



Институт космических исследований Российской академии наук.
Отдел физики планет и малых тел Солнечной системы.

Многоканальный лазерный спектрометр для исследования атмосферы и летучих компонент грунта Марса

*Эксперимент «Марсианский многоканальный диодно-лазерный спектрометр М-ДЛС»
для комплекса научной аппаратуры на посадочную платформу проекта «Экзомарс»*



21-й Общероссийский семинар по диодной лазерной спектроскопии
им. А.М.Прохорова
ИОФ РАН, Москва, 02.04.2014

Эксперимент «М-ДЛС»

Научный руководитель: И.И. Виноградов, ИКИ РАН

Научный со-руководитель: А.В. Родин, ИКИ РАН, МФТИ

Ведущий по прибору: В.В. Барке, ИКИ РАН

В составе научной группы сотрудники лабораторий:

ИКИ РАН:

Отдел физики планет и
малых тел Солнечной
системы.

Лаб. 531, 532, 534, 536.

МФТИ:

Факультет проблем
физики и
энергетики.

Лаб. ИСПАВР.

ИОФ РАН:

Отдел диодной лазерной спектроскопии.
Лаб. прикладной диодной лазерной
спектроскопии, лаб. спектроскопии
межмолекулярных взаимодействий.

- Авторским коллективом разработана концепция исследований атмосферы и летучих грунта Марса при помощи многоканального диодно-лазерного спектрометра "М-ДЛС", предложенного для реализации в составе российского комплекса научной аппаратуры долгоживущей посадочной платформы международной миссии ЭкзоМарс-2018.

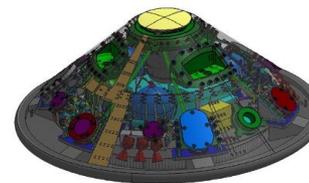
Состав КА проекта ЭкзоМарс

Запуск в 2016 г.

TGO (Trace Gas Orbiter)
Орбитальный зонд - изучение малых газовых составляющих атмосферы Марса



EDL Demonstrator Module (EDM)
Демонстрационный посадочный модуль



В стадии реализации

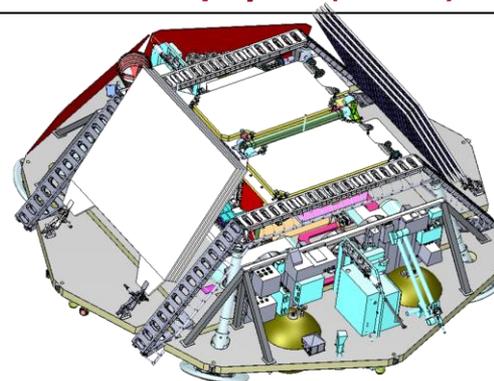
В стадии согласования

Запуск в 2018 г.

Ровер ЕКА

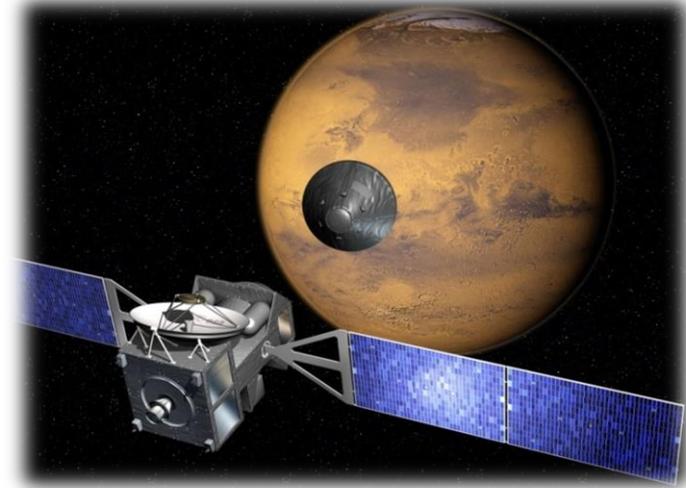


Стационарная посадочная платформа (НПОЛ)



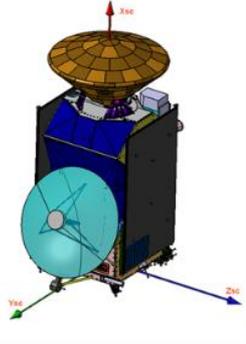
ExoMARS 2016 Mission Timeline

- ❑ **Launch Period: 7 – 27 Jan 2016**
- ❑ **SCC Interplanetary Cruise:
Jan – Oct 2016**
- ❑ **TGO – EDM Separation: 16 Oct 2016**
- ❑ **EDM EDL and TGO MOI: 19 Oct 2016**
- ❑ **(EDM) Landing Platform Surface
Operations: 19 – 23 (TBC) Oct 2016**
- ❑ **TGO into Science and Data Relay Orbit: Nov 2017
(following the Aerobraking phase)**
- ❑ **TGO Science Phase: Nov 2017 – Jan 2019**
- ❑ **TGO Science and Data Relay Phase: Jan – Nov 2019**
- ❑ **TGO Data Relay Phase: Nov 2019 – Dec 2022**



2016 Mission Overview – TGO

LAUNCH

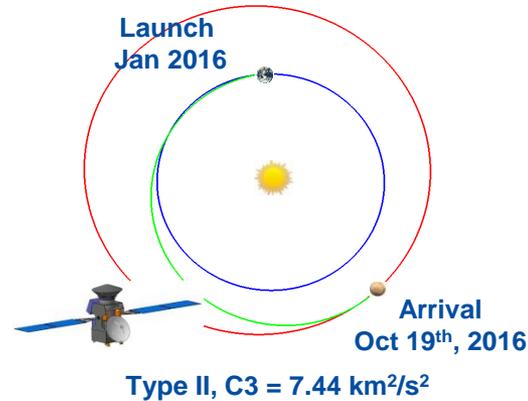


ExoMars SCC in launch configuration



Proton M/Breeze M

INTERPLANETARY CRUISE

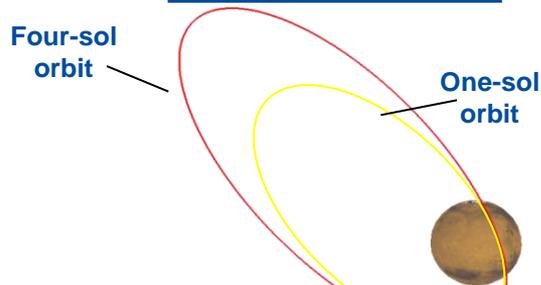


MARS APPROACH, EDM RELEASE & MOI



- (1) EDM released from the hyperbolic approach 3 days before MOI
- (2) TGO performs retargeting and MOI into 4 sol orbit (inclination compatible with target landing site) while guaranteeing data relay coverage for EDM during EDL (TBC)

TRANSITION To One-Sol ORBIT



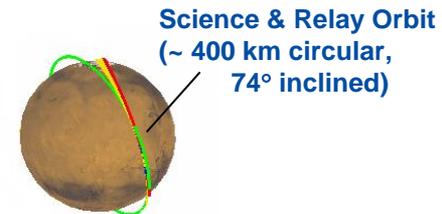
- (1) Data Relay of EDM surface operations to be provided by MEX and NRO
- (2) TGO orbit inclination change to baseline science and data relay orbit (74° inclined)
- (3) Reduction of orbit Apoares to one-sol

AEROBRAKING PHASE



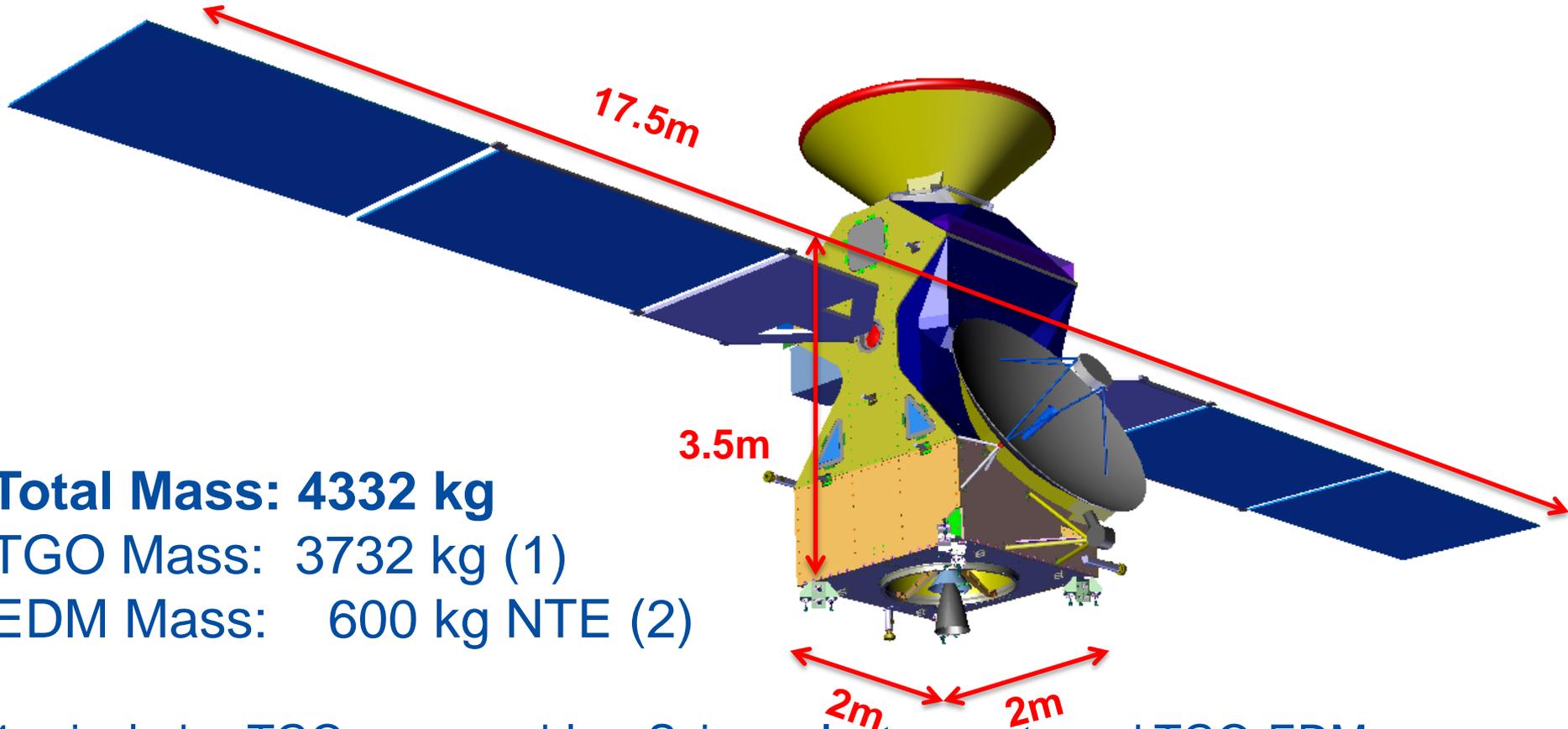
- (1) TGO Aerobraking to final orbit
- (2) Start of Science Phase

SCIENCE & DATA RELAY PHASE



- (1) Data relay for 2018 Rover and Surf Platform starts in Jan 2019
- (2) Data relay capability for future Mars surface assets throughout 2022

2016 Spacecraft Composite Overview



Total Mass: 4332 kg

TGO Mass: 3732 kg (1)

EDM Mass: 600 kg NTE (2)

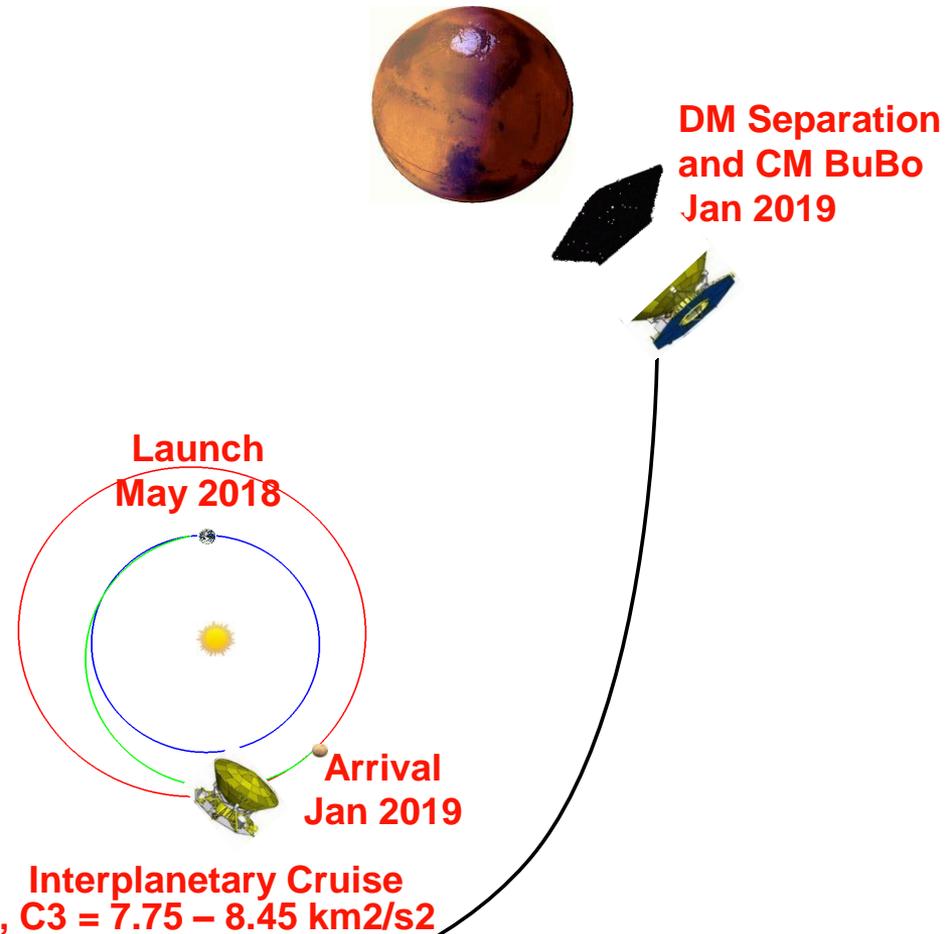
1. includes TGO consumables, Science Instruments and TGO-EDM Separation Assembly
2. includes EDM consumables and EDM Science Instruments

2018 Mission Timeline and Overview

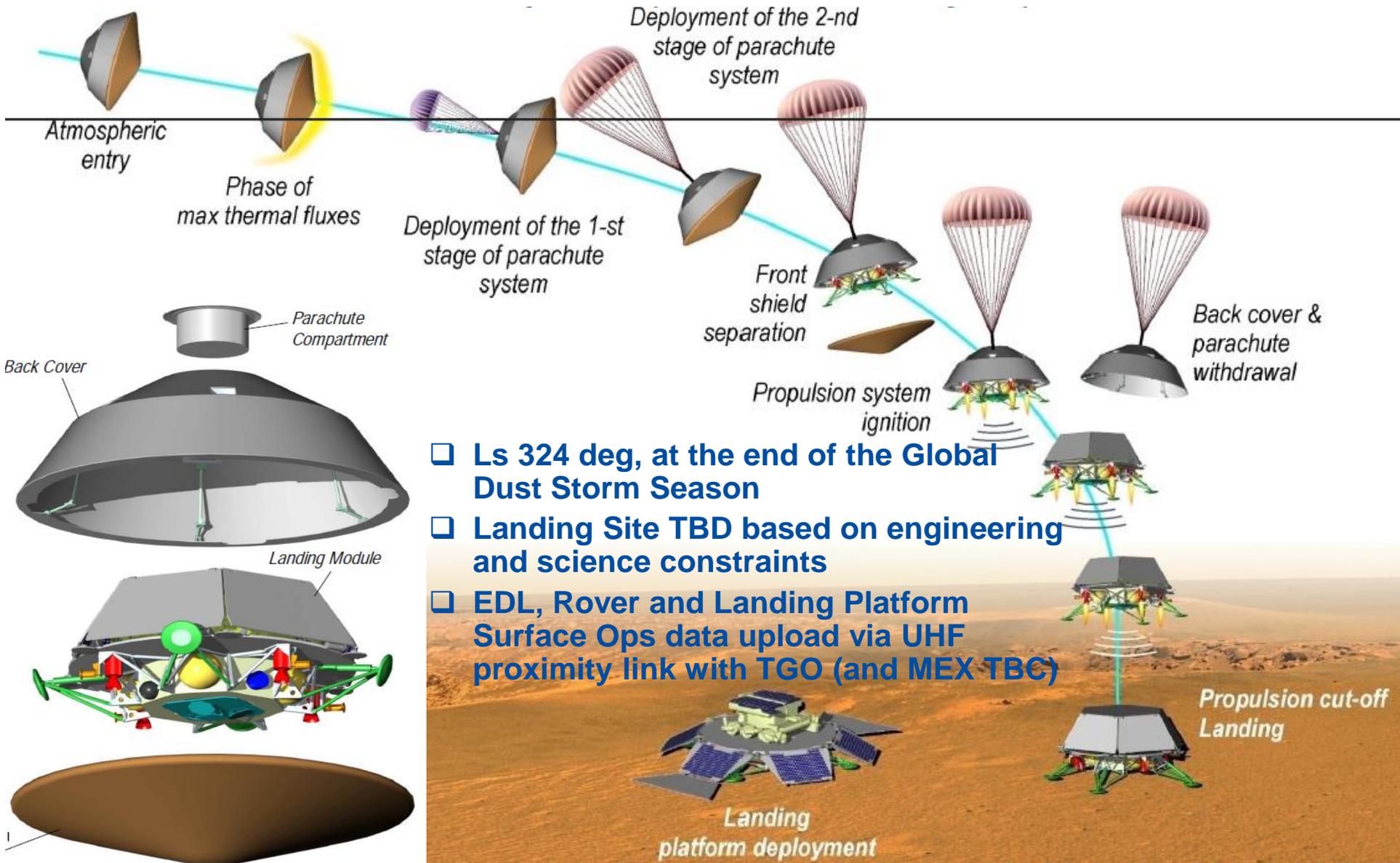
- ❑ **Launch Period: 7 – 27 May 2018**
- ❑ **SCC Interplanetary Cruise: May 2018 – Jan 2019**
- ❑ **CM – DM Separation (0.5 hrs before EIP), DM EDL and CM Burn-up/Break-out: 15 Jan 2019**
- ❑ **Rover Egress and Surface Operations: Jan – Oct 2019**
- ❑ **DM Landing Platform Surface Operations: Jan 2019 – Jan 2021**



**SCC LEOP
May-June 2018**



2018 Mission – EDL Timeline and Overview



- ❑ Ls 324 deg, at the end of the Global Dust Storm Season
- ❑ Landing Site TBD based on engineering and science constraints
- ❑ EDL, Rover and Landing Platform Surface Ops data upload via UHF proximity link with TGO (and MEX TBC)

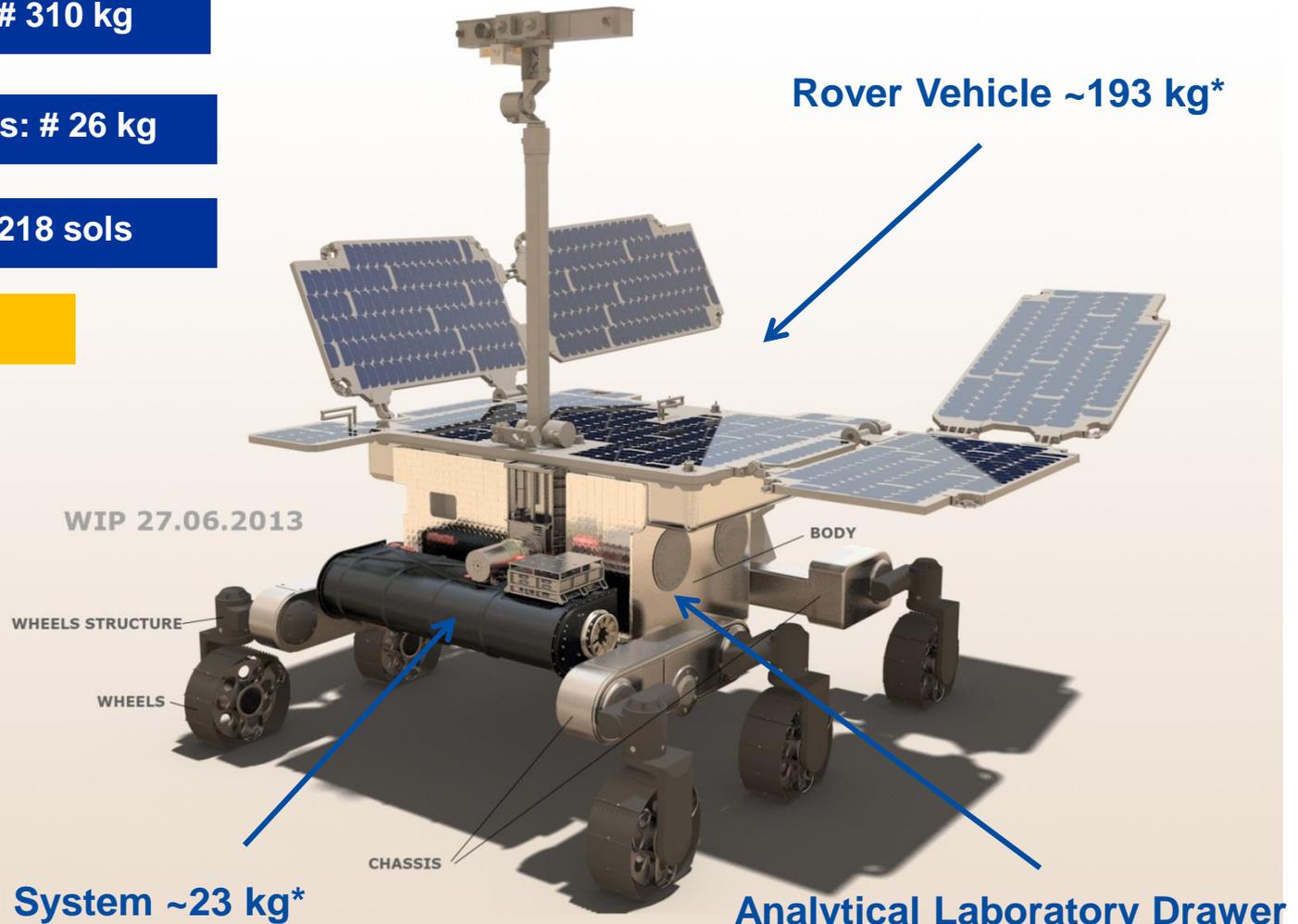
ExoMars Rover

Rover mobile mass: # 310 kg

Science Payload mass: # 26 kg

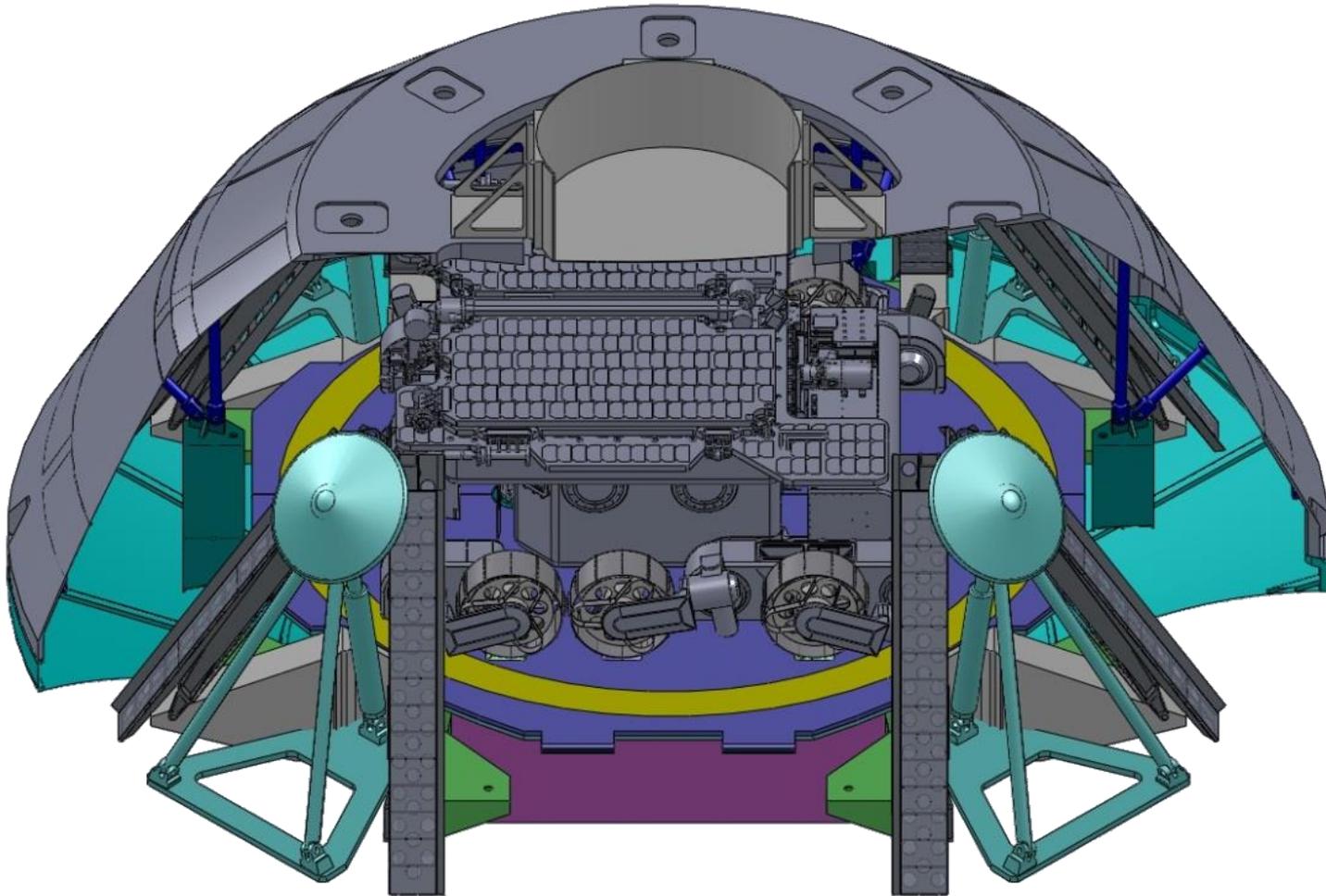
Nominal Mission: # 218 sols

Latitude: 5 S – 25 N

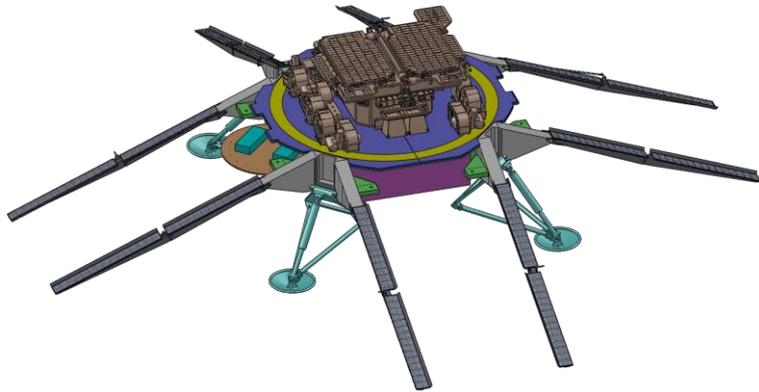


(*) excl. System Margin

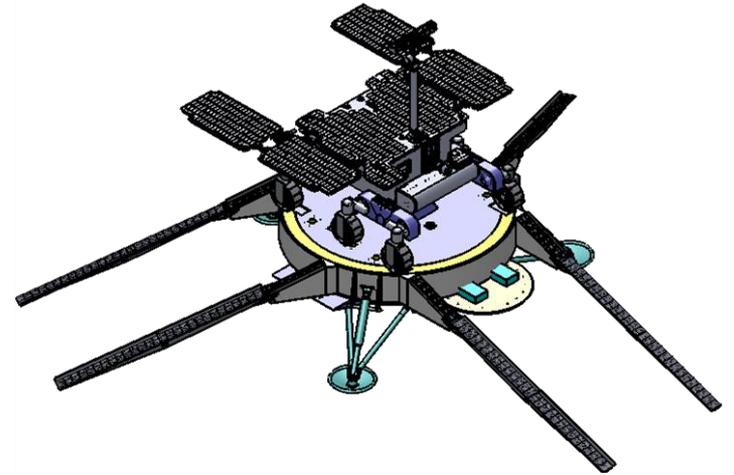
Десантный модуль



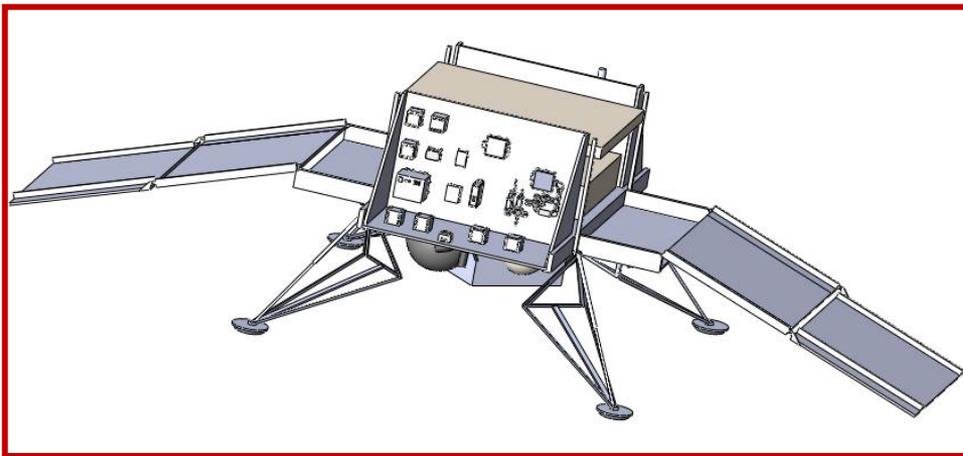
Варианты доставки марсианского ровера посредством посадочной платформы



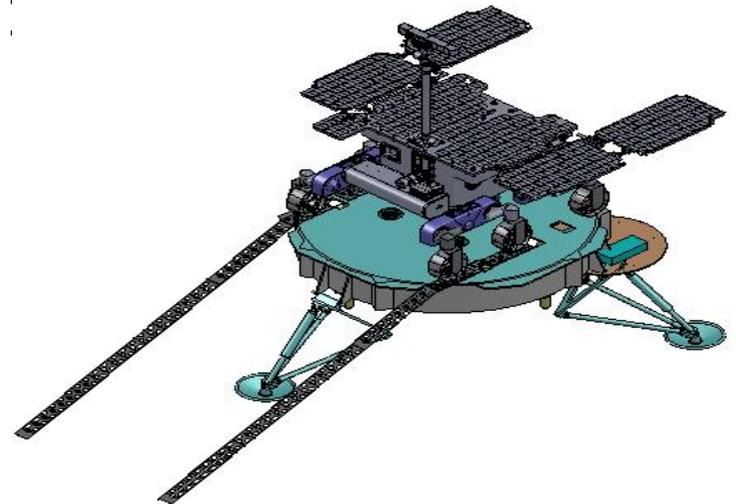
4 направления для схода марсохода,
4 посадочные опоры



3 направления для схода марсохода,
3 посадочные опоры

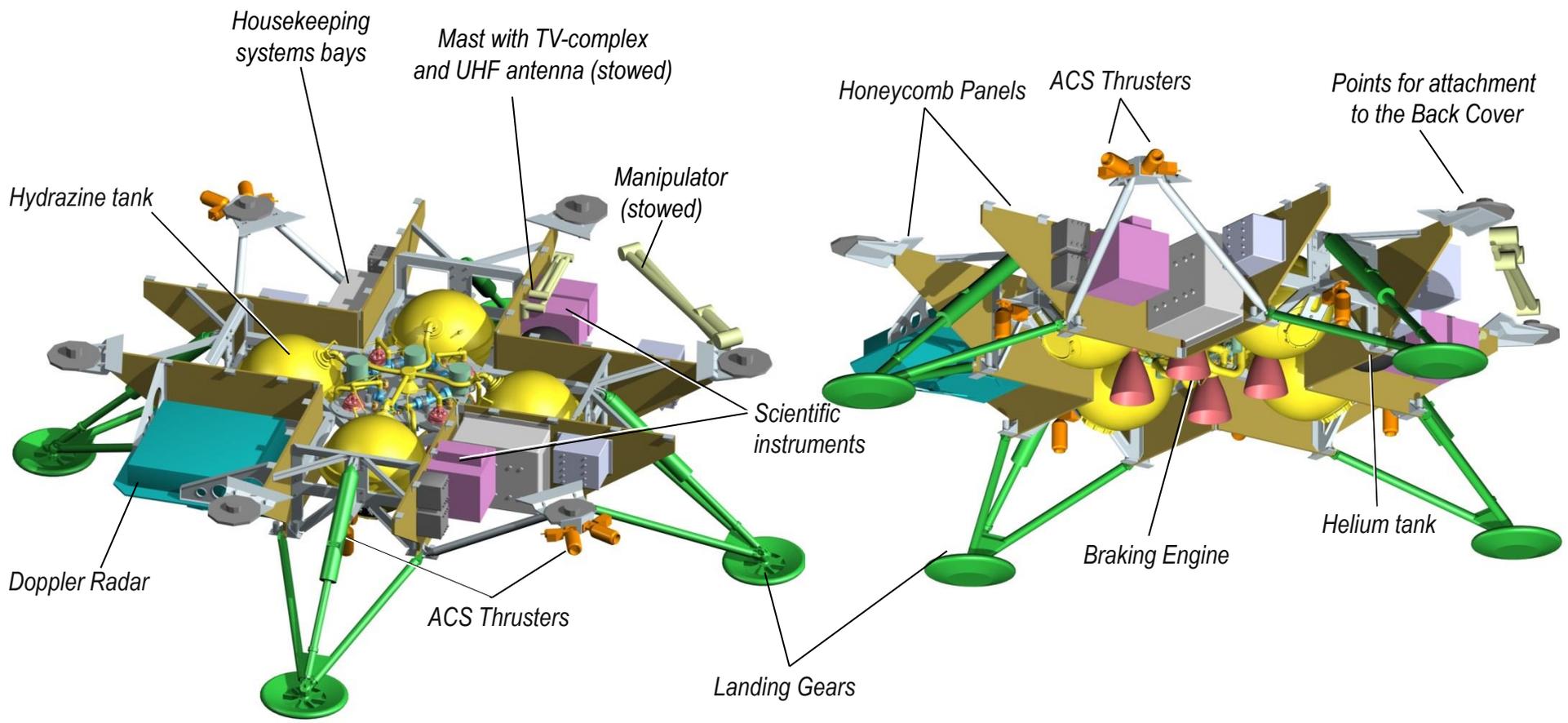


2 направления для схода марсохода,
4 посадочные опоры



Поворотная платформа марсохода,
3 посадочные опоры

Посадочная платформа



Научные задачи приборного комплекса долгоживущей (~1 марсианский год) стационарной посадочной платформы

- Марсианский климатический мониторинг**
- Исследования атмосферной химии Марса с его поверхности**
- Изучение приповерхностной воды**
- Забор и анализ проб грунта**
- Изучение взаимодействия атмосфера-поверхность**
- Дозиметрия**

Проблема

Эволюция,
Палеоклимат.

Геология.
Внутреннее строение.
Пригодность для обитания.

Современный
климат.
Метеорология.

Маркер

Изотопы D, C¹³, O¹⁷, O¹⁸.
Связанная вода в
минералах.

Изотопы C¹³.
Летучие
в минералах,
метан в атмосфере

Изотопы D, C¹³.
Вариации H₂O
в грунте.
Профили P, T.
Ветер.

*Канал
измерений*

Оптический
интерфейс
МГАК.

Анализ проб
местной
атмосферы

Прямые
наблюдения
Солнца

Синергетика М-ДЛС исследований атмосферы и летучих грунта Марса

Научная аппаратура М-ДЛС предназначена для долговременных исследований:

- химического и изотопного состава атмосферы вблизи поверхности Марса, химического и изотопного состава летучих компонент марсианского грунта в месте посадки платформы, суточных и сезонных вариаций измеряемых величин;
- химического и изотопного состава атмосферы Марса и его высотного хода в нижних шкалах высот в районе посадки платформы, его вариаций в зависимости от местного времени в светлое время суток;
- динамики атмосферы Марса в нижних шкалах высот в районе посадки платформы, мезомасштабной и локальной турбулентности, ее вариаций в зависимости от местного времени и сезона в светлое время суток.

Основа методики исследований - регулярные периодические измерения спектров молекулярного поглощения на оптических трассах прибора:

- активные измерения проб местной атмосферы в многосоставной многопроходной оптической кювете;
- активные измерения в оптической кювете, соединенной с пиролитической ячейкой Марсианского Газового Аналитического Комплекса (МГАК);
- пассивные измерения спектра пропускания атмосферы путем прямых наблюдений Солнца методом оптического гетеродинамирования.

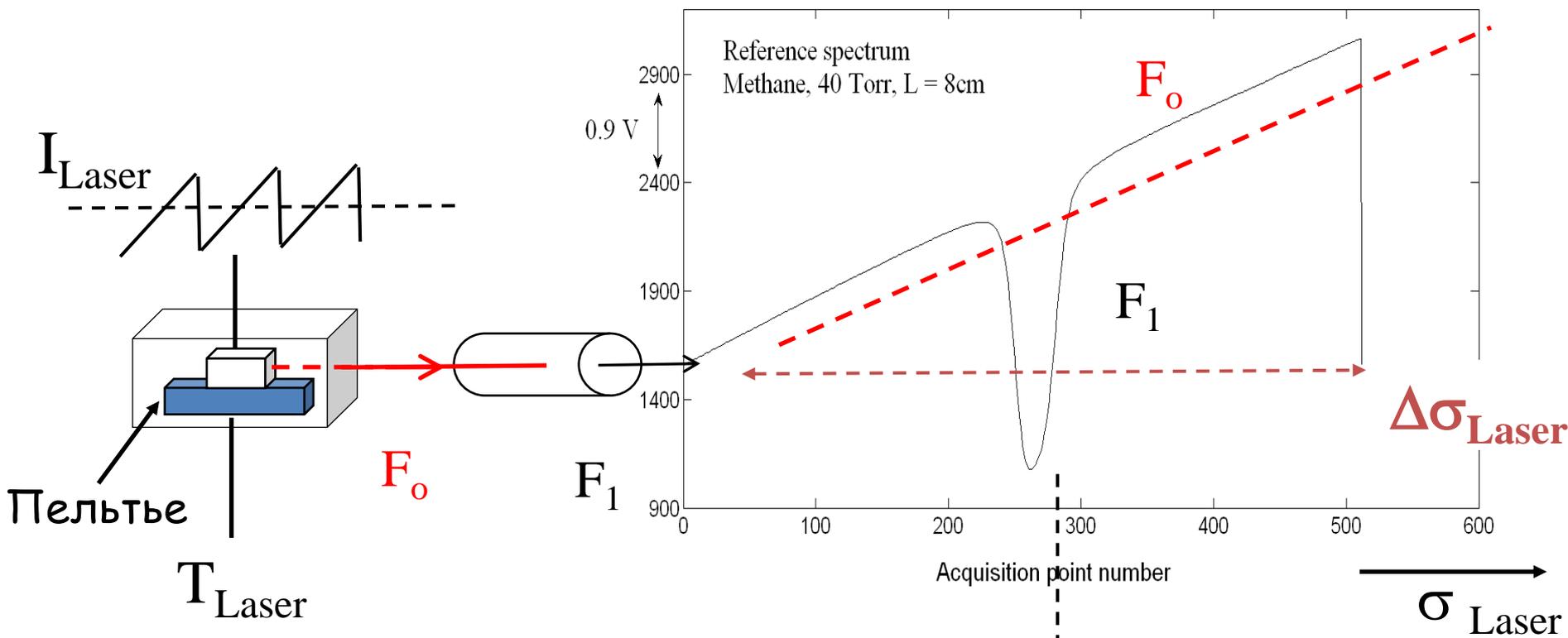
Будут проведены измерения в ряде узких спектральных интервалов со спектральным разрешением ~ 3 МГц ($\sim 0,0001$ см⁻¹), что позволяет полностью разрешить контур исследуемых спектральных линий.

С учетом высокой точности измерений относительного поглощения в контуре линий порядка 10^{-4} , данная методика позволит осуществить:

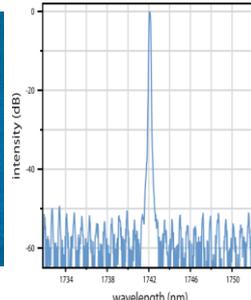
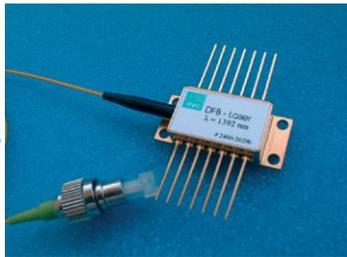
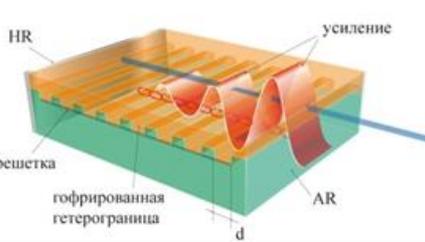
- мониторинг вариаций содержания CO₂, H₂O, CH₄ и ряда других соединений;
- измерения изотопных соотношений D/H, O¹⁸/O¹⁷/O¹⁶ для H₂O, C¹³/C¹², O¹⁸/O¹⁷/O¹⁶ в углекислом газе с точностью 0,1..1,0%%;
- измерения вертикальных профилей температуры и давления, содержания паров воды и ее изотопов, проекции скорости ветра на направление на Солнце.

- Принцип диодно-лазерной спектроскопии:**
 прецизионное сканирование частоты лазера, просвечивающего оптическую кювету
 либо используемого в качестве гетеродина

CH_4 , 40 Torr, 8cm, $\lambda \sim 1.65 \mu\text{m}$



$$\sigma_{\text{Laser}}(T_{\text{Laser}}, I_{\text{Laser}}) = \sigma_{\text{mol}}$$



Канал оптической кюветы МГАК

- Оценки чувствительности для М-ДЛС/МГАК выполнены для кюветы длиной 200 мм при ее рабочем объеме $1,5 \text{ см}^3$ (просвет \varnothing 3 мм), для температуры 296 К и давлении газовой смеси 300 мбар, определяемой газом-носителем He – определены парциальные давления газовых компонент (относительно 300 мбар), обеспечивающие оптическое поглощение 10^{-4} на длине ячейки.
- Так, чувствительность измерений по отношению к изотопам $\text{H}_2^{17,18}\text{O}$ и HDO составит примерно 4 ppt (по наименьшей чувствительности) от количества пробы грунта массой 1 г, точность определения изотопных соотношений 1% будет достигнута уже при содержании H_2O в грунте 400 ppt или 0,04%, что существенно ниже ожидаемого содержания связанной воды в реголите.
- Пропорциональное масштабирование приведенных данных возможно как по оптической длине ячейки, так и по оптическому поглощению для данной в таблице концентрации молекул.

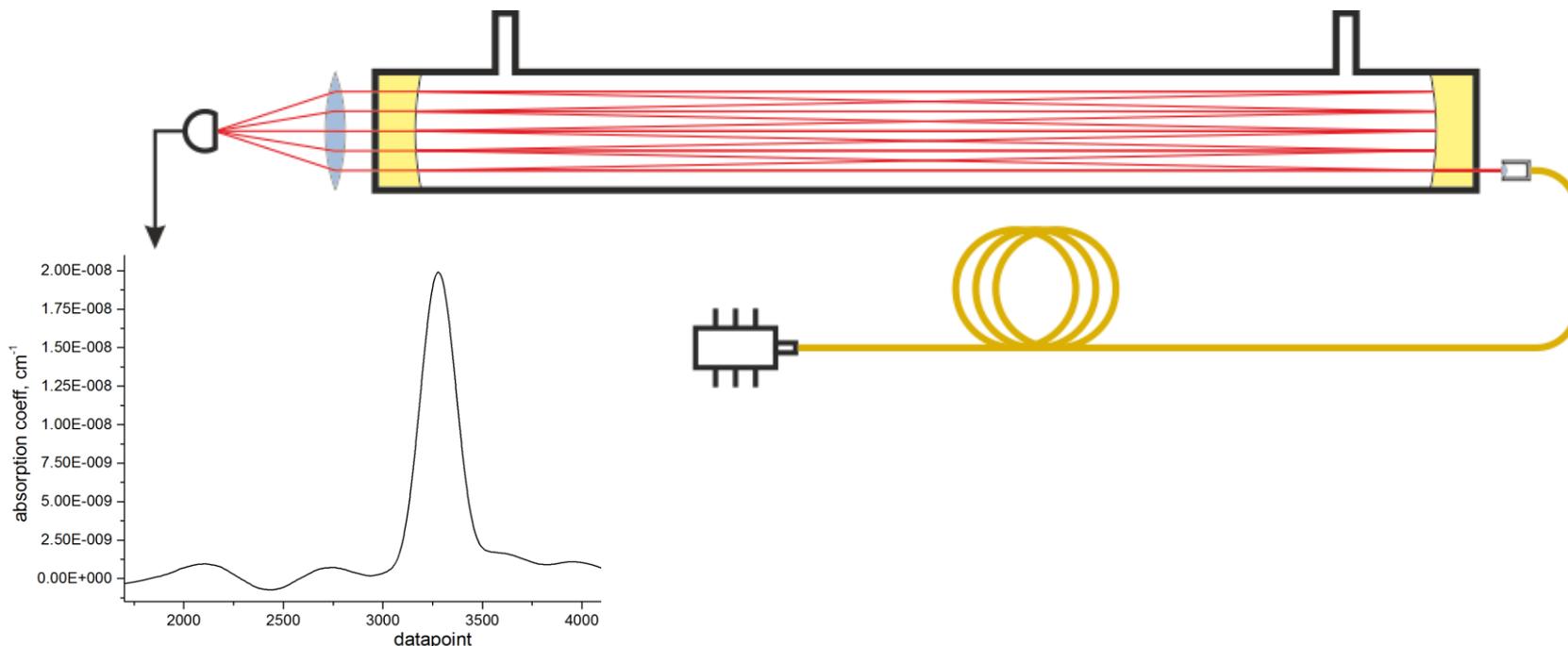
Расчетные характеристики чувствительности канала оптической кюветы М-ДЛС для газохроматографического комплекса МГАК

Молекула	Длина волны, мкм	Длина волны, см ⁻¹	Парциальное давление смеси основной молекулы и изотопов, мбар	Концентрация смеси основной молекулы и изотопов, ppmv.	Измеряемая концентрация смеси основной молекулы и изотопов при D=0,0001 (не хуже чем)		Измеряемая концентрация только изотопа при D=0,0001 (не хуже чем)	
					нг (ppb)	мкг (ppm для массы по отношению к 1 г грунта)	нг (ppb)	мкг (ppm для массы по отношению к 1 г грунта)
H ₂ ¹⁶ O	1,39	7182,9463	0,0007	3,07E+00	0,8	0,001		
H ₂ ¹⁶ O		7183,6858	2	8,77E+03	2194,3	2,194		
H ₂ ¹⁷ O	-	7183,7354	4	1,75E+04	4388,6	4,389	1,7	1,72E-03
H ₂ ¹⁸ O	-	7184,456	0,5	2,19E+03	548,6	0,549	1,2	1,22E-03
HDO	-	7183,9727	0,91	3,98E+03	997,4	0,997	0,3	3,27E-04
¹² C ¹⁶ O ₂	1,604	6234,6241	0,4	1,75E+03	1072,8	1,073		
¹⁷ O ¹² C O	-	6233,6667	-			0,000	0,0	0,000
¹⁸ O ¹² C O	-	6233,5836	100	4,39E+05	268189,8	268,190	1106,7	1,107
¹³ C ¹⁶ O ₂	-	6233,7704	4	1,75E+04	10727,6	10,728	4,9	4,86E-03
CH ₄	1,651	6057,095	0,003	1,32E+01	2,9	0,003		
NH ₃	1,51	6622,52	0,01	4,39E+01	10,4	0,010		
H ₂ S	1,602	6234,003	0,5	2,19E+03	1036,2	1,036		
HCl	1,19	8403,36	0,1	4,39E+02	222,5	0,222		
C ₂ H ₂	1,53	6535,95	0,0008	3,51E+00	1,3	0,001		
HF	1,28	7823,8212	0,000076	3,33E-01	0,1	9,26E-05		

Канал многосоставной многопроходной оптической кюветы для анализа атмосферных проб:

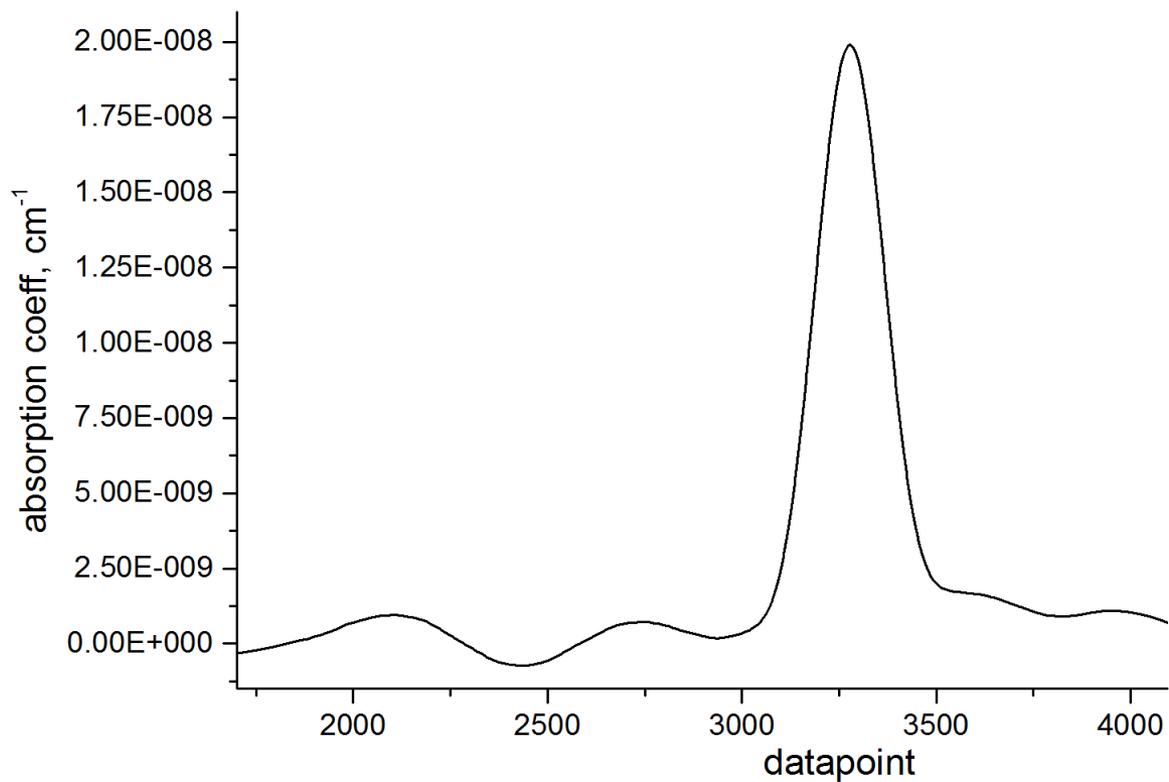
ICOS – Integrated Cavity Output Spectroscopy

- *спектроскопия интегрального внутрирезонаторного выхода, модификация лазерной спектроскопии поглощения.*
- **Оптический путь $L_{\text{eff}} = d/(1-R)$, d – расстояние между зеркалами $R=99,9\%\dots99,99\% \Rightarrow L_{\text{eff}} = d \times 10^3\dots10^4$!!! $\Rightarrow \sim 1$ км эфф. оптический путь**

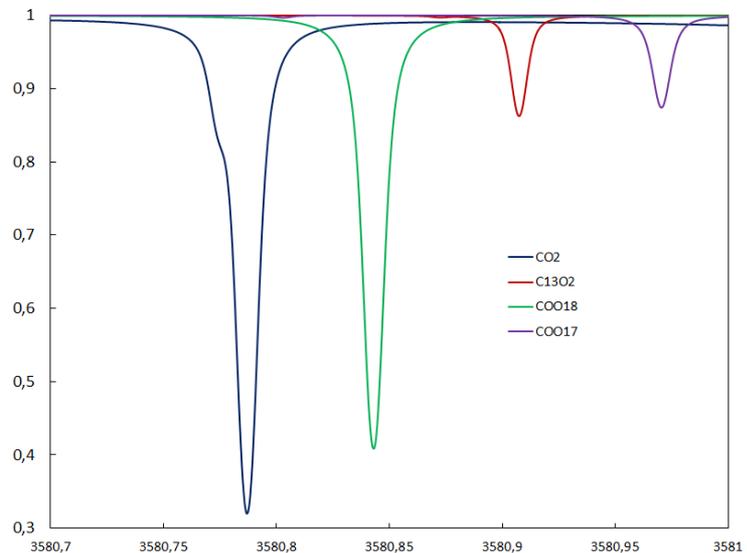
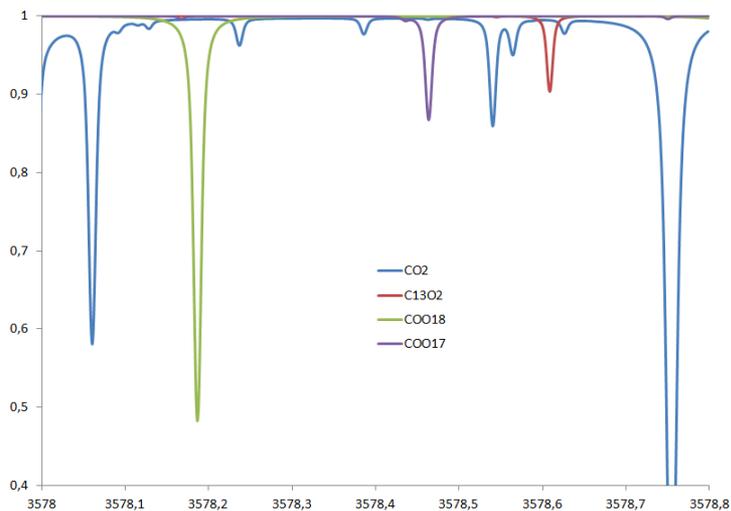
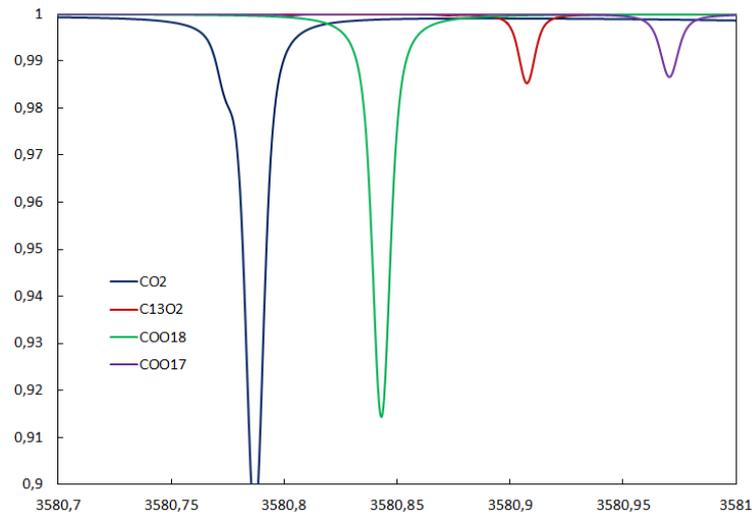
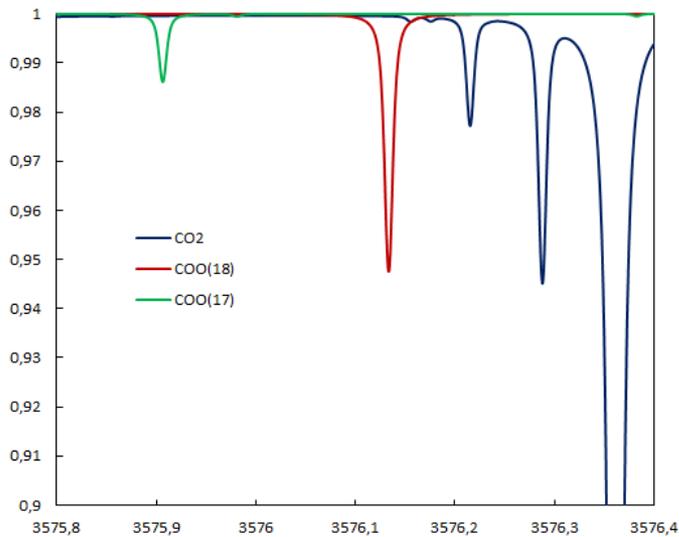


Лабораторная демонстрация эффективности ICOS-кюветы: чувствительность 10^{-9} cm^{-1} при записи контура поглощения слабой 2×10^{-8} cm^{-1} линии CO_2 около 1,6 мкм. ИОФ РАН, 09.2013.

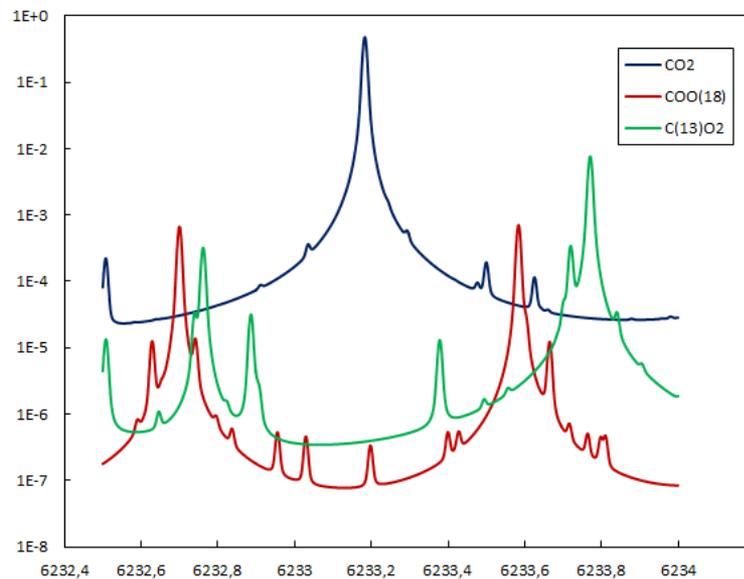
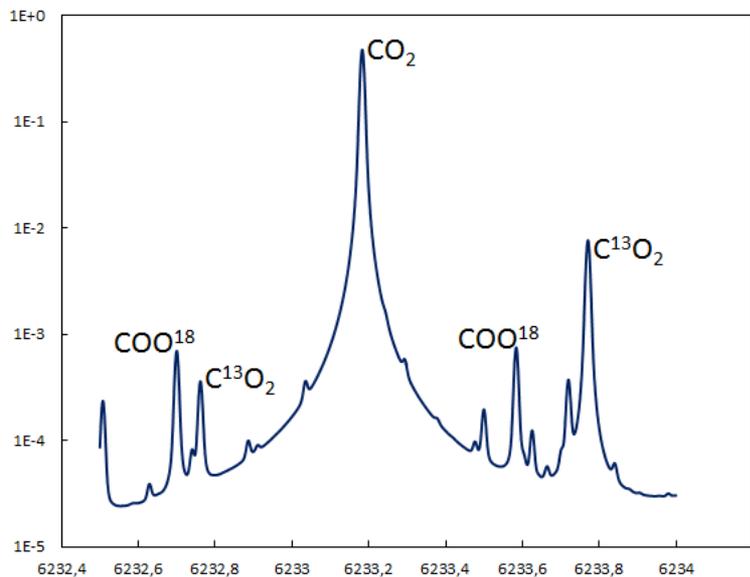
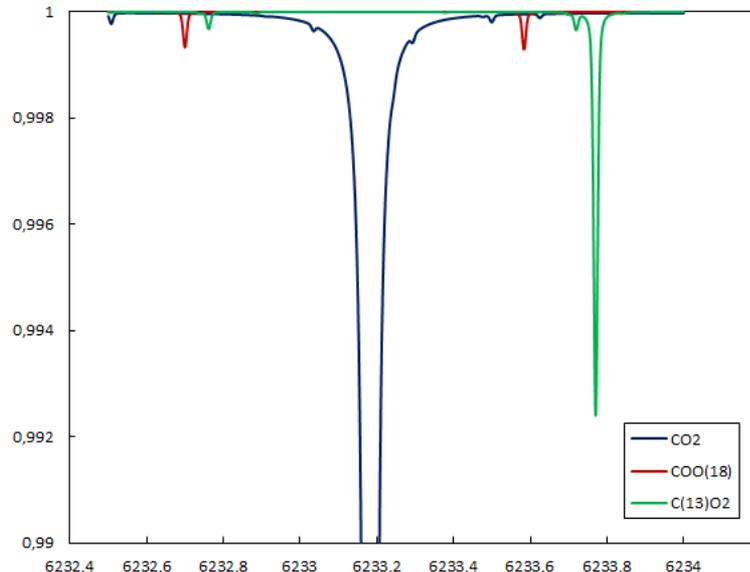
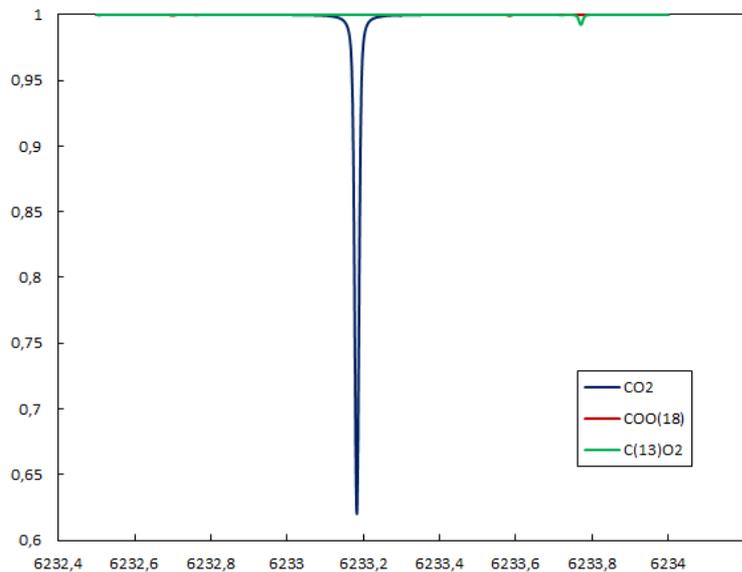
**Лабораторная демонстрация измерений при помощи ICOS-кюветы: реализация чувствительности 10^{-9} cm^{-1} при записи контура поглощения слабой $2 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$ линии CO_2 в диапазоне 1,6 мкм.
ИОФ РАН, 09.2013.**



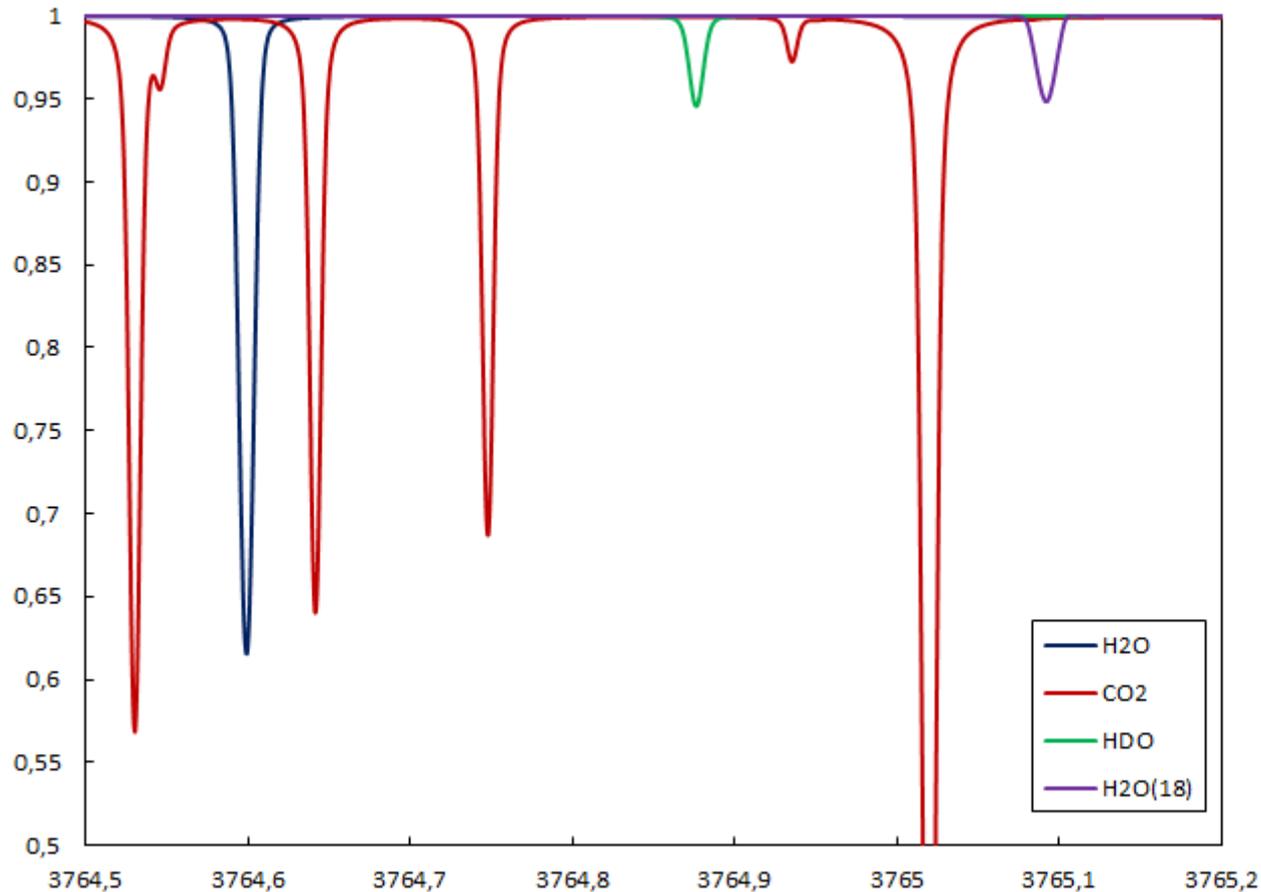
Расчетные характеристики атмосферного канала прибора для измерений изотопов CO_2 в диапазоне длин волн 2,78 мкм: сверху – в однопроходной оптической кювете длиной 25 см, снизу – в 10-проходной.



Модель спектра поглощения CO_2 и изотопов для атмосферы Марса около его поверхности в диапазоне длин волн 1,604 мкм для оптического пути 20 м.



Моделирование спектра поглощения H_2O и изотопов в диапазоне 2,64 мкм для атмосферы Марса около его поверхности, для оптического пути 1 км.



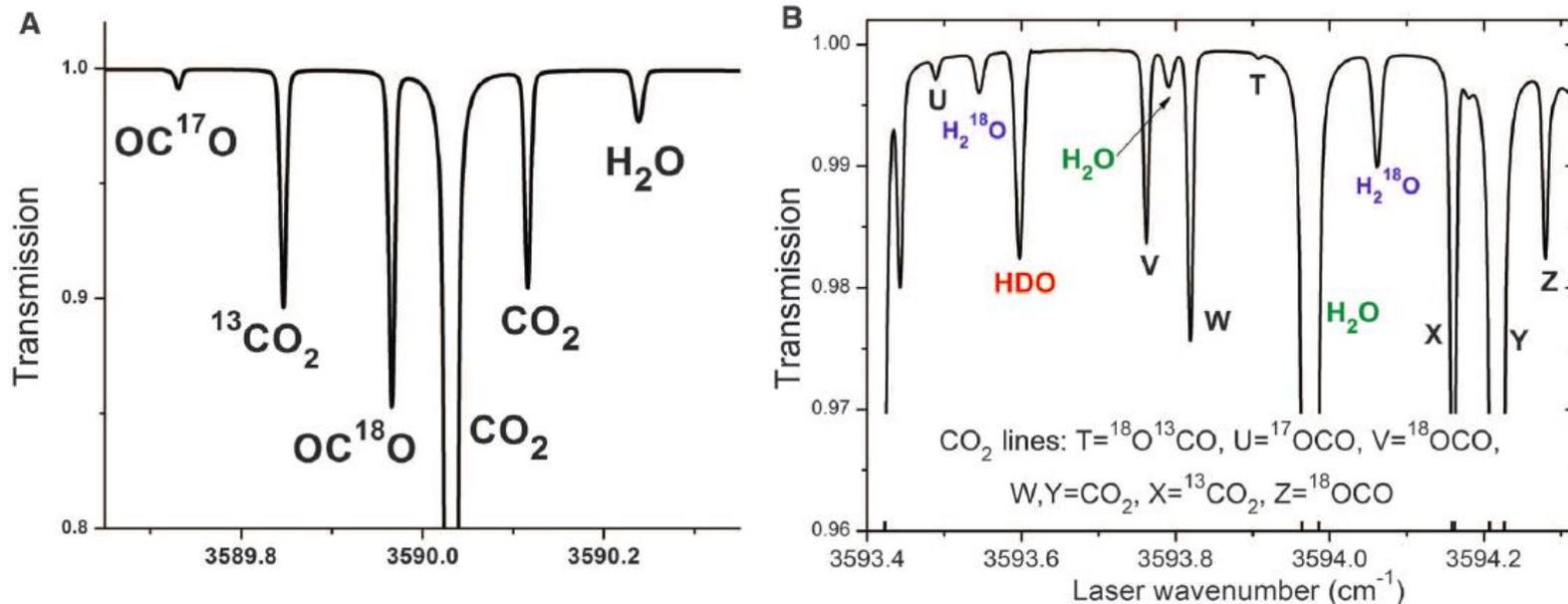
Требуются дополнительные оценки для изотопа $^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ и прочих изотопов в диапазонах 2,78 мкм ...

Table 1. Carbon dioxide isotope ratios ‰ ± 2 SEM (standard error of the mean). *, not measured.

Measurement	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{17}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}^{18}\text{O}$
SAM-TLS	46 ± 4	48 ± 5	24 ± 5	109 ± 31
SAM-QMS (3)	45 ± 12	*	*	*
Phoenix lander (12)	-2.5 ± 4.3	31.0 ± 5.7	*	*
Viking Neutral Mass Spectrometer (11)	23 ± 43	7 ± 44	*	*
SNC meteorites (8, 12, 32)	36 ± 10	3.9–5.4 ± 0.1	~0.53* $\delta^{18}\text{O}$ ~ $\delta^{13}\text{C}$ + $\delta^{18}\text{O}$	
ALH84001 meteoritic carbonate range (30, 31)	27 to 64	-9 to 26	~0.53* $\delta^{18}\text{O}$ ~ $\delta^{13}\text{C}$ + $\delta^{18}\text{O}$	
ALH84001 meteoritic carbonate mean value (31)	46 ± 8	4.6 ± 1.2	*	*
Earth telescopes (9)	-22 ± 21	18 ± 18	*	*

*Webster et al.
Science 341 (2013).
Isotope Ratios of H,
C, and O in CO₂ and
H₂O of the Martian
Atmosphere*

Fig. 1. Spectral scan regions used by the TLS instrument. Calculated spectra from the HITRAN database (36) for measuring CO₂ (A and B) and H₂O isotope ratios (B). The HDO line intensity has been increased by a factor of 6 to better represent the martian environment.



... и 3,27 МКМ !

*Webster et al. Planetary
and Space Science 59
(2011) 271-283*

On Earth, ratios of carbon's two stable, naturally occurring isotopes ^{12}C (98.89%) and ^{13}C (1.11%) are expressed in ‰ relative to the standard VPDB (Vienna Pee Dee Belmnite: see Criss, 1999) in the following expression:

$$\delta^{13}\text{C} = [({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C})_{\text{sample}} / ({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C})_{\text{standard}} - 1] \times 1000\text{‰}.$$

As described and referenced in Webster (2005), inorganic carbon sediments on Earth such as limestone have $\delta^{13}\text{C}$ of $\sim 0\text{‰}$, and atmospheric $\delta^{13}\text{C}$ is about -7‰ . Photosynthetic organisms preferentially take up ^{12}C over ^{13}C due to faster diffusion through leaf stomata and enzymatic preference, producing a kinetic isotopic shift in $\delta^{13}\text{C}$ of about -13‰ for C4 plants ...

... Thus, methane sources on Mars are expected to contain 5 times the amount of CH_3D relative to CH_4 to produce a D/H ratio ($[\text{CH}_3\text{D}]/4[\text{CH}_4]$) five times that of Earth. The calculation of δD is expressed as the D/H ratio of the sample with respect to that of water. For Earth,

$$\delta\text{D} = [(\text{D}/\text{H})_{\text{sample}} / (\text{D}/\text{H})_{\text{standard}} - 1] \times 1000\text{‰}$$

and D/H ratios are expressed by relative to Standard Mean Ocean Water (SMOW: Criss, 1999). For methane, then:

$$\delta\text{D} = \{([\text{CH}_3\text{D}]/4[\text{CH}_4]) / ([\text{HDO}]/2[\text{H}_2\text{O}]) - 1\} \times 1000\text{‰}.$$

Natural abundances of these isotopic gases produce δD values close to 0‰ on Earth (with biogenic variations close to $\sim 200\text{‰}$). Strictly, the higher D/H ratio of Mars would produce δD values of typically 3960‰ . If as on Earth biological processes on Mars impact the D/H values by a similar 20%, then δD values of $\sim 2960\text{‰}$ would be expected.

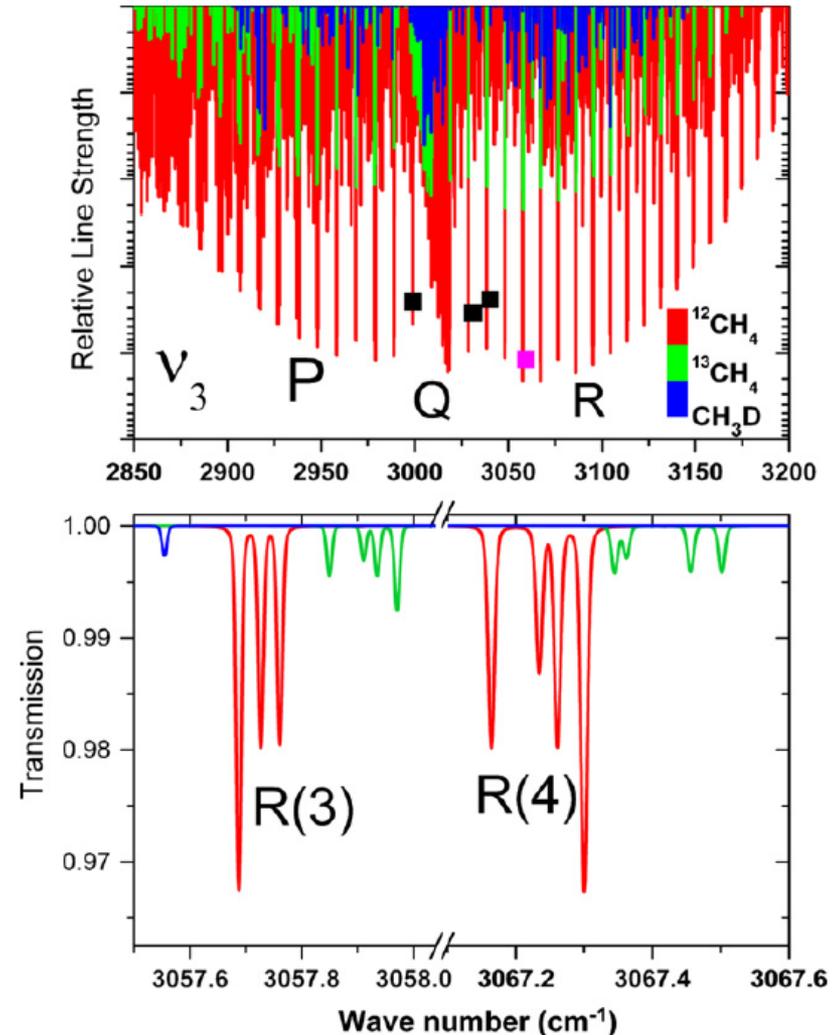


Fig. 3. Top: methane rovibrational lines in the ν_3 region. The black squares rest on the lines used by Mumma et al. (2009) in their analysis, and the magenta square shows the R(3) group used by TLS (see Fig. 8). Isotopic ratios are terrestrial. Bottom: the region near the R(3) and R(4) line groups (note x-axis scale break) at 10 mbar pressure and 298 K. Note the 10-cm^{-1} isotopic shift that puts the R(4) group adjacent to the R(3) group but as $^{13}\text{CH}_4$. For display clarity, the $^{13}\text{CH}_4$ lines are 20 times more intense than terrestrial, and the CH_3D is 1000 times more intense than terrestrial. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Расчетные характеристики атмосферного канала прибора для концентрации CO₂ 95% и концентрации H₂O 200 ppt

Молекула	Длина волны, см ⁻¹	Ожидаемая концентрация основной молекулы	Чувствительность, выраженная в концентрации	Точность восстановления основной концентрации
H ₂ O	3764,59913	~200 ppt	<40 ppb	<0.1%
H ₂ ¹⁸ O	3765,09081		<0.8 ppb	<0,2%
HDO	3764,87629		<0.7 ppb	<0,2%
CO ₂	3580,786	~95%		~0,1%
¹³ CO ₂	3580,843			~0,1%
CO ¹⁸ O	3580,907			~0,1%
CO ¹⁷ O	3580,970			~0,1%
CH ₄	3057,68728	<1 ppb	Чувствительность ~50 ppt	

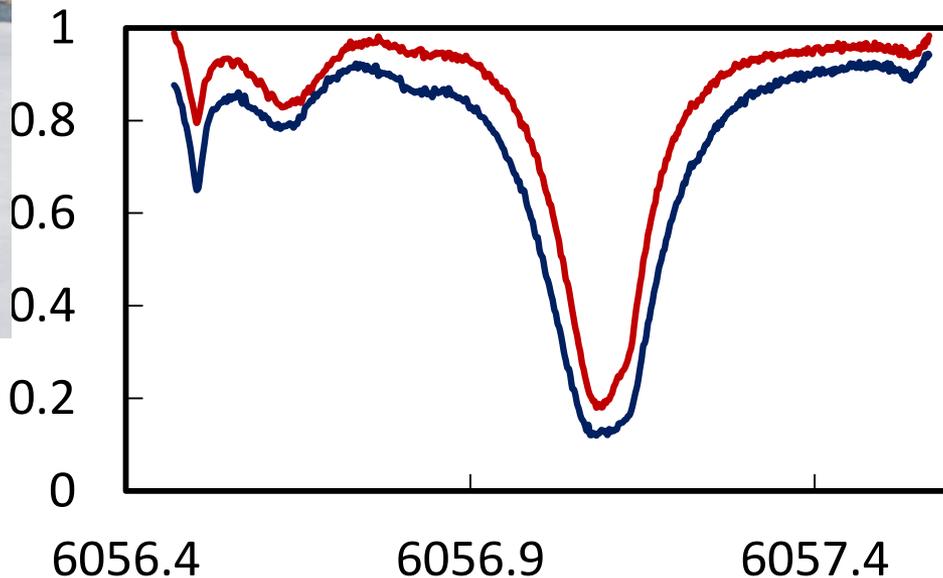
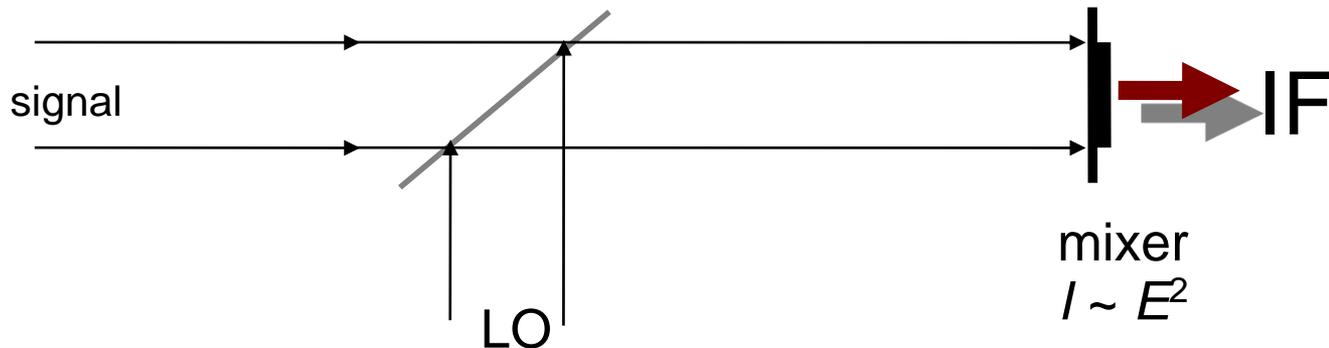
Расчетная точность определения изотопных соотношений:

¹³C/C ~ 0,1%, D/H < 0,2%, ¹⁸O/O < 0,1..0,2%

Гетеродинная ИК спектроскопия

Обеспечивает высокое спектральное разрешение
без потери уровня сигнала

Ограничение на апертуру: $\Omega \cdot S = \lambda^2$



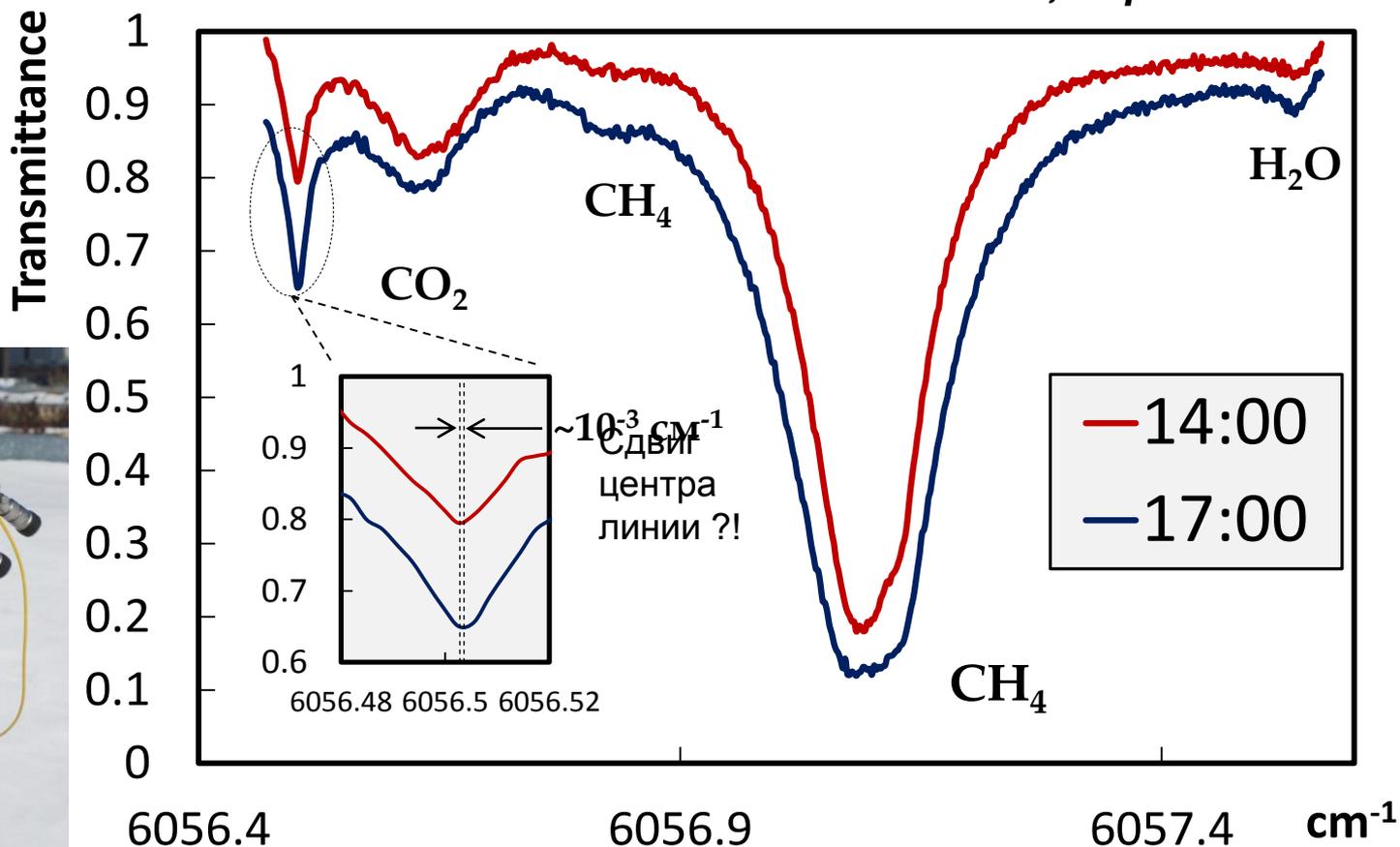
Спектр пропускания
атмосферы в Москве,
03.2013



Пассивные измерения на открытой трассе наблюдений Солнца. Гетеродинный канал измерений.

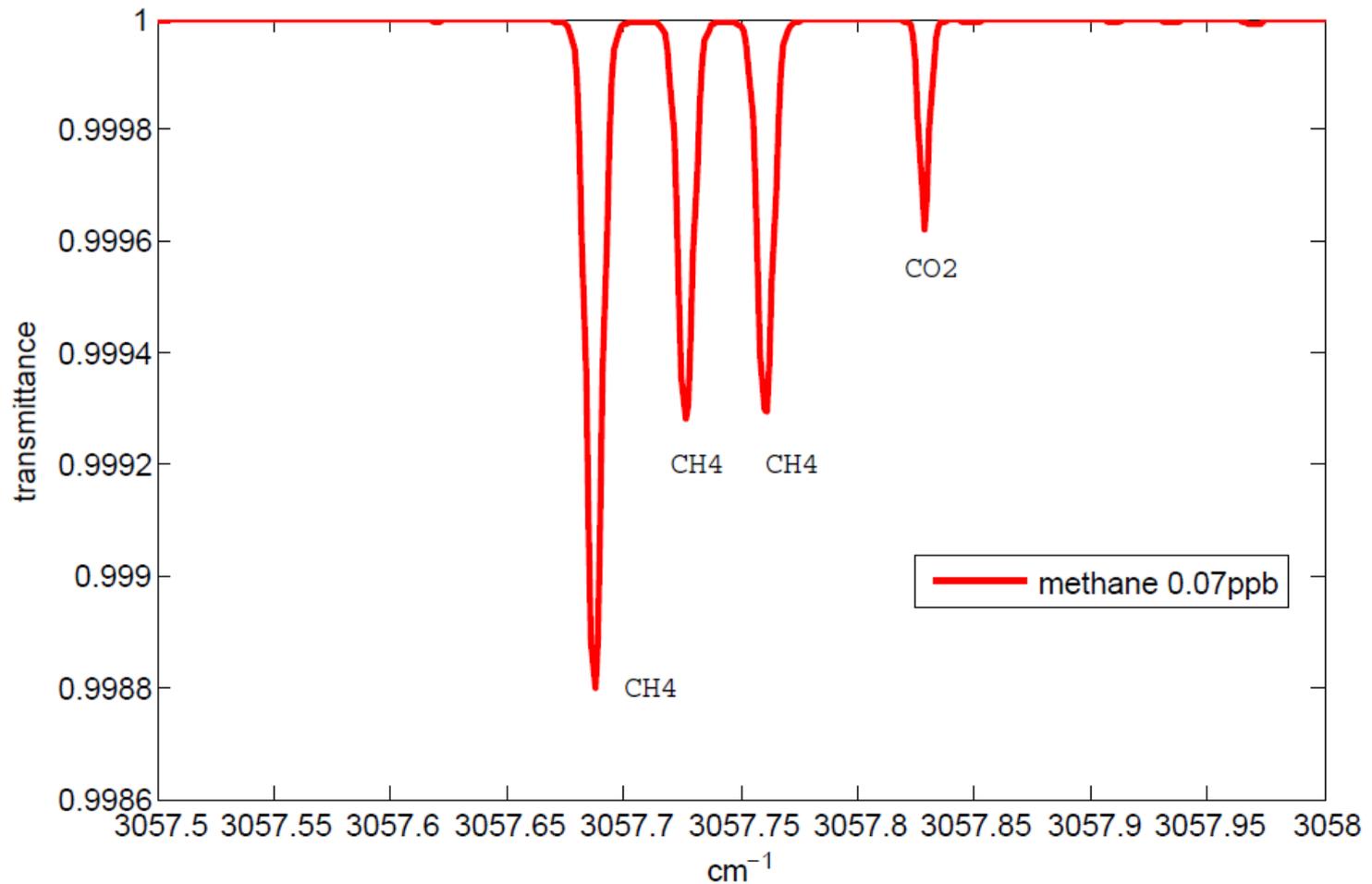
Метод гетеродинной спектроскопии позволяет реализовать спектральное разрешение $\lambda/\delta\lambda \sim 10^8$ и осуществлять прямые доплеровские измерения скорости ветра в свободной атмосфере.

Измерения в атмосфере Земли, диапазон 1,65 мкм.
ИОФ РАН, март 2013 г.



Синтетический спектр поглощения CH_4 всей толщи марсианской атмосферы, полученный для оценки чувствительности измерений в диапазоне 3,27 мкм при величине зенитного угла 45° .

Пиковое относительное поглощение в линии = 10^{-3} .



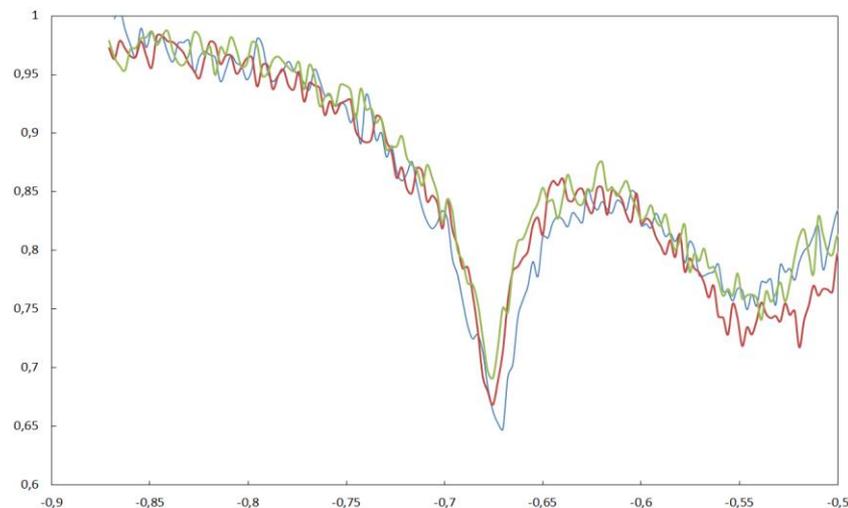
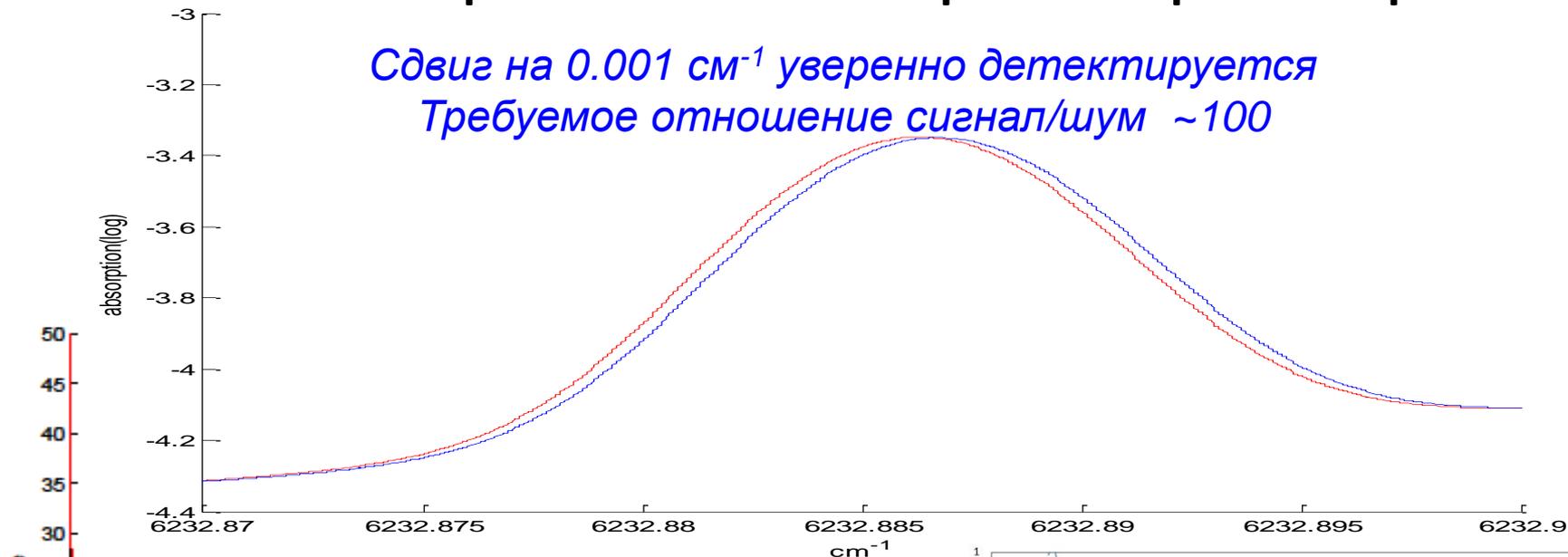
Расчет чувствительности к поглощению в канале измерений на открытой трассе солнечного просвечивания

Молекула	Длина волны, см ⁻¹	Ожидаемая концентрация основной молекулы	Чувствительность, выраженная в концентрации	Точность восстановления ожидаемой концентрации
¹³ CO ₂	6233,77045	~95%	0,4 ppm	1%
CO ¹⁸ O	6232,6992		1 ppm	0,3%
H ₂ ¹⁸ O	7184,45637	~100 ppm	6 ppb	1,5%
H ₂ O	3764,59913		120 ppb	0,3%
HDO	3764,87629		0,7 ppb	0,2%
CH ₄	3057,68728	<1 ppb	Чувствительность ~ 70 ppt	

Расчетная точность определения изотопных соотношений:
¹³C/C ~ 1%, D/H ~ 0,2%, ¹⁸O/O ~ 0,3%

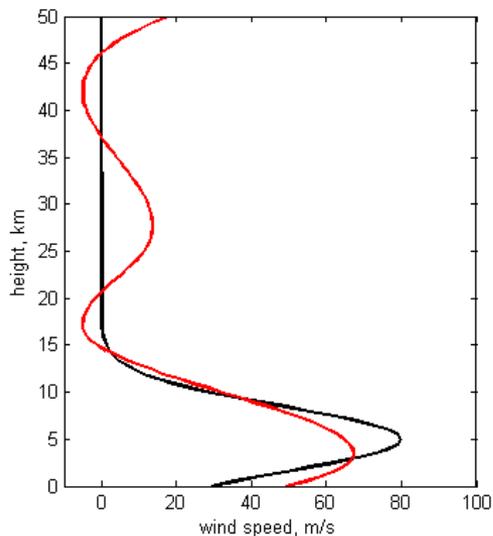
Пассивные измерения на открытой трассе солнечного просвечивания. Измерения скорости ветра.

*Сдвиг на 0.001 cm^{-1} уверенно детектируется
Требуемое отношение сигнал/шум ~ 100*

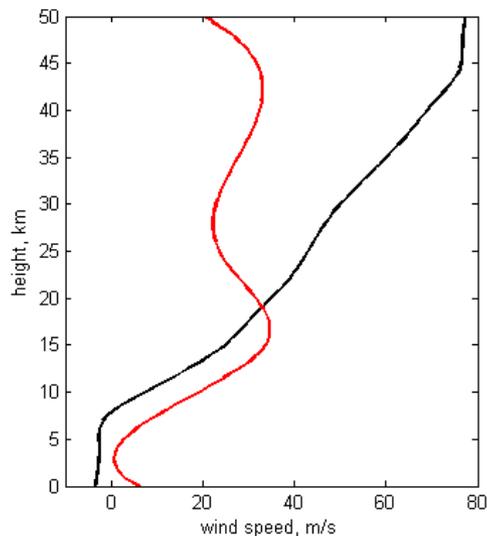


- сверху – синтетический спектр поглощения CO₂ с учетом и без учета ветра
- внизу – профиль скорости ветра, использованный в расчете
- справа – пример необработанных спектров наблюдений земной атмосферы, фиксирующих доплеровский сдвиг линии.

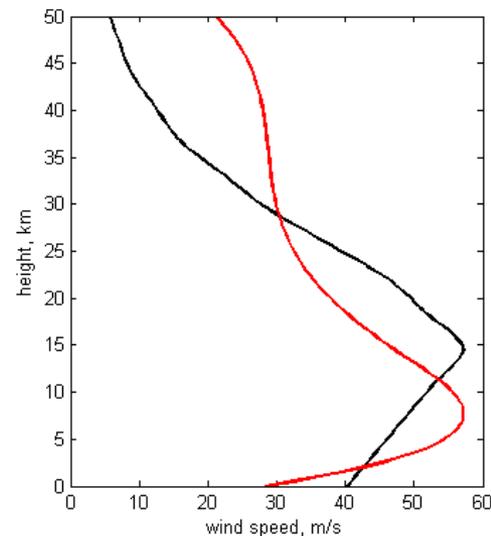
Восстановление вертикального профиля скорости ветра в нижних шкалах высоты



а



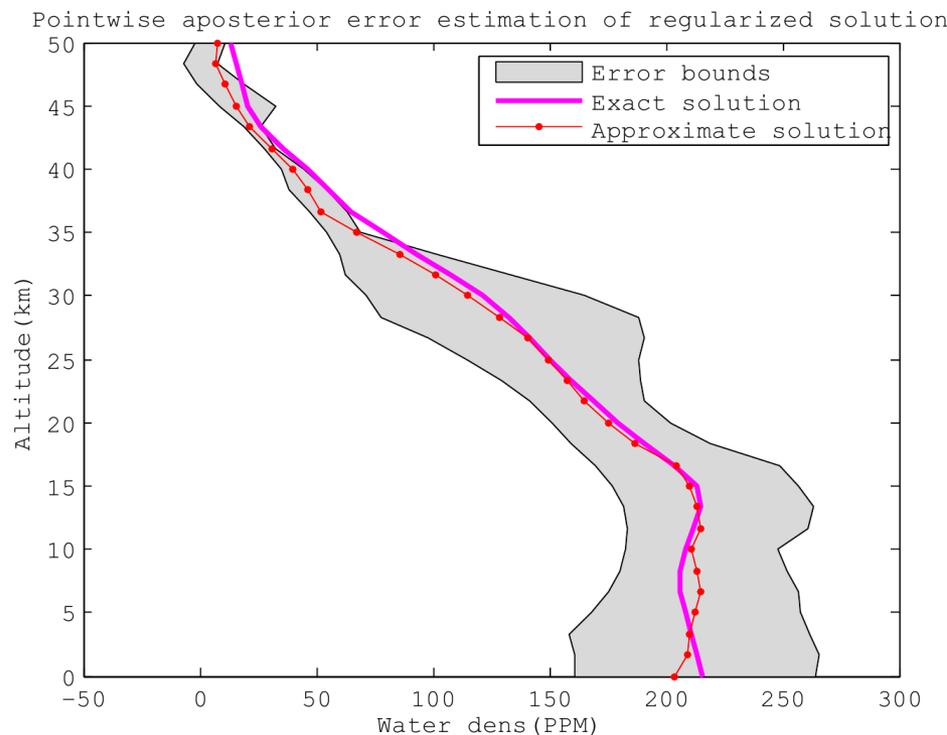
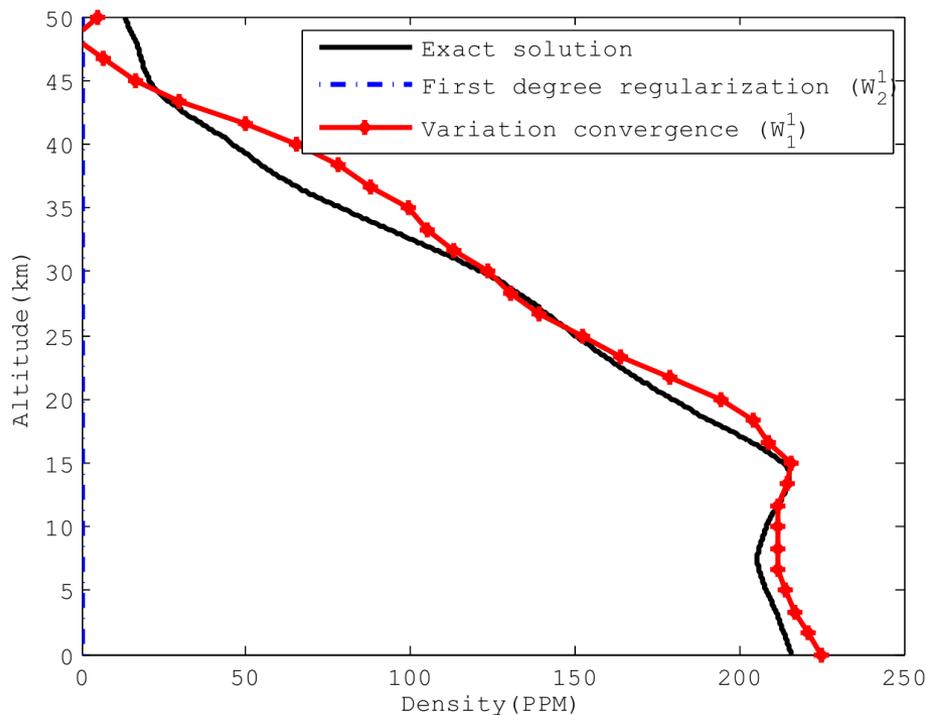
б



в

Модельные (черные кривые) и восстановленные по доплеровскому смещению спектральной линии CO_2 $6244,255 \text{ cm}^{-1}$ (красные кривые) проекции профиля скорости ветра в направлении на Солнце. Зенитный угол Солнца 30° .
(а) Гауссов профиль ветра с максимумом на 5 км;
(б) данные модели общей циркуляции атмосферы Марса (Forget et al., 2013) для 0°N , 45°E , $L_s = 27^\circ$;
(в) та же модель для 30°N , 135°E , $L_s = 27^\circ$.

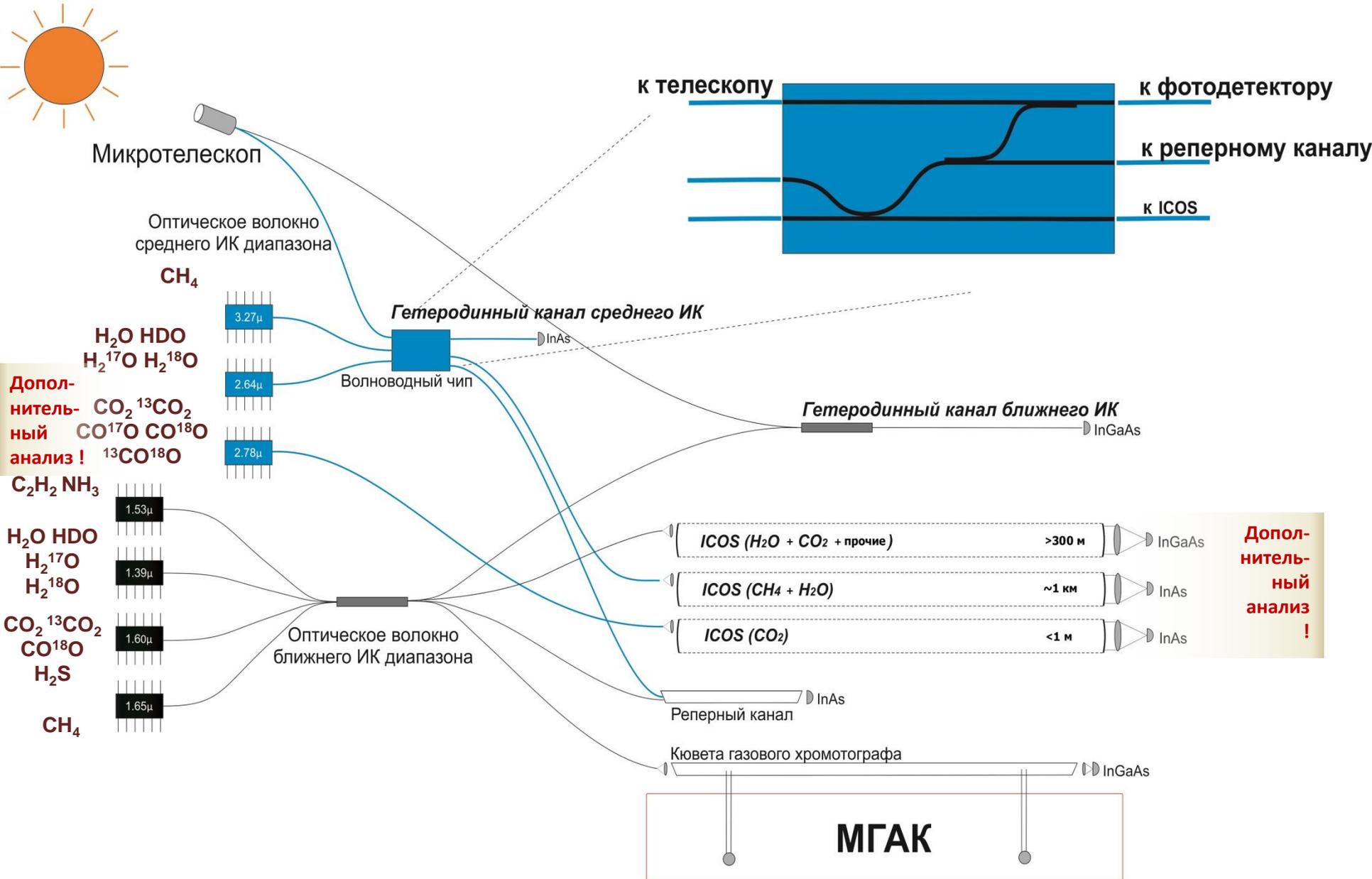
Восстановление вертикального профиля водяного пара в нижних шкалах высоты



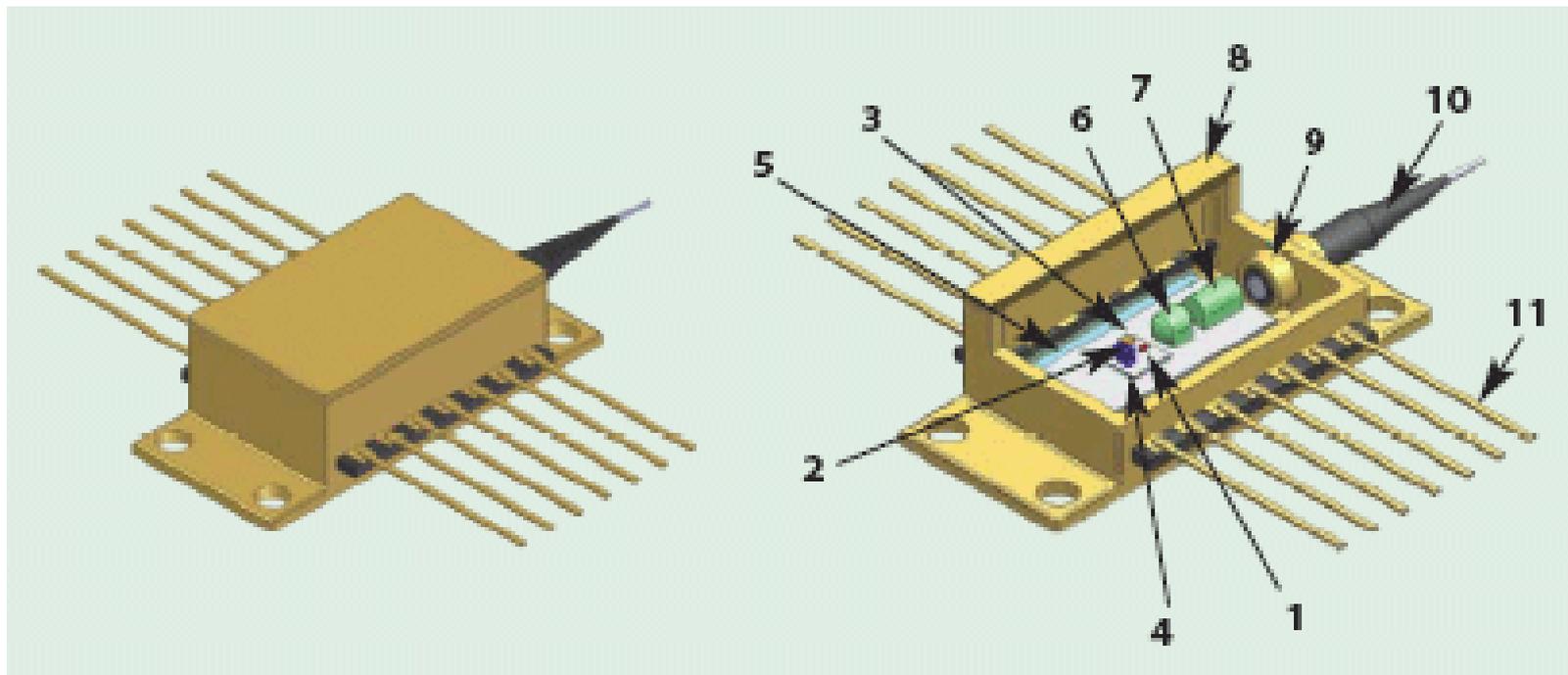
Пример восстановления профиля (слева) и оценки ошибок (справа) методом сглаживающего функционала

(!) Солнечное просвечивание с орбиты не позволяет восстанавливать профиль H_2O ниже 10-15 км

Оптическая схема измерительных каналов эксперимента М-ДЛС

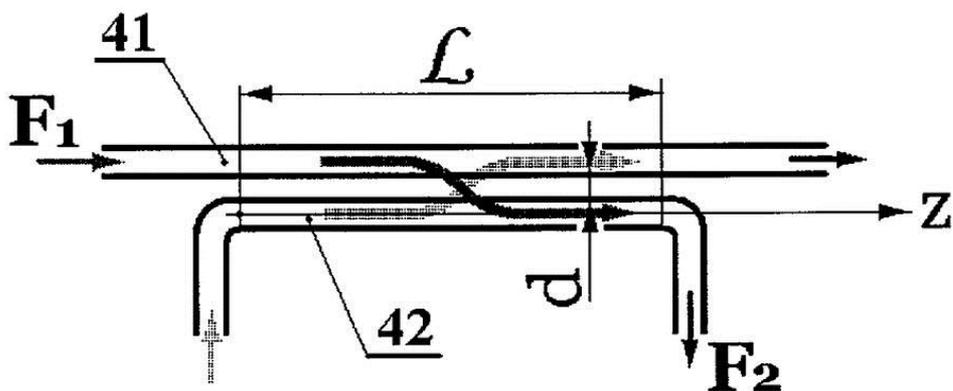
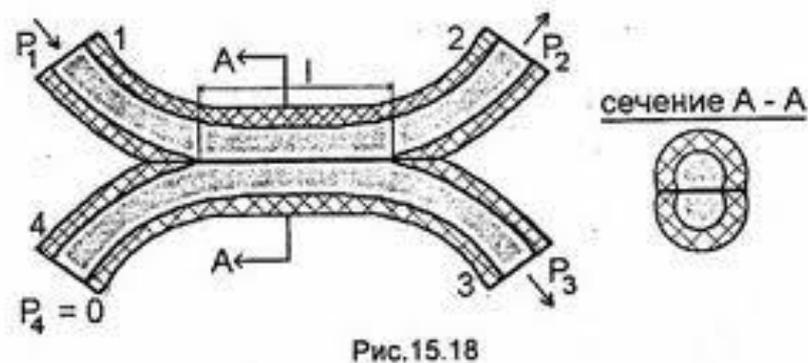


Лазерный модуль «бабочка» (butterfly package) диапазона 1,5 мкм для телекоммуникаций и газоанализа



- Лазерный кристалл (1), контрольный фотодиод (2), термистор (3), кристаллодержатель (4), термоэлектрический охладитель (5), микролинза (6), оптический изолятор (7), корпус модуля (8), выходное оптическое окно (9), оптическое волокно (10), внешние электрические контакты (11)

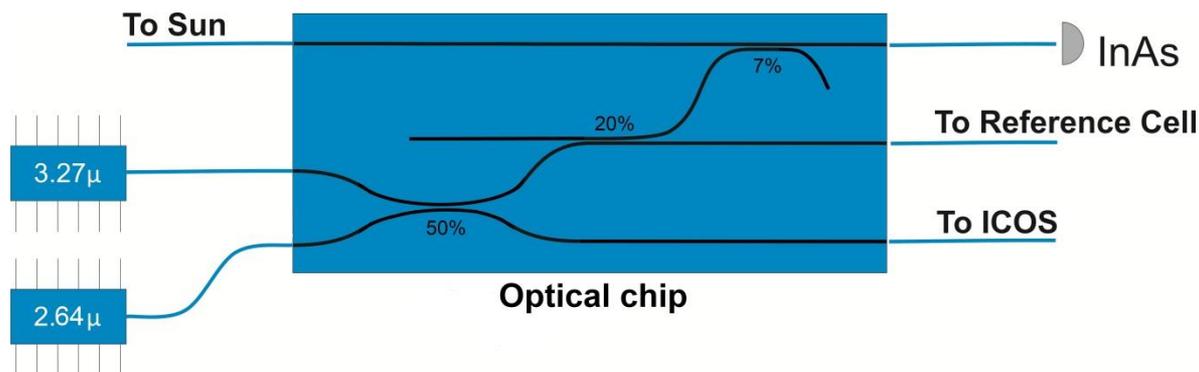
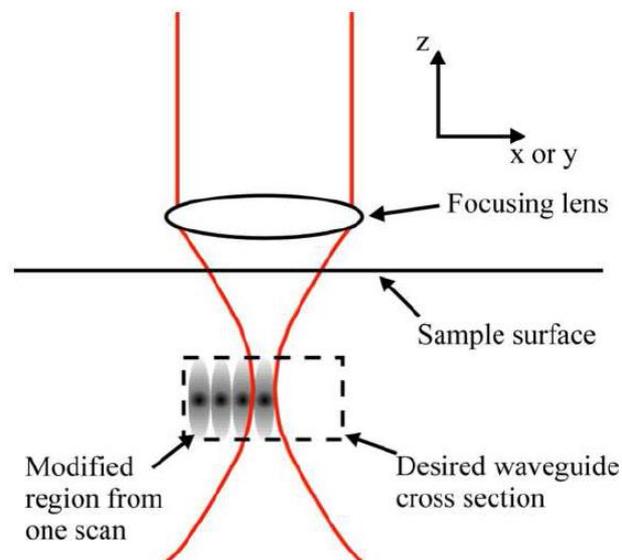
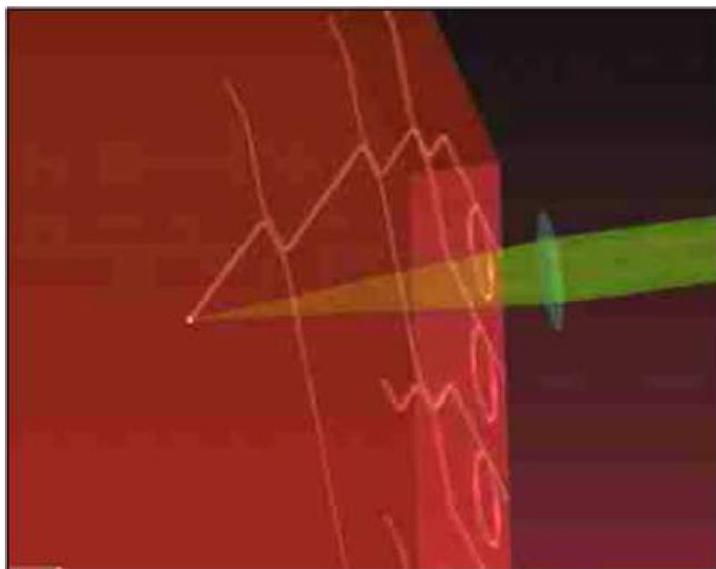
Волоконно-оптические направленные ответвители



Пример:
2x32 волоконный ответвитель

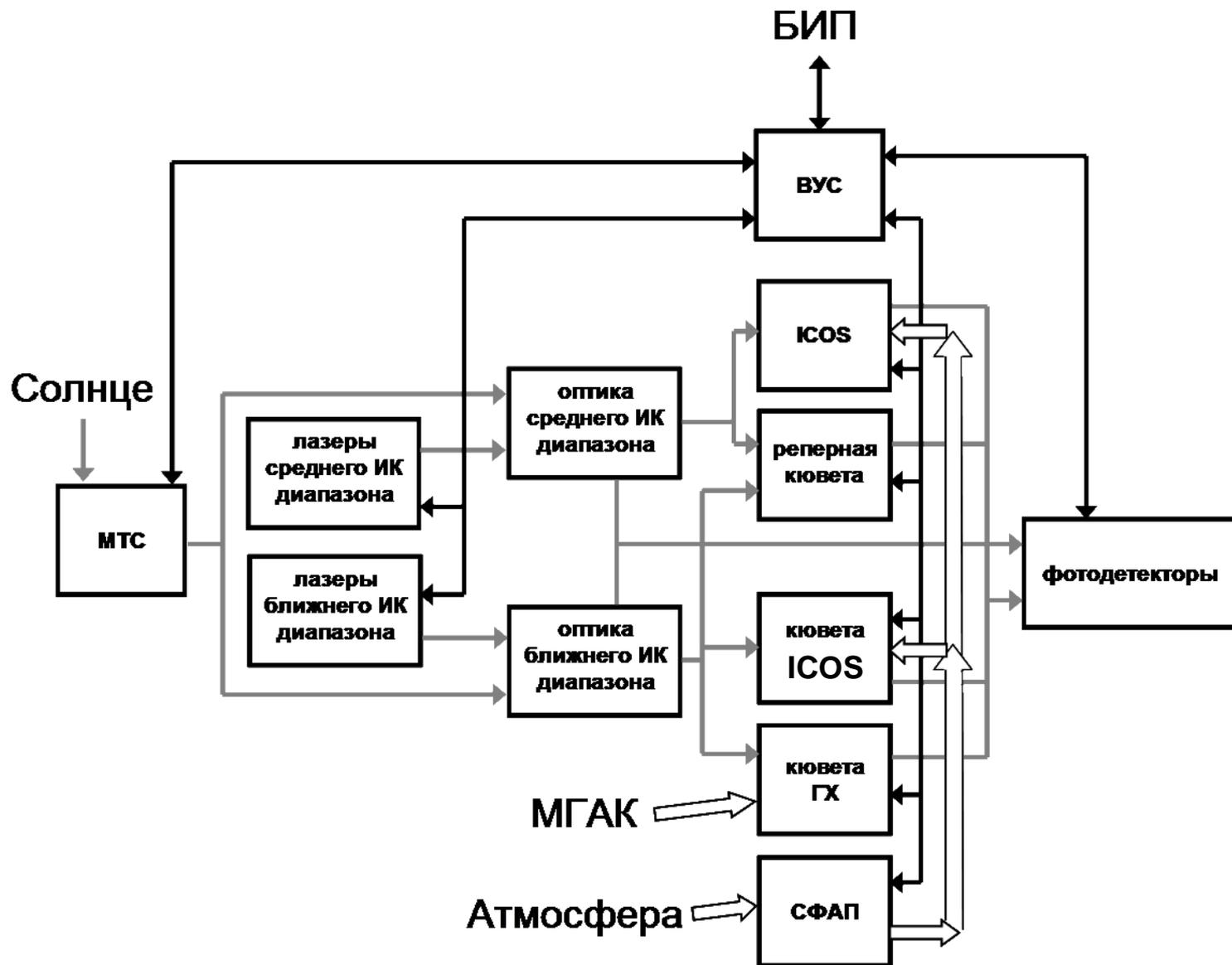
- ✓ Широкий ассортимент коммерческих продуктов для телекоммуникационного диапазона в окрестности 1,5 мкм.

Формирование интегральных оптических волноводов на основе халькогенидных стёкол посредством «лазерной гравировки»



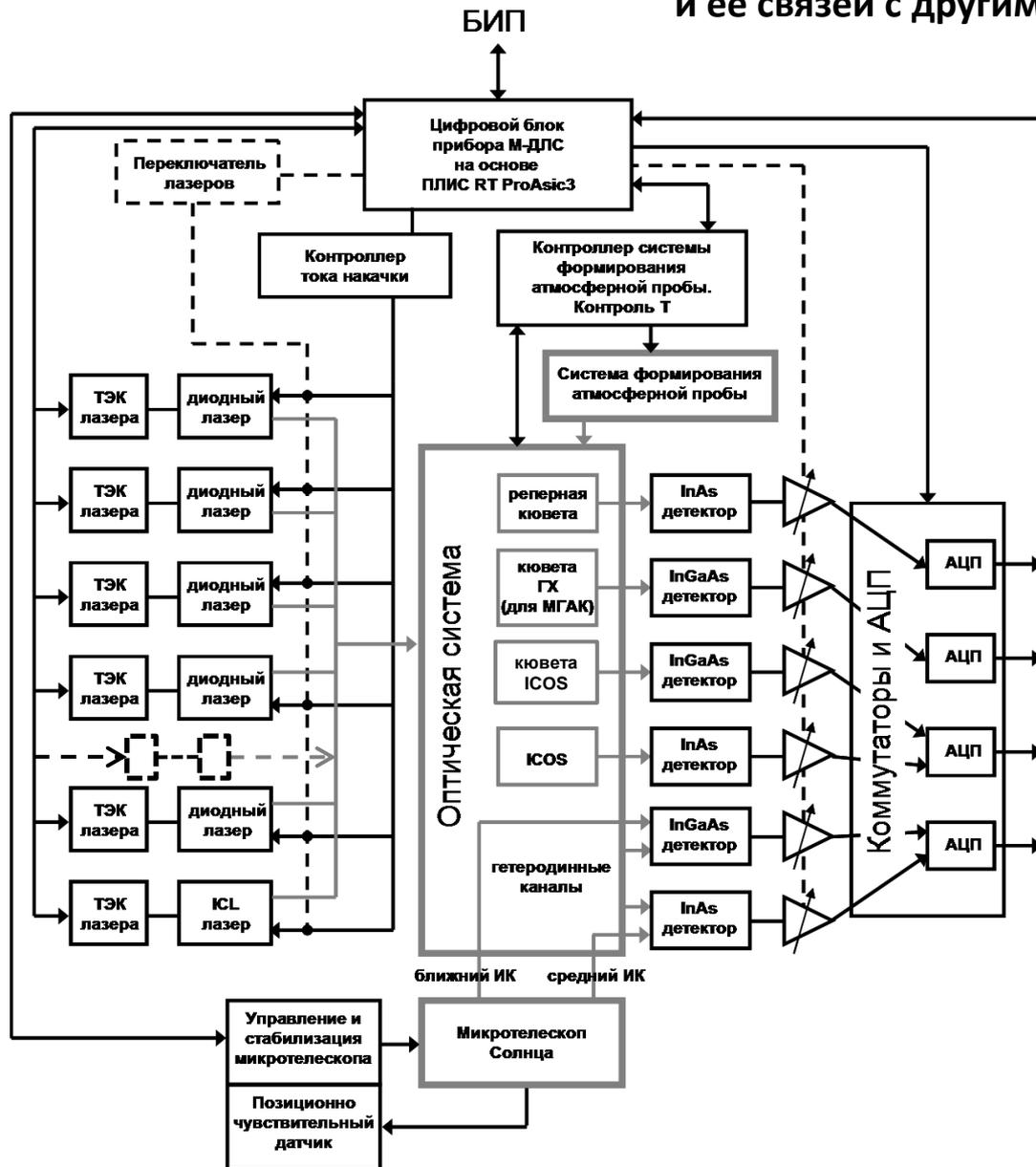
Предварительная схема интегрально-оптического волноводного чипа среднего ИК диапазона (около 3 мкм) оптической подсистемы прибора М-ДЛС

Функциональная блок-схема прибора М-ДЛС.



Черные стрелки соответствуют электрическим интерфейсам, серые – оптическим, фигурные – газовым.

Предварительная блок-схема электронной системы прибора М-ДЛС и ее связей с другими системами.



Внешний вид электроники - прототипа, установленной в конструктив ЛО прибора ДЛС/ХМС-1Ф проекта «Фобос-Грунт».



Черные прямоугольники и стрелки – электронные (электрические) компоненты и связи, серые прямоугольники и стрелки – оптические и газовые компоненты и связи.

Интерфейс с прибором МГАК: однопроходная оптическая кювета с торцевыми окнами и капиллярами циркуляции газовой смеси

Кювета разработана при подготовке экспериментов для миссий «Фобос-Грунт» и «Луна-Ресурс»

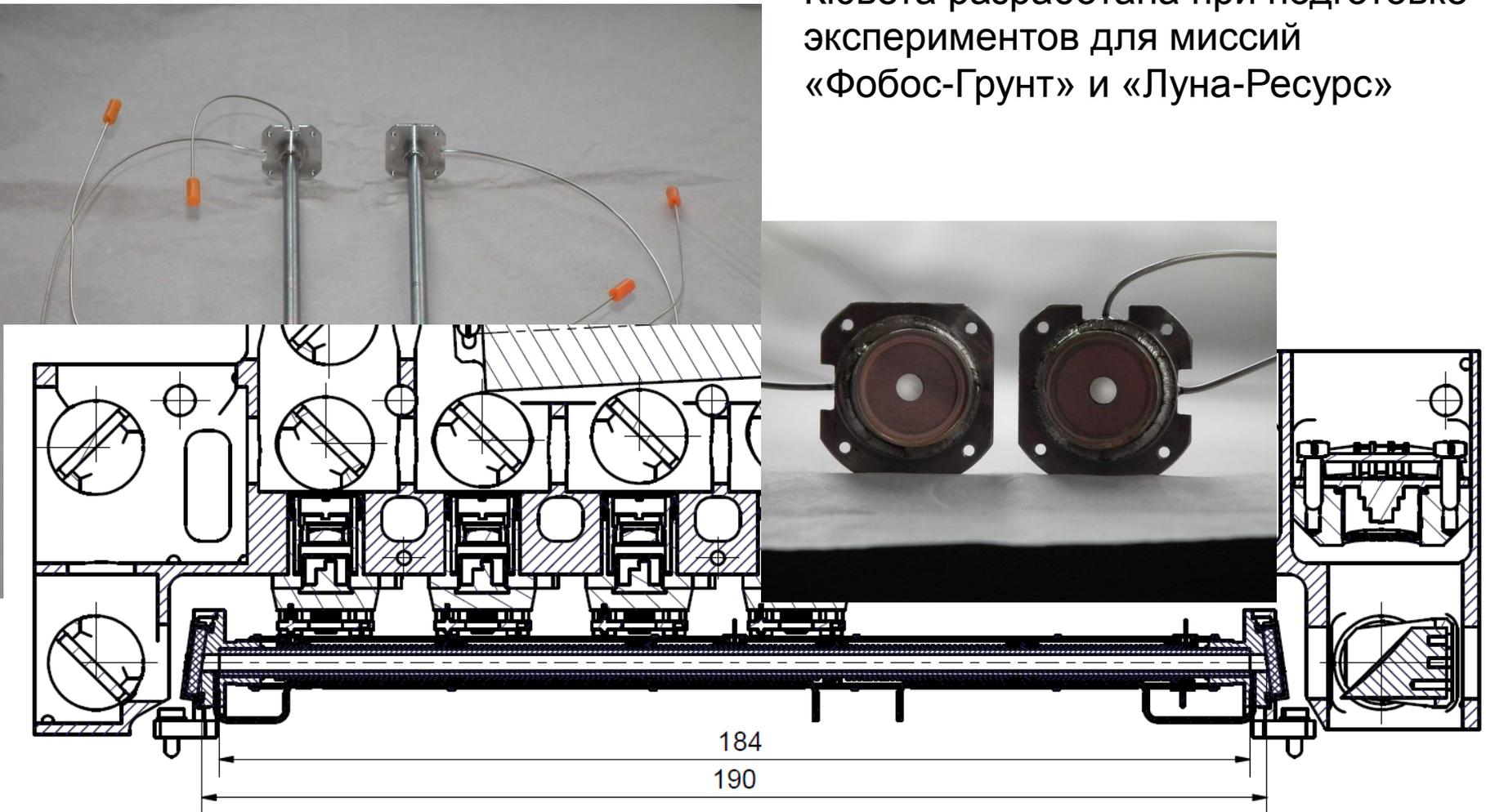
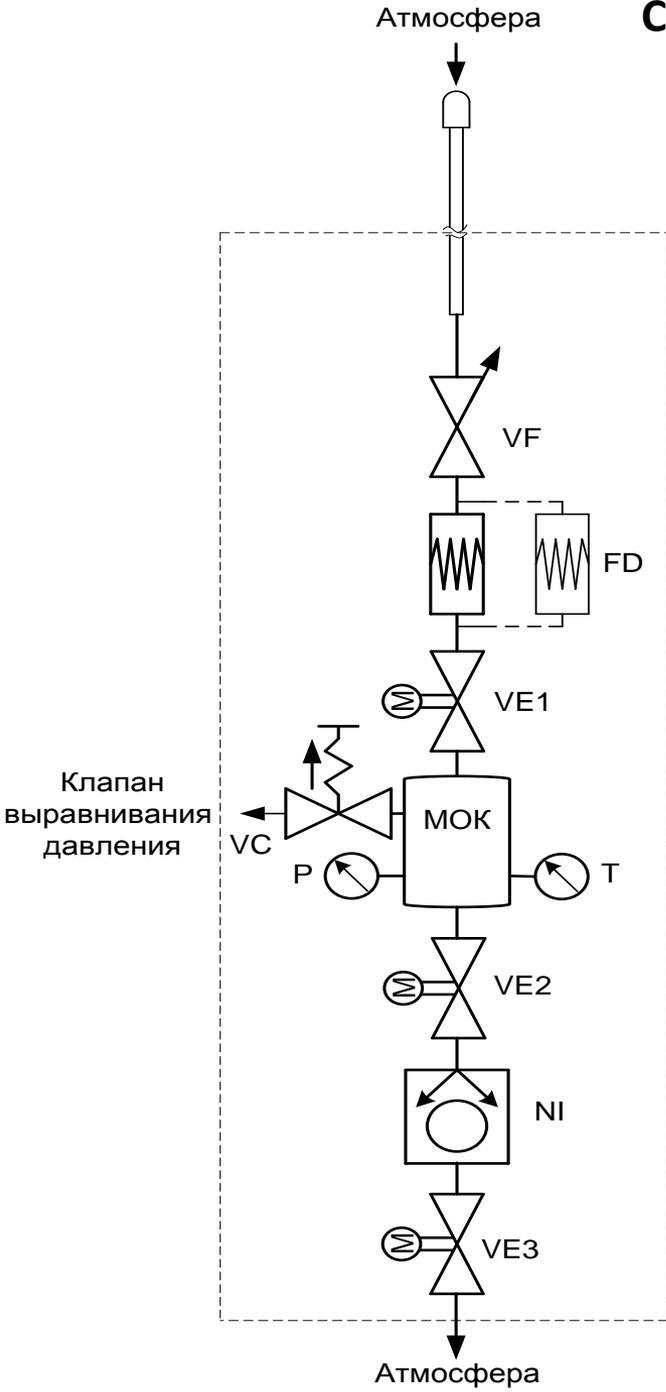


Схема вакуумная принципиальная атмосферного канала измерений прибора М-ДЛС



Штанга забора пробы атмосферы

Регулятор потока

Кассета со сменными фильтрами

Вакуумный клапан

Составная многопроходная оптическая кювета

Вакуумный клапан

Вакуумный насос

Вакуумный клапан

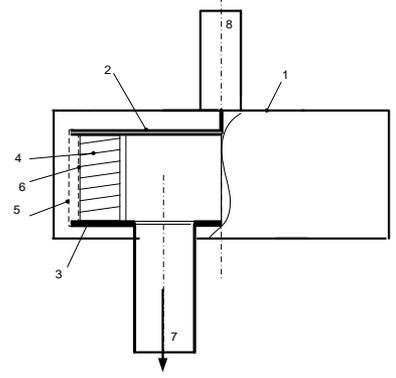
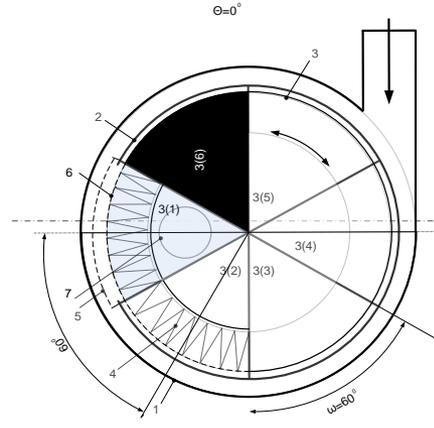


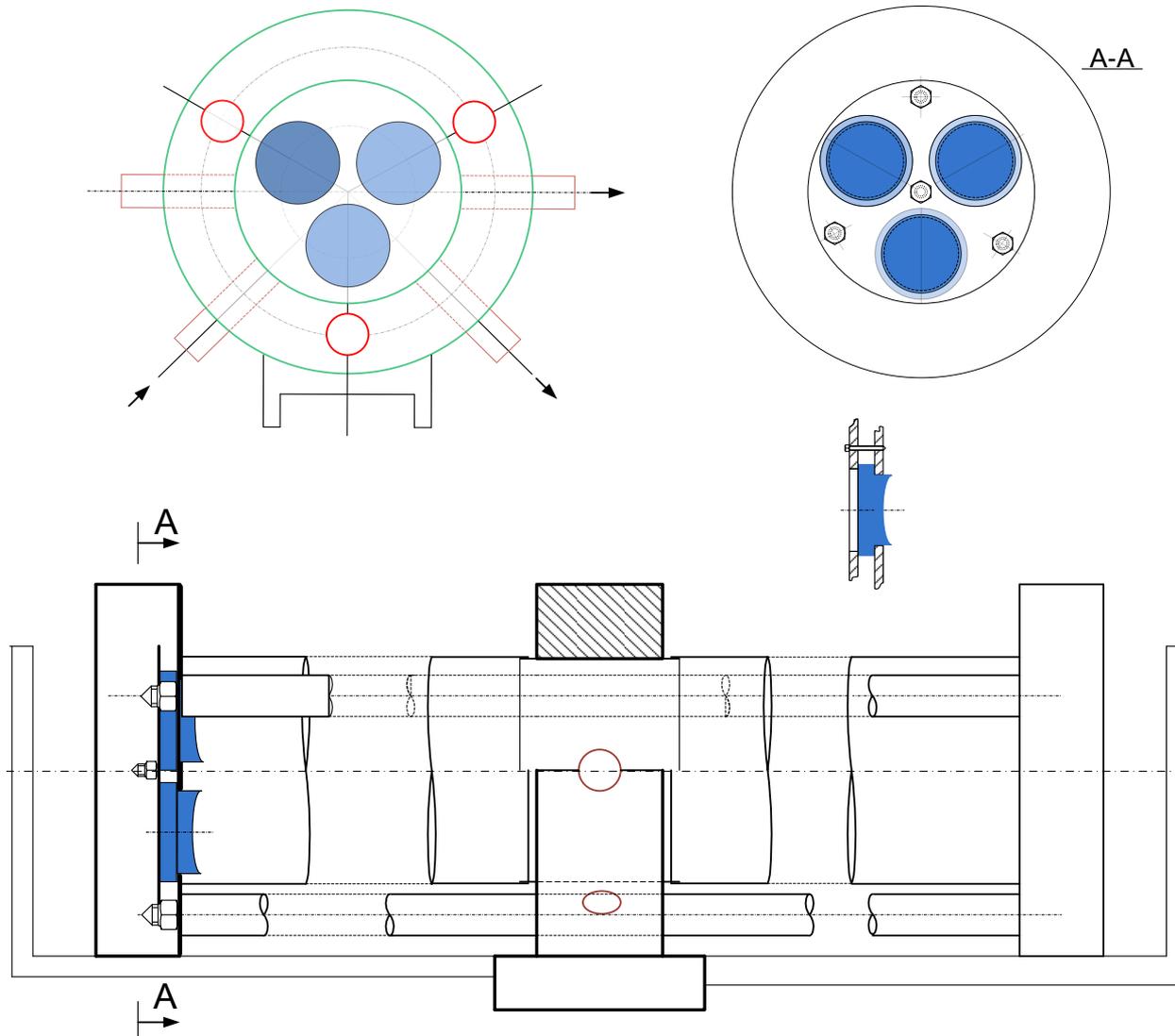
Схема кассеты фильтра класса N13 стандарта HEPA тонкой очистки атмосферной пробы от твердых частиц

Микроклапаны - разработаны компанией Aker Industries для **Huuygens' GCMS**
 Диаметр = 1,27 см
 Длина = 4,5 см
 Материал: титан
 Назначение: контроль газовых потоков прибора



Миниатюрный вакуумный насос компании Creare для **МОМА**
 Потребление: < 10 Вт
 Масса: 150 гр
 Размер: 8,4 см x ø 3,3 см

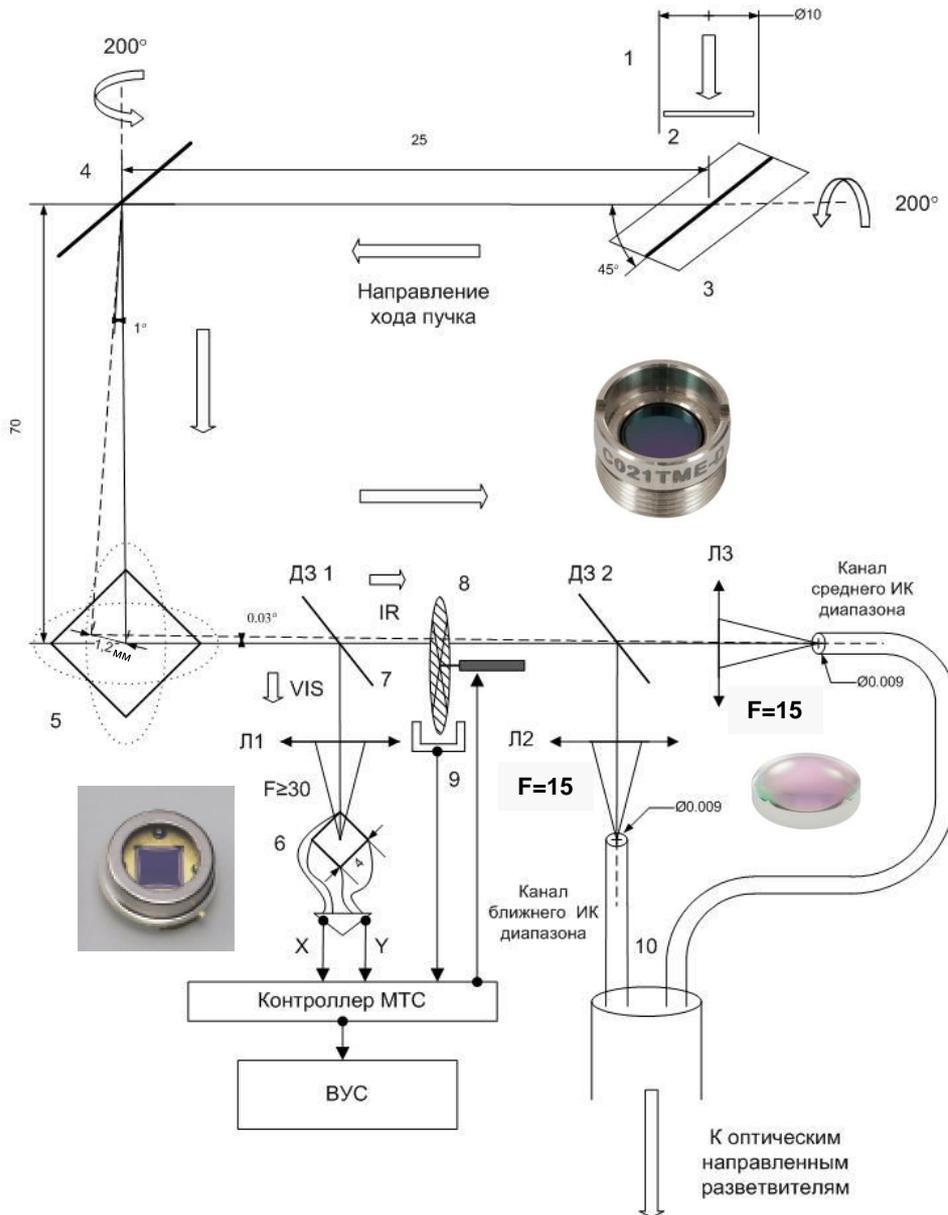
Предварительная конструкция многосоставной многопроходной оптической кюветы МОК



Солнце



Предварительная схема микротелескопа, сопряжённого с оптическим волокном, для наблюдения Солнца



- 1-2. Мини-бленда и входной отрезающий светофильтр.
- 3-4. Двухзеркальный проектор Солнца с электроприводами, аналогичный системе наведения прибора ФАСТ.
5. Двухкоординатный угловой стабилизатор (качающееся зеркало).
- 6-7. Дихроичное зеркало №1 и позиционно-чувствительный датчик (**PSD**, компания **HAMAMATSU**) относительного положения Солнца.
- 8-9. Оптический прерыватель и датчик положения оптического прерывателя.
10. Оптическое волокно.

Технические характеристики прибора М-ДЛС

- **Общая масса** прибора М-ДЛС оценивается в 2,5 ($\pm 0,3$) кг.
- **Энергопотребление** переменное, в среднем 10 Вт, в максимуме 15 Вт.
- **Основные габариты** моноблочного корпуса прибора М-ДЛС вписаны в размер 370 x 300 x 140 мм. В верхней части корпуса со стороны его крепления к ТСП освобождено пространство прямоугольного сечения 120 x 30 мм, с целью огибания элементов теплового испарителя ТСП. Сверху прибора размещены оптико-механические элементы системы наблюдения Солнца и выдвижная штанга забора атмосферной пробы, выступающие, соответственно, на 35 мм и на 300-700 мм выше верхней плоскости корпуса М-ДЛС в рабочем положении прибора.
- **Оптические спектральные диапазоны ближнего ИК:** 1,39 мкм, 1,53 мкм, 1,6 мкм, 1,65 мкм; **среднего ИК:** 2,64 мкм, 2,78 мкм, 3,27 мкм.
- **Поле зрения, требования к установке на посадочной платформе (ПП) КА.**
 - Точность наведения на Солнце – 2 угловые минуты.
 - Требуется полный обзор верхней полусферы марсианского неба, для чего необходимо максимально высокое размещение прибора М-ДЛС, а также выдержать после посадки и выравнивания ПП угол возможного отклонения направления строительной оси «Х» ПП от местной вертикали не более чем 15-20°.
 - Должна быть предусмотрена возможность свободного вертикального выдвижения штанги-трубки забора атмосферной газовой пробы на высоту 0,3-0,7 м выше верхнего края ТСП для уменьшения влияния любого газовыделения ПП и бортовой аппаратуры на результаты измерений.
 - Требуется непосредственная близость М-ДЛС и блока газового хроматографа МГАК, что позволит минимизировать газовые и электрические межблочные соединения.

Технические характеристики прибора М-ДЛС. Продолжение.

- **Информативность прибора** – до 10 МБайт/сутки: в среднем 4 сеанса в сутки по 2,5 Мбайт, в каждом сеансе до 1000 спектров по 2 Кбайт и служебная информация.
- **Внутренняя память прибора** – 10 Мбайт, позволяющая хранить резервный суточный объем научных и служебных данных в случае любых задержек передачи данных в БИП.
- **Числовые команды** – до 10 команд в сутки для запуска циклограмм сеансов работы М-ДЛС.
- **Код бортового времени** – требуется передача прибору кода бортового времени не реже одного раза в секунду для синхронизации шагов циклограммы сеанса работы прибора.
- **Метки, сетки частот и синхроимпульсы, ТМ – каналы** – не требуются.
- **Одна релейная команда, один аналоговый измерительный канал** – для однократного выдвигания вверх и для верификации успешного выдвигания телескопической штанги забора атмосферной пробы.
- **Информационный интерфейс** между прибором М-ДЛС и блоком интерфейсов и памяти (БИП) – низкоскоростной интерфейс RS-485.
- **Скорость передачи данных** – скорость передачи данных: 38400 бит/с в соответствии с протоколом информационного обмена по низкоскоростному интерфейсу между БИП и научными приборами КА «Экзомарс».
- **Блок интерфейсов и памяти (БИП) КНА ПП должен обеспечивать:**
 - вывод информации от прибора М-ДЛС до 10 МБ в сутки и управление прибором через интерфейс, установленный на посадочной платформе;
 - управление прибором М-ДЛС и прием информации от прибора через низкоскоростной интерфейс, построенный на основе стандарта RS-485.

Специфические характеристики прибора М-ДЛС, отличающие его от ряда аналогичных приборов, построенных на основе традиционных консервативных конструкций:

- Сверхвысокое спектральное разрешение прибора $\lambda/\delta\lambda=10^7\div 10^8$, позволяющее детально разрешать форм-фактор регистрируемых линий молекулярного поглощения.
- Радикальное оптическое накопление изначально слабого полезного сигнала в атмосферных измерительных каналах – увеличение эффективного оптического пути до $\sim 1\div 10$ км при физических размерах прибора $\sim 0,3$ м – характеризуемое коэффициентом накопления $\sim 3*(10^3\div 10^4)$, что эквивалентно числу эффективных полных проходов зондирующего луча через рабочий объем прибора, либо соотношению эффективной длины оптической трассы наблюдения Солнца, порядка нескольких атмосферных шкал высоты при наклонных трассах, и геометрических размеров прибора.
- Гибкость управления набором монохроматических РОС-лазеров: один и тот же лазер эффективно используется для измерений в трех или четырех каналах за счет организации оптоволоконной среды передачи оптического излучения и применения направленных оптических разветвителей.
- Применение волоконно-оптической среды передачи и мультиплексирования оптических полей для организации оптических гетеродинных измерений, исключающее проблемы прецизионности юстировки и устойчивости схем на основе объемной дискретной оптики.
- Использование принципа сканирования частоты гетеродина и регистрации полезного сигнала в единственном радиочастотном канале с полосой ~ 10 МГц при записи оптического спектра сверхвысокого разрешения, исключающее необходимость применения широкополосных многоканальных радиочастотных спектр-анализаторов.
- Полная автономность систем в составе комплекса М-ДЛС: слежения за Солнцем с угловой точностью $\sim 0,03^\circ$; подготовки атмосферных проб с защитой рабочего объема и прецизионных оптических элементов от загрязнений на всех этапах хранения, старта, перелета, посадки и активных измерений.

Успешная реализация указанных характеристик позволит, в частности:

- осуществлять суточный и сезонный атмосферный мониторинг изотопных соотношений H_2O и CO_2 ,
- реализовать чувствительность к атмосферному содержанию метана до ~ 50 ppt,
- измерять содержание и изотопные соотношения H_2O , CO_2 , а также малые концентрации ряда простых молекул в составе летучих марсианского грунта с точностью $\sim 0,1\%$.

Контакты

- Виноградов И.И., ИКИ РАН, +7-926-223-38-16, imant@iki.rssi.ru
- Родин А.В., МФТИ, ИКИ РАН +7-916-617-33-77, alexander.rodin@phystech.edu
- Барке В.В., +7-495-333-5000, tandem422t@mail.ru

Кооперация

- ИКИ РАН (г. Москва)
- СКБ КП ИКИ РАН (г. Таруса, Калужская обл.)
- ИОФ РАН (г. Москва)
- МФТИ (г. Долгопрудный, Московская обл.)
- ООО НПП Астрон Электроника (г. Орёл)
- Университет г. Реймс (Франция)
- Университет г. Кёльн (Германия)
- Лаборатория атмосферных экспериментов Годдардовского центра космических полётов НАСА (США)

Благодарности

Авторы благодарят за поддержку работ со стороны:

- Программы 22 Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы»
- Гранта Министерства образования и науки РФ #11.G34.31.0074
- ИКИ РАН, в рамках контракта между НПО имени С.А. Лавочкина и ИКИ РАН для подготовки ЭП КНА ПП проекта «ЭкзоМарс»

Авторы надеются на поддержку реализации предложенной методики от:

- Роскосмоса и ЕКА в рамках российского и международного проектов по созданию комплекса научной аппаратуры посадочной платформы миссии ЭкзоМарс 2018

Спасибо за внимание!