



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

# Эксперимент ИСКРА-В (Измерение Сернистых Компонент Разрежаемой Атмосферы Венеры) отечественного проект «Венера-Д».

Виноградов И.И. [imant@iki.rssi.ru](mailto:imant@iki.rssi.ru), Беляев Д.А. [dbelyaev@iki.rssi.ru](mailto:dbelyaev@iki.rssi.ru),

*Барке В.В., Герасимов М.В., Засова Л.В., Игнатъев Н.И., Кораблёв О.И., Лебедев Ю.В., Фёдорова А.А.  
ИКИ РАН, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32*

*Бендеров О.В., Климчук А.Ю., Краснопольский В.А., Родин А.В., Семёнов В.М.  
МФТИ, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

*Надеждинский А.И., Понуровский Я.Я., Спиридонов М.В.  
ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38*



23-й Общероссийский семинар по диодной лазерной спектроскопии  
им. А.М.Прохорова (ДЛС-23)  
ИОФ РАН, Москва, 27.10.2015

# Общие сведения о Венере

- ✓ Ближайшая к Земле планета (0.7 а.е.);
- ✓ Схожа с Землей по размеру, массе и количеству получаемой солнечной энергии;
- ✓ Условия у поверхности:  $T \sim 450^\circ\text{C}$ ,  $p \sim 90$  бар;
- ✓  $\text{CO}_2$ -атмосфера с гигантским парниковым эффектом ( $\Delta T \sim 500^\circ\text{C}$ );
- ✓ Отсутствие магнитного поля;
- ✓ Отсутствие времен года;
- ✓ Период вращения – 243 земных суток (обратное вращение);
- ✓ Солнечные сутки – 117 земных суток;
- ✓ Суперротация облаков (100 м/сек, ~4 суток)



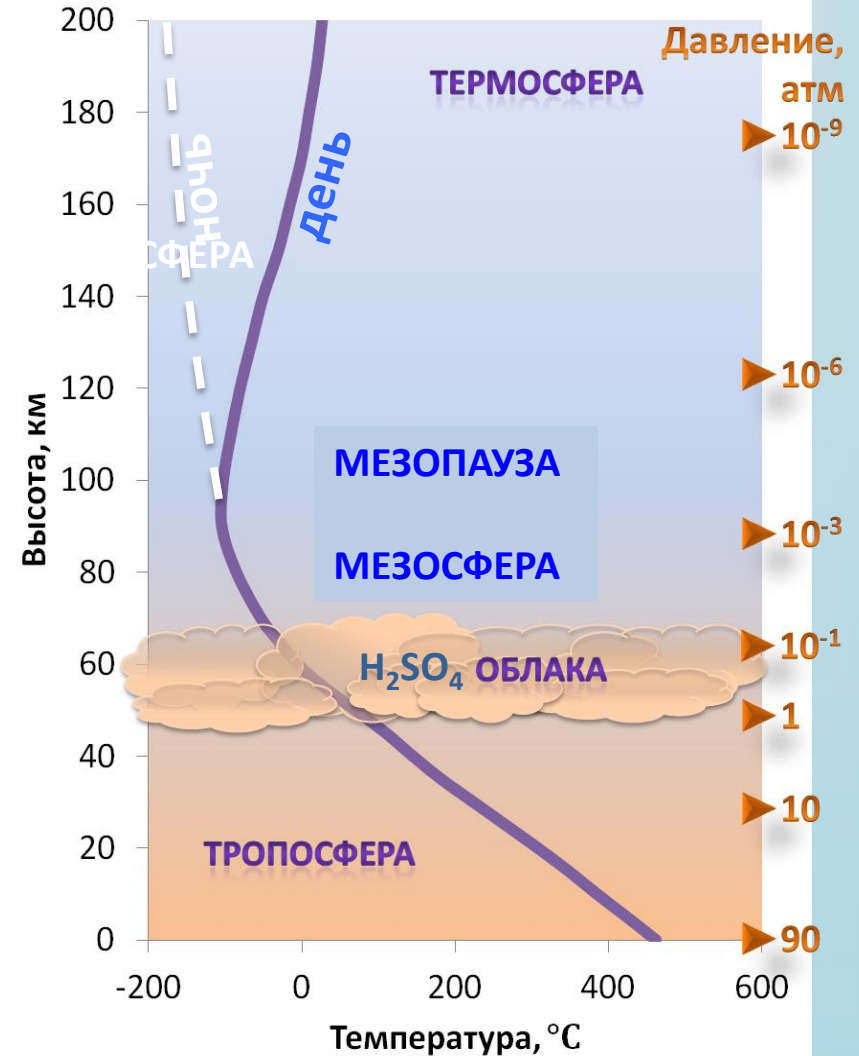
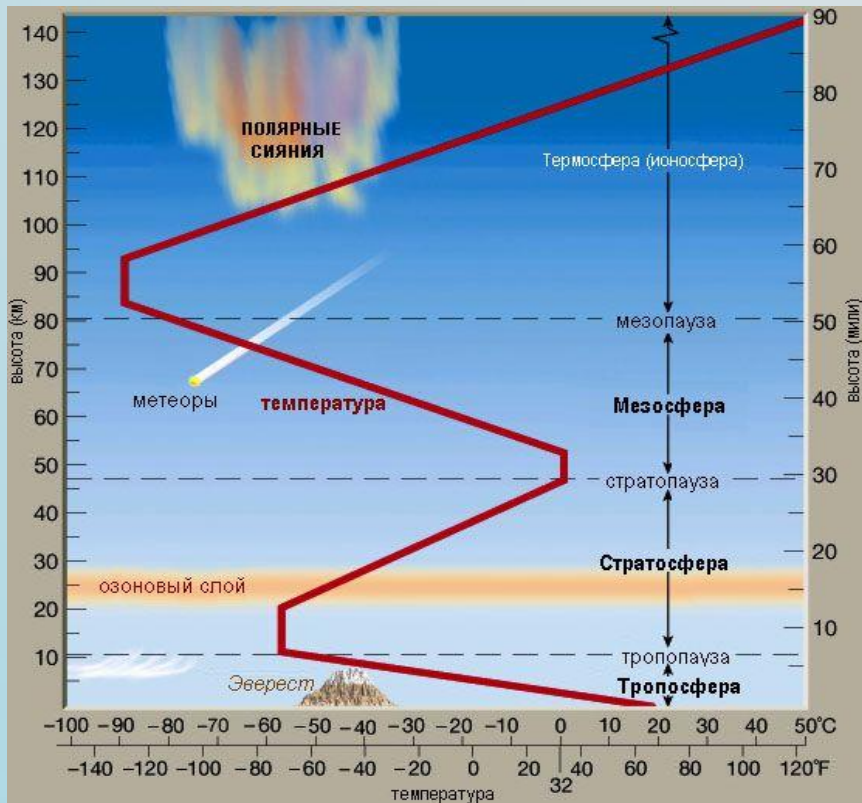
	Венера	Земля
Масса, $M_3$	0.82	1
$g$ , $\text{м/с}^2$	8.87	9.8
Плотность [ $\text{г/см}^3$ ]	5.24	5.515
Альбедо	0.65	0.3
$T_{\text{эфф}}$ , $^\circ\text{C}$	-45	-24
$T_{\text{пов}}$ , $^\circ\text{C}$	450	14
Давление	90 атм	1 атм <sup>2</sup>

# Температурная структура атмосферы

## Венера

Отсутствие стратосферы;  
Наличие криосферы на ночной стороне

## Земля



# Начало космических экспериментов на Венере

1962 год

Первая удачная экспедиция к другой планете (Венера) - «Маринер-2» (США). Пролет около Венеры на расстоянии 35 тыс. км. Измерения радиояркостной температуры по диску планеты показали соответствие гипотезе о высокой температуре её поверхности.



1967 год

Первый научный эксперимент на другой планете (Венера) - аппарат «Венера-4» (СССР). Спустился в атмосферу до 25 км и измерил ее температуру (до 535°K), давление, скорость ветра и химический состав ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  в интервале высот 25-55 км). Данные передавались в течение 94 мин до разрушения КА.





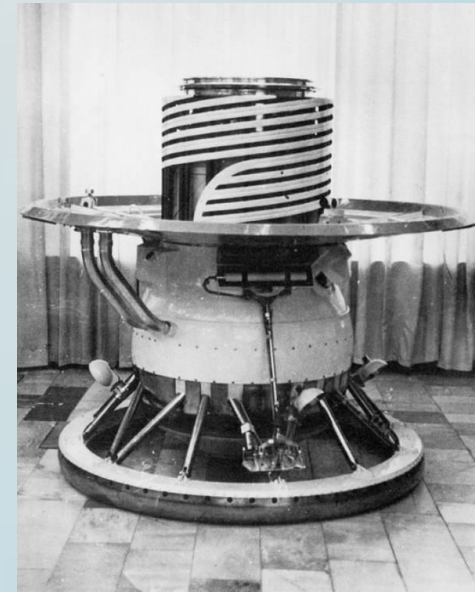
# Начало космических экспериментов на Венере

15 декабря 1970 года

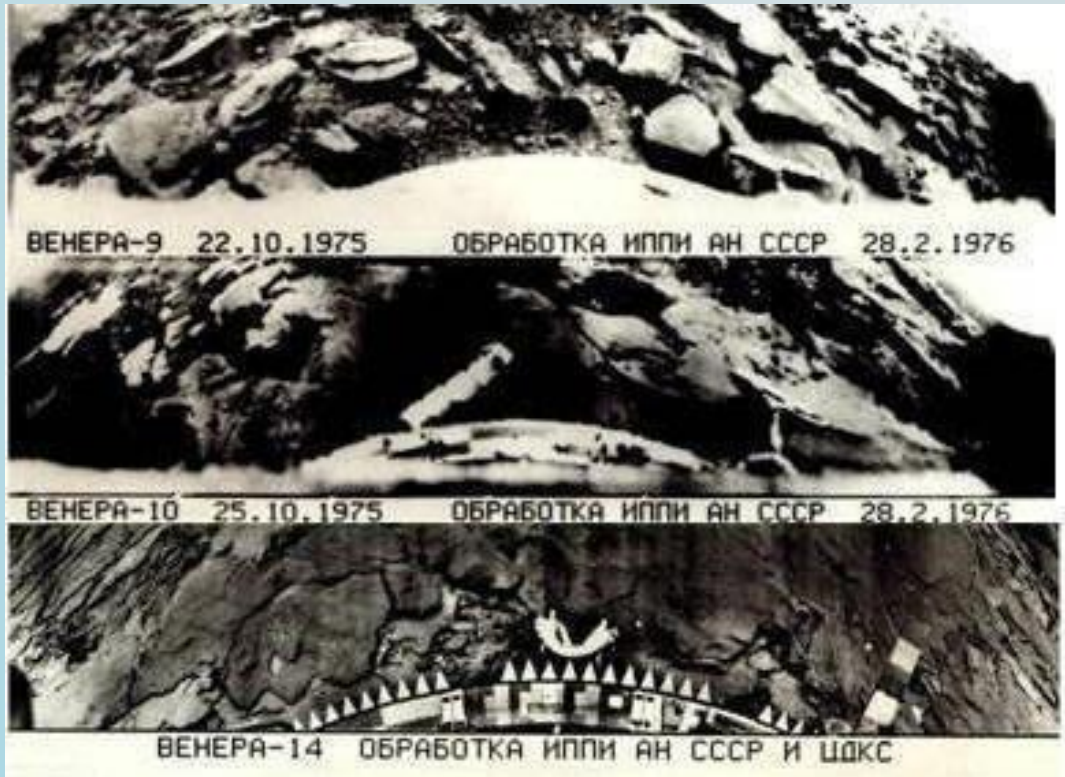
Первая мягкая посадка на поверхность другой планеты (Венера) - аппарат «Венера-7» (СССР). 23 мин передачи телеметрии с поверхности Венеры, температура на поверхности 747°K.

22 июля 1972 года

Мягкая посадка аппарата «Венера-8», передача телеметрии после посадки 50 мин. Температура атмосферы 743°K, давление - 93 бар.



«Венера-9» (1975г.)  
Первая съемка  
поверхности Венеры



Снимки поверхности  
(Венера - 9, 10, 14)

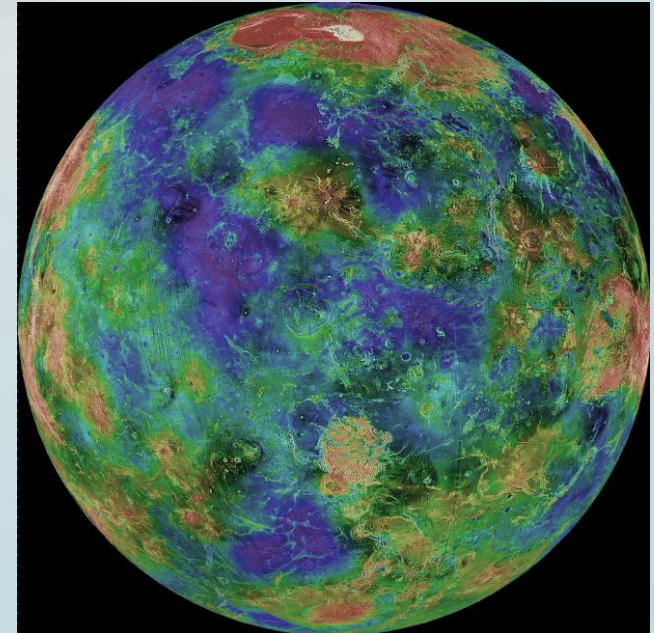
# Освоение Венеры

## Эра №1: 1962-1990 годы

Более 20 аппаратов СССР и США (пролетные, орбитальные, спускаемые, атмосферные баллоны) [Мороз В.И. и др., Планетные экспедиции XX века, Космические исследования, 2002, т. 40, № 5, с. 451-481]



Миссии Вега 1-2



Радиолокация (Магеллан)

## Эра №2: 2004-2015 годы

Мессенджер 2004 (пролет), Венера-Экспресс 2006-2015 (орбитальный КА), Акацуки 2010 (неудачный подлет)

Проект: The Surface and Atmosphere Geochemical Explorer (SAGE) - предложение не прошло конкурсный отбор НАСА.

**Венера-Д - отечественный проект 2020-х !**



# Освоение Венеры

Космический орбитальный аппарат  
«Венера Экспресс»

Европейского Космического Агентства:

Запуск: 9 Ноября 2005

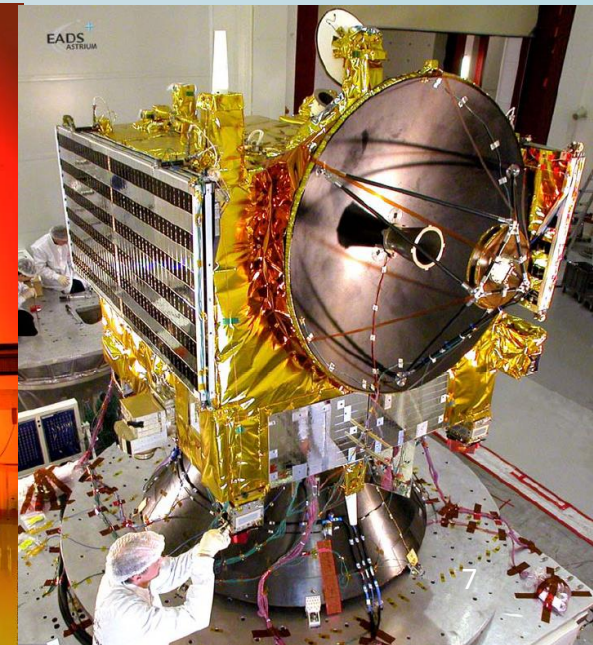
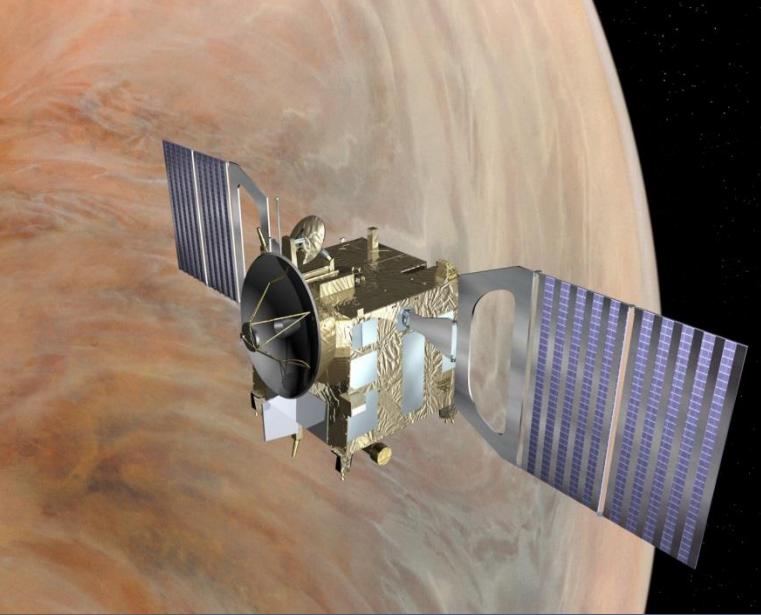
(Байконур, РН «Союз-Фрегат»)

Выход на орбиту: 11 Апреля 2006

Начало научной миссии: 4 Июня 2006

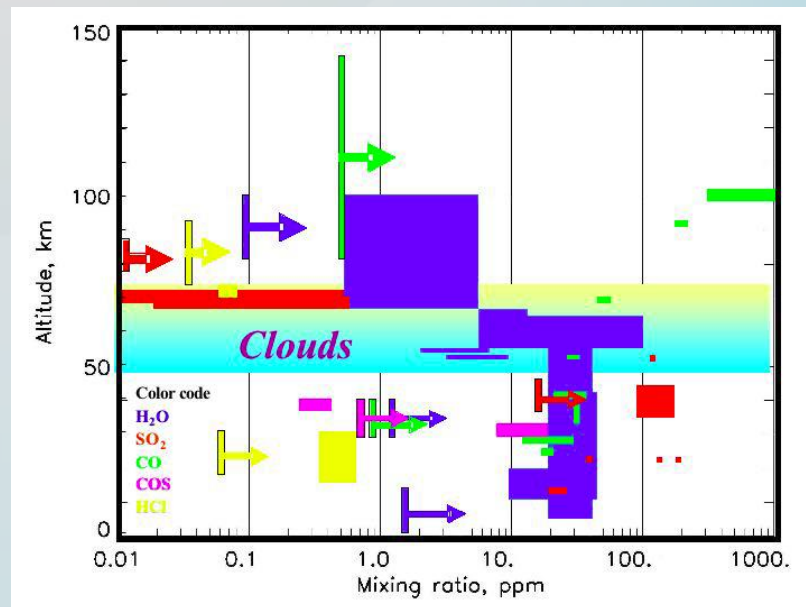
- ✓ всестороннее исследование состава и динамики атмосферы Венеры

От КА Mars Express (2003)... до КА Venus Express (2005-2015)!



# Отечественный проект «Венера-Д»

Проект «Венера Д» предназначен для длительных исследований Венеры. Целью проекта является продолжение фундаментальных исследований Венеры, активно проводившихся в 60-80 годы и начале девяностых советскими и американскими миссиями. За эти годы был получен большой объем данных, касающихся строения и состава атмосферы, облачного слоя, скоростей ветра, состава поверхности. Однако многие вопросы, связанные с динамикой атмосферы, проблемами суперротации, гигантского парникового эффекта, эволюции Венеры и др. остались нерешенными. Впечатляющие результаты получены европейским орбитером Венера Экспресс, однако, многие вопросы не могут быть решены с орбитера.



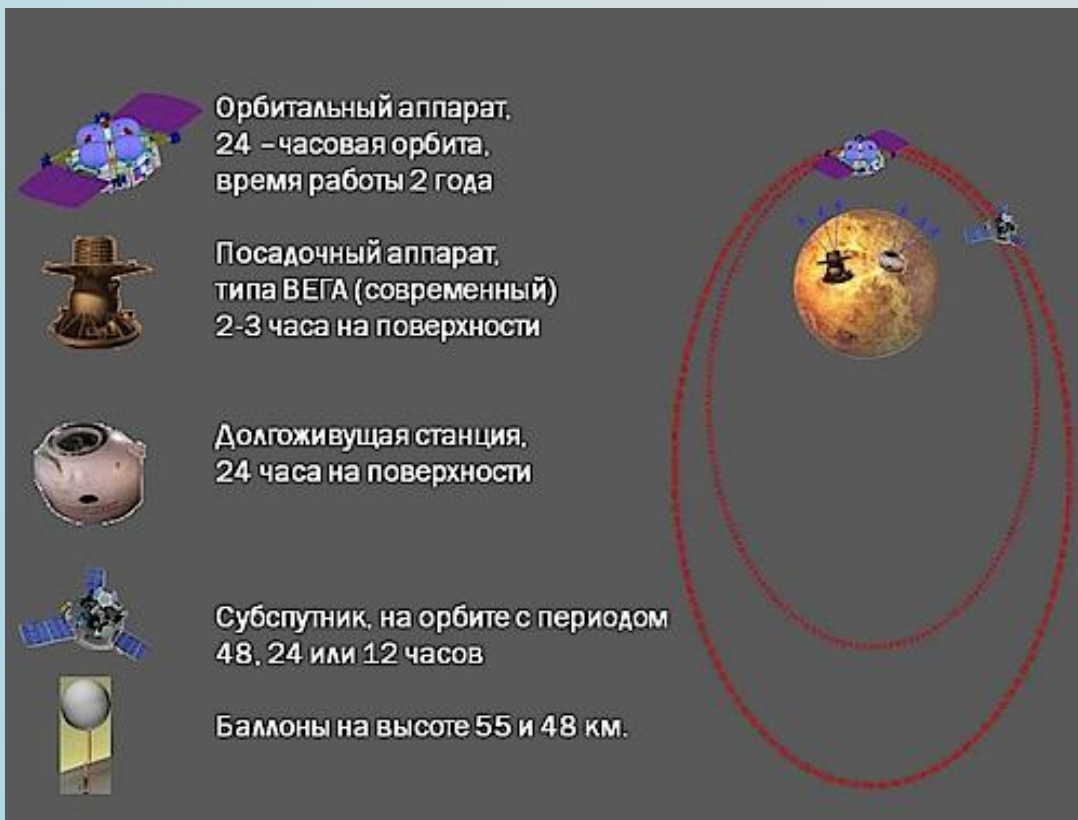
Проект «Венера-Д» должен обеспечить новый качественный уровень научных исследований планеты, когда наблюдаемые природные явления, происходящие на планете, можно одновременно изучать как с орбиты, так и находясь на поверхности Венеры.

Атмосферное давление		9 321,9 кПа
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	96,5%
Азот	N <sub>2</sub>	~3,5%
Диоксид серы	SO <sub>2</sub>	0,015%
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	0,003%
Угарный газ	CO	0,0017%
Аргон	Ar	0,007%
Гелий	He	0,0012%
Неон	Ne	0,0007%
Карбонилсульфид	COS	Следы
Хлороводород	HCl	Следы
Фтороводород	HF	Следы



# Отечественный проект «Венера-Д»

Разрабатываемый космический комплекс должен обеспечить исследования структуры, энергетического баланса и динамики нижней атмосферы, строение мезосферы, термические приливы, химсостав атмосферы, включая изотопы летучих, обилие инертных газов и изотопный состав, строение и химию облаков, природу УФ-поглотителя, химический и минералогический состав, включая радиоактивные изотопы, геологию поверхности, сейсмику и вулканизм, молнии, проблему воды и процессы диссипации атмосферных составляющих и др.



Проект «Венера-Д» продолжит исследования Венеры с использованием орбитального аппарата, субспутника и посадочного аппарата, оснащённых научной аппаратурой широкого спектра. Прорабатывается включение в проект долгоживущей станции на поверхности. Такой по сложности космический проект будет осуществлен впервые. Российский и мировой опыт в области технологии космического машиностроения, в создании миниатюрных измерительных приборов и повышении качества космической радиосвязи позволит реализовать данный проект.

# Концепция проекта Венера-Д

H, He, O, N, N<sub>2</sub>, CO  
 H<sup>+</sup>, He<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, N<sup>+</sup>, C<sup>+</sup>, CO<sub>2</sub><sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, NO<sup>+</sup>

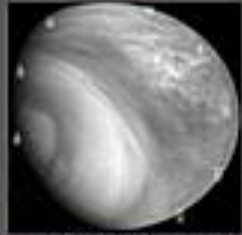
Орбитальный аппарат



CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, OH, NO emissions

100 км

H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, SO, CO, HF, HCl, HDO, ClO, BrO, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, HCS



Облака



Полярный диполь



Суперротация

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+UV-absorber?

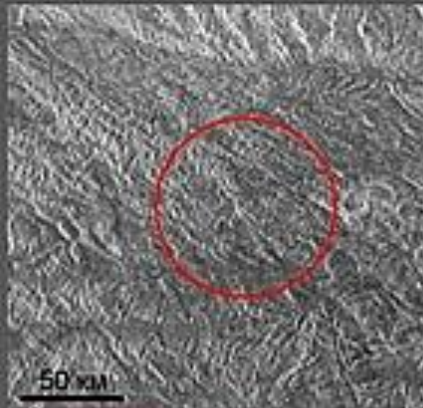
H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+crystals?

50 км

Место посадки (тессера)

Посадочный аппарат

Время спуска 30-60 мин.  
 Время жизни на поверхности 2-3 ч.



50 км



CO, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, OCS, H<sub>2</sub>S,  
 HCl, HF, Ne, Ar, Kr, Xe, O, C, N

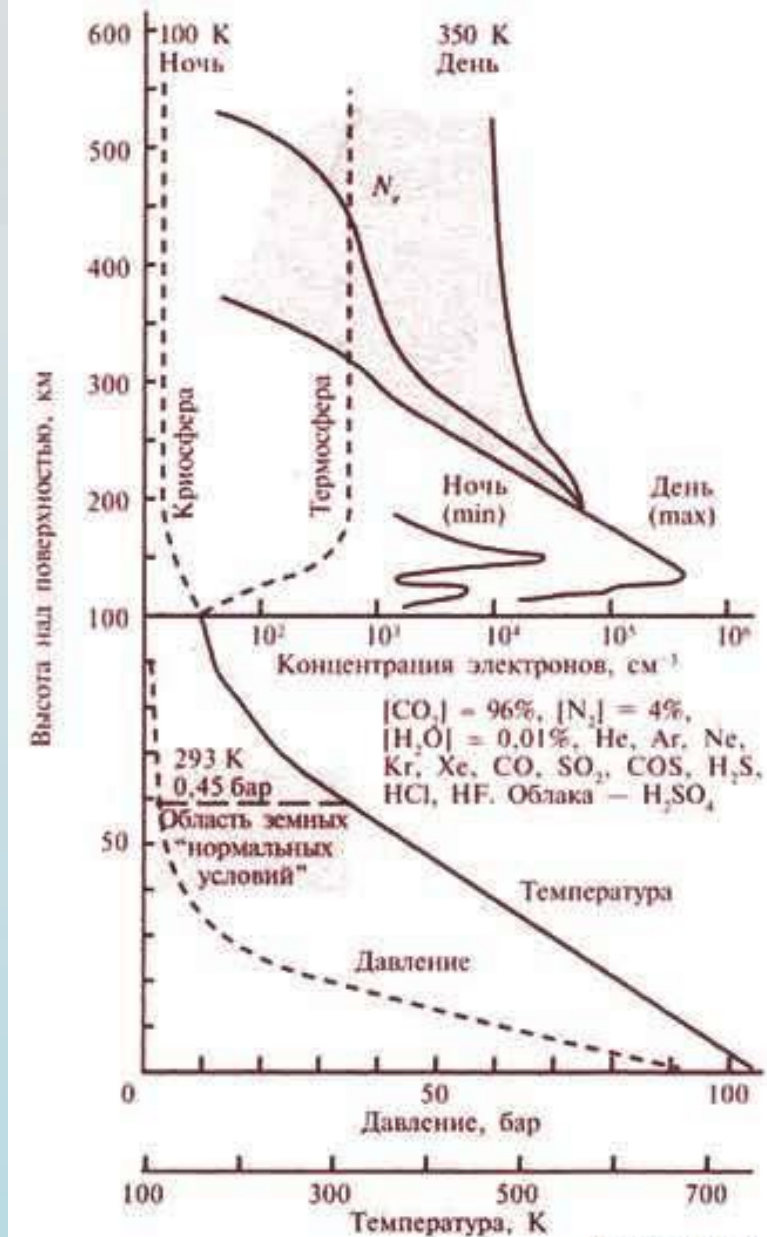
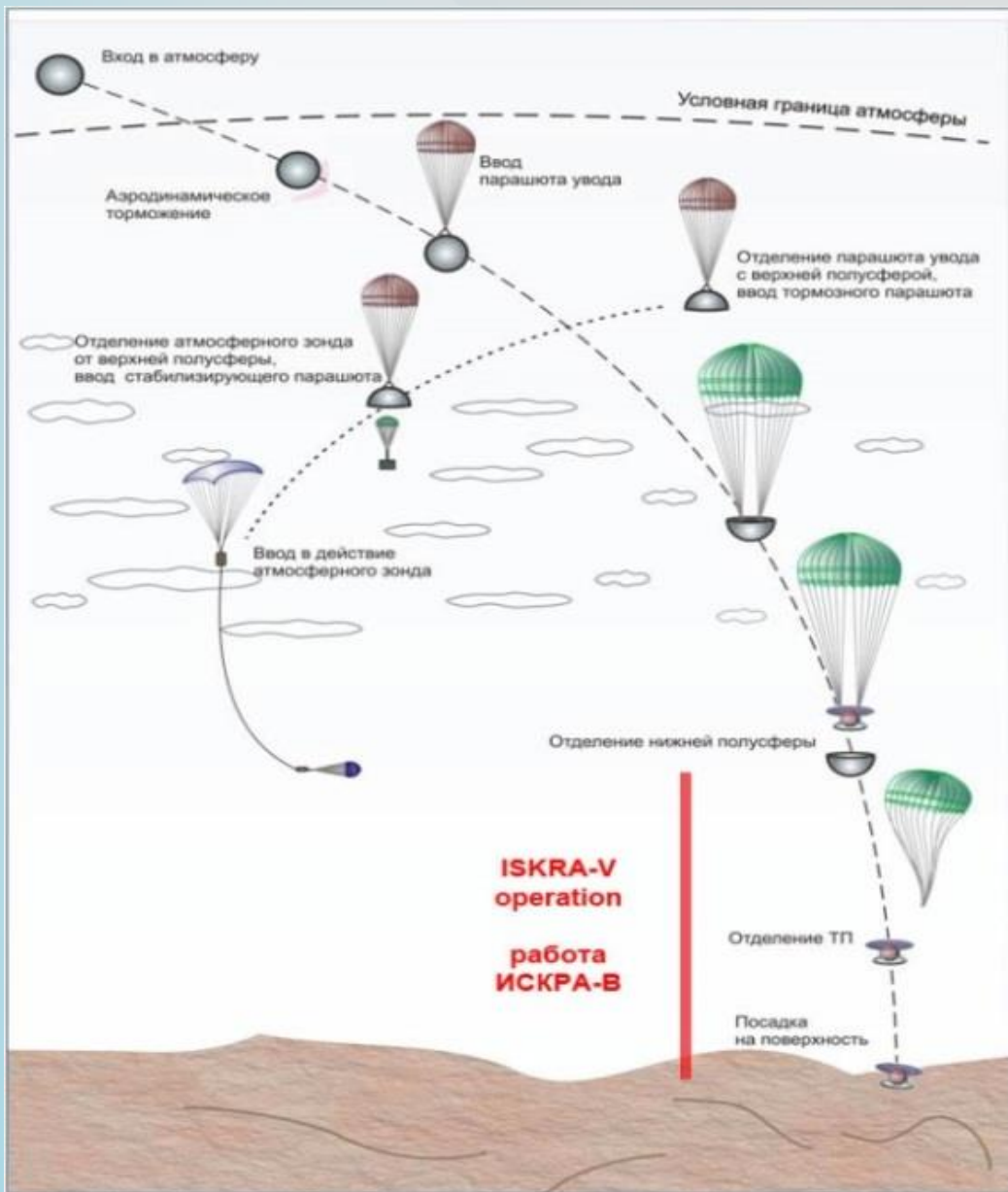
Si, O, Ca, Na, Al, Mg, Fe, Ti, K, Th, U

# Эксперимент ИСКРА-В на посадочном аппарате «Венера-Д»

- В продолжение многолетних экспериментальных исследований фотохимии атмосферы Венеры предложен эксперимент ИСКРА-В, целью которого является определение вертикальных профилей состава венерианской атмосферы, её сернистых компонент и малых газовых составляющих на траектории снижения посадочного аппарата отечественного проекта «Венера-Д».
- Активная фаза эксперимента ИСКРА-В начнётся в момент сброса защитной полусферы посадочного аппарата на высоте около 65 км и продолжится вплоть до касания аппаратом поверхности Венеры. Продолжение измерений возможно и вблизи поверхности Венеры, в зоне посадки аппарата, вплоть до исчерпания его физических ресурсов.
- Основа прибора ИСКРА-В – многоканальный диодный лазерный спектрометр (ДЛС). Последовательное включение перестраиваемых лазеров с распределённой обратной связью – набора диодных лазеров и квантовых каскадных лазеров обеспечит детальное изучение состава окружающей атмосферы. Зондирующее лазерное излучение будет просвечивать рабочий объём многосоставной многопроходной аналитической оптической кюветы, заполняемой газовой пробой венерианской атмосферы, разрежаемой до рабочего давления 50 мбар.
- Планируются измерения содержания следующих основных молекул и изотопных соотношений:  $SO_2$ ;  $CO$  и  $CO_2$ ,  $^{13}C/^{12}C$  для  $CO$  и  $CO_2$ ;  $OCS$ ,  $^{34}S/^{33}S/^{32}S$  для  $OCS$ ;  $CO_2$  и  $H_2O$ ,  $^{13}C/^{12}C$  и  $^{16}O/^{17}O/^{18}O$  для  $CO_2$ ,  $D/H$  и  $^{16}O/^{17}O/^{18}O$  для  $H_2O$ .

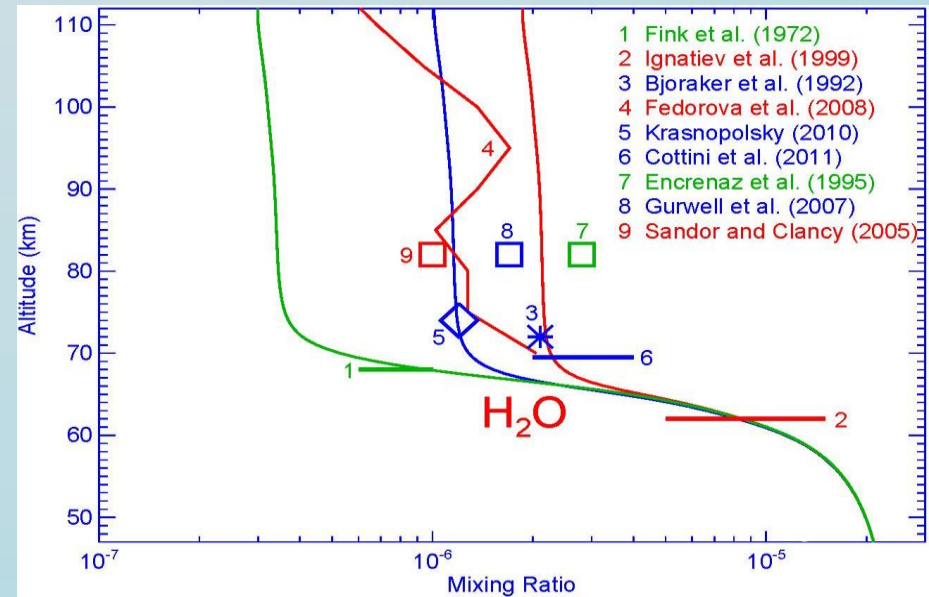
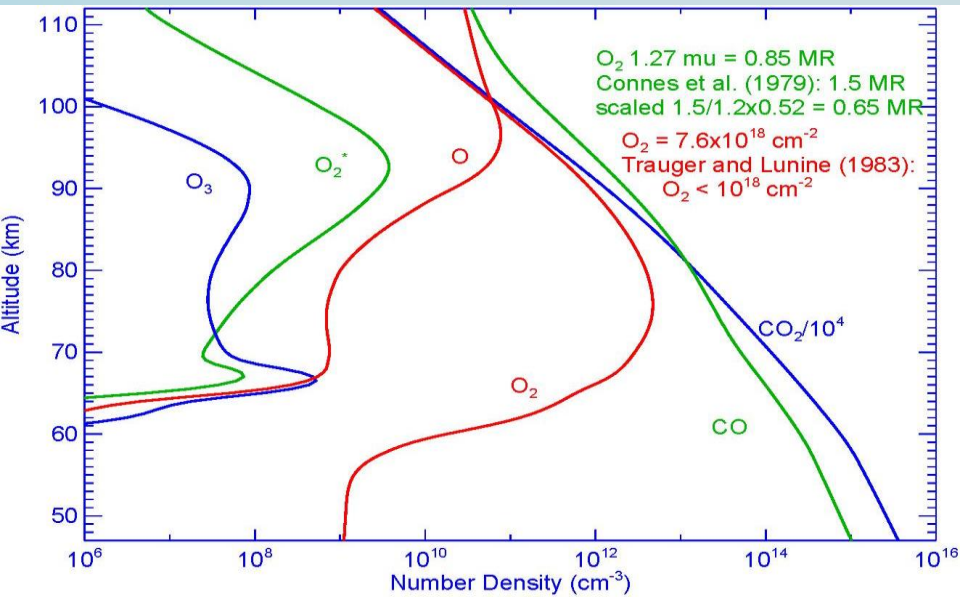
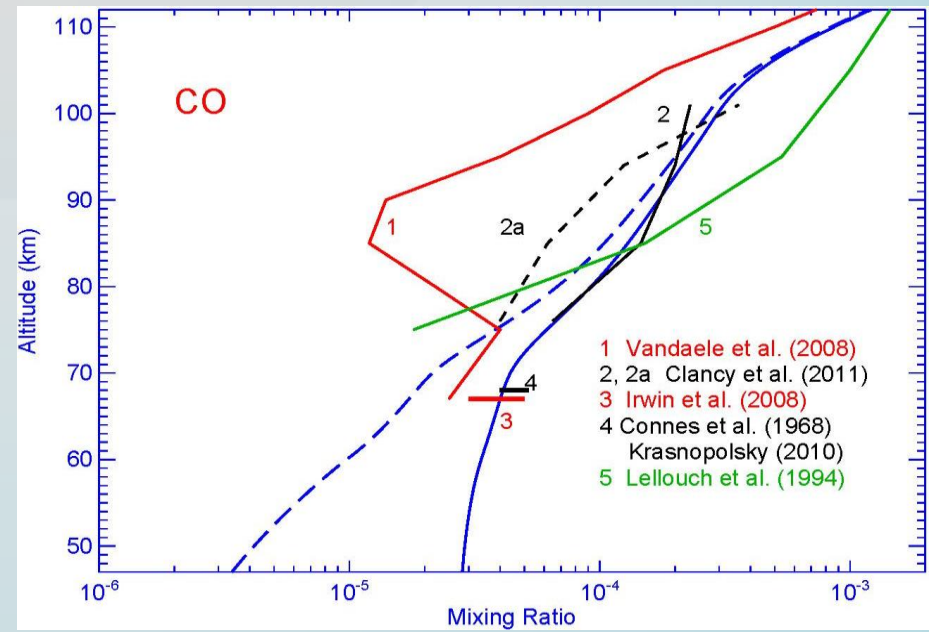
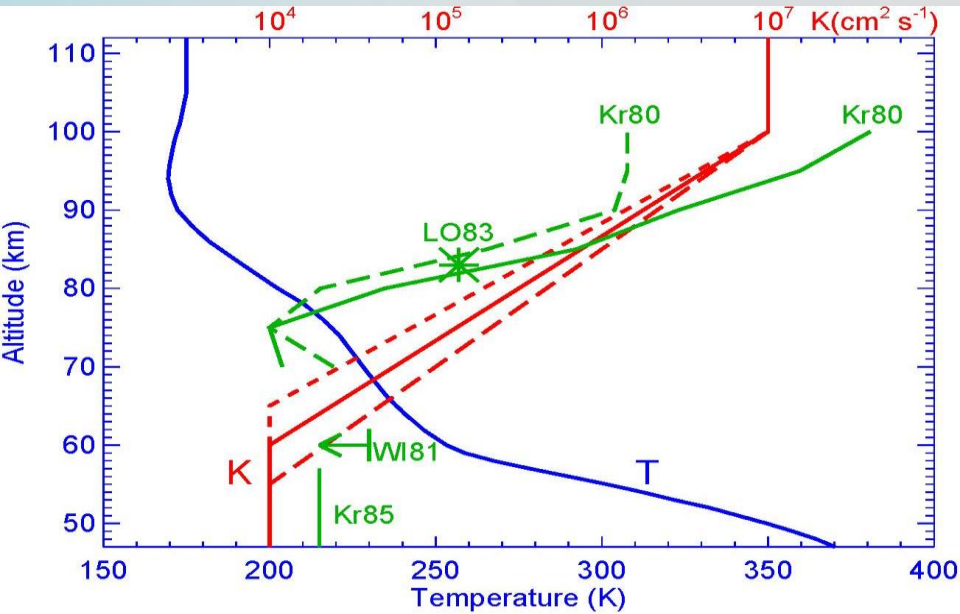


# Обстановка для сеансов измерений



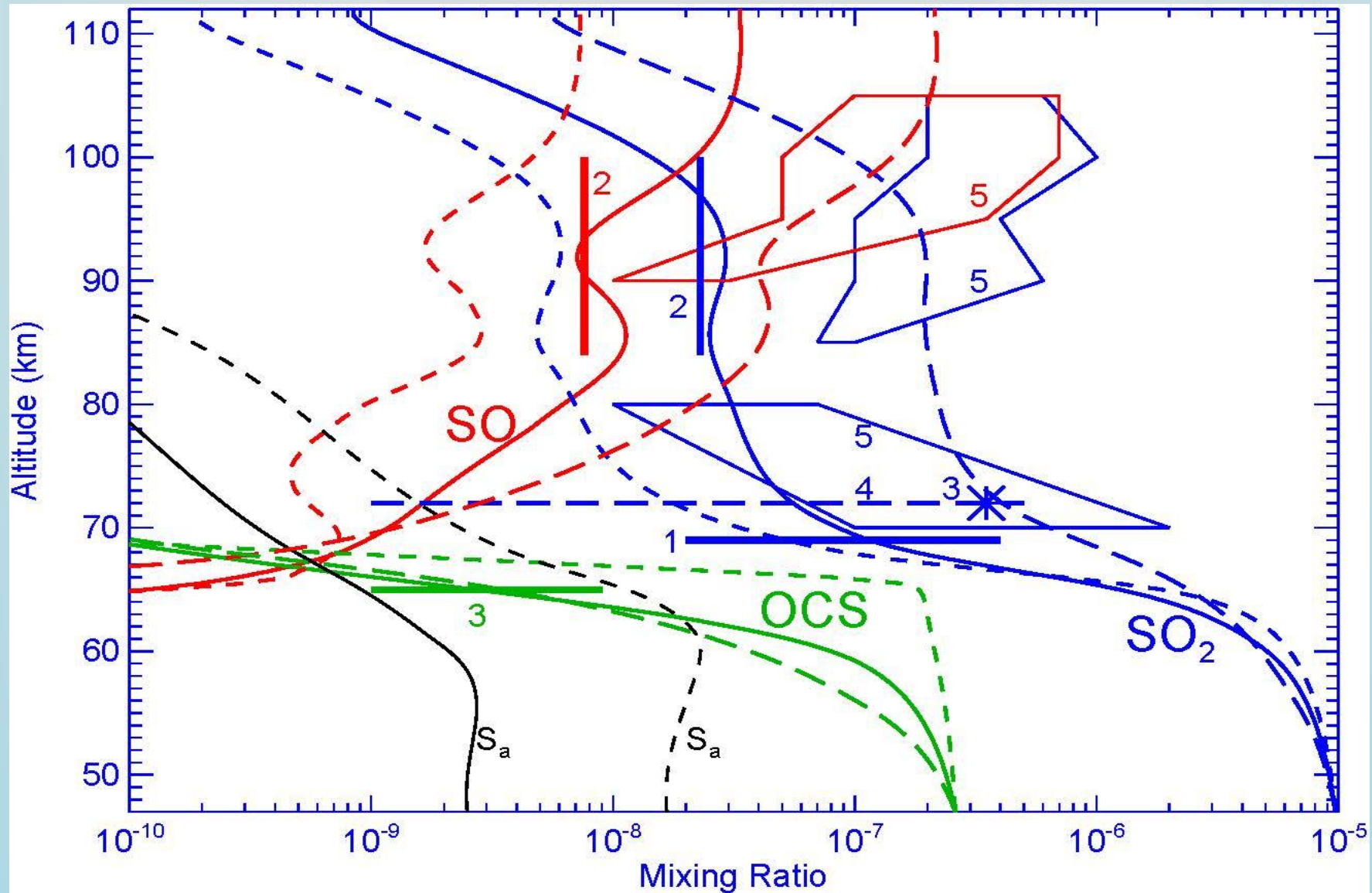
# Пример данных моделирования для высот 47-112 км

[Краснопольский В.А., 5M-S<sup>3</sup>, 15.10.2014, ИКИ РАН]



# SO<sub>2</sub>, SO, OCS, сернистые аэрозоли и их вариации

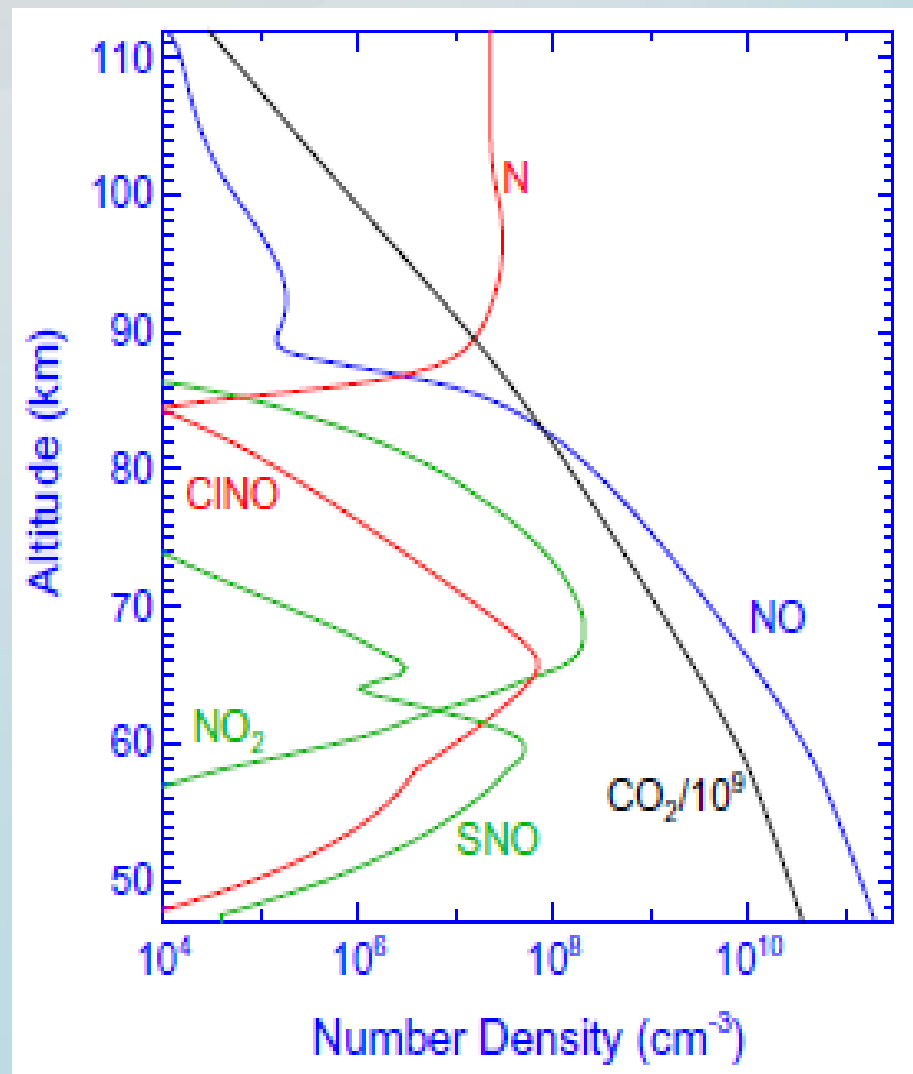
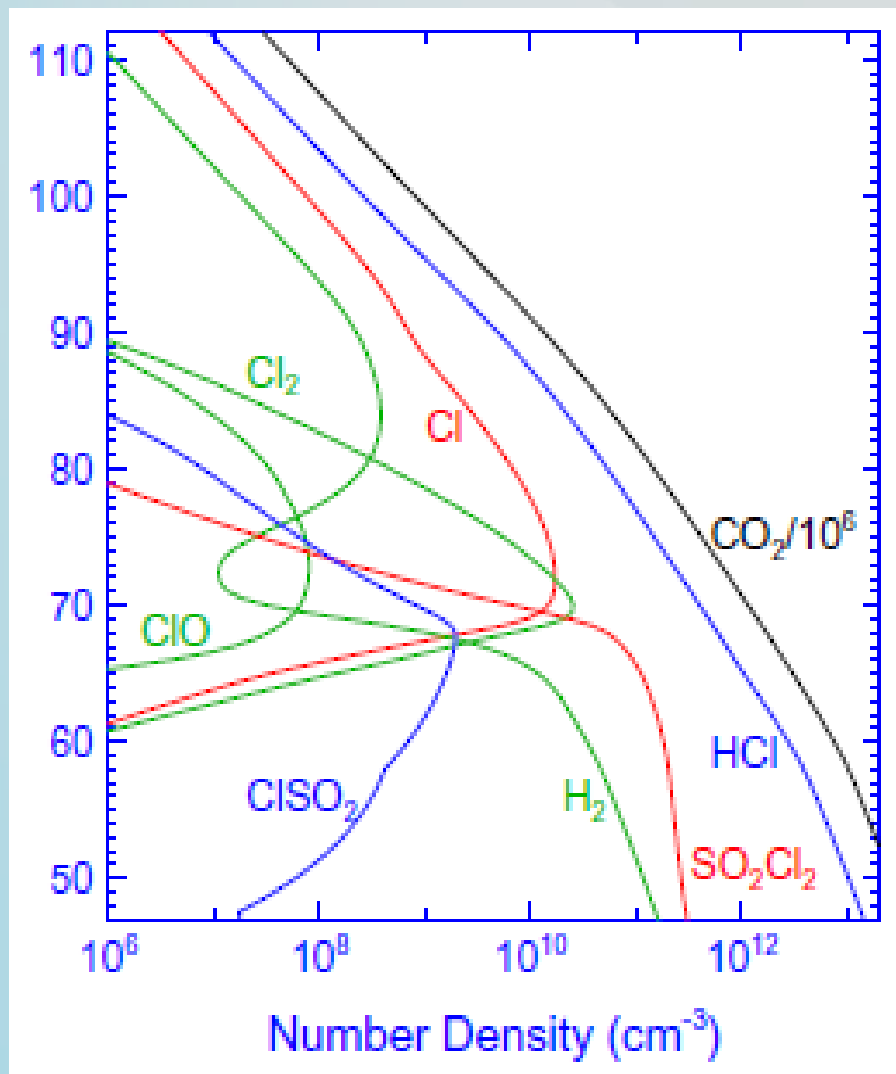
[Краснопольский В.А., 5M-S<sup>3</sup>, 15.10.2014, ИКИ РАН]





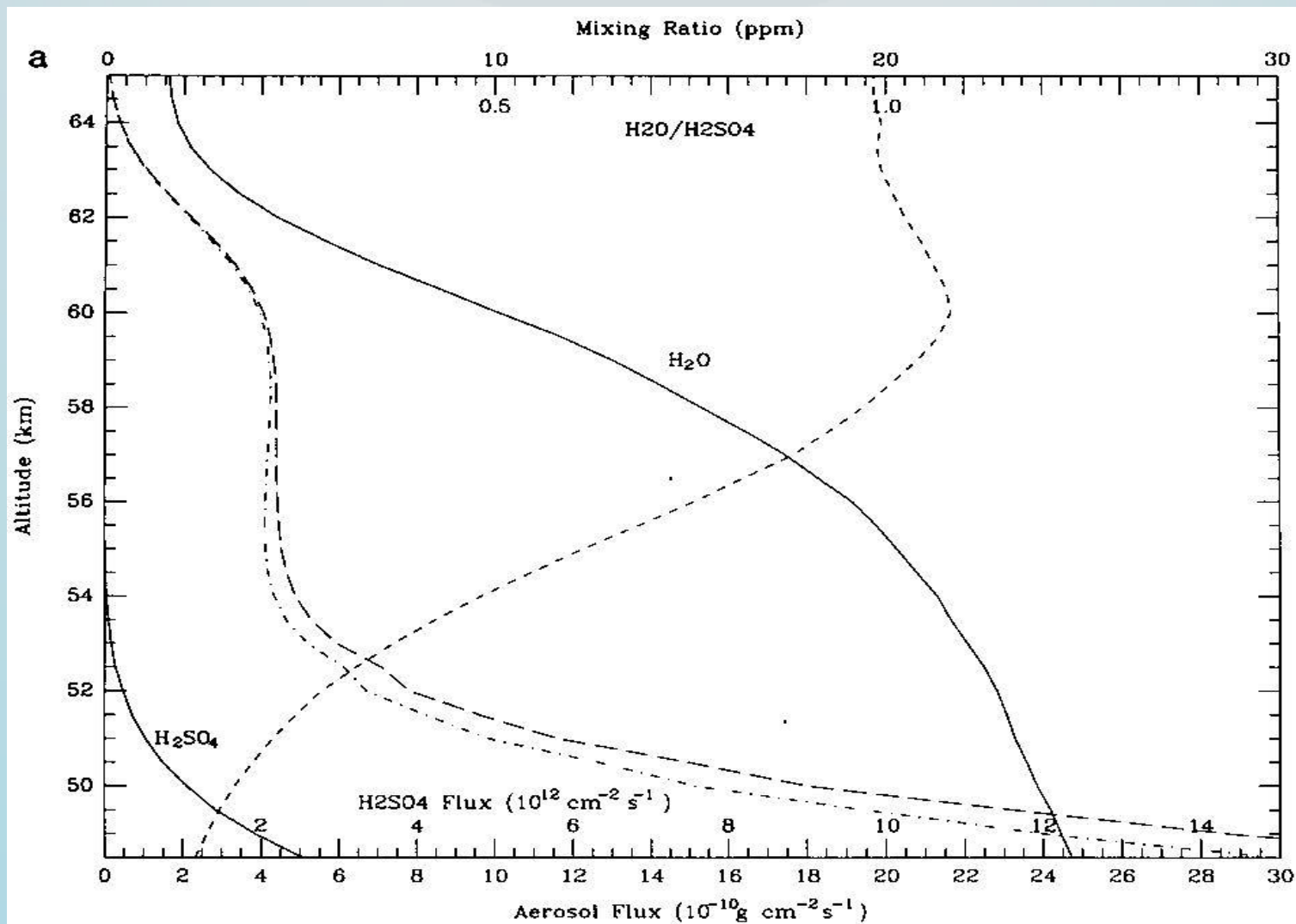
# H<sub>2</sub>, хлористые и азотистые компоненты

[Краснопольский В.А., 5M-S<sup>3</sup>, 15.10.2014, ИКИ РАН]



# Взаимобусловленная диффузия и конденсация $\text{H}_2\text{O}$ и $\text{H}_2\text{SO}_4$ [Kr Pollack 1994]. Несоответствие с параметром 79% в нижнем облачном слое от [Arney et al. 2014].

[Краснопольский В.А., 5M-S<sup>3</sup>, 15.10.2014, ИКИ РАН]



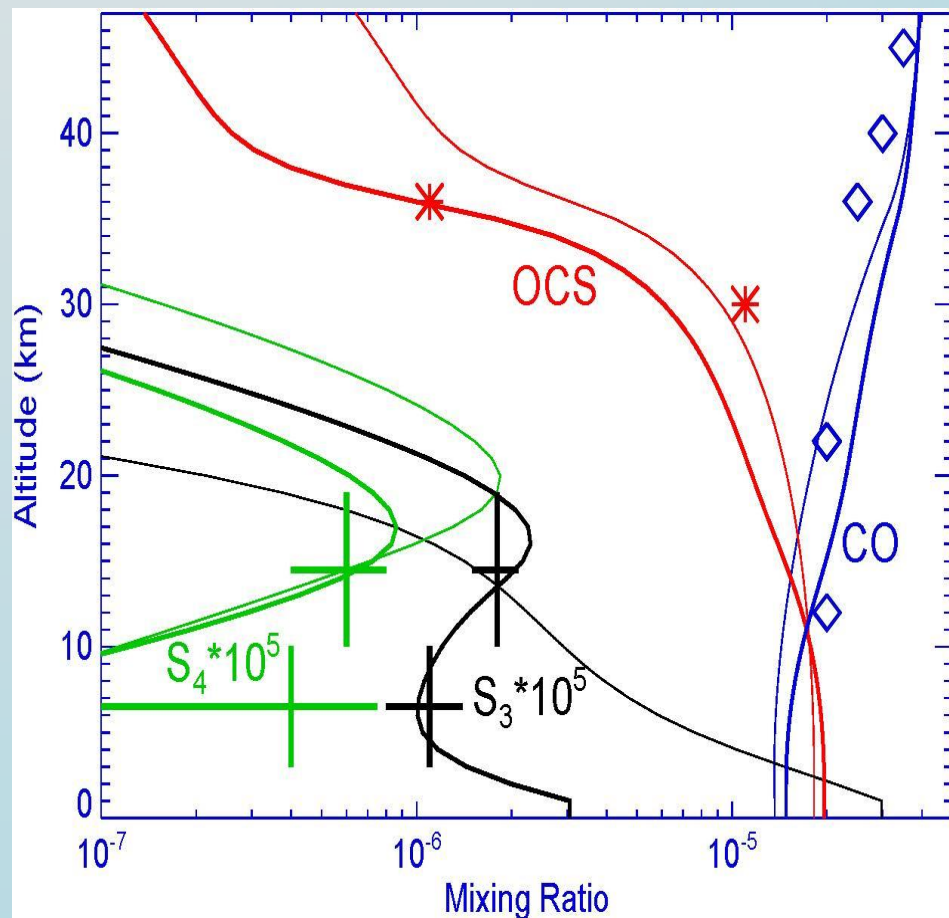
**Химия в области нижней атмосферы обусловлена :**

- (1) потоками  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и  $\text{CO}$  от средних слоёв атмосферы,
- (2) термохимическими реакциями,
- (3) фотолизом  $\text{S}_3$  и  $\text{S}_4$ .

*[Краснопольский В.А., 5M-S<sup>3</sup>, 15.10.2014, ИКИ РАН]*

## Измеряемые переменные составляющие

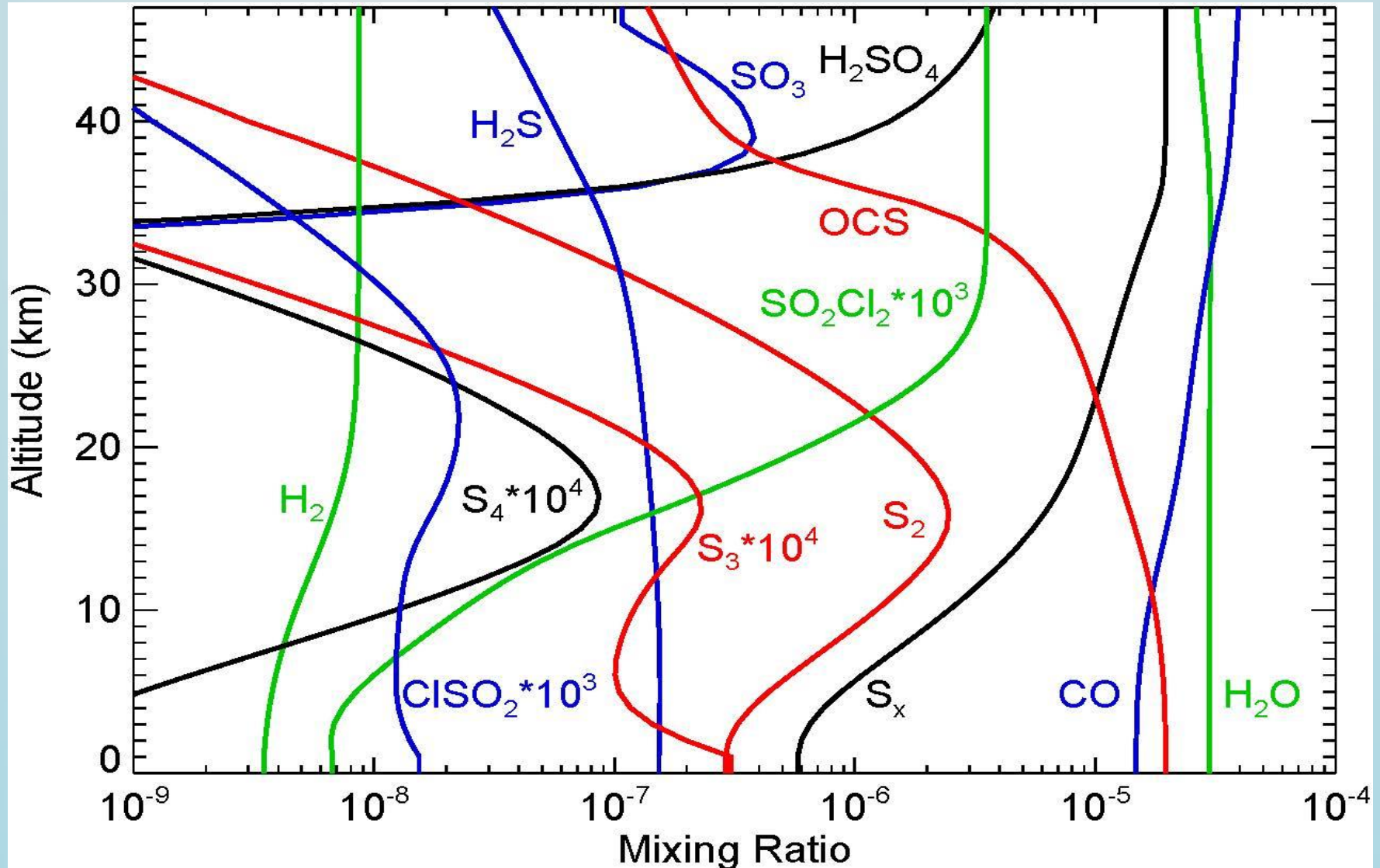
- $\text{OCS} + \text{S}_x = 20 \text{ ppt}$
- $\text{OCS} + \text{CO} = 37 \text{ ppt}$
- $\text{S}_x$  формируется около 36 км,  $\text{S}_8 = 2.5 \text{ ppt}$  выше 40 км, конденсируется около 50 км и подвержена турбулентной диффузии. Не может служить основным NUV поглотителем, возникающим около верхнего облачного слоя.



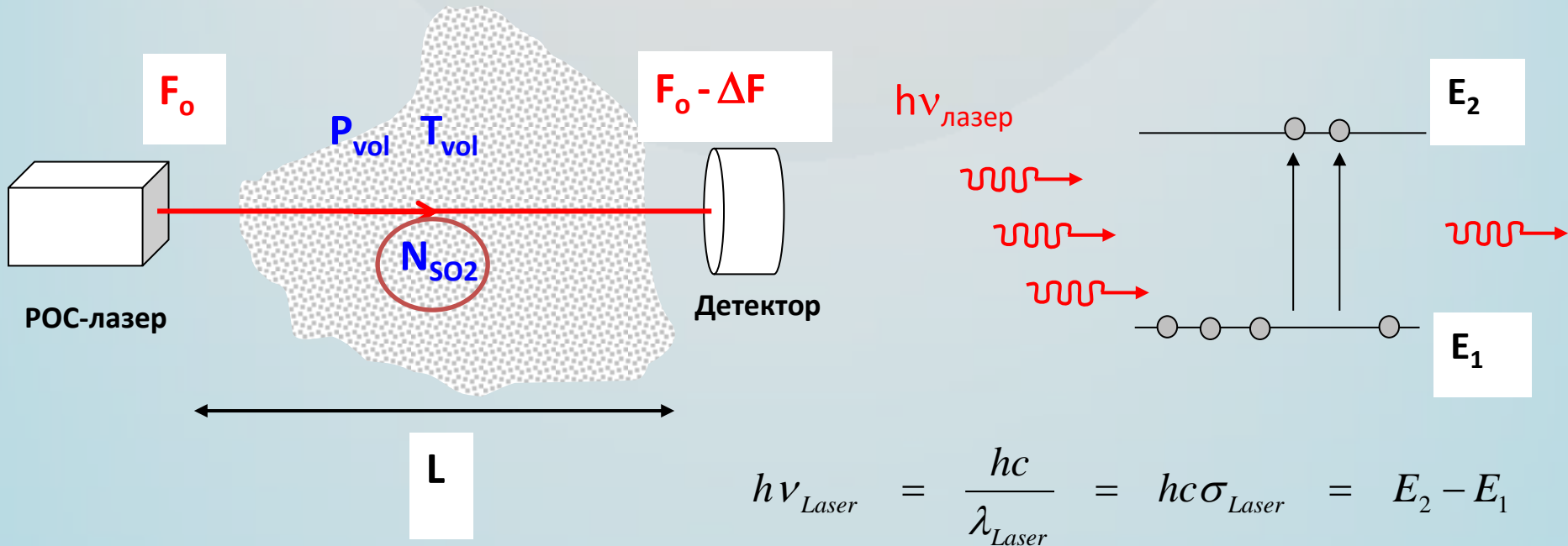


# Модельные вертикальные профили наиболее распространённых составляющих

[Краснопольский В.А., 5M-S<sup>3</sup>, 15.10.2014, ИКИ РАН]



# Основы диодной лазерной спектрометрии



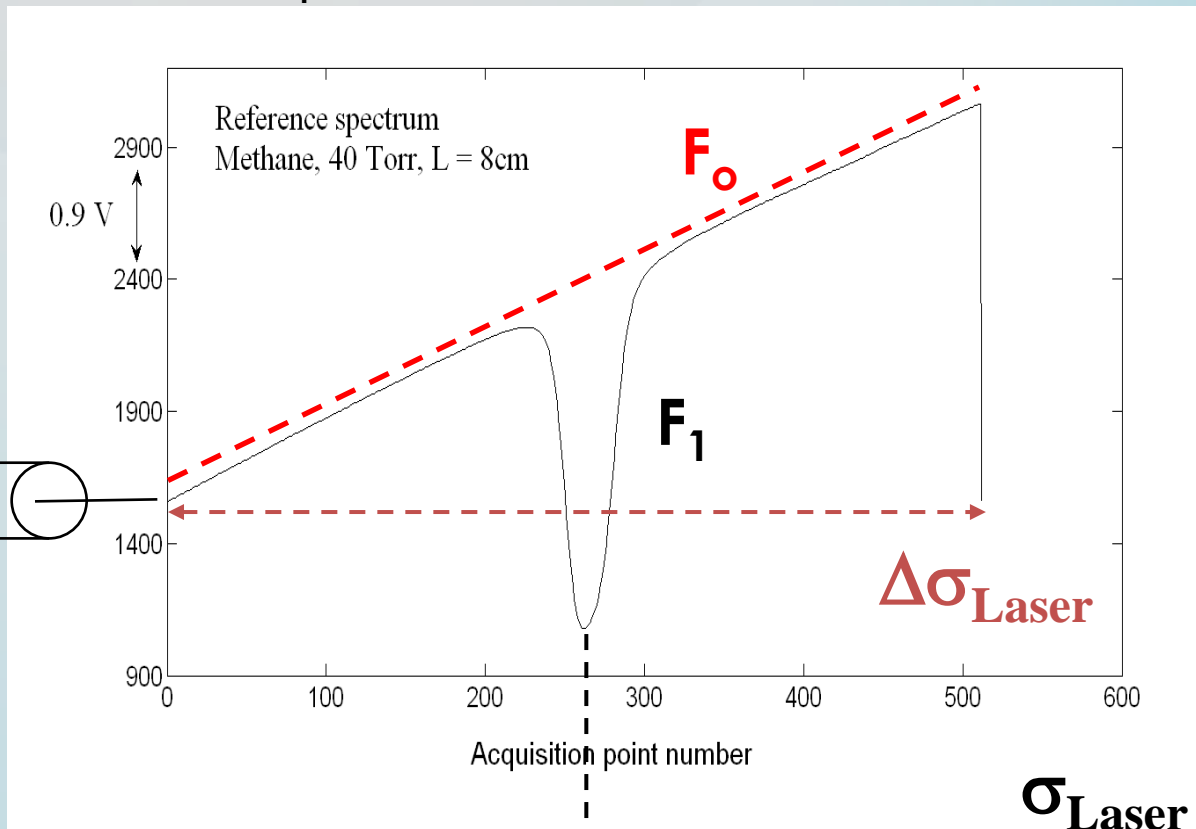
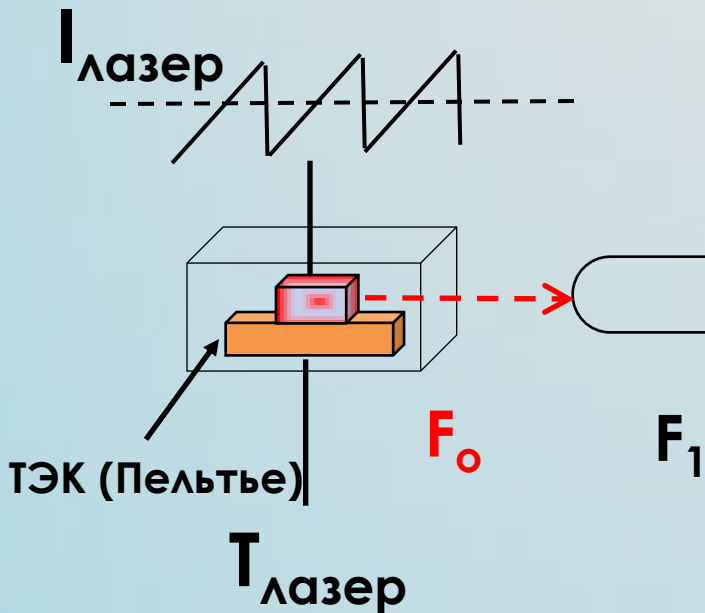
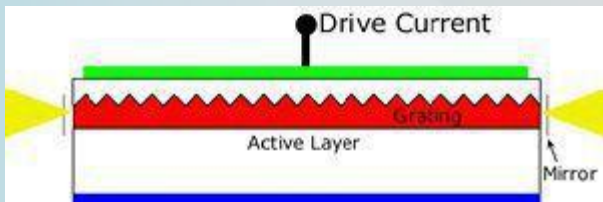
Закон Бугера-Ламберта-Бера, приближение слабого молекулярного поглощения  $\Delta F/F_0 < 1\%$ :

$$A_{mol}(\sigma) = \frac{\Delta F}{F_0} \approx \underbrace{k(T_{atmos}) \times \phi(T_{atmos}, P_{atmos}, \sigma)} \times L \times N_{SO_2}$$

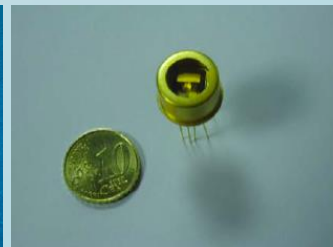
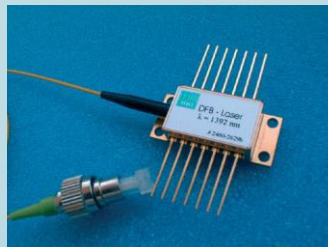
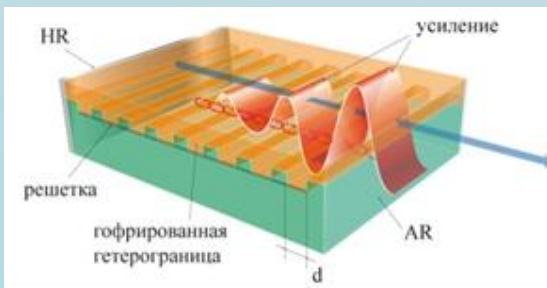
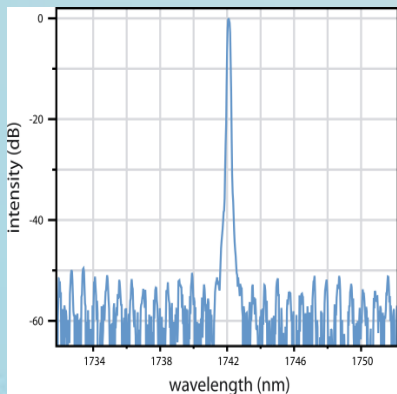
Табличные параметры молекулярного поглощения (NITRAN, лабораторные данные ...)

# Базовый способ регистрации оптических спектров поглощения газовой компоненты атмосферной пробы

$\text{CH}_4$ , 40 торр, 8 см,  $\lambda \sim 1,65$  мкм



$$S_{\text{лазер}}(T_{\text{лазер}}, I_{\text{лазер}}) = S_{\text{мол}}$$

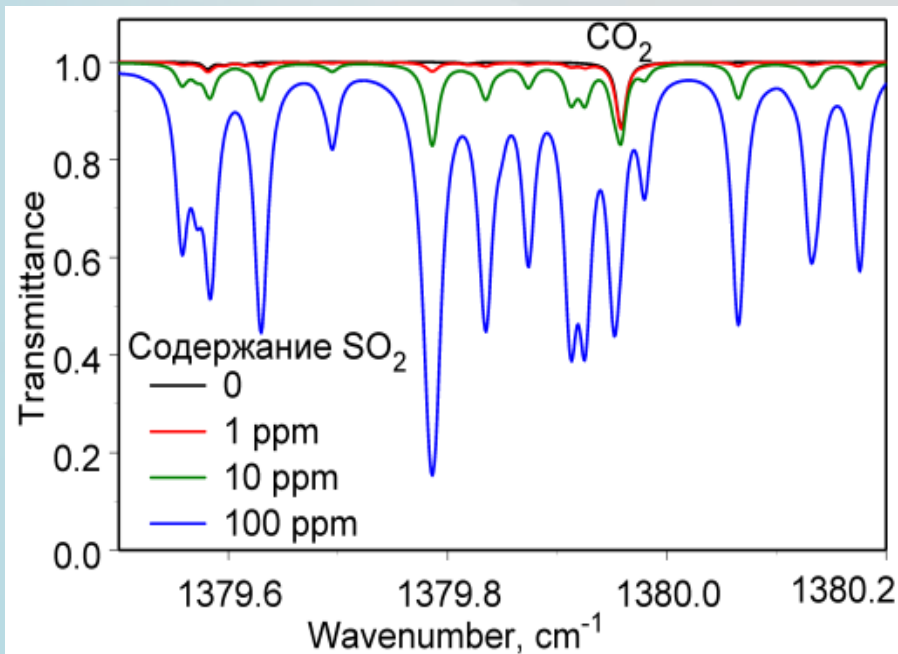




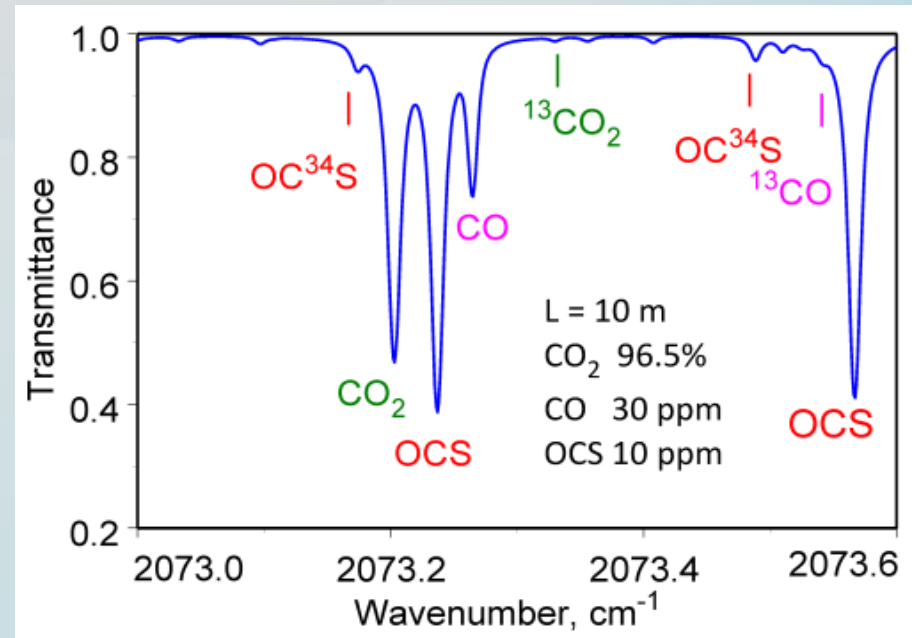
# Выбор молекулярных целей для измерений

- Доступно множество монохроматичных прецизионно контролируемых лазеров с распределённой обратной связью (РОС-лазер, DFB-laser):
  - Диодные лазеры (ДЛ, DL) @ 0,7-3 мкм,
  - Межзонные каскадные лазеры (МКЛ, ICL) @ 3-4,5 мкм,
  - Квантовые каскадные лазеры (ККЛ, QCL) @ 4,5-16 мкмможно получить от специализированных компаний-поставщиков nanoplus, Alpes Lasers и т.д., для измерений основных молекул и изотопных соотношений, перечисленных ниже в предварительном списке:
- **Двуокись серы  $SO_2$**  — Регистрация линий поглощения возможна около  $1380\text{ см}^{-1}$  при помощи ККЛ диапазона длин волн 7,2 мкм. Эффективный оптический путь 30 м соответствует поглощению в максимуме линии 90% при давлении газовой пробы 50 мбар и температуре 300 К. Ожидаемое количество  $SO_2$  в интервале высот 0...65 км изменяется от нескольких ppm до более чем 100 ppm и чрезвычайно переменен на уровне облаков.
- **Оксид углерода CO, двуокись углерода  $CO_2$ , сернистый карбонил COS и изотопные соотношения  $^{13}C/^{12}C$  в CO и  $CO_2$ ,  $^{34}S/^{33}S/^{32}S$  в COS** — Регистрация линий поглощения возможна около  $2073\text{-}2074\text{ см}^{-1}$  при помощи ККЛ диапазона длин волн 4,82 мкм. Требуемая длина эффективного оптического пути - до 17 м.
- **$CO_2$  и  $H_2O$ , основные молекулы** — Множество сильных линий поглощения локализовано около 2,68 мкм, переключение между ними возможно перестройкой рабочей температуры РОС-лазера. Дополнительно сильные линии  $CO_2$  и  $H_2O$  могут быть использованы для измерений около 2783 мкм, см. ниже.
- **Изотопологи  $CO_2$  и  $H_2O$**  — Имеется обилие линий молекулярного поглощения около 2,78 мкм для измерения соотношений  $^{13}C/^{12}C$  и  $^{16}O/^{17}O/^{18}O$  для  $CO_2$  около 2785 мкм, а также  $D/H$  и  $^{16}O/^{17}O/^{18}O$  для  $H_2O$  около 2783 мкм. Один и тот же РОС-лазер обеспечит данные измерения, посредством температурной перестройки между указанными диапазонами.

# Примеры модельных спектров для газовых проб



Модельный спектр газовой пробы венерианской атмосферы при 50 мбар, 300 К и эффективной длине оптического пути  $L=30$  м для различного содержания  $\text{SO}_2$  в спектральном диапазоне максимального поглощения  $\text{SO}_2$  около 7,2 мкм.

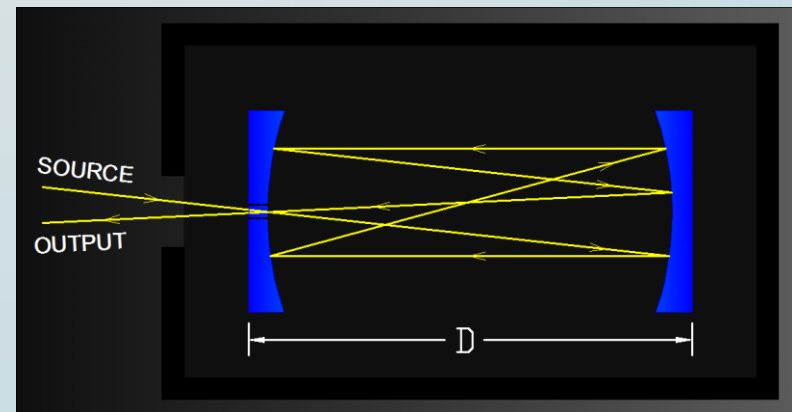


Модельный спектр атмосферной газовой пробы около 4,82 мкм для  $L=10$  м и содержания газов:  $\text{CO}_2$  – 96,5%,  $\text{CO}$  – 30 ppm,  $\text{OCS}$  – 10 ppm.

# Реализация нужного эффективного оптического пути ДЛС

Возможности выбора конструкции аналитической оптической кюветы позволяют реализацию любого требуемого эффективного оптического пути от  $<1$  м до нескольких км:

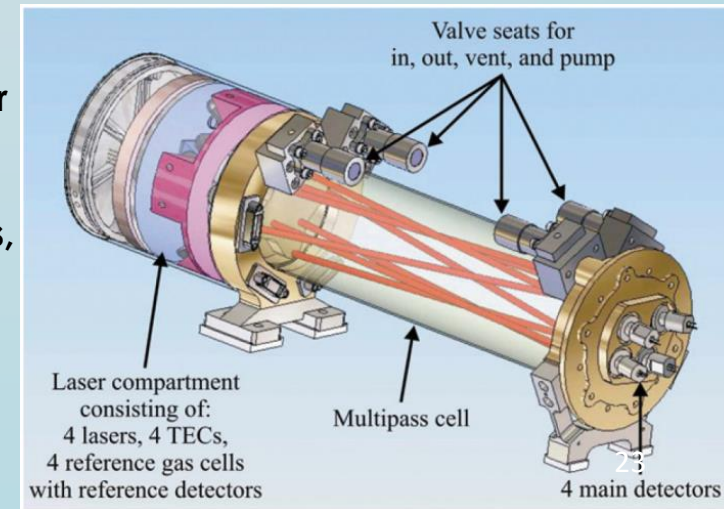
- лаконичная однопроходная оптическая кювета с длиной пути  $<1$  м;
- многопроходная оптическая кювета Уайта, Чернина или Эрриотта, обеспечивающая до 100 м в габаритах компактного бортового прибора;
- ICOS (CEAS) ультра-многопроходная кювета, обеспечивающая эффективный оптический путь порядка 3 км на борту.



Однопроходная оптическая кювета разработана в ИКИ РАН специально для ДЛС в составе бортового газового аналитического комплекса для проектов «Фобос-Грунт» и «Луна-Ресурс».



Multilaser Herriott cell for planetary tunable laser spectrometers, C.R. Webster, et al., Applied Optics, 2007, V.46, No.28, 6923.



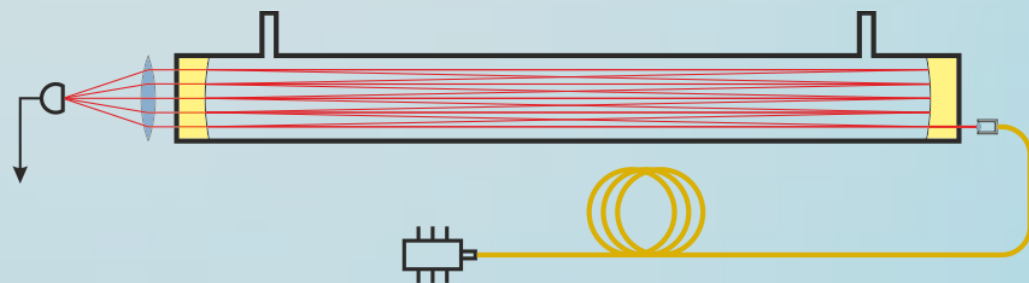
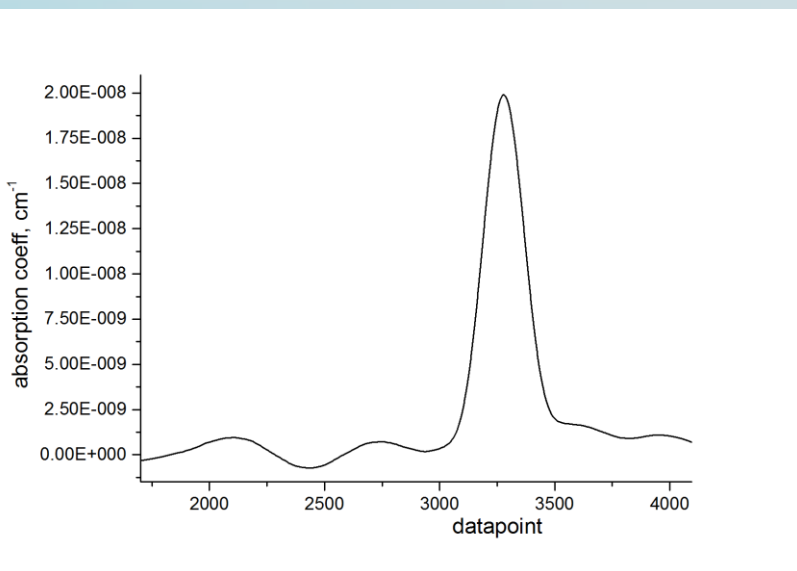


# ICOS – Integrated Cavity Output Spectroscopy

- Эквивалентно: Cavity enhanced absorption spectroscopy (CEAS).
- **Спектроскопия интегрального внутрирезонаторного выхода, модификация лазерной спектроскопии поглощения.**
- Оптический путь  $L_{\text{эфф}} = d/(1-R)$ ,  $d$  – расстояние между зеркалами.

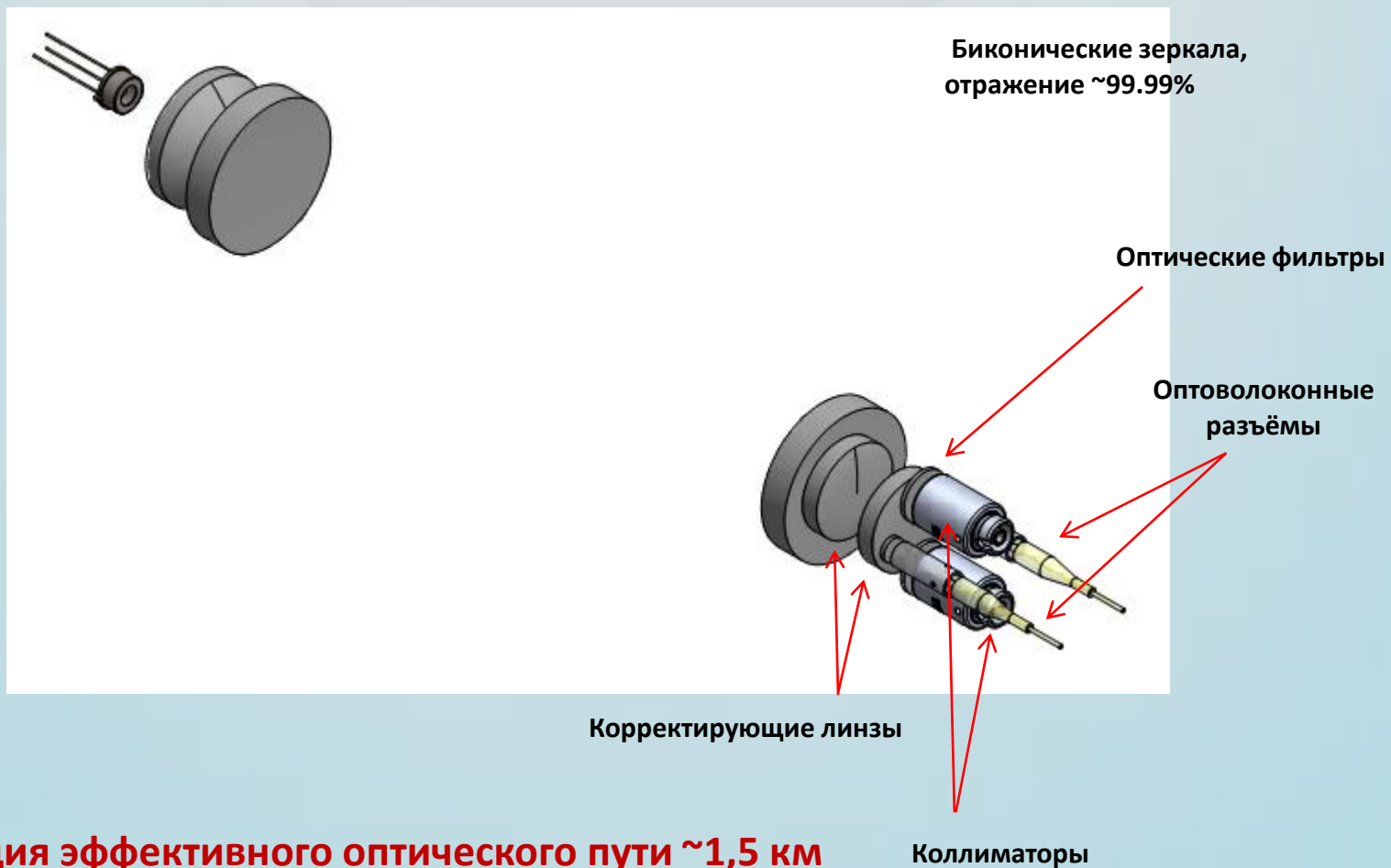
**$R=99,9\%\dots99,99\% \Rightarrow$**

**$L_{\text{эфф}} \approx \text{roundtrip} \times 10^3 \dots 10^4 \Rightarrow \sim 1 \text{ км эффективного оптического пути !!}$**



Лабораторный эксперимент ICOS, демонстрирующий чувствительность  $10^{-9}$  см<sup>-1</sup> при детектировании слабой  $2 \cdot 10^{-8}$  см<sup>-1</sup> **CO<sub>2</sub>** линии поглощения около 1,6 мкм, выполненный в сентябре 2013 в ИОФ РАН.

# ICOS - канал

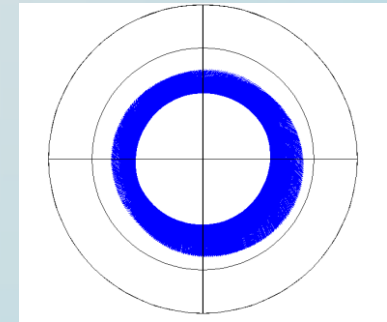
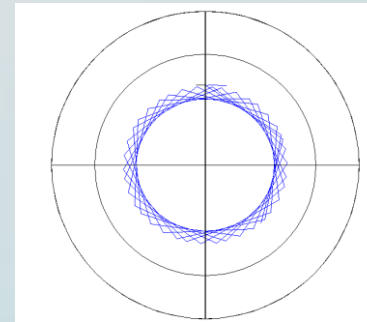


**Реализация эффективного оптического пути ~1,5 км для атмосферной газовой пробы, заполняющей аналитическую оптическую кювету.**

# Анализ технических допусков канала ICOS в геометрическом приближении.

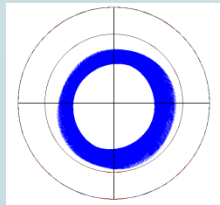
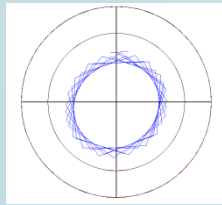


Распределение оптических лучей в пределах апертуры зеркала  $\Phi$  12 мм

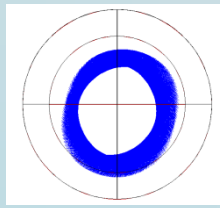
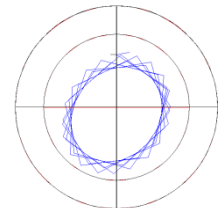


Угловое смещение оси зеркала:

0,1°



0,2°



Изменение расстояния между зеркалами L:

1,0 мм



Поперечный линейный сдвиг XY:

0,2 мм



0,5 мм



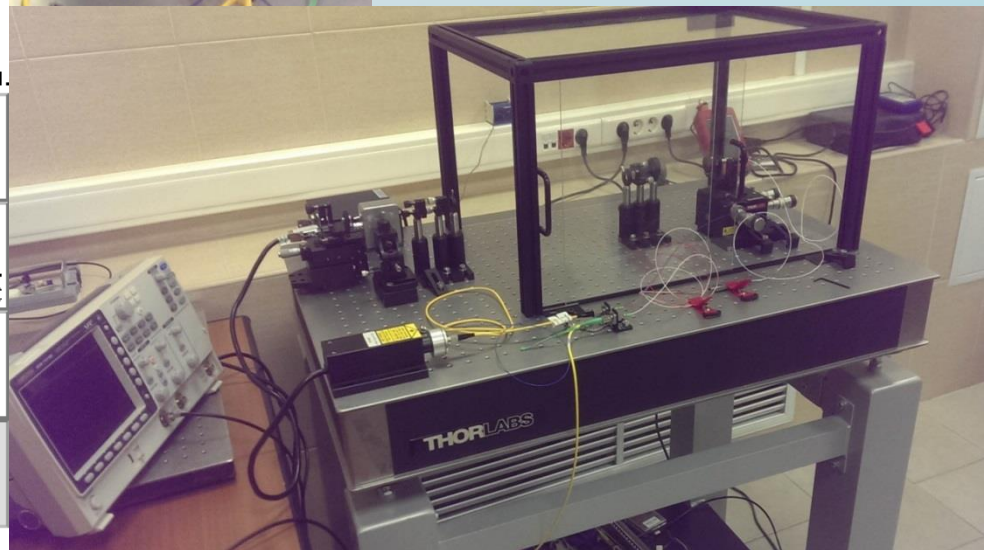
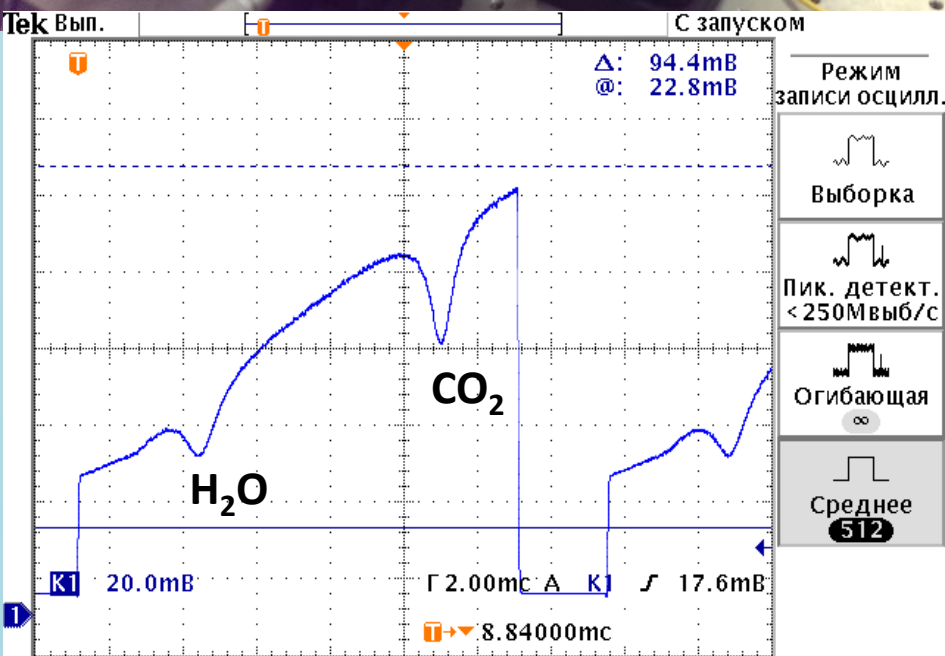
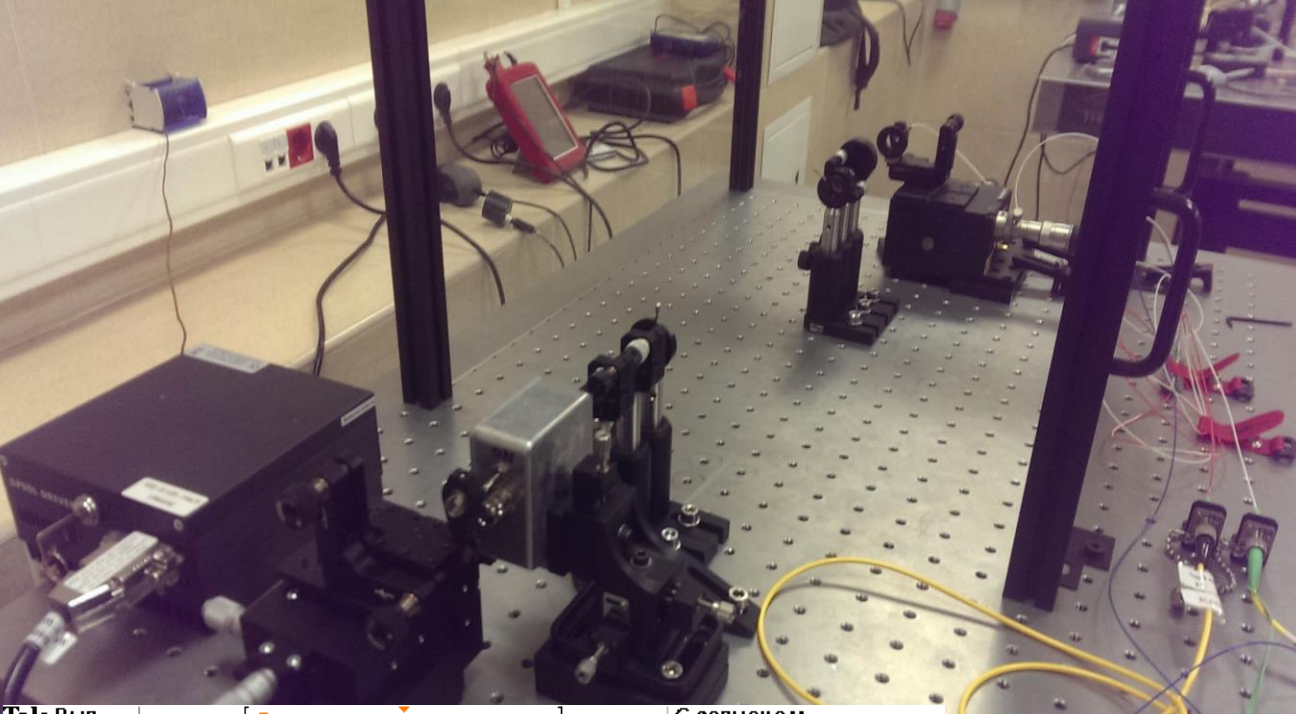
Отклонение входного луча:

0,1°





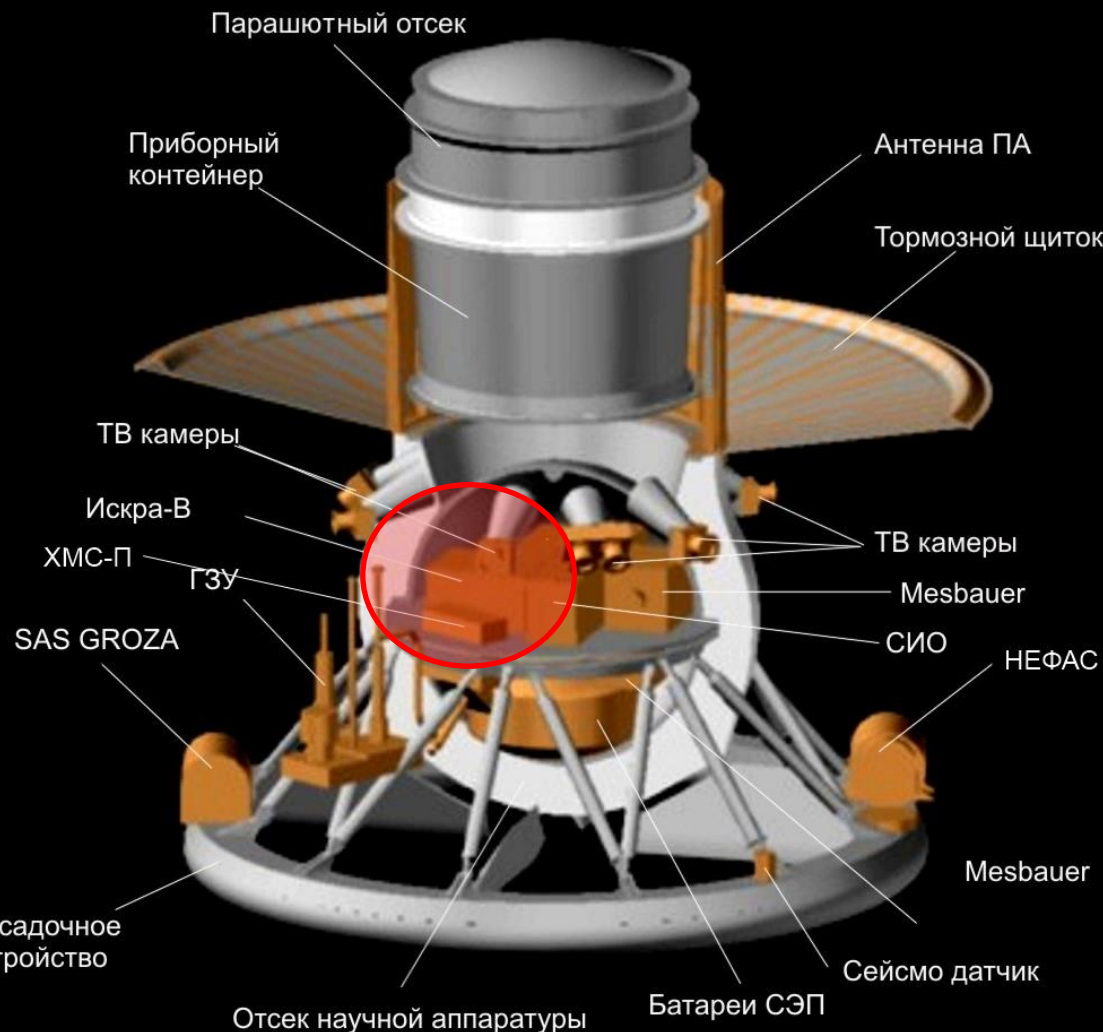
Лабораторное макетирование оптического канала измерений ICOS. Январь 2015, МФТИ.



Режим Среднее	Гориз. разреш. Обычное	Сброс горизонт. задержки	Автоуст.	WaveAlert	Частота выборки: 500квыб/с
---------------	------------------------	--------------------------	----------	-----------	----------------------------

## Прибор ИСКРА-В будет размещён внутри защищённого контейнера для научной аппаратуры

• Присущее ДЛС высокое спектральное разрешение  $\lambda/\Delta\lambda \sim 10^7$  способствует высокой чувствительности аппаратуры ИСКРА-В. Расчётная чувствительность к относительному поглощению порядка  $10^{-5}$ , отвечает за динамический диапазон в несколько порядков величины при ожидаемом поглощении порядка нескольких процентов. Измерения для спектральных линий с различным поглощением позволит расширить эффективный динамический диапазон для выбранных молекул и изотопных соотношений.

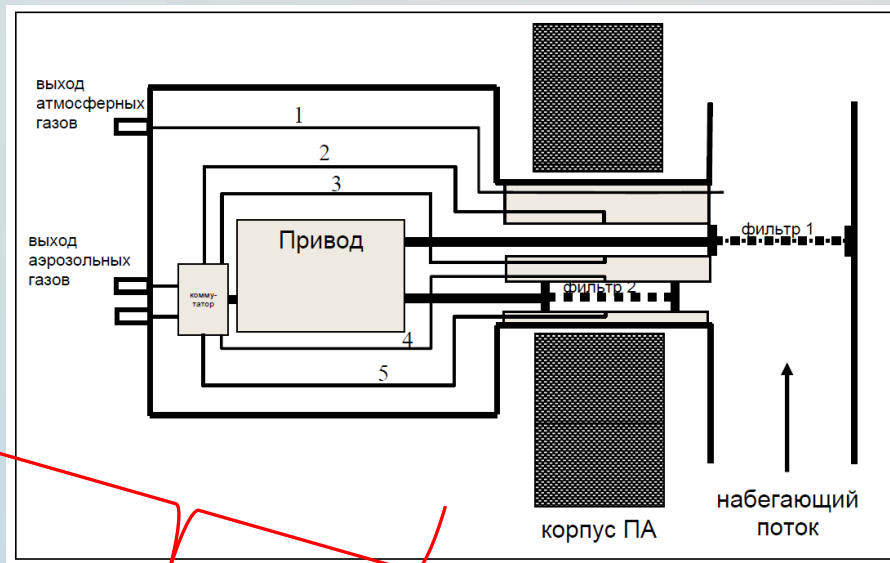


# Особенности забора проб окружающей атмосферы

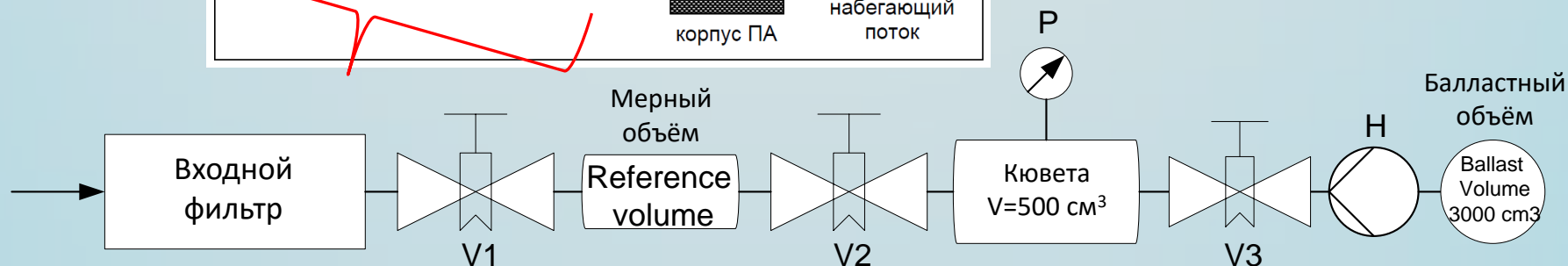
- Сквозной канал для набегающего атмосферного потока может быть организован внутри посадочного аппарата, по аналогии с предыдущими венерианскими посадочными зондами. Такой канал будет задействован как для соседнего газового аналитического комплекса (ГАК) «газовый хроматограф – масс спектрометр», так и собственно для прибора ИСКРА-В. Газовая проба для прибора ИСКРА-В может забираться после аэрозольных фильтров ГАК, что обеспечит её предварительную очистку от аэрозолей, капелек, пыли, льдинок и т.д.
- Каждая атмосферная газовая проба будет разрежена до рабочего давления в объёме аналитической оптической кюветы около 50 мбар и будет откачиваться в конце каждого цикла измерений. Сопутствующий коэффициент разрежения будет сохраняться как необходимый параметр для восстановления действительного содержания измеряемых компонент.
- Продолжительность измерений будет соответствовать циклограмме спуска посадочного аппарата и определится в результате оптимизации газозаборной системы, требуемой последовательности срабатывания клапанов, откачки, эффективности поглотителя обильного  $\text{CO}_2$  и т.д.
- Ожидаемое вертикальное разрешение до 2 км для измеряемых высотных атмосферных профилей может быть достигнуто при осуществлении продолжительности одного полного цикла спектральных измерений многоканального ДЛС не более 1...2 мин.



# Иллюстрация принципа забора атмосферной пробы



- Система фильтров, используемых комплексом ГАК и прибором ИСКРА-В



**V1, V2 – коммутируемые импульсные клапаны;**

**Мерный объём, переключаемого объёма 50, 5 и 0,5 см<sup>3</sup>;**

**Аналитическая многосоставная многопроходная оптическая кювета 500 см<sup>3</sup>, стабилизированная при +50°C;**

**P – датчик давления;**

**V3 – регулируемый клапан;**

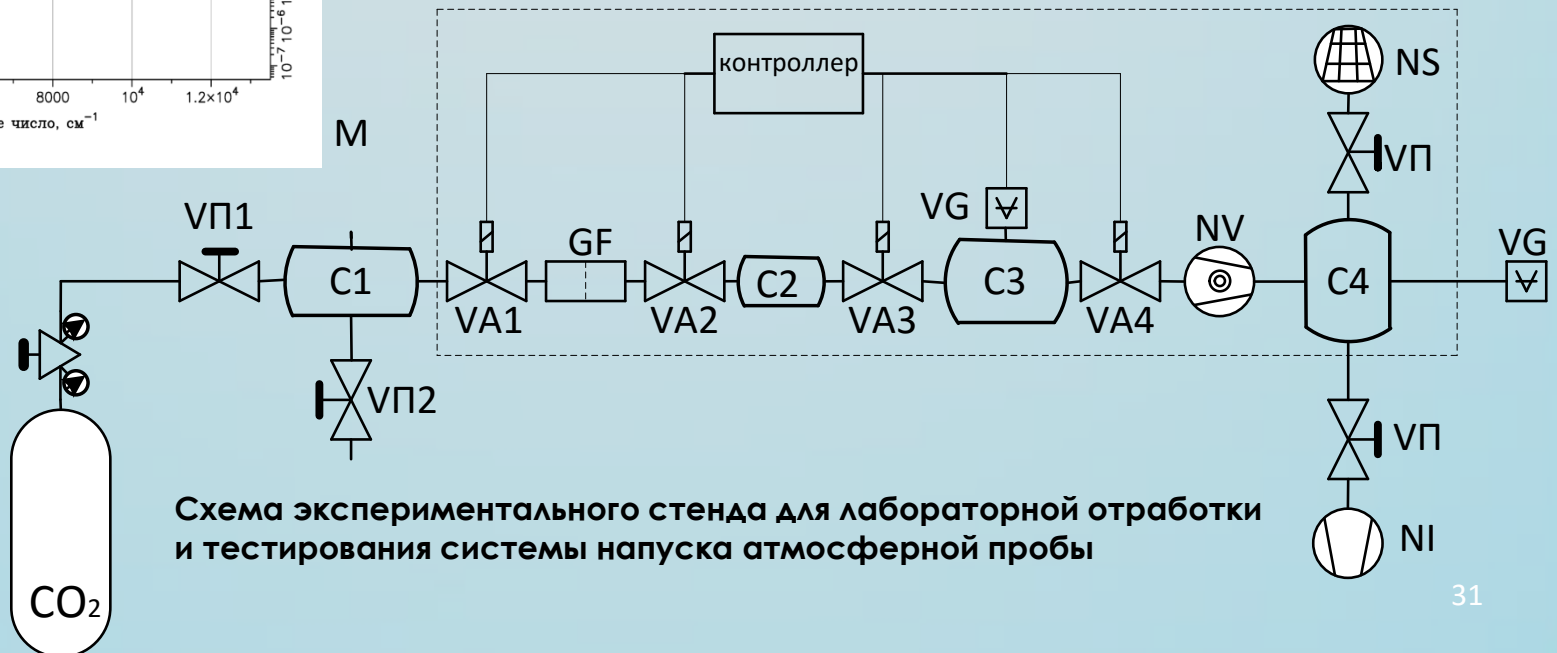
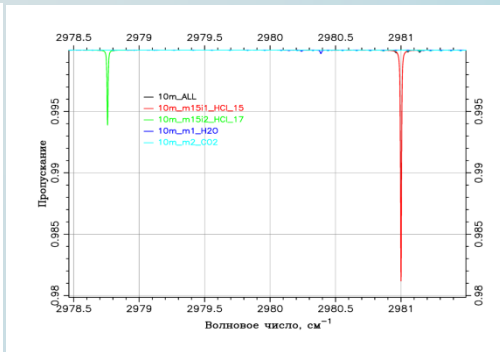
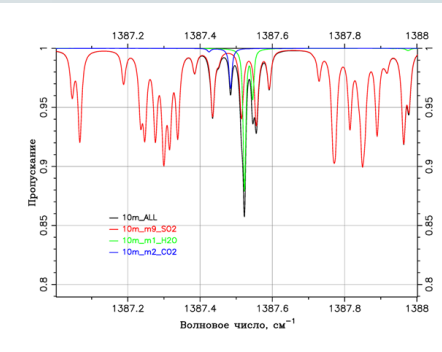
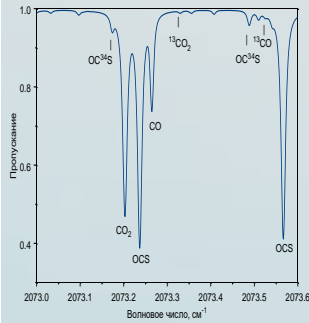
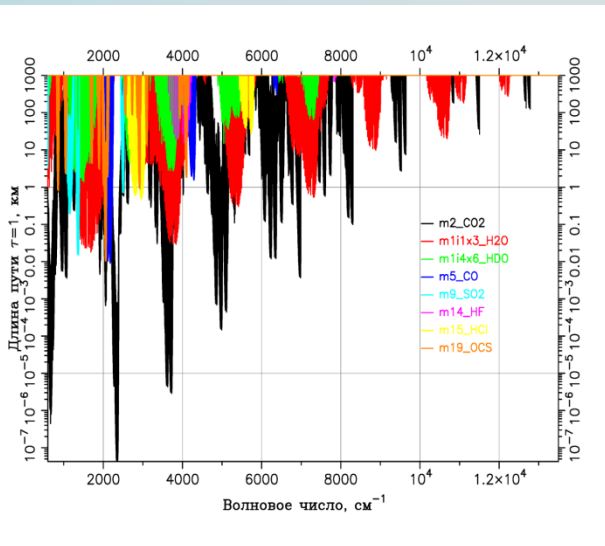
**Н – откачной насос;**

**Балластный объём 3000 см<sup>3</sup> с поглотителем CO<sub>2</sub>, опционально многосоставной.**



# Планирование дальнейших работ

- Детальное моделирование спектров поглощения для выбранных молекул и изотопологов.
- Выбор комплектации ДЛС, лабораторная отработка и оптимизация.
- Лабораторная отработка системы забора и смены атмосферных газовых проб.



# Благодарности

**Огромная благодарность энтузиазму и неизменной воле к победе участникам совместных работ!**

Авторы благодарят за поддержку работ со стороны:

- Роскосмоса, за ежегодное умеренное финансирование НИР.

Авторы надеются на поддержку реализации предложенной методики и финансирование ОКР от:

- Роскосмоса и заинтересованных отечественных и зарубежных партнёров.



**Many thanks for your attention!**

**Спасибо за внимание!**