

УДК 629.78

МИКРОСПЕКТРОМЕТР ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

*О.И. Кораблев, И.И. Виноградов, В.И. Гнедых,
М.В. Поверев, А.В. Родин, А.А. Федорова*

Институт космических исследований РАН, Москва

Углекислота CO_2 как основной парниковый газ играет важнейшую роль в тепловом балансе тропосферы и формировании климата Земли. Именно концентрация CO_2 в атмосфере является основным фактором, определяющим результирующий парниковый эффект в тропосфере, в формирование которого дают вклад также другие газы, в первую очередь, пары воды. Углекислота активно участвует во многих биогеохимических циклах, и ее содержание определяется множеством как биогенных (лесные массивы), так и абиогенных факторов (обмен атмосферы и океана), однако в последнее время особенное беспокойство вызывает необратимое поступление двуокиси углерода в атмосферу за счет сжигания органического топлива. Измерения демонстрируют увеличение содержания этого газа с 280 до 370 частей на миллион (ppm) с начала интенсивного промышленного развития в середине XX века [1].

Возможные климатические последствия этого процесса интенсивно изучаются ведущими научными центрами всего мира и служат предметом серьезных политических дискуссий. За последние 40 лет наблюдения, ведущиеся с помощью наземной сети, показывают, что только около половины антропогенного CO_2 остается в атмосфере. Другая половина поглощается океаном и континентальными экосистемами. Однако имеющиеся на сегодняшний день измерения не обеспечивают ни должного охвата, ни разрешения, необходимого для отождествления стоков CO_2 . В частности, есть серьезные указания на мощный сток CO_2 в Северном полушарии, но невозможно разделить вклады Североамериканского и Азиатского континентов и океанов. Для верификации численных моделей и составляемых на их основе прогнозов, для оценки роли различных процессов и резервуаров

в балансе двуокиси углерода необходимы весьма точные и локализованные спутниковые измерения ее концентрации в атмосфере. Такие измерения также необходимы для проверки и мониторинга эффективности вводимых сейчас международных ограничений на сжигание органического топлива.

Другой важнейшей задачей является мониторинг CH_4 . Метан, будучи сам по себе парниковым газом, выделяется в атмосферу как в результате биогенных процессов, так и локально — в результате аварий газопроводных сетей. Измерения метана позволяют получить данные о его фоновом содержании, собрать важную дополнительную информацию о состоянии ряда экосистем, а также отработать методику спутникового контроля крупных техногенных выбросов метана, в том числе его утечек в сети многочисленных газопроводов на территории нашей страны.

Состояние проблемы

Несмотря на чрезвычайную важность предмета исследования, мониторинг содержания CO_2 и CH_4 в атмосфере при помощи космических средств пока не получил развития, адекватного имеющемуся технологическому заделу. В настоящее время измерения интегрального содержания CO_2 в столбе атмосферы с высокой спектральной точностью проводятся только наземными станциями при помощи фурье-спектрометров высокого разрешения. Требуемую пространственную точность обеспечить трудно, так как для проведения одного измерения требуется значительное время, в течение которого воздушная масса изменяется. Дороговизна и сложность в обслуживании таких приборов не требуют комментариев. Таким образом, создание простой и компактной спектроскопической аппаратуры для наземных станций, позволяющей проводить быстрые (не более нескольких секунд) измерения, также является актуальной задачей.

Для получения данных глобального характера необходимы точные и локализованные, регулярные и долговременные измерения с использованием космических аппаратов (КА). Для спутниковых измерений разрабатываются ряд методов, в том числе спектрофотометрия, лидарные измерения и зондирование в тепловом ИК-диапазоне в полосе 15 мкм. Однако этим методам присущ ряд недостатков. В частности, спектрофотометрия отраженного солнечного излучения в полосах поглощения CO_2 с

умеренным спектральным разрешением эффективна с точки зрения характеристик аппаратуры, но не позволяет получить необходимой точности [2]. Аппаратура для лидарных измерений требует больших ресурсов КА (масса, потребление и т. д.). Фурье-спектрометры, обеспечивающие высокое спектральное разрешение, не только громоздки и дороги, но имеют малое пространственное разрешение (15–25 км) и малое быстродействие (время измерения ~ 10 с), что критично для задачи получения пространственного распределения изучаемой компоненты. Приборы, использующие метод модуляции давления, обладают высоким спектральным разрешением и им достаточно умеренных ресурсов КА, но они имеют малое быстродействие для применения в космических экспериментах. Кроме того, измерения в тепловом диапазоне очень сильно зависят от температуры и не обеспечивают необходимой итоговой точности [3].

Для небольших КА наиболее перспективны спектроскопические измерения в ближнем ИК-диапазоне с высоким спектральным разрешением, позволяющим различить отдельные насыщенные линии поглощения CO_2 и CH_4 . Регистрируемая величина поглощения для хорошо известных спектральных линий позволит с высокой точностью определить концентрацию наблюдаемых газовых компонент при знании оптического пути и состояния атмосферы в окрестности точки наблюдения и на трассе наблюдения. На этом принципе в США предложена и разрабатывается аппаратура для мониторинга содержания CO_2 на спутнике ОСО (Orbiting Carbon Observatory) [4, 5]. Масса КА около 400 кг, измерения планируется проводить тремя различными спектрометрами в диапазонах 0,76 мкм (O_2 — канал сравнения), 1,58 мкм (CO_2 — 1-й канал) и 2,05 мкм (CO_2 — 2-й канал). Спектральное разрешение $\sim 20\,000$, пространственное $\sim 1,5$ км, полоса захвата 10 км. Запуск планируется осуществить в конце 2007 г.

ИКИ РАН готовит эксперимент РУСАЛКА по отработке методики подобных измерений на основе компактной аппаратуры, размещаемой на Российском сегменте Международной космической станции (МКС). В разрабатываемом приборе объединены микроспектрометр высокого разрешения ($> 20\,000$) ОРАКУЛ диапазона 0,76–1,7 мкм и цифровая камера сопровождения. Планируется получить приоритетные данные, что позволит в дальнейшем использовать аппаратуру типа РУСАЛКА для

проведения глобальных измерений парниковых газов на микро-спутниковой платформе.

Методика проведения эксперимента

Оптический метод дистанционного зондирования нашел широкое применение для определения содержания малых составляющих в атмосфере Земли и атмосферах планет. Эксперимент РУСАЛКА (Ручной Спектральный АнаЛизатор Компонентов Атмосферы) предполагает проведение спектроскопических измерений в ближнем ИК-диапазоне с высоким спектральным разрешением, позволяющим различить отдельные ненасыщенные линии в слабых полосах CO_2 и CH_4 (рис. 1). При условии хорошего знания оптического пути точность таких измерений может приближаться к отношению сигнал/шум спектрометра.

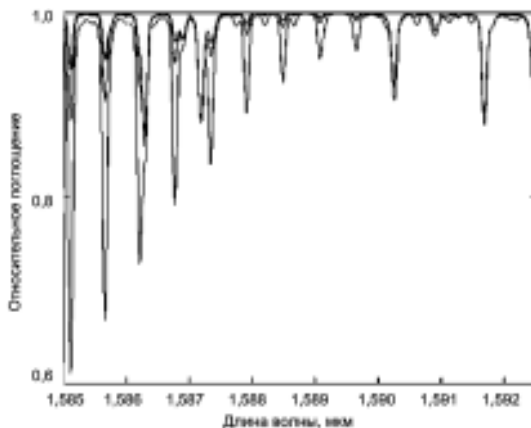


Рис. 1. Синтетический спектр пропускания атмосферы Земли в участке полосы CO_2 , 1,58 мкм при наблюдении в надир с фактором воздушной массы 2 для номинальной концентрации углекислоты (0,033 %), удвоенной (0,066 %) и десятикратной (0,33 %) концентрации. Синтетический спектр представляет собой результат свертки модельного спектра с предполагаемой аппаратной функцией прибора РУСАЛКА

Измерения будут проводиться двумя методами:

- Оптическая ось спектрометра ориентируется в надирном или околонадирном направлении, и прибор регистрирует

солнечное излучение, отраженное поверхностью и дважды прошедшее сквозь атмосферу Земли.

- Оптическая ось прибора ориентируется на блик Солнца на поверхности воды (рис. 2). Этот метод значительно точнее предыдущего из-за малого влияния рассеяния на аэрозоле, которое количественно контролируется дополнительно по уровню отраженного сигнала.

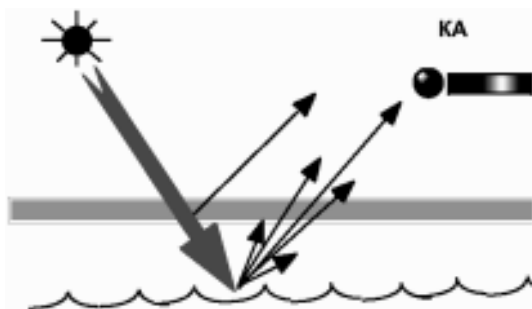


Рис.2. Принцип наблюдения отражения Солнца от поверхности воды

Наведение спектрометра в выбранную точку будет осуществляться космонавтом через иллюминатор МКС. Преимуществом метода является широкая свобода в выборе координат измерения и относительно высокое пространственное разрешение, определяемое малым временем измерения ~ 1 с и остронаправленным полем зрения спектрометра. Для контроля состояния подстилающей поверхности и выявления аэрозольных и облачных слоев вдоль трассы наблюдения и для привязки к местности предусмотрена контекстная цифровая фотокамера Canon D1X. По предварительным оценкам, точность интегральных измерений содержания CO_2 в столбе атмосферы может составлять от 10% в случае больших неопределенностей по аэрозолю до нескольких процентов и лучше при благоприятных условиях измерений.

После отработки методики измерений на МКС эксперимент будет продолжен на разрабатываемом в настоящее время микро-спутнике (МС) «Чибис», при помощи спектрометра ОРАКУЛ (Орбитальный Анализатор Концентрации УглекисЛоты) — одного из основных научных приборов данного МС.

Информация, необходимая для интерпретации полученных данных

Для точного определения содержания каждой составляющей атмосферы необходимы следующие данные:

Солнечный спектр высокого разрешения — предполагается известным, кроме того, могут быть проведены прямые измерения солнечного спектра прибором РУСАЛКА.

Характеристики поглощения для выбранного спектрального интервала — определяются при помощи моделирования на основе программ расчета переноса излучения в атмосфере и спектроскопических баз данных. Расчеты ведутся с учетом эффектов многократного рассеяния. В ИКИ накоплен богатый опыт такого моделирования для атмосфер планет Солнечной системы. Возможно, что при отработке методики понадобятся уточненные параметры спектральных линий. В таких случаях потребуются экспериментальная проверка спектроскопических данных, что возможно в рамках существующей кооперации с Институтом спектроскопии РАН (г. Троицк) или Университетом г. Реймс (Франция).

Время наблюдения — фиксируется прибором автоматически.

Координаты точки наблюдения — фиксируются автоматически при помощи вспомогательной цифровой фотокамеры.

Угловое положение Солнца — вычисляется по координатам МКС и времени наблюдения.

Координаты МКС — выясняются при наземной обработке на основе времени наблюдения.

Источники ошибок

При интерпретации данных измерений, наряду с приборными ошибками, источниками погрешностей оказываются неопределенности поведения основных параметров атмосферы и поверхности:

Коэффициент отражения поверхности — в каждом диапазоне прибор должен захватывать спектральный интервал, достаточный для определения спектрального континуума, в котором присутствуют хорошо известные линии поглощения различной интенсивности. Таким образом, для любых условий измерения найдутся ненасыщенные линии, уверенно регистрируемые прибором.

Высота, плотность и оптические параметры аэрозоля — параметры, которые наиболее трудно поддаются учету. Необходимо привлечение дополнительных данных о состоянии трассы наблюдения. Главным образом предполагается, что канал сравнения (O_2) будет испытывать такое же влияние аэрозоля, как и канал измерения CO_2 и CH_4 . Для этого предпочтительны измерения на более близких длинах волн (см. ниже).

При измерениях блика Солнца на водной поверхности аэрозоль не оказывает заметного влияния, так как, благодаря яркости источника, измеряется преимущественно поглощение, и эффектами обратного рассеяния можно пренебречь. Ослабление сигнала учитывается аналогично учету альбедо поверхности.

Температурные профили — отклонение температурных профилей от модельных играет слабую роль в ближнем ИК-диапазоне. Для проверки этого необходимо привлечение данных прогнозов или других приборов (фурье-спектрометров) как на борту МКС, так и на других спутниках.

Наличие облачного слоя, его оптическая толщина — см. *параметры аэрозоля*. Отбраковка случайных измерений, сделанных над оптически плотным облачным слоем, возможна по фотоизображениям и по характеру полученных спектров.

Влажность и полное атмосферное давление точки наблюдения — в пределах выбранного спектрального диапазона поглощение излучения парами воды практически отсутствует. Учет изменений атмосферного давления возможен при помощи канала сравнения.

Канал сравнения

Наряду с регистрацией спектров CO_2 и CH_4 будут проводиться измерения O_2 — основной компоненты атмосферы с хорошо известным высотным распределением. Такие одновременные измерения позволяют существенно повысить точность определения содержания углекислого газа и метана в точке наблюдения.

В качестве канала сравнения выбирается одна из двух полос поглощения атмосферного кислорода : 1270 или 760 нм. Полоса 1270 нм кажется более предпочтительной ввиду близости к полосам, выбранным для измерения CO_2 и CH_4 , что позволит существенно уменьшить влияние аэрозолей, облачности и т. д.

Однако вариации дневной эмиссии в данной полосе O_2 могут привести к систематическим ошибкам в концентрации малых составляющих, что заставляет рассматривать необходимость проведения измерений в полосе 760 нм. В ходе отработки методики предстоит выяснить применимость как полосы 1270 нм, так и полосы 760 нм.

Выбор параметров аппаратуры

Определение содержания малых составляющих газов предъявляет некоторые специфические требования к оптическим приборам, применяемым при проведении космических измерений:

- высокое спектральное разрешение;
- высокое пространственное разрешение;
- быстрое действие.

Опыт подготовки в ИКИ РАН прототипа компактного спектрометра высокого ($\lambda/\Delta\lambda \approx 30\,000$) разрешения для изучения планетных атмосфер [6] позволяет предложить практически готовую разработку микроспектрометра, удовлетворяющего таким требованиям. В спектрометре использована дифракционная эшеллерешетка, работающая в высоких порядках, что позволило кардинально увеличить разрешающую силу до величины $\lambda/\Delta\lambda \approx 20\,000$ в диапазоне 1,58 мкм, что на порядок выше типичного разрешения приборов этого класса. Действующий лабораторный прототип прибора представлен на рис. 3. Ряд атмосферных спектров поглощения, полученных с его помощью, показан на рис. 4–6. На рис. 7 показаны эскизы летных приборов SPICAV/UV/IR/SOIR, разрабатываемых в настоящее время в ИКИ РАН для проекта Venus-Express в сотрудничестве с Европейским космическим агентством. В верхней части приборной сборки расположен эшелле-спектрометр высокого разрешения SOIR (Solar Occultation InfraRed experiment) с селекцией порядков дифракции на основе перестраиваемого акустооптического фильтра [7–9].

Эскиз оптической схемы микроспектрометра и общий вид приборов РУСАЛКА и ОРАКУЛ показаны на рис. 8–10. Спектрометр построен по автоколлимационной схеме с вертикальным разделением входного и выходного оптических пучков и горизонтальным направлением развертки спектра по отношению

к плоскости изображения на рис. 8. В схеме прибора используются серийная эшелле-решетка компании Richardson Grating Laboratories (рабочий угол — 70° , 24,35 штр/мм, подложка размером $50 \times 100 \times 16$ мм) и внеосевое (10°) параболическое зеркало (фокусное расстояние $F_0 = 200$ мм, размер $50 \times 50 \times 15$ мм). Размер входной микрощели — $0,05 \times 1$ мм. В качестве многоканального детектора используется InGaAs-линейка компании Hamamatsu (512 элементов площадью 25×500 мкм). Для селекции рабочих порядков предполагается разместить около входной щели спектрометра набор четырехполосовых (100 см^{-1}) фильтров, автоматически чередующихся при измерениях. Входной телескоп — осевое параболическое зеркало (фокусное расстояние $F_{\text{вх}} = 120$ мм, размер $30 \times 30 \times 10$ мм). Светосила спектрометра — $F/6$. Общие параметры аппаратуры РУСАЛКА и ОРАКУЛ показаны в таблице.

Общие параметры аппаратуры РУСАЛКА и ОРАКУЛ

Параметр	РУСАЛКА	ОРАКУЛ
Масса, кг	3	1
Потребляемая мощность, не более, Вт		10
Поле зрения, угл. мин	2×20, или 0,3×3,0 км ² с высоты 500 км в надир	
Информативность	Доступный объем flash-памяти	26 кбит/с, 177 Мбайт/сут
Длительность измерения, с	1 (30–50 измерений за сеанс, 30 сеансов измерений)	1 (до 60 тыс. измерений в сутки)
Спектральный интервал для CO ₂ , нм	1567–1585 (49 — порядок дифракции)	
Спектральный интервал для CH ₄ , нм	1633–1652 (47 — порядок дифракции)	
Спектральный интервал для O ₂ , нм	1258–1273 (61 — порядок дифракции), 760–769 (101 — порядок дифракции)	
Спектральная полоса, нм	< 20	
Разрешающая сила	> 20 000	
Разделение порядков эшелле-решетки	4 сменных полосовых фильтра 100 см^{-1}	
Направление оптической оси	Соосно с камерой сопровождения	
Наведение	Вручную через иллюминатор МКС	Средствами ориентации КА

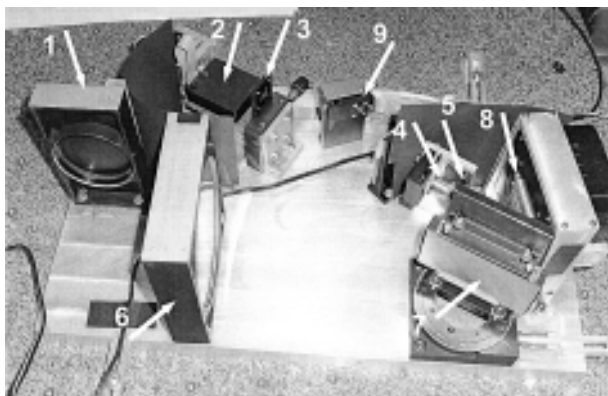


Рис. 3. Лабораторный прототип спектрометра высокого разрешения диапазона 1–1,7 мкм: 1 — входной телескоп — внеосевое параболическое зеркало; 2 — акустооптический перестраиваемый фильтр для селекции порядков; 3 — вспомогательная линза; 4 — фокусирующий объектив; 5 — входная щель спектрометра; 6 — коллиматор спектрометра — внеосевое параболическое зеркало; 7 — дифракционная эшелле-решетка; 8 — линейный многоэлементный детектор; 9 — вспомогательный канал низкого разрешения

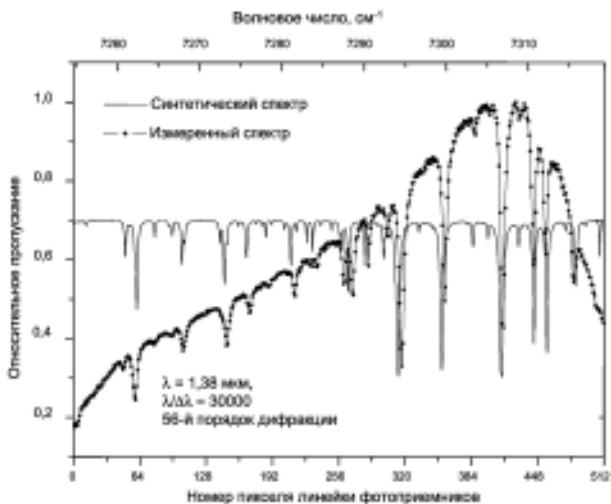


Рис. 4. Спектр поглощения H_2O в лабораторном воздухе. Источник — Хе-лампа, длина оптического пути около 2 м

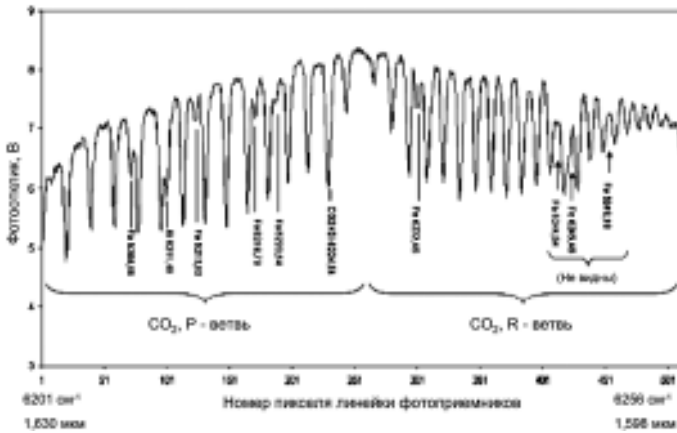


Рис. 5. Спектр поглощения солнечного излучения в полосе CO_2 1,6 мкм (Университет г. Реймс, Франция, 30.01.2004)

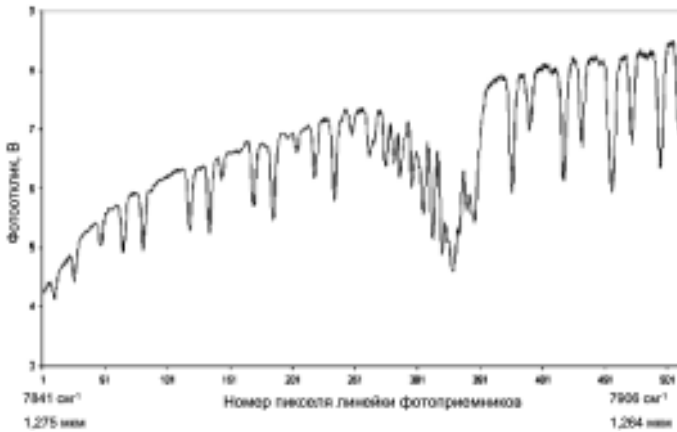


Рис.6. Спектр поглощения солнечного излучения в полосе молекулярного кислорода O_2 1,27 мкм (Университет г.Реймс, Франция, 16.02.2004)

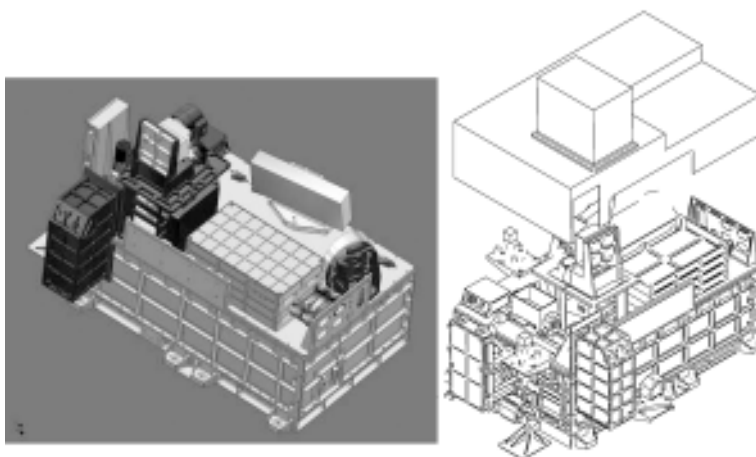


Рис. 7. Эскизы летных приборов SPICAV/UV/IR/SOIR, разрабатываемых для проекта Venus-Express в сотрудничестве с Европейским космическим агентством

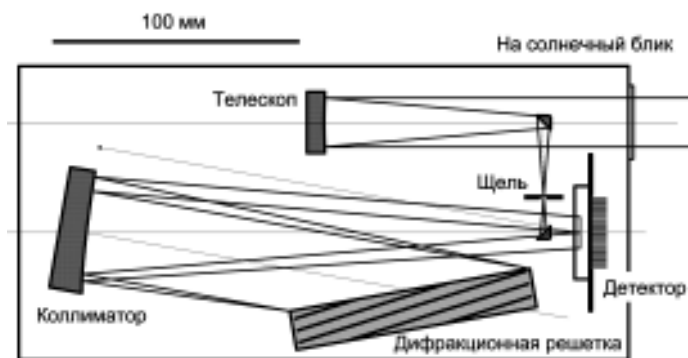


Рис. 8. Эскиз оптической схемы спектрометров РУСАЛКА и ОРАКУЛ

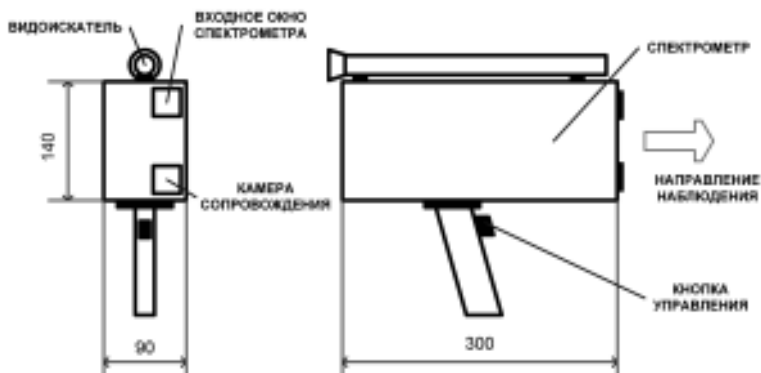


Рис. 9. Эскиз прибора РУСАЛКА

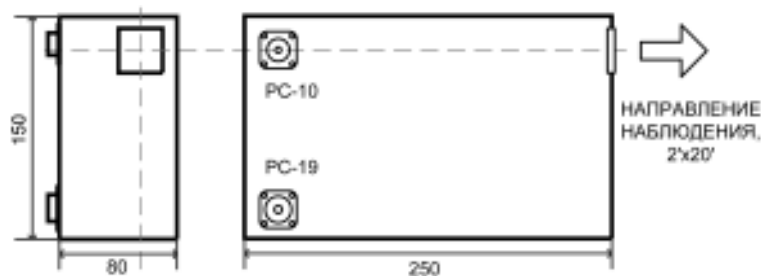


Рис. 10. Эскиз прибора ОРАКУЛ

Сбор и доставка данных на Землю для их обработки и анализа будет осуществляться при помощи возвращаемого модуля Flash-памяти для эксперимента РУСАЛКА и средствами бортовой электронной аппаратуры и каналов телеметрии МС «Чибис» для эксперимента ОРАКУЛ.

Осуществление первых экспериментов РУСАЛКА на основе данной первой версии микроспектрометра предполагается в конце 2005–2006 гг. Предложенная схема микроспектрометра может послужить основой для разработки серии компактных легких бортовых приборов аналогичного назначения. Ее дальнейшее усовершенствование и повышение точности измерений возможно, не в последнюю очередь, путем использования

оптических схем осевой геометрии и компонентов, обладающих меньшими дисторсиями, а также появляющихся на рынке новых моделей многоканальных детекторов.

Литература

1. *Cicerone R.J., Barron E.J., Dickinson R.E., Fung I.Y., Hansen J.E., Karl T.R., Lindzen R.S., McWilliams J.C., Rowland F.S., Sarachik E.S., Wallace J.M.* Climate change science: an analysis of some key questions // National Research Council, Washington DC, 2001.
2. *Dufour E., Breon F.-M.* Spaceborne estimate of atmospheric CO₂ column by use of the differential absorption method: error analysis // *Appl. Opt.* 2000. V. 42. P. 3595–3609.
3. *Engelen R. J., Denning A. S., Gurney K. R.* Global observations of the carbon budget. 1. Expected satellite capabilities for emission spectroscopy in the EOS and NPOESS eras // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 20 055–20 068.
4. *Kuang Z., Margolis J., Toon G., Crisp D., Yung Y.* Spaceborne measurements of atmospheric CO₂ by high-resolution NIR spectrometry of reflected sunlight: An introductory study // *Geophysical Research Letters.* 2002. V. 29. N. 15. P. 11-1.
5. *Crisp D. et al. (31 co-authors)* The Orbiting Carbon Observatory (OCO) mission // 34th COSPAR Scientific Assembly, The Second World Space Congress, Houston, TX, USA, 10-19 Oct. 2002. P. 2932.
6. *Korablev O. I., Bertaux J.-L., Vinogradov I. I.* Compact high-resolution IR spectrometer for atmospheric studies // *Proc. SPIE* 4818. 2002. P. 272–280.
7. *Korablev O. I., Bertaux J.-L., Vinogradov I. I., Kalinnikov Yu. K., Nevejans D., Neefs E.* Compact high-resolution echelle-AOTF NIR spectrometer to study the details of planetary atmospheres // *Proc. of the 37th ESLAB Symp. “Tools and Technologies for Future Planetary Exploration”*, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2–4 Dec. 2003.
8. *Korablev O. I., Bertaux J.-L., Vinogradov I. I., Kalinnikov Yu. K., Nevejans D., Neefs E.* Compact high-resolution echelle-AOTF NIR spectrometer for atmospheric measurements // *Proc. of the ICSO 2004 5th Intern. Conf. on Space Optics*, Toulouse, France, 30 Mar. – 2 Apr. 2004.
9. *Bertaux J.-L., Nevejans D., Korablev O. I. SPICAV/SOIR Team, SPICAV/SOIR package on Venus – Express* // *European Geosciences Union 1st General Assembly rep. EGU04-A-7530*, Nice, France, 25–30 Apr. 2004.