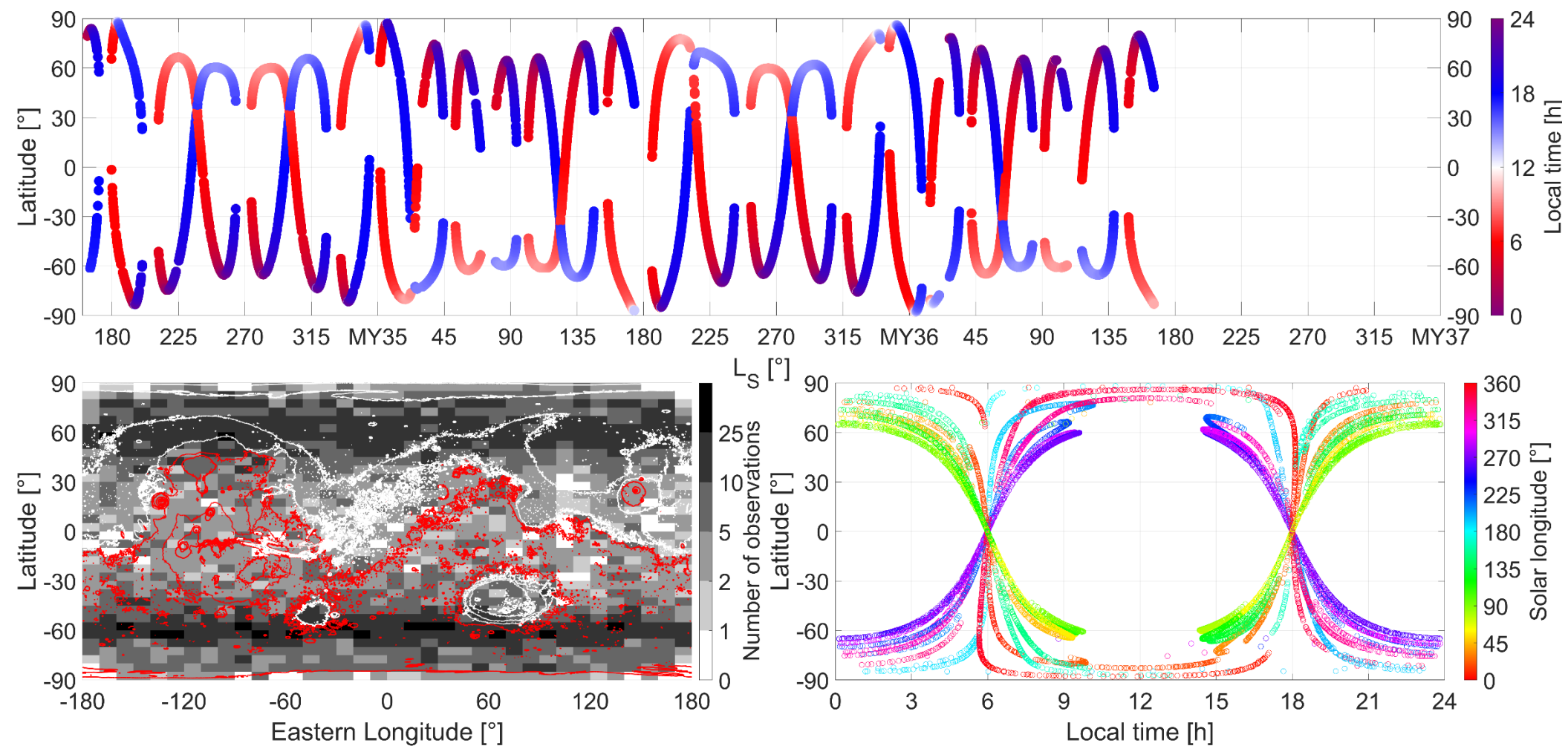
- Аэрозольный коэффициент ослабления
- Профили P и T -> профили S (А.А. Федорова)
- Большое количество наблюдений

Occultation #8707_N2, L_s 102.8, Lat -50.2, Long 105.3, Local Time 8.2 Saturation ratio



Набор данных

8632 сеансов НИР с восстановленными профилями P, T и аэрозольной экстинкции
 L_s 163° MY 34 — L_s 166° MY 36

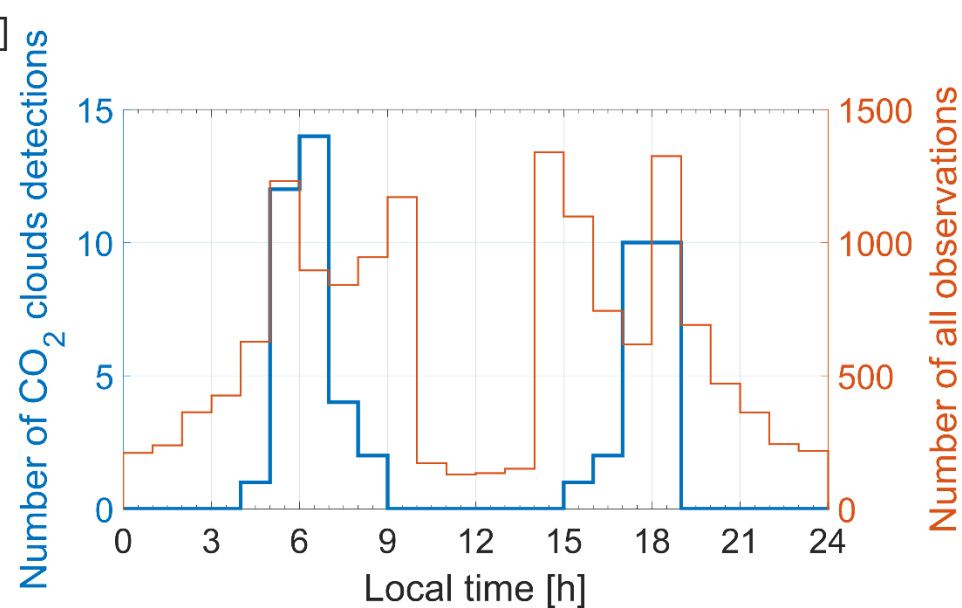
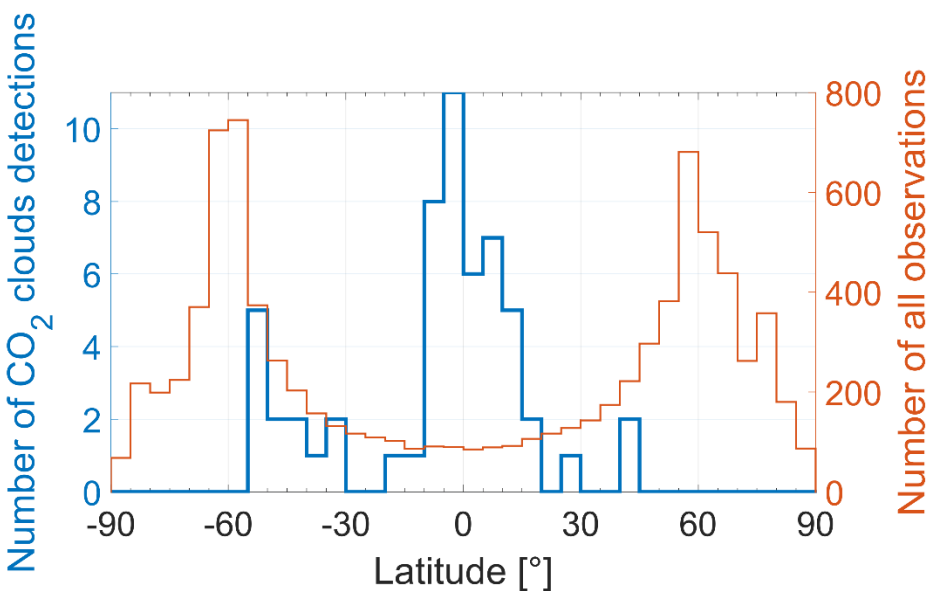
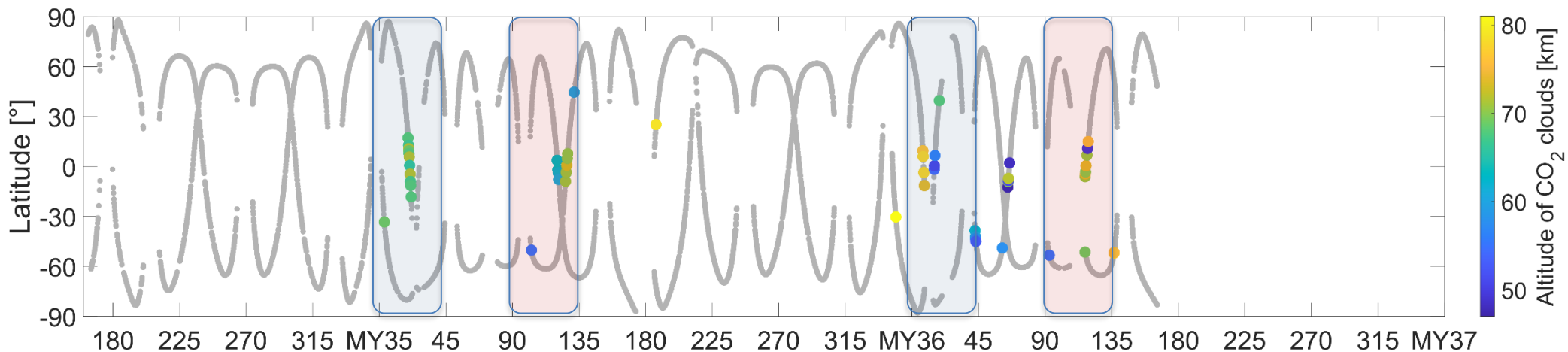


Распределение по высоте, широте и местному времени

8632 сеансов НИР

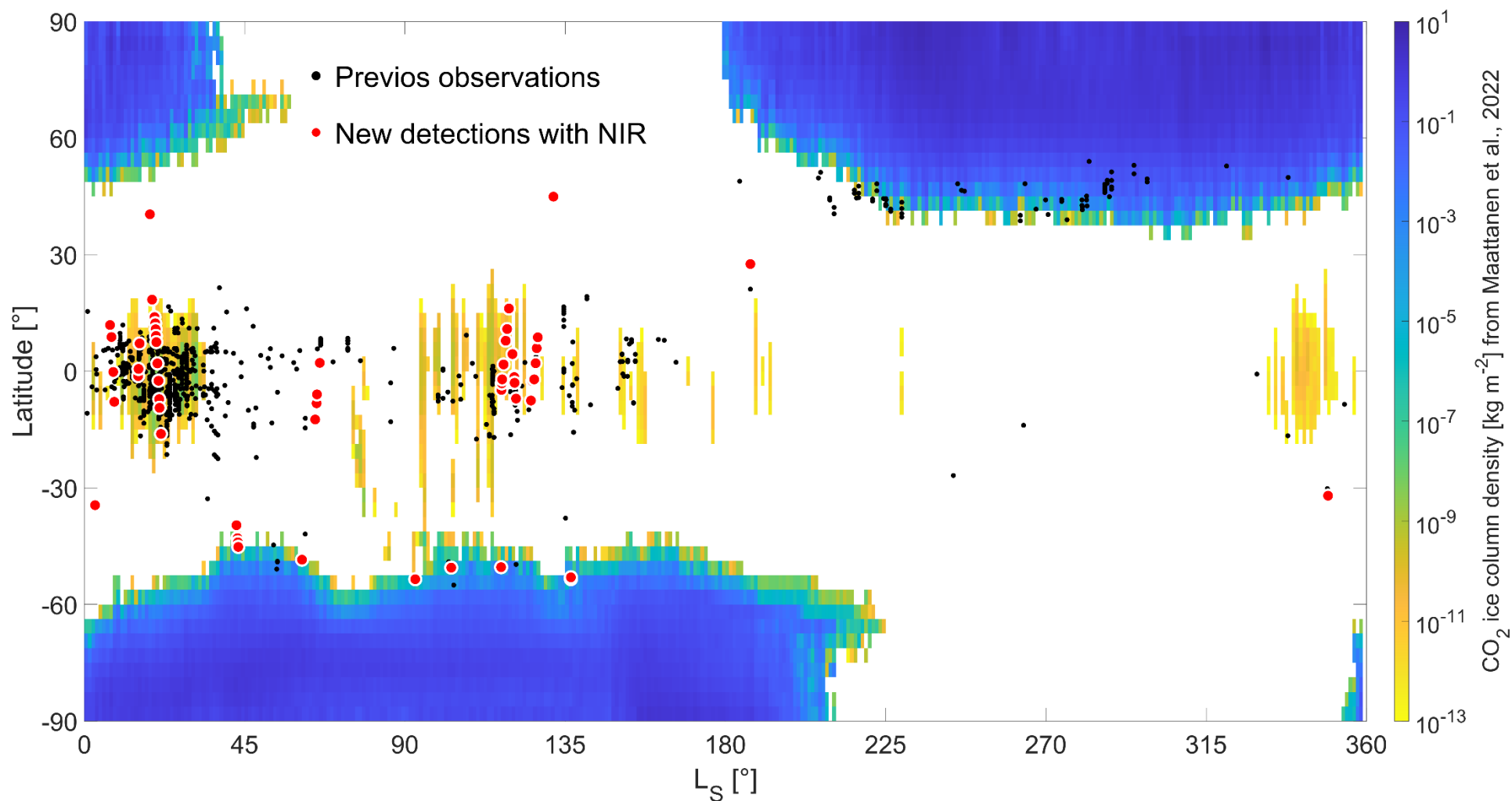
L_s 163° MY 34 — L_s 166° MY 36

62 детектирования CO_2 облаков — **56 новых случаев** (не считая опубликованных Luginin+ 2024)



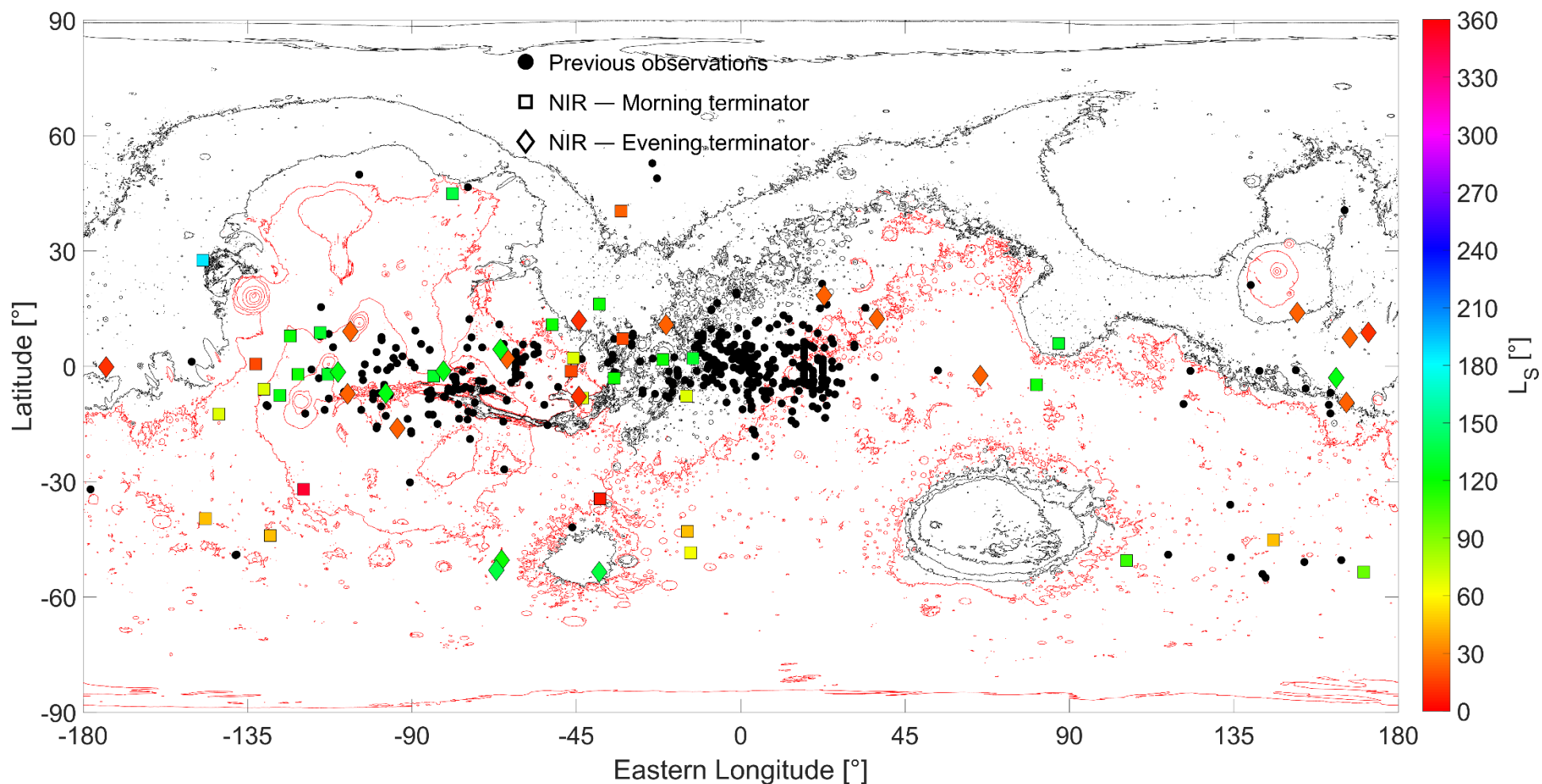
Наблюдения мезосферных CO₂ облаков: широта и солнечная долгота

Previous detections: **SPICAM** (Montmessin+ 2006), **TES** (Clancy+ 2007), **OMEGA** (Montmessin+ 2007; Maatani+ 2010), **THEMIS** (McConnochie+ 2010), **HRSC** (Scholten+ 2010), **CRISM** (Vincendon+ 2011; Clancy+ 2019), **PFS** (Aoki+ 2018), **IUVS** (Jiang+ 2019), **NOMAD** (Liuzzi+ 2021), **ACS** (Luginin+ 2024)



Наблюдения мезосферных CO₂ облаков: широта и долгота

Previous detections: **SPICAM** (Montmessin+ 2006), **TES** (Clancy+ 2007), **OMEGA** (Montmessin+ 2007; Maatanen+ 2010), **THEMIS** (McConnochie+ 2010), **HRSC** (Scholten+ 2010), **CRISM** (Vincendon+ 2011; Clancy+ 2019), **PFS** (Aoki+ 2018), **IUVS** (Jiang+ 2019), **NOMAD** (Liuzzi+ 2021), **ACS** (Luginin+ 2024)



Выводы

Детектирование CO₂ облаков по полосе 2.7 мкм по данным TIRVIM и MIR

- Детектирование CO₂ облаков в 11 солнечных затмениях из 1663 уникальных наблюдений TIRVIM и MIR с L_s 164 МГ 34 (апрель 2018 г.) по L_s 206 МГ 36 (апрель 2022 г.), 19 слоев CO₂.
- Эффективный радиус CO₂ = 0.1–2.2 мкм, медиана 0.6 мкм.
- CO₂ облака были обнаружены на высотах 39–90 км. В 5 из 11 затмений наблюдалось два или три слоя CO₂ облаков, разделенных промежутками в 5–15 км.
- Оптическая толщина CO₂ облаков в надире на 0.8 мкм и 2.7 мкм 5×10^{-4} – 4×10^{-2} , медианные значения 5×10^{-3} .
- 2 из 5 случаев детектирования CO₂ облаков сопровождались наблюдениями H₂O аэрозолей. Они располагались на высоте ~50 км и ~75 км. Эффективный радиус H₂O = 0.1–0.2 мкм.
- $S \geq 1$ было обнаружено в 5 из 19 случаев, $S < 0.1$ обнаружено в 9 из 19 случаев. Интерпретация наблюдаемых свойств частиц CO₂ и атмосферных параметров требует более сложного подхода.

Luginin, M., Trokhimovskiy, A., Fedorova, A., Belyaev, D., Ignatiev, N., Korablev, O., Montmessin, F., & Grigoriev, A. (2024). Unambiguous detection of mesospheric CO₂ clouds on Mars using 2.7 μm absorption band from the ACS/TGO solar occultations. *Icarus*, 423(August), 116271.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2024.116271>

Детектирование CO₂ облаков из Р, Т и аэрозольной экстинкции по данным НИР

- 56 новых обнаружений детектирование CO₂ облаков (8632 сеансов L_s 163° MY 34 — L_s 166° MY 36)
- Большинство обнаружений происходит в пределах последовательностей орбит
- Неравномерное географическое и сезонное распределение
 - Группировка по широте -145°E–45°E, долготы 20°S–20°N, и солнечной долготы L_s 0°–40°, 120°–135°
- Повторное появление CO₂ облаков в двух последовательных марсианских годах LS 0°–40°, 120°–135°



Спасибо за внимание!

