



Эксперимент М-ДЛС на стационарной посадочной платформе проекта "ЭкзоМарс-2020"

И. И. Виноградов¹, В. В. Барке¹, А. А. Венкстерн¹, И. Ш. Газизов^{2,1}, И. В. Головнин⁴, С. Г. Зеневич^{2,1},
В. А. Казаков^{1,2}, Т. О. Козлова¹, Ю. В. Лебедев¹, С. В. Малашевич^{2,1}, В. В. Мещеринов^{2,1}, А. В. Носов¹,
А. В. Родин^{1,2}, О. З. Росте¹, М. В. Спиридонов³, J. Cousin⁵, G. Durry⁵, M. Ghysels-Dubois⁵

¹Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32.

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (МФТИ), Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9.

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФ РАН), 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38.

⁴Московский государственный университет им. И. В. Ломоносова, Физический факультет, Корпус нелинейной оптики, 119991, г. Москва, мкр Ленинские горы, 1, стр. 62.

⁵GSMA, UMR CNRS 7331, Université de Reims, BP 1039, 51687 Reims, Cedex 2, France.

Контакты: imant@iki.rssi.ru

ОБЩЕРОССИЙСКИЙ СЕМИНАР ПО ДИОДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ им. А. М. Прохорова
Москва. ИОФ РАН. 10.04.2019

Введение

В 2013 году, учёные **ИКИ РАН**, совместно с коллегами из **МФТИ**, **ИОФ РАН**, и **GSMA CNRS** (G.Durry, University of Reims, France) предложили разработать перестраиваемый диодно-лазерный абсорбционный спектрометр (TDLAS) для изучения *in situ* приповерхностной атмосферы Марса на борту стационарной посадочной платформы миссии «ЭкзоМарс».

Основная научная группа на 2019 год:

ИКИ РАН

Отдел физики планет и малых тел Солнечной системы. Лаборатория Экспериментальной спектроскопии. Отдел производства ИКИ РАН. (Научный руководитель - И. И. Виноградов)

МФТИ

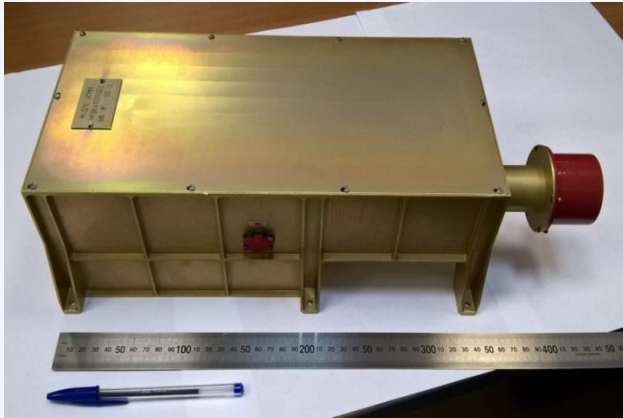
Физтех-школа аэрокосмических технологий (ФАКТ). Лаборатория прикладной инфракрасной спектроскопии. (Научный со-руководитель - А. В. Родин)

Ключевые участники объединённой научной группы:

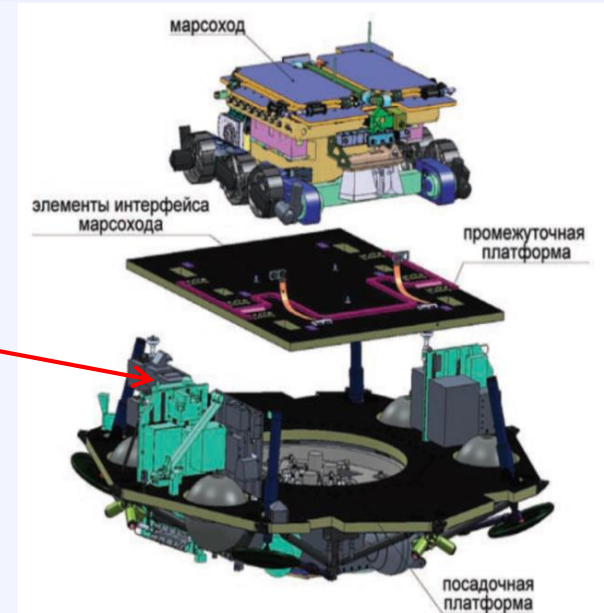
В. Барке, В. Казаков, Т. Козлова, И. Газизов, С. Зеневич, Ю. Лебедев, М. Спиридонов, М. Ghysels-Dubois, G. Durry

Расположение прибора на посадочной платформе

Эксперимент М-ДЛС

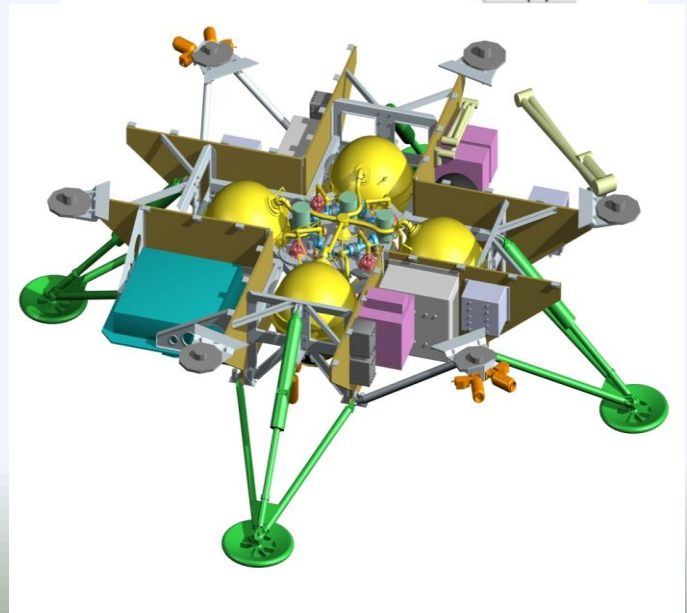


М-ДЛС



М-ДЛС (Марсианский многоканальный диодно-лазерный спектрометр)

- компактный и лёгкий прибор, размещаемый на борту стационарной посадочной платформы проекта «ЭкзоМарс-2020» и предназначенный для регулярных *in situ* исследований химических и изотопных вариаций приповерхностной атмосферы Марса на протяжении как минимум одного марсианского года.



M-DLS overview

Science objectives	Continuous observations of chemical and isotopic atmosphere composition near the surface during platform's lifetime.
Prototype	Luna-Resource, Phobos-Grunt.
Implementation	High-resolution, highly sensitive tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) combined with optical path enhancement by integrated cavity output spectroscopy (ICOS). Molecular absorption measurement at 2.6÷2.9 μm. Search for diurnal, seasonal and sporadic variations of H_2O, HDO, H_2^{18}O; CO_2, $^{13}\text{CO}_2$, CO^{18}O, CO^{17}O. Atmosphere gas sampling via MGAP instrument.
European contribution	GSMA/CNRS (France) – laboratory tests, instrument characterization, data treatment.

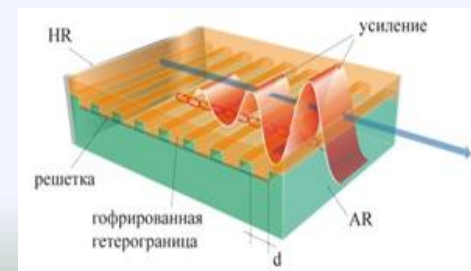
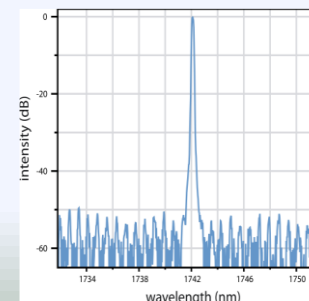
Краткий список параметров М-ДЛС

Параметр	Примечания
Форм-фактор	Моноблок
Габариты	Корпус 350 × 160 × 115 мм
Расположение на платформе	В верхней части тепловой панели посадочной платформы, под термоизоляцией
Диапазон температур посадочного места прибора	Рабочий, во включённом состоянии: - 20 ÷ + 40 °С; в выключенном состоянии: - 40 ÷ + 55 °С
Масса	2.6 _{-0.1} кг
Напряжение питания, потребляемая мощность	28 ⁺⁴ ₋₃ В, 15 Вт
Внешние интерфейсы	- ВСИ с БИП, - бортовой интерфейс (команда на раскрытие воздухозаборника), - интерфейс с МГАК (газовая магистраль)
Периодичность измерений	30 – 120 мин, 1 – 3 цикла/сол (утро, день, вечер)
Локация точки измерения	~ 2 м над поверхностью Марса, ~ 0.2 м над платформой
ИК-диапазоны длин волн	2656 nm (H ₂ O + iso), 2808 nm (CO ₂ + iso)
Аналитический объём, длина; расчетный эфф. оптический путь	156 см ³ , 22 см; 147 м @ 2656 nm, 55 м @ 2808 nm
Расчётная точность концентраций основных молекул	- 0,2 % для CO ₂ , ¹³ CO ₂ , CO ¹⁷ O, CO ¹⁸ O, H ₂ O; - 2% для HDO, HO ¹⁸ O
Расчётная точность изотопных соотношений	- D/H < 2%, ¹⁸ O/O < 2% (H ₂ O); - ¹⁸ O/ ¹⁷ O/O < 0.3%, ¹³ C/C ~ 0.3% (CO ₂)
Скорость передачи данных	1000 ± 10 Кбит/с (НВСИ)
Объём данных	4.5 КВ/единичное измерение, 0.28 МВ/цикл, 1.2 МВ/сол (макс)

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

- В эксперименте М-ДЛС марсианская атмосфера будет исследоваться при помощи **оптических измерений молекулярного спектра поглощения газовой пробы**, отбираемой в непосредственной близости от стационарной посадочной платформы.
- **Высокая чувствительность и точность измерений, гибкость управления TDLAS сочетаются с преимуществами ICOS** - возможностью радикального ($\sim 10^3$) увеличения эффективного оптического пути регистрации молекулярного поглощения для измерений малых газовых концентраций при низком давлении образца марсианской атмосферы.
- **Изменения молекулярного содержания H_2O и CO_2 и изотопных соотношений** будут осуществлены при наземной обработке записанных и пересланных данных спектров молекулярного поглощения.
- Образец газа будет зондироваться внутри компактной аналитической оптической многопроходной ячейки ICOS монохроматическим излучением двух поочерёдно работающих перестраиваемых РОС-лазеров (DFB-laser), излучающих в диапазонах:
 - **2656 нм для H_2O , и HDO, $HO^{18}O$;**
 - **2808 нм для CO_2 , и $^{13}CO_2$, $CO^{17}O$, $CO^{18}O$.**

РОС-лазер

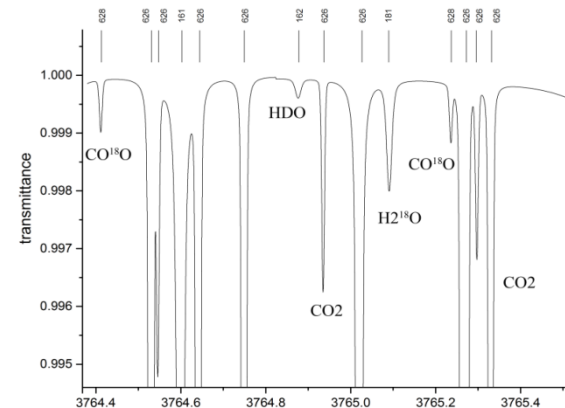
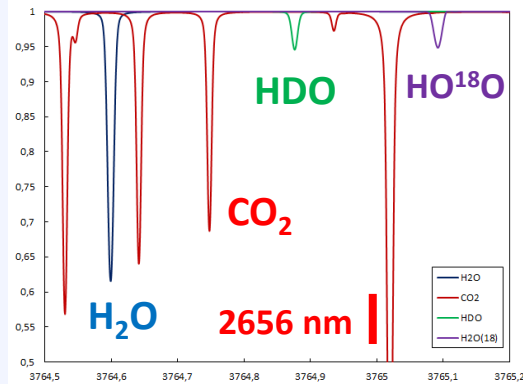


Модельные спектры поглощения марсианской атмосферы

Спектры поглощения для смеси CO₂ + H₂O (100 ppm)

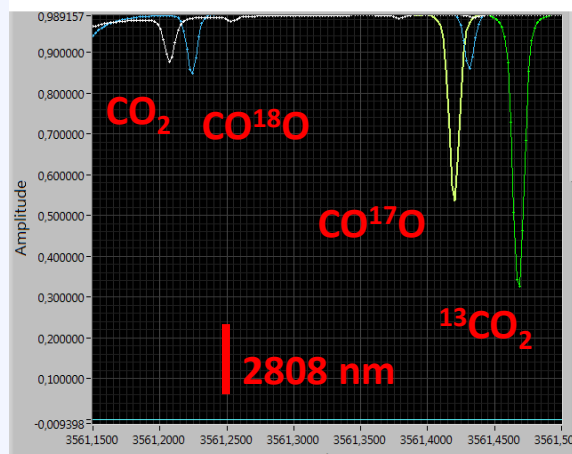
Линии H₂O, HDO, HO¹⁸O при 8 мбар, 300 К для:
 - 1 км эфф. опт. пути (слева сверху, D/H=6*(D/H)_{земли});
 - 200 м эфф. опт. пути (справа, D/H=(D/H)_{Earth}).

Линии слабого поглощения CO₂, ¹³CO₂, CO¹⁸O, CO¹⁷O для эффективного оптического пути длиной 50 м при 10 мбар и T = 300 К (слева внизу).

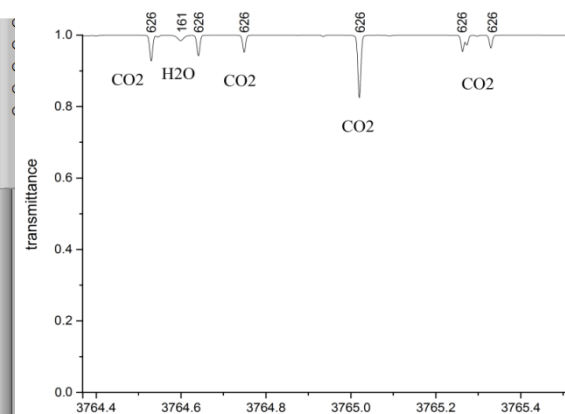


Near 2656 nm

2656 nm



Near 2808 nm

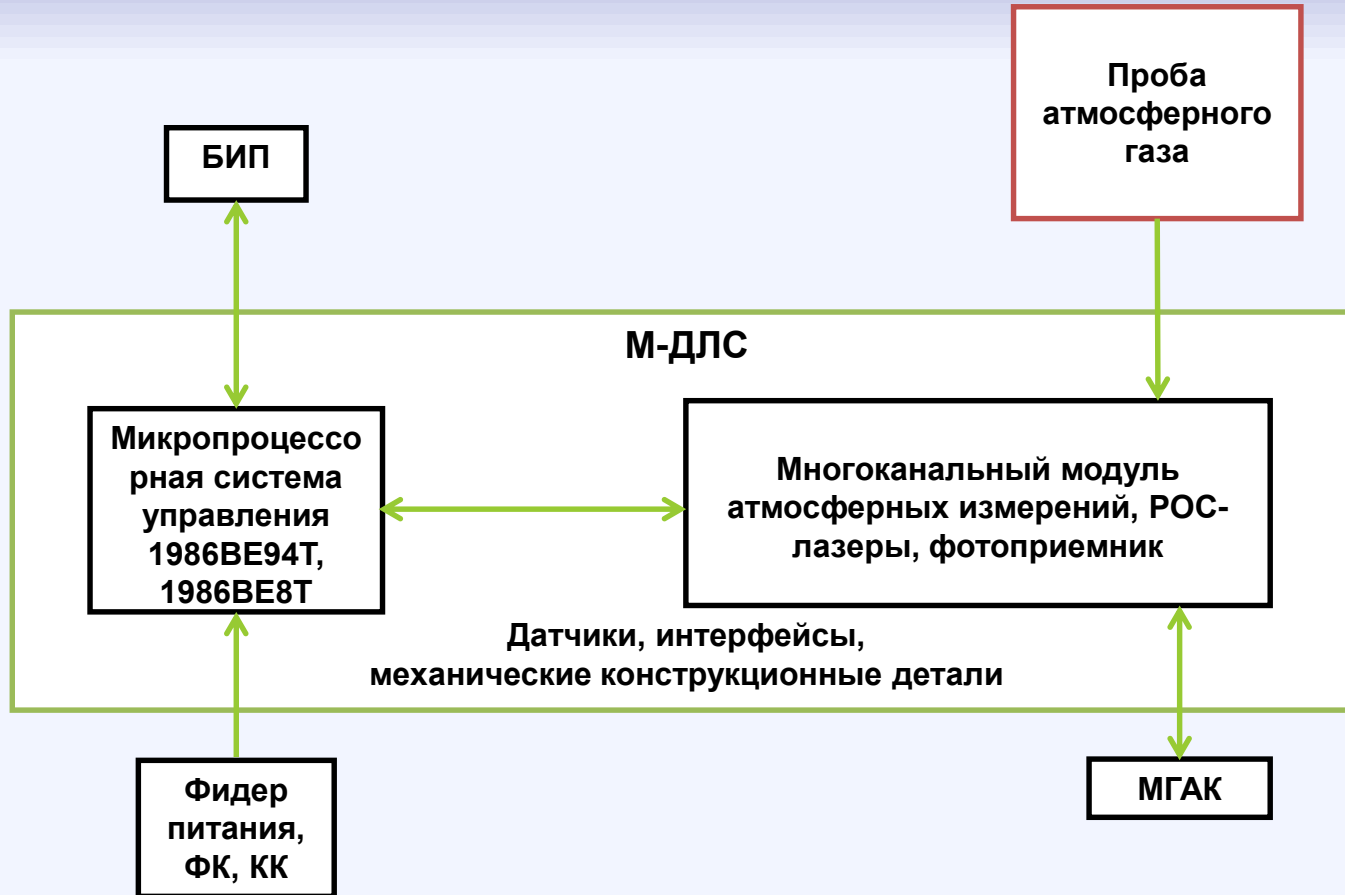


Оценка чувствительности для измерений CO₂ + H₂O (200 ppm), и для изотопологов вблизи 2656 нм (H₂O) и 2808 нм (CO₂)

Молекула	Волновое число, см ⁻¹	Ожидаемая концентрация основной молекулы	Точность измерения концентрации
CO ₂	3561,207	~ 95%	~ 0,2%
¹³ CO ₂	3561,468		~ 0,2%
CO ¹⁸ O	3561,223		~ 0,2%
CO ¹⁷ O	3561,420		~ 0,2%
H ₂ O	3764,59913	~ 200 ppm	< 0,2%
H ₂ ¹⁸ O	3765,09081		< 2%
HDO	3764,87629		< 2%

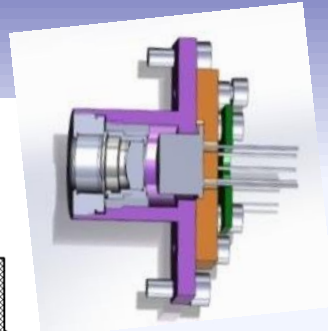
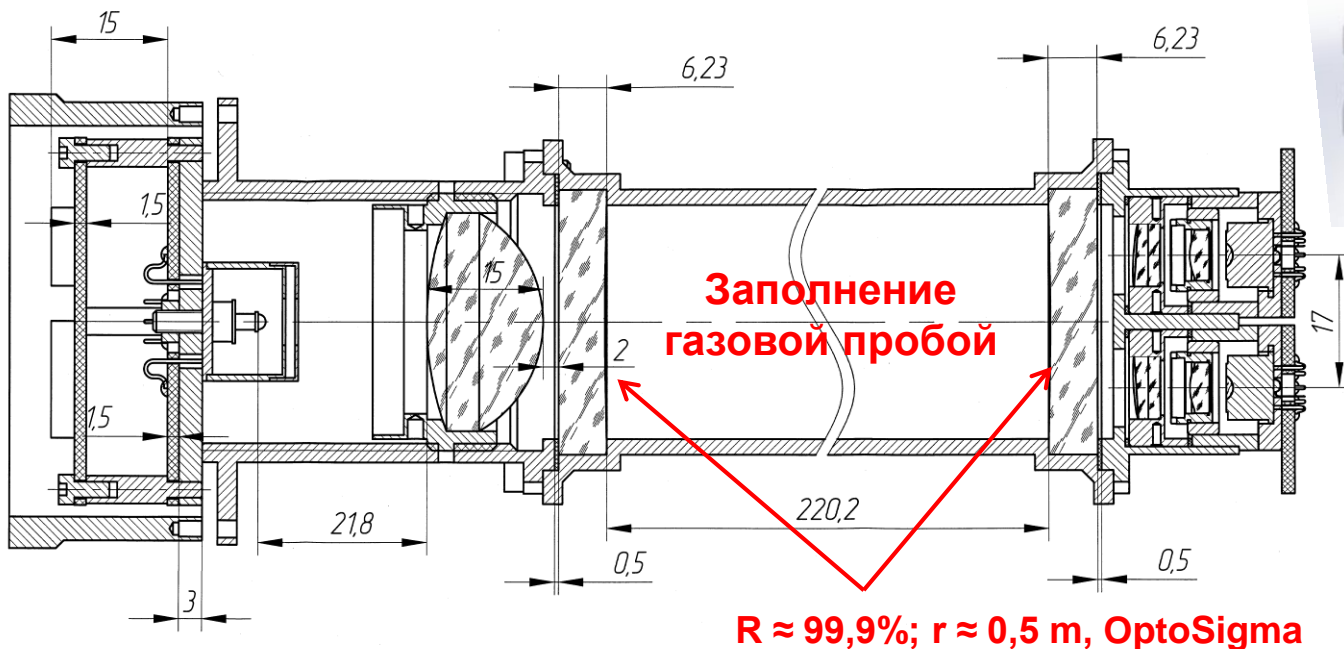
Точность измерения изотопного отношения оценивается как :
D/H < 2%, ¹⁸O/O < 2% (H₂O), ¹⁸O/¹⁷O/O < 0,3% (CO₂), ¹³C/C ~ 0,3%.

Функциональная блок-схема прибора М-ДЛС

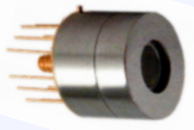


- Многоканальный модуль атмосферных измерений включает в себя аналитическую многопроходную оптическую ячейку и систему формирования газовой пробы окружающей атмосферы.
- Микропроцессорная система контролирует циклограмму подготовки газовой пробы и её измерения, а также осуществляет связь с БИП - командным модулем для обмена научной информацией и хранения данных.
- Сервисные системы, датчики, интерфейсы, крепления и проч. Распределены внутри корпуса М-ДЛС.

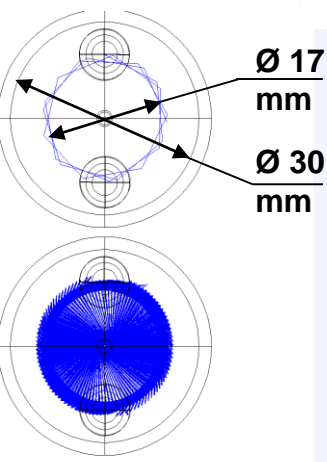
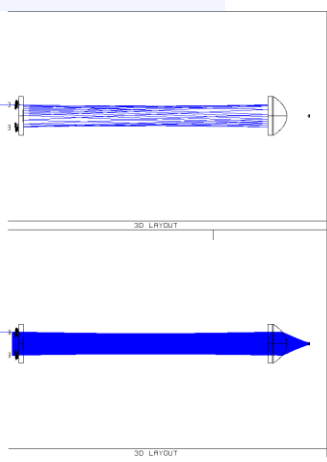
Устройство кюветы ICOS



DFB-260290 nanoplus
Лазерный модуль и коллимирующая линза



PVI-3V VIGO
фотодетектор



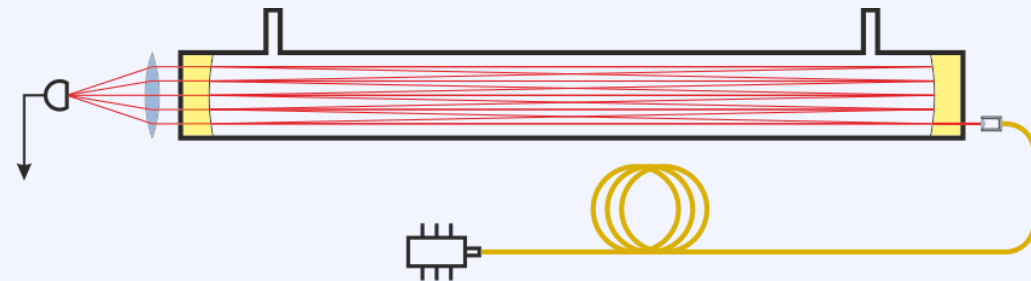
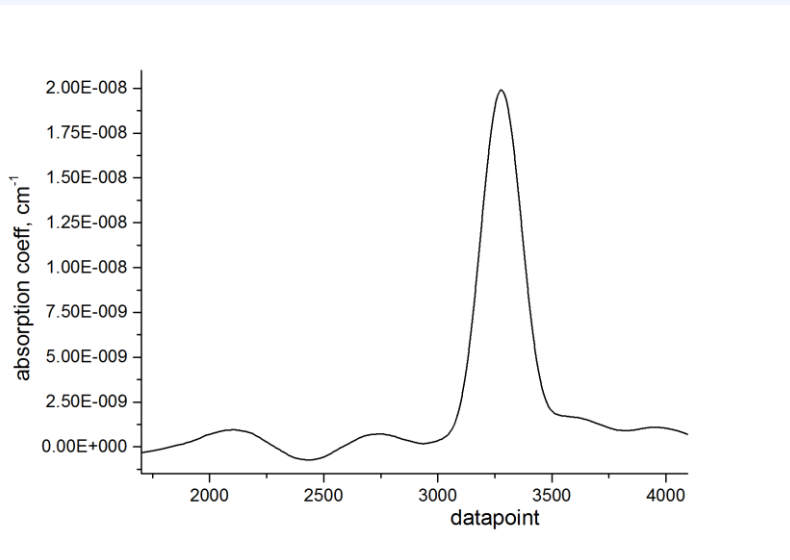
Допуски на позиционирования ячеек зеркала ICOS

Наклон главной оси:		ICOS	
0.1°		Поперечный линейный сдвиг:	0.2 mm ✓
0.2°		Продольный сдвиг:	0.5 mm ✗
		Наклон входной оси:	1.0 mm ✓
			0.1° ✓

Расчетные лучи и паттерны на ячейках зеркал ICOS

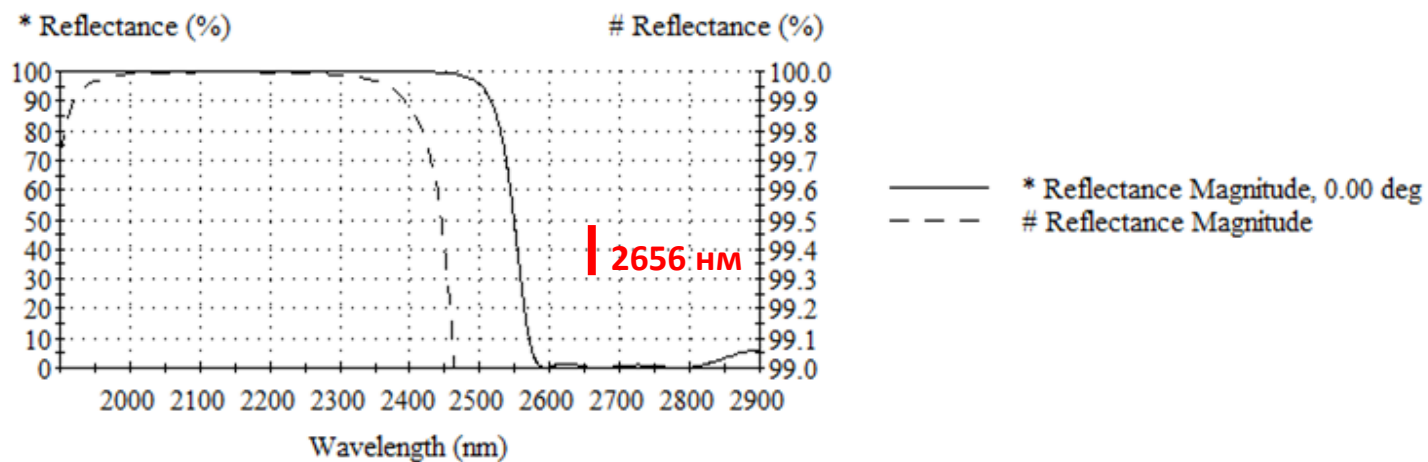
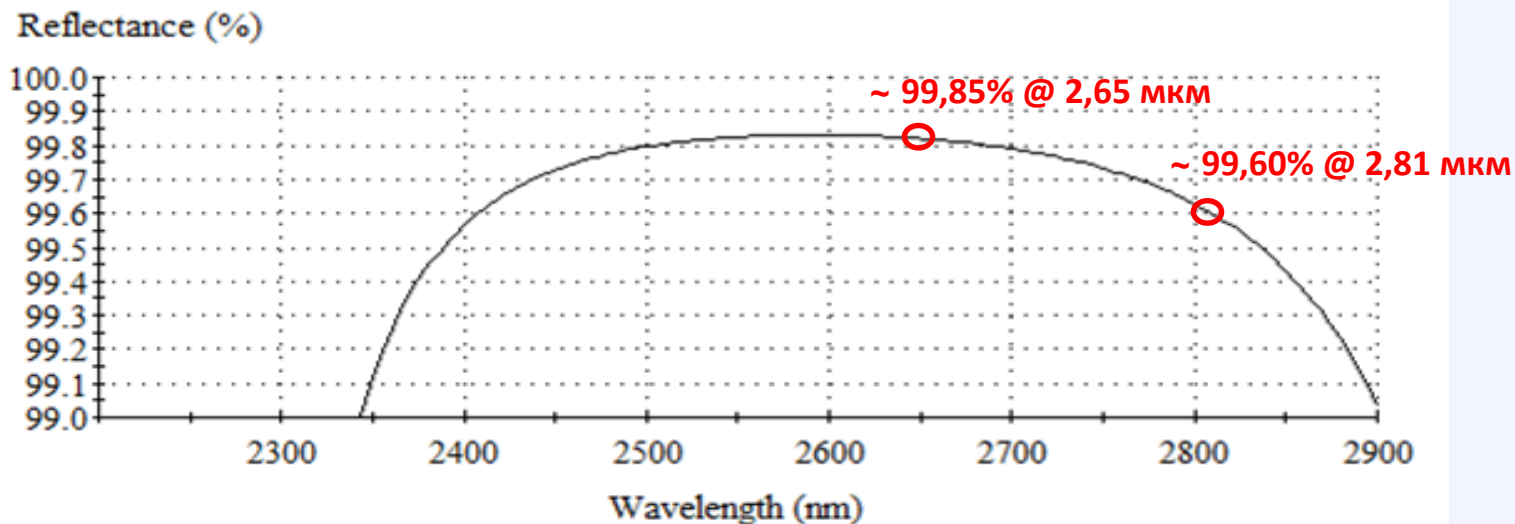
Параметры кюветы ICOS

- **ICOS:** Integrated Cavity Output Spectroscopy - Спектроскопия интегрального внутрирезонаторного выхода, также известная как: Cavity enhanced absorption spectroscopy.
- **Оптический путь :** $L_{\text{eff}} = d/(1-R)$; $d = 22 \text{ см}$ – расстояние между зеркалами.
- **Выходная мощность:** $I_{\text{output}}/I_{\text{input}} = T/2$, T – пропускание зеркала, R – отражение зеркала: $T=(1-R)/(2\div 5)$ для реального зеркала; типично $I_{\text{input}} = 3 \text{ мВ}$.
- **Для 2656 нм:** $R = 99,85\%$, $L_{\text{eff}} = d \times 0.67 \times 10^3 = 147 \text{ м}$ эффективный оптический путь; $I_{\text{output}}/I_{\text{input}} = 10^{-3} / (4\div 10) \Rightarrow I_{\text{output}} \sim 0.2 \text{ мкВт}$
- **Для 2808 нм:** $R = 99,60\%$, $L_{\text{eff}} = d \times 0.25 \times 10^3 = 55 \text{ м}$ эффективный оптический путь; $I_{\text{output}}/I_{\text{input}} = 4 \times 10^{-3} / (4\div 10) \Rightarrow I_{\text{output}} \sim 0.8 \text{ мкВт}$.

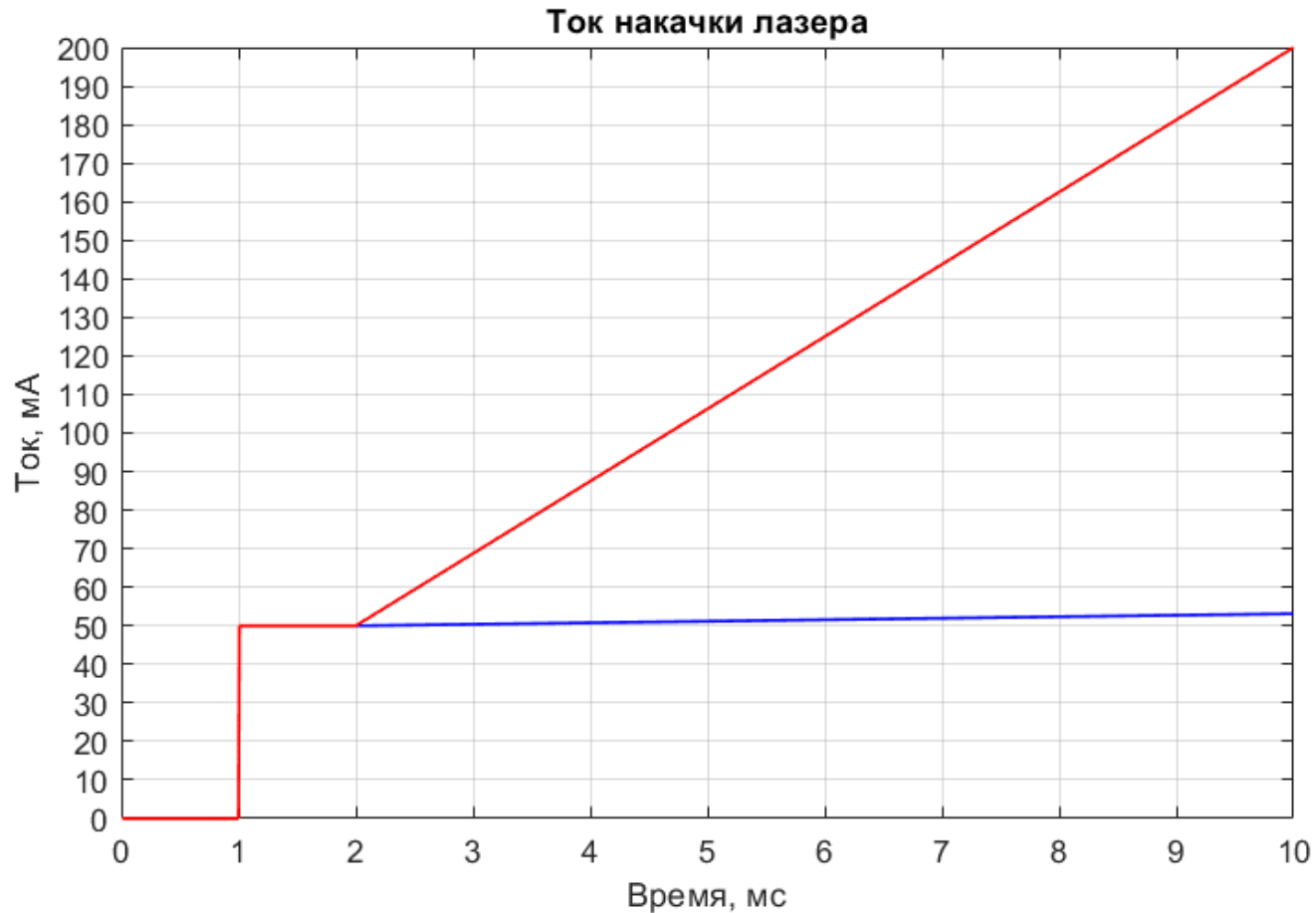


Лабораторный эксперимент с кюветой ICOS, проведённый в сентябре 2013 года в ИОФ РАН, продемонстрировал точность 10^{-9} см^{-1} для обнаружения слабой линии CO_2 $2 \times 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ вблизи 1,6 мкм.

Расчетная отражательная способность зеркал ICOS (сверху) и корректирующего фильтра (снизу) от OptoSigma



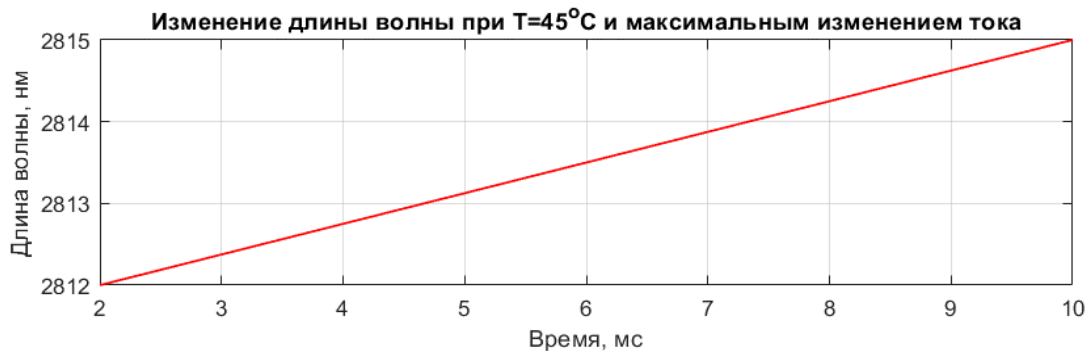
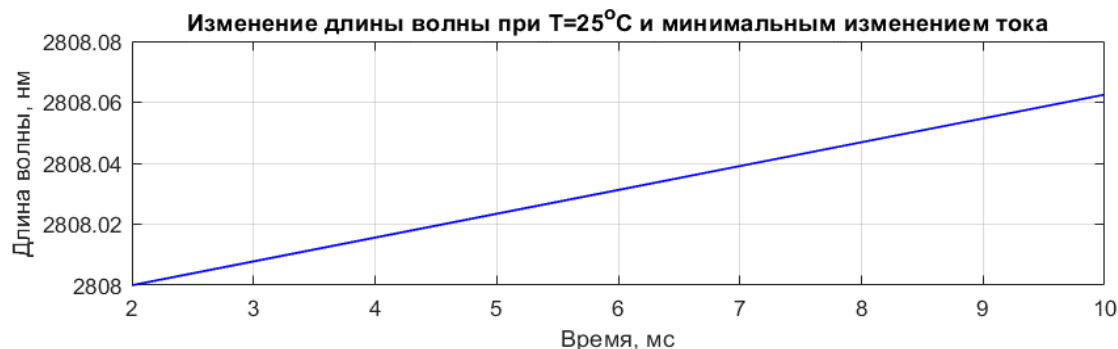
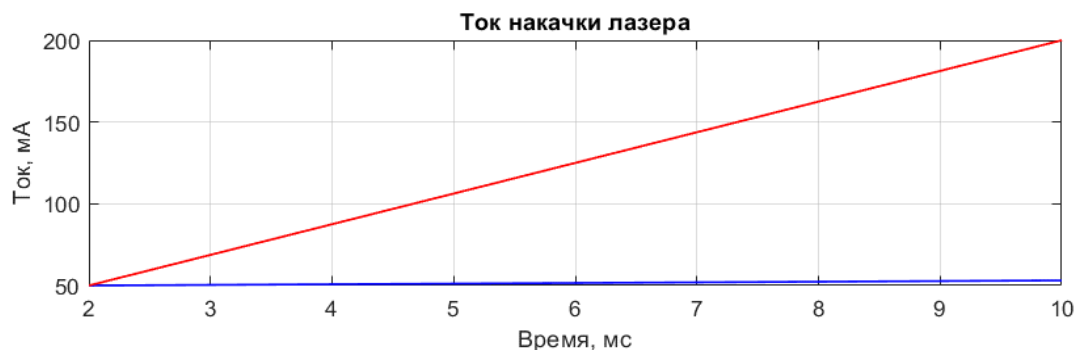
Форма тока лазера для отдельного цикла управления



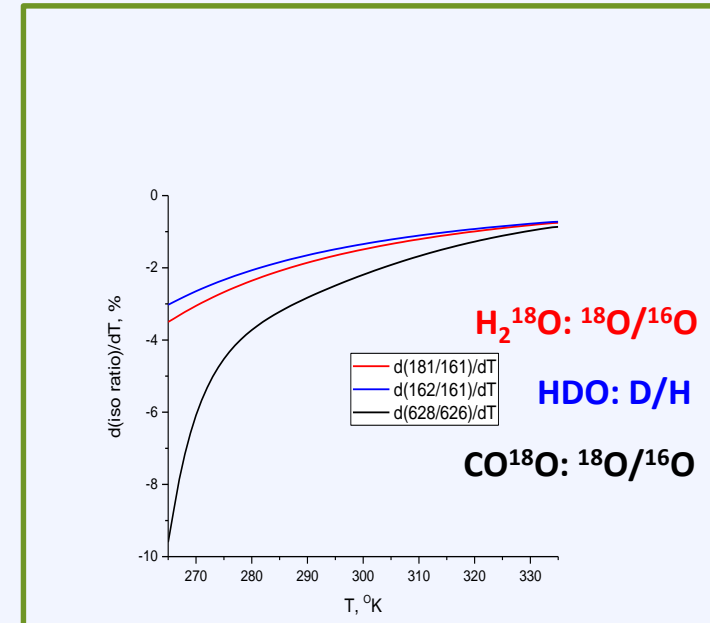
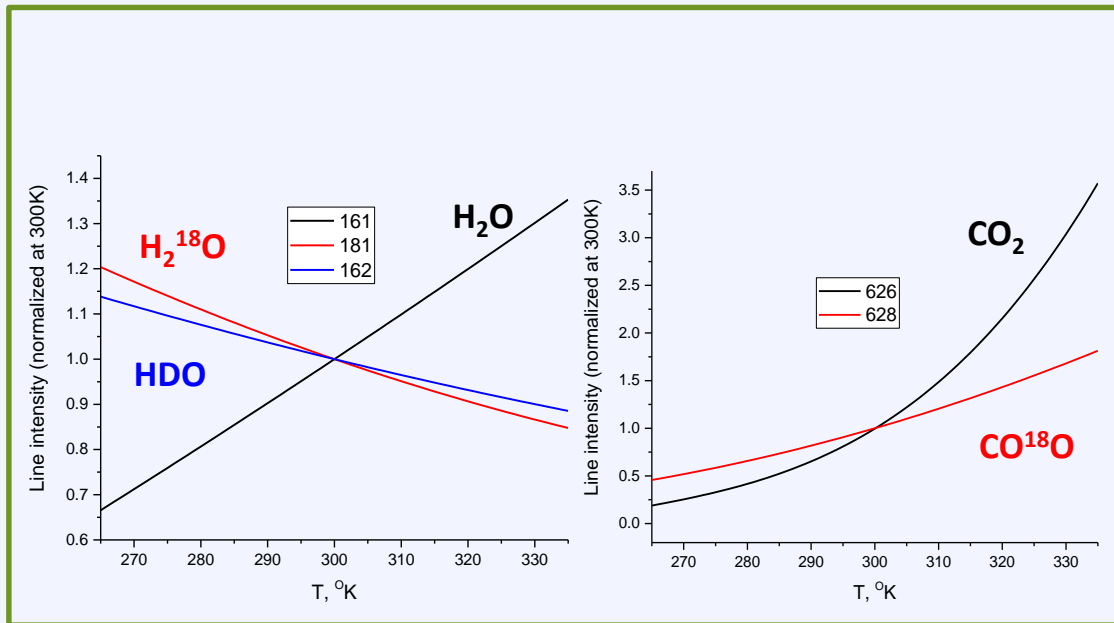
Диапазон изменения, разрешение

$$\lambda/d\lambda \sim 10^8$$

- Измерения будут выполняться последовательно с интервалами шириной $\sim 1 \text{ см}^{-1}$ и спектральным разрешением до $\sim 10 \text{ МГц}$ ($\sim 0,0003 \text{ см}^{-1}$), что приведет к точной регистрации контуров линий молекулярного поглощения.



Чувствительность спектроскопических параметров к температурным изменениям



Температурные зависимости CO₂ и H₂O линий поглощения для 265-335 К и P = 8 мбар.

Оценка точности измерения зависимости изотопного отношения от температуры образца газа.

Газовая система

Вакуумная схема

Ввод

Atmosphere P=5÷8 mbar

Gas sampler (telescopic tube)

Герметизация на этапах: старга, перелета, посадки

Пылевой фильтр

Оптическая кювета

Вакуумные клапаны

М-ДЛС

Интерфейс

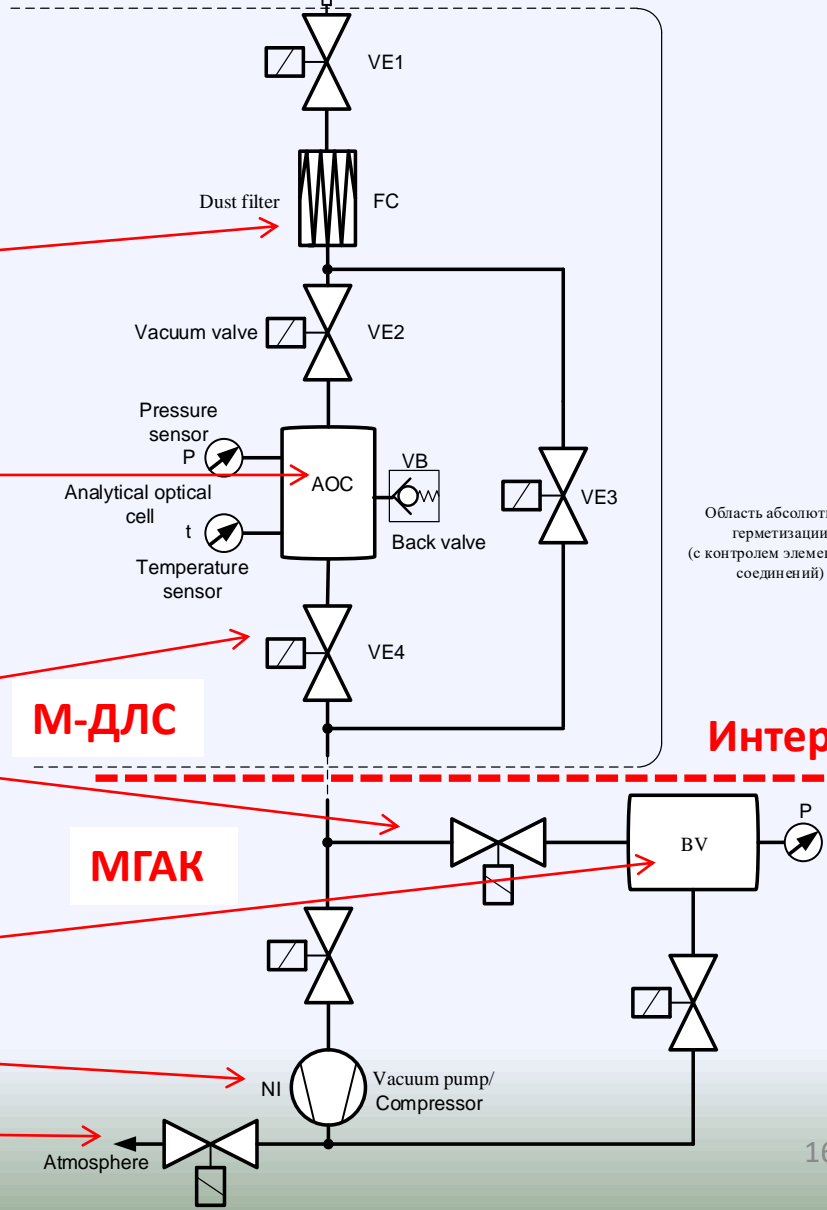
Балластный объем

МГАК

Вакуумный насос

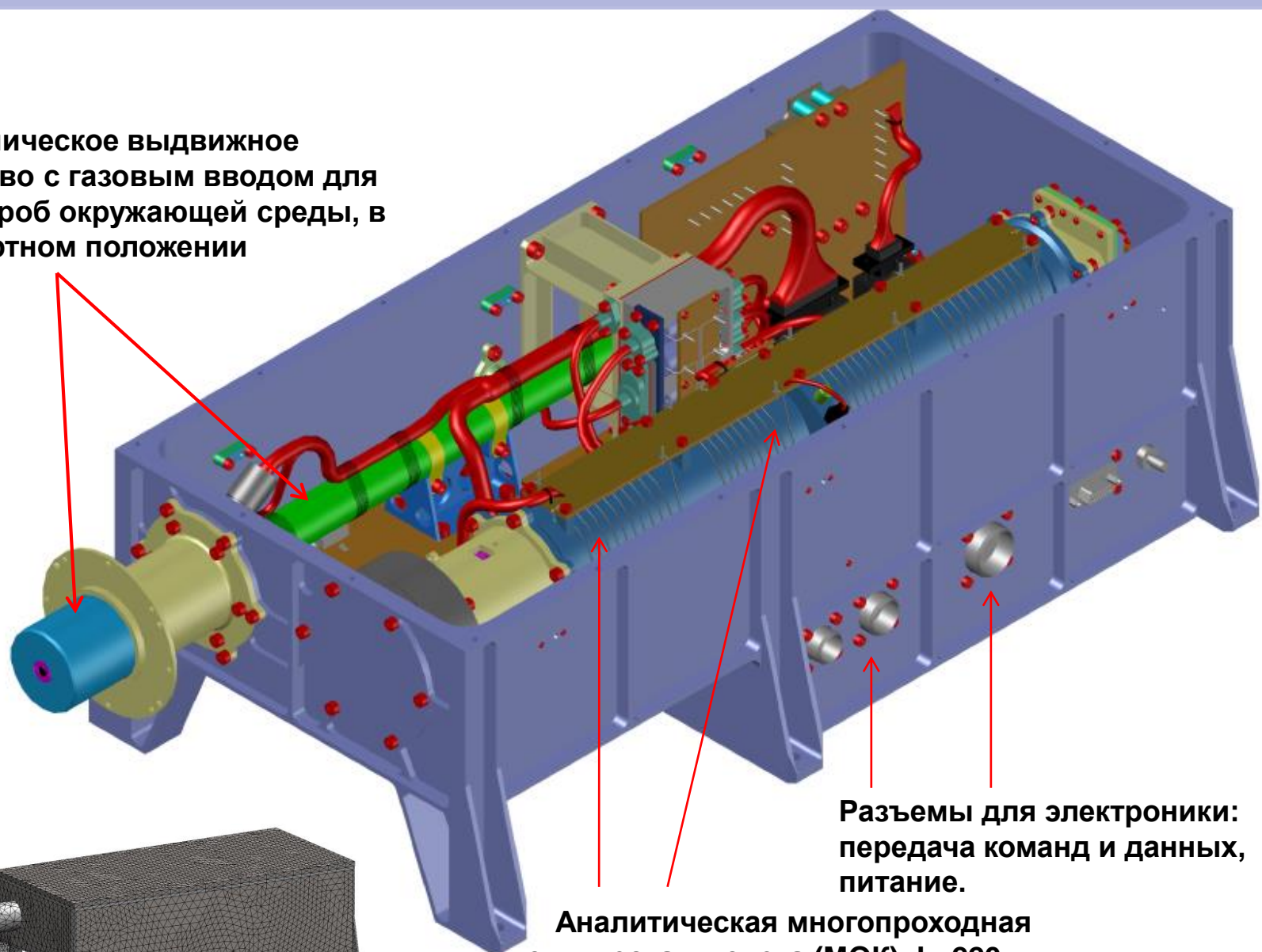
Выход

Atmosphere



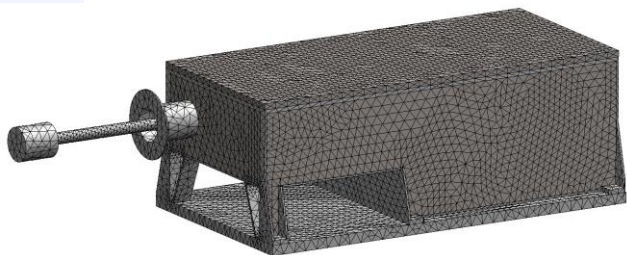
Область абсолютной герметизации (с контролем элементов и соединений)

Телескопическое выдвижное устройство с газовым вводом для отбора проб окружающей среды, в транспортном положении



**Разъемы для электроники:
передача команд и данных,
питание.**

**Аналитическая многопроходная
оптическая кювета (МОК): L=220 мм,
Ø=40 мм**



Оголовок
выдвижного
устройства с
фильтром
пылевой защиты

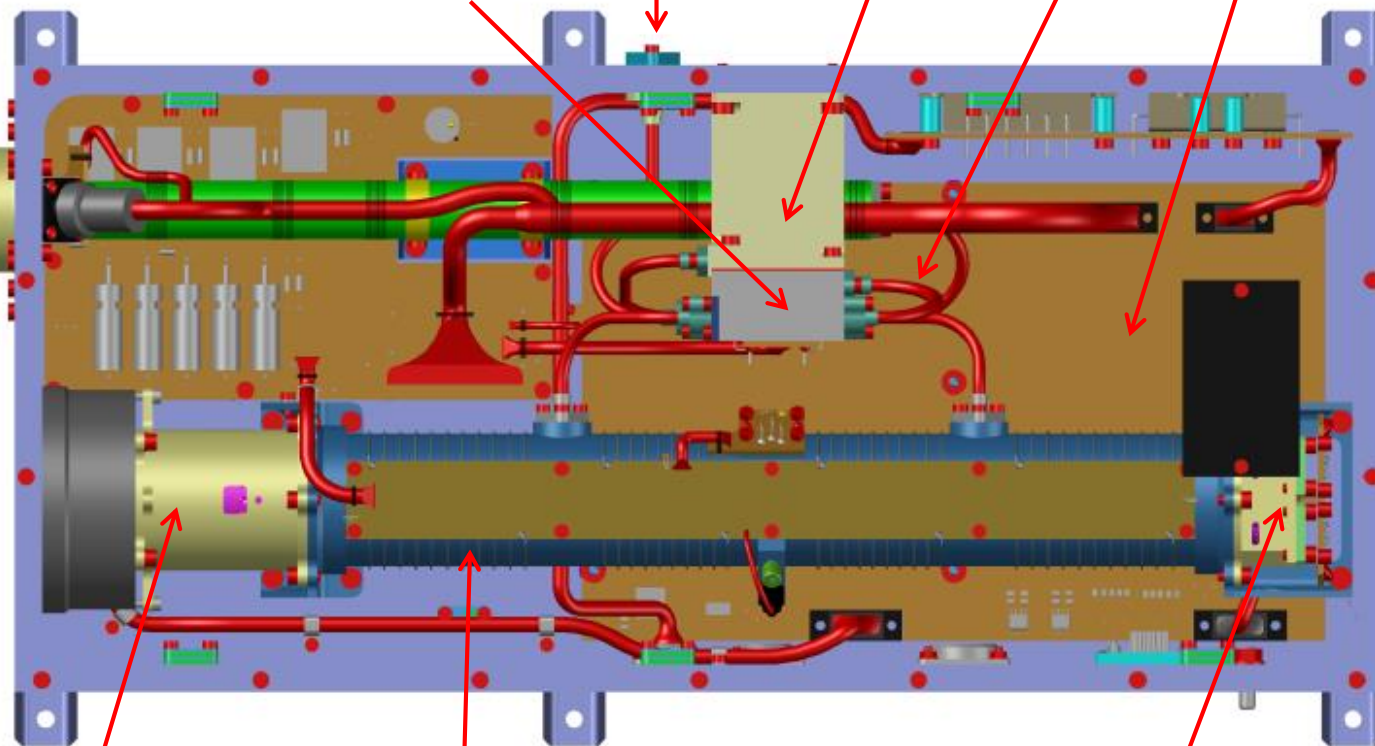
Газовый вывод,
интерфейс с МГАК

Электроника на «нижнем уровне»
Пылевой фильтр
тонкой очистки

Электромагнитные
вакуумные клапаны

Газовые трубки

Расположение
привода
выдвижного
устройства



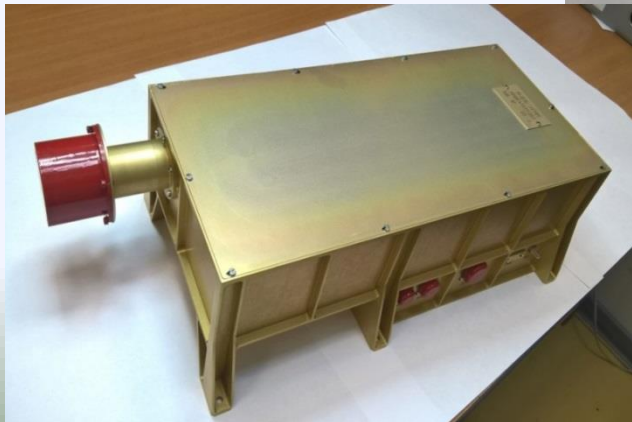
Выходной интерфейс МОК
с фотодетектором
и предусилителем

Аналитическая
многопроходная оптическая
кювета ICOS (МОК ICOS)

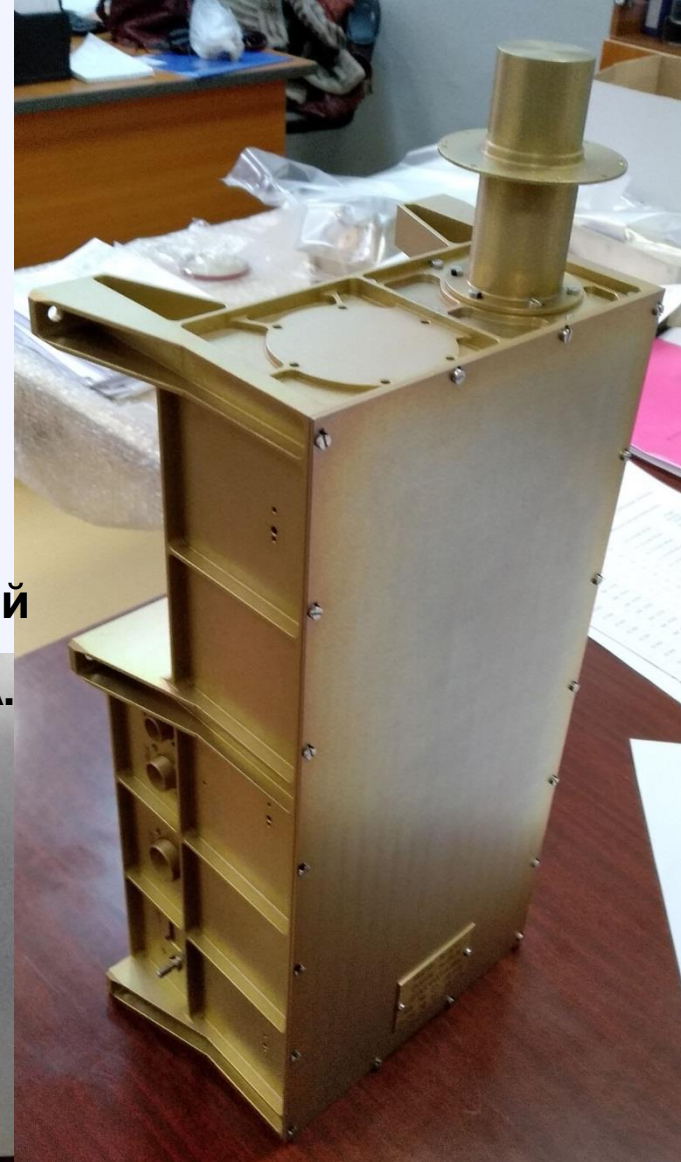
Входной оптический
интерфейс с РОС-
лазерами

Текущий статус

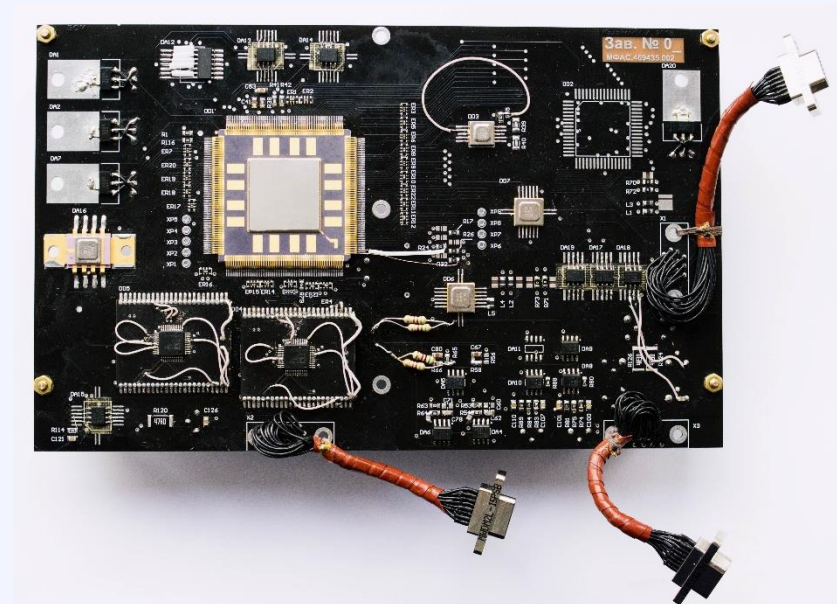
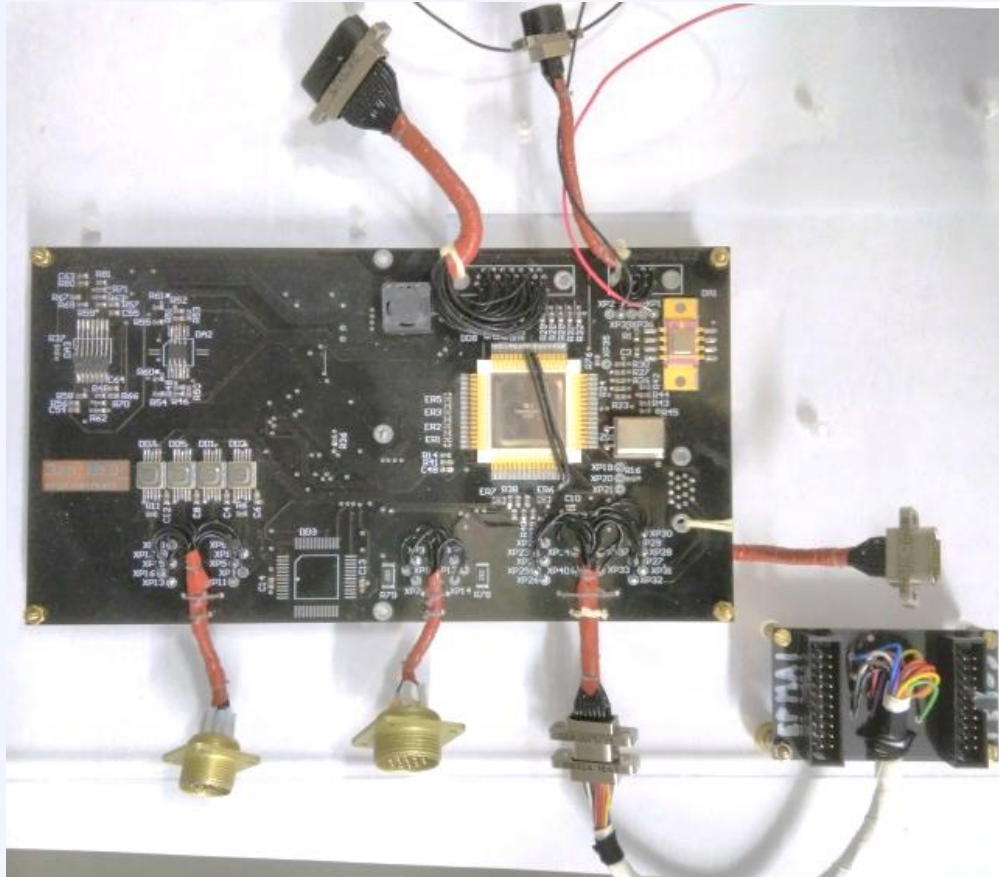
- **Натурный габаритно-массовый макет, тепловой эквивалент приняты в НПО им. Лавочкина.**
- **Технологический образец М-ДЛС прошёл индивидуальные ПСИ и комплексные испытания под управлением БИП ТО.**
- **Полностью разработана РКД на ШО М-ДЛС.**
- **Комплектующие ЭРИ закуплены полностью и проходят сертификацию.**
- **Изготовлен, испытан и поставлен обязательный макет прибора для комплексных испытаний КА.**



Макет М-ДЛС
Dummy M-DLS
НРДК.413311.006
Зав. No 01 2019г.
Serial No 01 2019г.



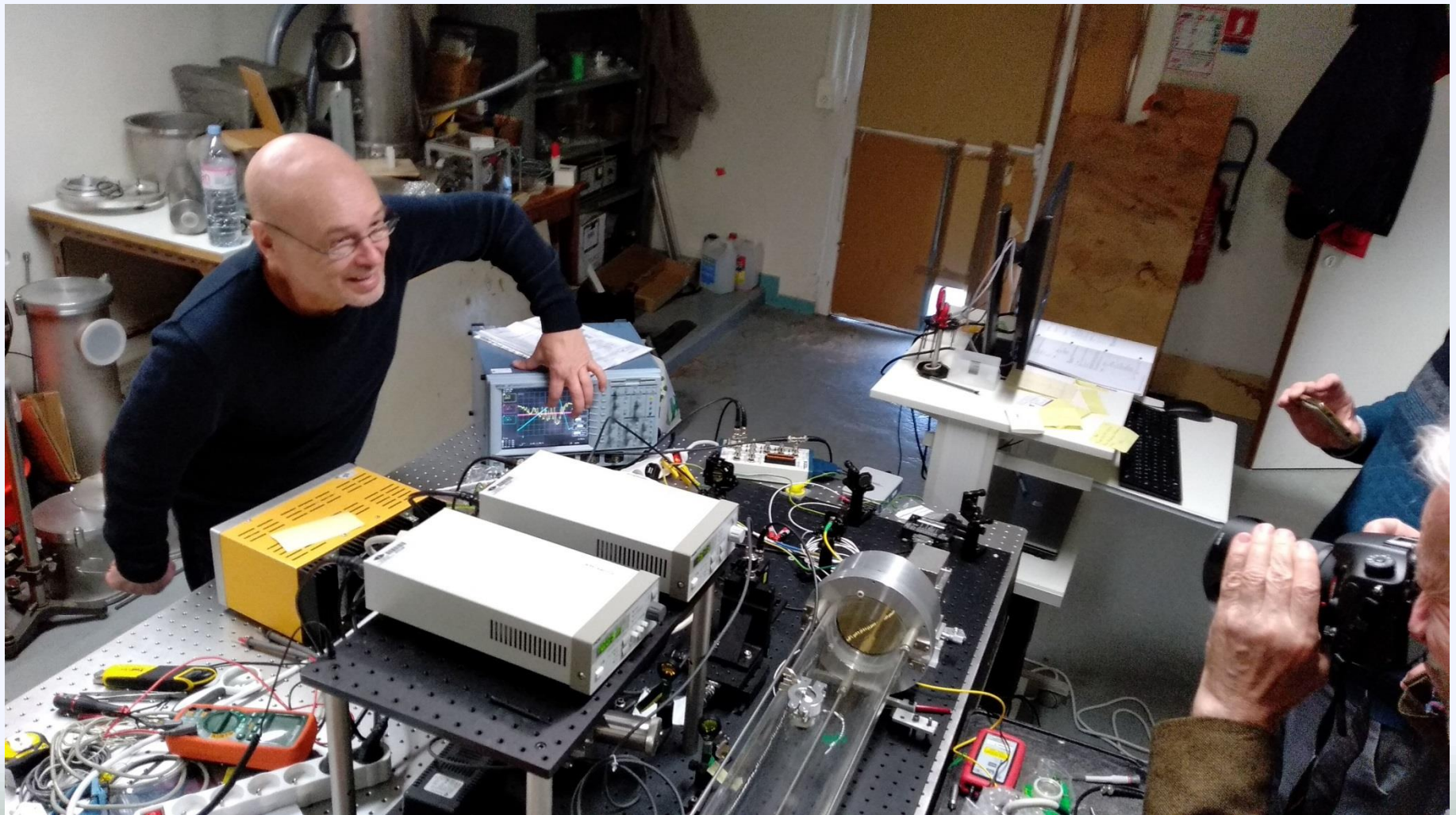
- Изготовлены и отлажены прототипы главных узлов штатной электроники.



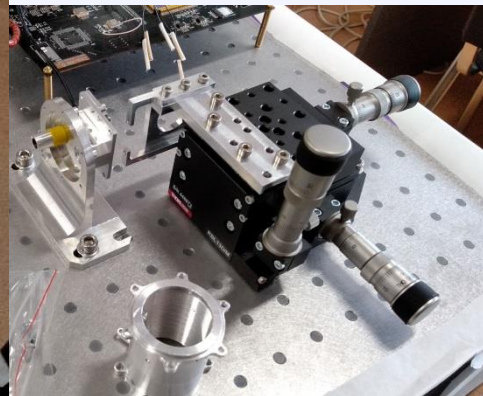
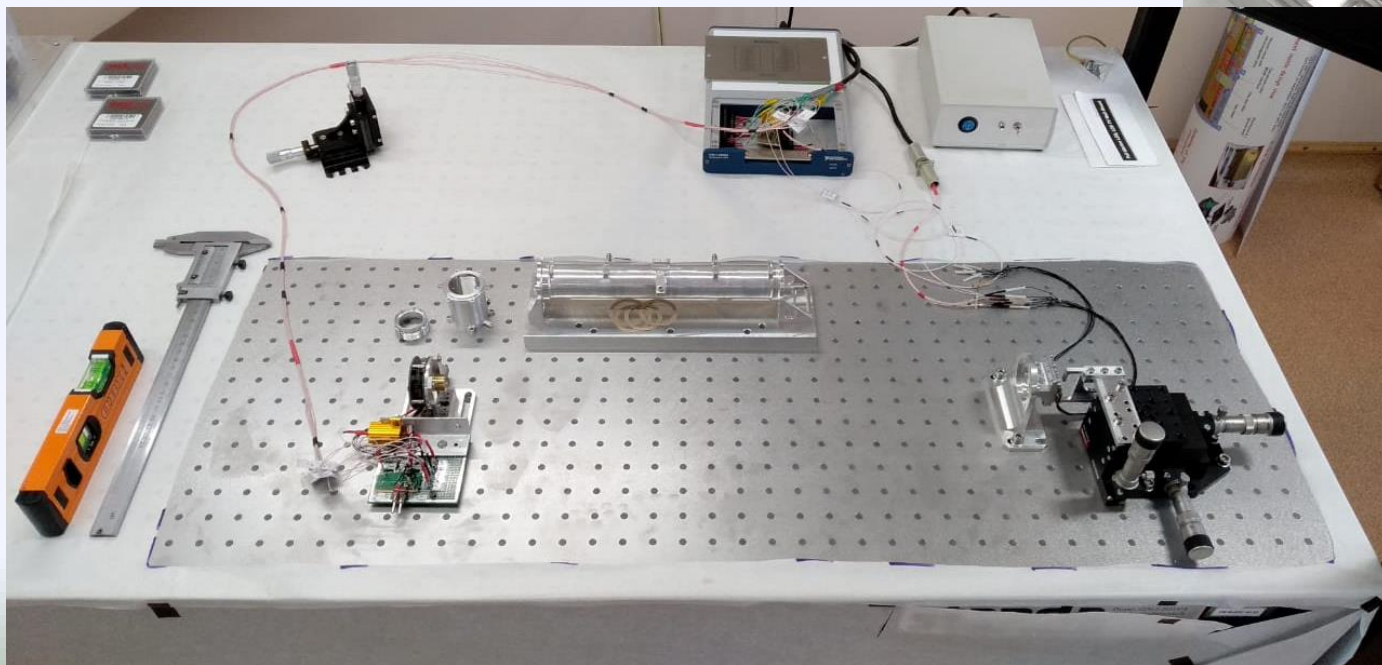
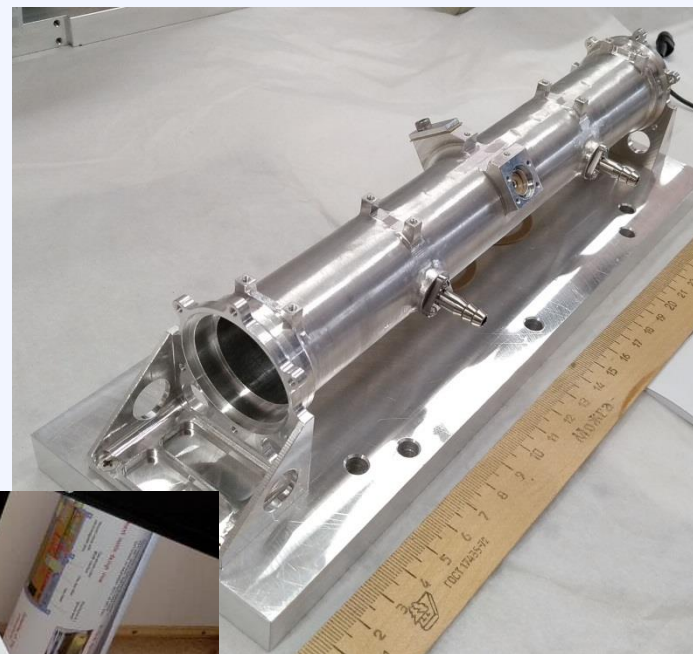
- Выполняются калибровки элементов газовой системы на вакуумном стенде рабочего места М-ДЛС



- Выполнены предварительные спектральные калибровки лазерных модулей



- Отрабатывается методика сборки и калибровки штатных оптико-электронных узлов прибора



Спасибо за внимание!

Acknowledgements

- **Early work on the M-DLS experiment was supported by:**
 - **Program 22 BR of the Presidium RAS "Fundamental processes of research and development of the Solar System";**
 - **Grant of the Ministry for Education and Science of the Russian Federation #11.G34.31.0074.**
- **Authors are grateful:**
 - **for current ROSCOSMOS contract support of the ExoMars mission industrial work**
 - **and for CNES support of the M-DLS laboratory research work.**

References

- [1] Vinogradov, I., Barke, V., Klimchuk, A., Krasnopolsky, V., Rodin, A., and the M-DLS team, M-DLS – a multichannel diode laser spectrometer for Martian studies. The 40th COSPAR Scientific Assembly, 2-10 August 2014, Moscow, Russia, report #B0.2-0038-14STW-L-118.
- [2] Vinogradov, I., Rodin, A., Fedorova, A., Ignatiev, N., Korablev, O., Roste, O., Benderov, O., Churbanov, D., Klimchuk, A., Krasnopolsky, V., Pereslavl'tseva, N., Semenov, V., Shaposhnikov, D., Ushakov, A., Kalyuzhnyi, A., Nadezhdinskii, A., Ponurovskiy, Ya., Durry, G., Joly, L., Cousin, J., Amarouche, N., Labadie, L., Sornig, M., Thomson, R., Moiseev, P., Diode laser spectroscopy for the stationery landing platform of the ExoMars-2018 mission, 10th International Conference on Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLS-2015), July 6-10, 2015, Moscow, Russia, invited report #L10, Book of abstracts, P.14-15.
- [3] Webster, C. R., Mahaffy, P. R., Flesch, G. J., Niles, P. B., Jones, J. H., Leshin, L. A., Atreya, S. K., Stern, J. C., Christensen, L. E., Owen, T., Franz, H., Pepin, R. O., Steele, A., the MSL Science Team, Isotope Ratios of H, C, and O in CO₂ and H₂O of the Martian Atmosphere, Science, Vol. 341, 19 July 2013, P.260-263.

- [4] I. Vinogradov, A. Klimchuk, K. Alexandrov, V. Barke, O. Benderov, A. Fedorova, M. Gerasimov, N. Ignatiev, V. Kazakov, T. Kozlova, Yu. Lebedev, M. Patsaeva, A. Rodin, O. Roste, A. Sapgir, V. Semenov, M. Spiridonov, A. Venkstern, A multichannel diode laser spectrometer for *in situ* study of atmosphere near the Martian surface for the ExoMars-2020 mission Landing Platform. European Planetary Science Congress (EPSC 2017) Abstracts, Vol. 11, EPSC2017-23, Riga, Latvia, 17–22 September 2017.
- [5] I. Vinogradov, A. Klimchuk, V. Barke, A. Fedorova, M. Gerasimov, V. Kazakov, T. Kozlova, Yu. Lebedev, M. Patsaeva, A. Rodin, O. Roste, V. Semenov, M. Spiridonov, A. Venkstern, A multichannel diode laser spectrometer experiment on board of the ExoMars-2020 mission Landing Platform for *in situ* study of atmosphere near the Martian surface. The Eighth Moscow Solar System Symposium (8M-S³), 8MS3-PS-66, Moscow, 9-13 October, 2017.