

ПРИБОР “РУСАЛКА” ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ С БОРТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

© 2011 г. О. И. Кораблев*, доктор физ.-мат. наук; А. Ю. Трохимовский*;
И. И. Виноградов*, канд. физ.-мат. наук; А. А. Федорова*, канд. физ.-мат. наук;
А. Ю. Иванов*; Ю. К. Калинин**; А. Ю. Титов***; А. В. Калужный***;
А. В. Родин****, канд. физ.-мат. наук; Е. А. Кострова*****; А. А. Венкстерн*;
В. В. Барке*; Ю. В. Смирнов*****; М. А. Полуаршинов*****; О. З. Ростэ*

* Институт космических исследований РАН, Москва

** Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, пос. Менделеево, Московская обл.

*** СКБ космического приборостроения института космических исследований РАН,
г. Таруса, Калужская обл.

**** Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская обл.

***** Ракетно-космическая корпорация “Энергия”, г. Королев, Московская обл.

E-mail: aivanov@iki.rssi.ru, korab@iki.rssi.ru

Спектрометр высокого разрешения ближнего инфракрасного диапазона “РУСАЛКА” предназначен для отработки методики измерения содержания углекислого газа и метана в атмосфере с борта Международной космической станции. Он состоит из двух основных элементов: эшелле-спектрометра и акустооптического перестраиваемого фильтра, используемого для селекции дифракционных порядков решетки. Прибор обеспечивает высокую разрешающую силу (не менее 20 000) в диапазоне 0,73–1,68 мкм, компактен, имеет малый вес и не содержит движущихся частей. Содержание газов определяется по ненасыщенным линиям полос CO₂ (1,58 мкм) и CH₄ (1,65 мкм). В работе приводится описание и технические характеристики прибора, а также результаты его наземных калибровок.

Ключевые слова: эшелле-спектрометр, инфракрасный диапазон, состав атмосферы, парниковые газы, космический мониторинг.

Коды OCIS: 010.1280, 120.0120, 300.6190

Поступила в редакцию 27.01.2011

Введение

Углекислотный газ CO₂ как основной парниковый газ играет важнейшую роль в тепловом балансе тропосферы и формировании климата Земли. Его концентрация является основным фактором, определяющим парниковый эффект в тропосфере, в поддержании которого участвуют и другие газы, в первую очередь пары воды. Особое беспокойство вызывает необратимое поступление диоксида углерода в атмосферу при сжигании органического топлива. С начала интенсивного промышленного развития в середине 20 века зарегистрировано увеличение содержания CO₂ с 280 до 370 частей на миллион (ppm). Для проверки моделей и составляемых на их основе прогнозов, для оценки роли различных процессов в балансе диоксида

углерода необходимы точные и локализованные спутниковые измерения ее концентрации в атмосфере. Такие измерения также необходимы для подтверждения эффективности международных ограничений на выбросы парниковых газов. Другой важнейшей задачей является мониторинг содержания CH₄. Метан, будучи сам по себе парниковым газом, выделяется в атмосферу не только в результате естественных, в основном биогенных процессов, но и локально – в результате аварий газопроводных сетей.

Несмотря на важность таких исследований, мониторинг содержания CO₂ и CH₄ в атмосфере с помощью космических средств пока не получил широкого развития. Одним из основных методов измерений до настоящего времени являлся метод отбора проб с по-

следующим анализом их в лаборатории. Этот метод обеспечивает высокую точность локальных измерений, но проводится лишь на ~100 станциях в мире [1]. Наземные измерения содержания парниковых газов в оптическом диапазоне проводятся с применением фурье-спектрометров на ограниченном числе наземных станций.

Потребность в глобальных измерениях диктуется требованиями моделей, которые создаются для оценки источников и стоков CO_2 . Если оставаться в рамках наземной сети, необходимо покрытие не реже, чем на 8° по долготе и на 10° по широте, при точности не хуже 2,5 ppm [2].

Для получения таких данных глобального характера необходимы точные, локализованные, регулярные и долговременные измерения с использованием космических аппаратов (КА). Существует ряд методов, в том числе спектрофотометрия, лидарные измерения и зондирование в инфракрасном (ИК) диапазоне в полосе 15 мкм, которым присущ ряд недостатков. В частности, спектрофотометрия отраженного солнечного излучения в полосах поглощения CO_2 с умеренным спектральным разрешением (например, спектрометр SCHIMACHY на КА ENVISAT, разрешение 1,4 нм в канале 6 (для CO_2): 970–1772 нм) эффективна с точки зрения характеристик аппаратуры, но не позволяет получить необходимой точности измерений [3]. Например, амплитуда разности максимальных и минимальных значений восстановленного содержания CO_2 по данным SCHIMACHY в 4 раза превышает вариации предсказаний модели. Данные зондирования в ИК диапазоне представляют большую ценность, так как приборы такого типа широко используются на метеоспутниках для термического зондирования. Решение обратных задач с привлечением метеорологических моделей и одновременной ассимиляцией CO_2 и температуры позволяет определить оба неизвестных [4–6], но точность измерения содержания CO_2 получается не лучше 5–30 ppm.

Наиболее перспективны спектроскопические измерения в ближнем ИК диапазоне с высоким спектральным разрешением (более 20 000), позволяющим различить отдельные ненасыщенные линии в слабых полосах CO_2 и CH_4 . Методика таких измерений рассмотрена в статье [7]. Измеряемые с таким разрешением относительные глубины сильных линий поглощения исследуемых газов позволяют с высокой точностью (менее 2,5 ppm для

CO_2) определить концентрацию наблюдаемых газовых компонент при знании оптического пути и состояния атмосферы на трассе наблюдения. На основе этого принципа в США была предложена и разработана аппаратура для мониторинга содержания CO_2 на спутнике ОСО (Orbiting Carbon Observatory) [8, 9]. Масса КА около 400 кг; измерения планировалось проводить тремя различными спектрометрами в диапазонах 0,76 мкм (O_2 – канал сравнения), 1,58 мкм (CO_2 – 1 канал) и 2,05 мкм (CO_2 – 2 канал). Разрешающая способность составляет около 20 000, пространственное разрешение – около 1,5 км, полоса захвата – 10 км. Прибор должен был обеспечивать от 200 до 400 измерений CO_2 на градус широты. Однако в начале 2009 г. попытка вывести на орбиту спутник ОСО закончилась неудачей из-за отказа носителя. Повтор миссии ОСО планируется в 2013 г. Принцип измерений спектров ближнего ИК диапазона с высоким спектральным разрешением используется и в японском проекте GOSAT (IBUKI) (Greenhouse gases Observing SATELLITE) [10]. Спутник массой около 1,5 тонн запущен на околоземную орбиту в январе 2009 г. На нем установлен фурье-спектрометр теплового и ближнего ИК диапазонов TANSO-FTS для измерения газового поглощения коротковолнового солнечного излучения, отраженного от Земли, а также теплового инфракрасного излучения. Прибор работает в трех узких полосах (0,76, 1,6, и 2,0 мкм) и в широкой полосе (5,5–14,3 мкм) с разрешением $0,2 \text{ см}^{-1}$. На спутнике также установлены спектрометры ультрафиолетового (УФ), видимого и ближнего ИК диапазонов и SWIR радиометр, используемые для детектирования облаков и аэрозоля и для получения информации, необходимой для учета их влияния на полосы поглощения атмосферных газов. GOSAT находится на солнечно-синхронной орбите высотой 666 км в 13:00 местного времени, с углом наклона 98° . Первые полученные результаты представлены в работах [11, 12].

В Институте космических исследований (ИКИ РАН) подготовлен эксперимент “РУСАЛ-КА” (Ручной Спектральный Анализатор Компонент Атмосферы) для отработки методики подобных измерений на Российском сегменте Международной космической станции (РС МКС). В состав оборудования входит компактный спектрометр высокой разрешающей способности на диапазон 0,76–1,7 мкм и цифровой фотоаппарат. Эксперимент, проводимый на РС

МКС с августа 2009 г., позволил получить результаты о содержании парниковых газов в атмосфере Земли с орбиты и обработать методику измерений. В дальнейшем это позволит использовать аппаратуру подобного типа для проведения глобальных измерений парниковых газов на различных типах спутниковых платформ, включая микроспутники. В статье приводится описание прибора, его характеристики, а также результаты наземных калибровок.

Общее описание эксперимента

Основной задачей эксперимента “РУСАЛКА” является отработка методики космического мониторинга углекислого газа и метана в атмосфере. Измерения проводятся в ближней инфракрасной области спектра от 0,73 до 1,68 мкм с высоким спектральным разрешением в четырех полосах атмосферных газов. Выбор спектрального диапазона обусловлен наличием слабых полос парниковых газов (CO_2 на 1,58 мкм и CH_4 на 1,65 мкм), двух полос поглощения атмосферного кислорода (1,27 мкм и 0,76 мкм), используемых в качестве каналов сравнения для определения эффективной воздушной массы при наличии аэрозоля, и доступ-

ностью высокоэффективных приемников ИК излучения для работы в этом диапазоне.

Концентрация CO_2 определяется по ненасыщенной полосе 1,58 мкм, CH_4 – по полосе 1,65 мкм. Дополнительно прибор позволяет проводить измерения водяного пара в области полосы поглощения 1,38 мкм. В качестве каналов сравнения можно использовать две полосы поглощения O_2 , 1,27 мкм и 0,76 мкм, взаимно дублирующие друг друга. Полоса 1,27 мкм предпочтительна ввиду близости к полосам CO_2 и CH_4 , поскольку свойства аэрозоля сильно зависят от длины волны. Однако вариации дневной эмиссии в данной полосе могут привести к систематическим ошибкам в восстановлении параметров атмосферы. Для их коррекции могут быть использованы данные о поглощении в полосе 0,76 мкм.

На рис. 1 показаны модельные функции пропускания атмосферы, рассчитанные для стандартной модели (лето в средних широтах), надирных наблюдений и солнечного зенитного угла 0° , с предполагаемой воздушной массой равной 2. Спектры свернуты с ожидаемой аппаратной функцией прибора для разрешающей силы $\approx 23\,000$.

Вопросы точности измерения концентрации парниковых газов (прежде всего, CO_2) в атмо-

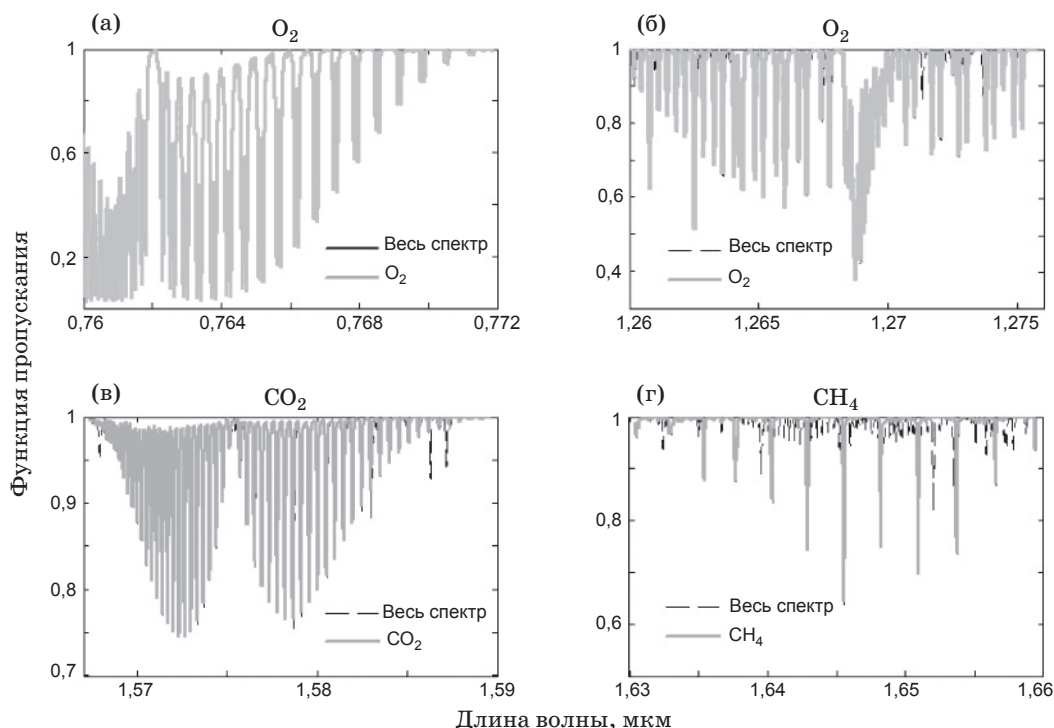


Рис. 1. Модельные функции пропускания атмосферы: (а) O_2 – 0,76 мкм, (б) O_2 – 1,27 мкм, (в) CO_2 – 1,58 мкм, (г) CH_4 – 1,65 мкм.

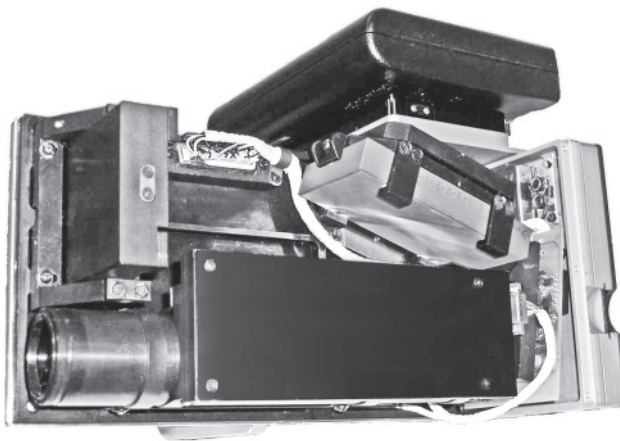


Рис. 2. Общий вид спектрометра “РУСАЛКА” со снятой крышкой.

сфере с использованием ненасыщенных полос поглощения в ближнем ИК диапазоне подробно рассмотрены в литературе, в рамках подготовки проектов ОСО и GOSAT [13–15] и выходят за рамки данной работы. Главный вывод заключается в том, что ключевым параметром при измерениях (помимо отношения сигнал/шум) является высокая разрешающая сила спектрометра, позволяющая разрешать изолированные ненасыщенные линии в полосах CO₂.

В основе аппаратуры “РУСАЛКА” лежит компактный спектрометр с высоким спектральным разрешением (рис. 2). Он используется для дистанционных наблюдений газовых составляющих атмосферы с борта МКС в ближнем ИК диапазоне, как с участием членов экипажа, так и в автоматическом режиме. Помимо спектрометра, аппаратура “РУСАЛКА” включает следующие вспомогательные элементы: кон-

текстный фотоаппарат Nikon D2Xs, аккумулятор, переходные платы для установки аккумулятора и крепления объектива, прибор ТИУС (трехступенной измеритель угловых скоростей) для определения текущих координат МКС с адаптером для его крепления и кронштейн крепления собранного прибора “РУСАЛКА” на иллюминатор МКС.

Функциональная схема прибора приведена на рис. 3. В эксперименте анализируется солнечное излучение, дважды прошедшее через атмосферу, рассеянное или отраженное подстилающей поверхностью в направлении наблюдателя. Входная оптика формирует мгновенное поле зрения прибора. Пространственное разрешение прибора определяется комбинацией мгновенного поля зрения и путем, проходимым лучом зрения по поверхности за время экспозиции. Далее излучение направляется на акустооптический фильтр. Фильтр пропускает лишь небольшой участок спектра, соответствующий длине волны выбранной полосы поглощения углекислого газа, метана, кислорода или водяного пара. Прошедшее через фильтр излучение попадает в эшелле-спектрометр. Спектр регистрируется линейным многоэлементным детектором, сигналы которого преобразуются в цифровой вид. Прибор управляется центральным контроллером, формирующим массив измерительной и служебной информации. После экспозиции и записи спектра акустооптический фильтр перестраивается на следующий спектральный интервал, и т. д. до окончания измерений. За одно измерение прибор может просканировать до 28 спектральных интервалов, соответствующих порядкам дифракции эшелле-спектрометра. Данные записывают-

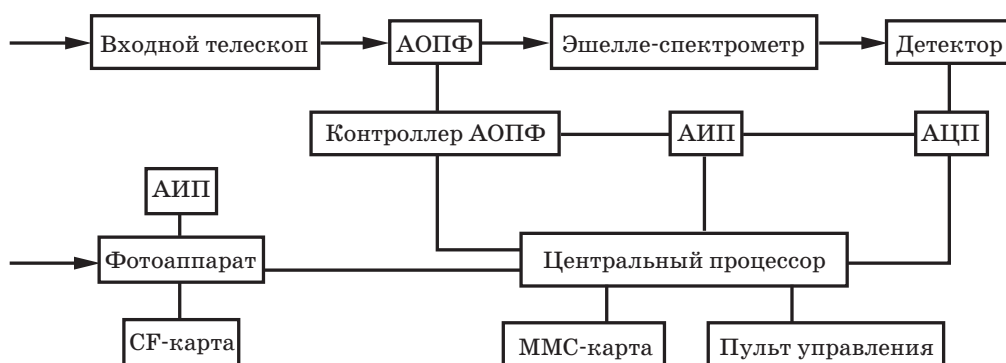


Рис. 3. Функциональная схема аппаратуры “РУСАЛКА”. АИП – автономный источник питания (аккумуляторная батарея), АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, АОПФ – акустооптический перестраиваемый фильтр, CF-карта – сменная карта памяти фотоаппарата, ММС-карта – сменная карта памяти спектрометра.

ся на сменные карты памяти и копируются на бортовой компьютер МКС или заменяются новыми по мере их заполнения. Таким образом, прибор полностью независим от бортовых систем станции.

Прибор предназначен для работы в трех основных режимах.

Надир. Оптическая ось спектрометра ориентируется в надирном или около-надирном направлении и прибор регистрирует солнечное излучение, отраженное поверхностью и дважды прошедшее через атмосферу. Преимуществом этого метода является широкая свобода в выборе координат измерения и относительно высокое пространственное разрешение.

Блик. Оптическая ось прибора ориентируется на солнечный блик на поверхности воды. Этот метод значительно точнее предыдущего благодаря высокой яркости сигнала и малому влиянию рассеяния на аэрозоле, которое дополнительно количественно контролируется по уровню отраженного сигнала.

Солнце. Прибор наводится на солнечный диск через каютные иллюминаторы МКС. Из-за трудностей ручного наведения на солнце режим используется в основном для целей калибровки.

Наведение спектрометра в режимах *Блик* или *Солнце* осуществляется космонавтом вручную. Режим *Надир* реализуется как вручную, так и с кронштейна, когда прибор закреплен на иллюминаторе МКС и в автоматическом режиме проводит длительные серии измерений. Для определения геометрии наблюдений используется время наблюдения, которое фиксируется прибором и фотоаппаратом автоматически. Координаты точки наблюдения отождествляются при наземной обработке по фотоснимкам. Предусмотрено и использование бортового прибора ТИУС для определения координат. Координаты МКС и углы солнца определяют по навигационным данным и по координатам точки наблюдения для данного времени наблюдений.

Спектрометр “РУСАЛКА”

Комбинация эшелле-спектрометра и АОПФ

Спектрометр “РУСАЛКА” представляет собой компактный прибор с высоким спектральным разрешением для дистанционных наблюдений газовых составляющих в ближнем ИК

диапазоне. Система состоит из двух ключевых элементов – спектрометра с решеткой эшелле и акустооптического перестраиваемого фильтра (АОПФ), предназначенного для предварительной селекции порядков дифракции. По сравнению со спектрометрами со скрещенной дисперсией подобный прибор позволяет достичь более высокого спектрального разрешения при меньшей массе и размерах. За одну экспозицию может быть измерен только небольшой участок спектра, соответствующий выбранному порядку дифракции, но АОПФ обеспечивает быстрое переключение на любой участок спектрального диапазона. Такой тип приборов был впервые предложен для атмосферных исследований в 2002 г. [16–18]. На основе этих разработок создан прибор для исследования атмосферы Венеры методом солнечных затмений в рамках проекта Venus Express (Европейское космическое агентство, 2005 г.). Прибор SOIR [19, 20] работает в диапазоне 2,3–4,3 мкм с разрешающей способностью порядка 20 000. Это первый и пока единственный спектрометр с таким разрешением в дальнем космосе.

Спектрометр “РУСАЛКА” является модификацией прибора SOIR на диапазон 0,7–1,7 мкм. В этом спектральном диапазоне спектральная яркость солнца значительно выше, а чувствительность детекторов значительно лучше, чем в диапазоне 2–4 мкм. Оптическая схема в коротковолновом диапазоне может быть построена более компактно. Это позволяет увеличить чувствительность и одновременно уменьшить размеры и массу прибора при использовании дифракционной решетки примерно тех же размеров, что и в приборе SOIR. Таким образом, прибор “РУСАЛКА” может использоваться как для прямых наблюдений солнечного диска или его отражений от поверхности воды (солнечный блик), так и для наблюдений солнечного излучения, диффузно отраженного от поверхности земли. Общие характеристики спектрометра представлены в табл. 1.

Оптическая схема

Упрощенная оптическая схема прибора представлена на рис. 4.

Оптическая часть прибора образована набором линз-дублетов, склеек, оптимизированных для спектрального диапазона прибора. Входной (\varnothing 30 мм) линзовый дублет имеет фокусное расстояние $F = 120$ мм, малые линзовые дублеты (\varnothing 10 мм) образуют коллиматор, предназна-

Таблица 1. Технические характеристики спектрометра “РУСАЛКА”

Параметр	Значение
Спектральный диапазон	730–1680 нм
Разрешающая способность, $\lambda/\Delta\lambda$	Не менее 20 000
Рабочие длины волн	CO ₂ 1580 нм CH ₄ 1650 нм O ₂ 1270 нм O ₂ 762 нм
Поле зрения	20×1,4 угл. мин
АОПФ	TeO ₂ , частота 40–100 МГц, полуширина апп. функции 44,2 см ⁻¹ эффективность 34% на 1580 нм
Эшелле-решетка	Richardson Grating Laboratories рабочий угол – 70°, 24,355 штр/мм, подложка 50×100×16 мм
Детектор	InGaAs КМОП линейка G9214-512S Hamamatsu 512 элементов площадью 25×500 мкм Охлаждение: один каскад Пельтье
Среднее отношение сигнал/шум	800 в центре порядка на 1580 нм
Электропитание	14,14 В; не более 10 Вт
Память	Сменная карта 8 Мбайт
Масса	3,3 кг
Габаритные размеры	Не более 235×280×160 мм

ченный для формирования перетяжки света в области акустооптической фильтрации. Поле зрения спектрометра определяется телескопом, формирующим изображение в плоскости диафрагмы поля и далее на щели спектрометра. Щель спектрометра соответствует угловому полю зрения 0,33°×0,024° (20×1,4'), тогда как на один пиксел детектора попадает излучение из телесного угла 14,3×0,7'.

АОПФ – оптический фильтр, основанный на принципе акустооптической дифракции в анизотропной среде. Центральная длина волны полосы пропускания фильтра определяется частотой сигнала, подаваемого на акустический

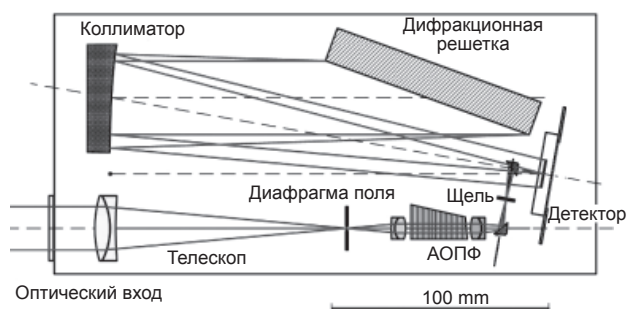


Рис. 4. Оптическая схема спектрометра “РУСАЛКА”.

преобразователь. Акустическая волна изменяет коэффициент преломления двулучепреломляющего кристалла и дифракция на образующейся распределенной структуре разделяет падающий луч на два дифрагировавших и нулевой. Один из дифрагировавших лучей поляризован горизонтально, другой вертикально. В приборе используется неколлинеарный АОПФ на основе кристалла TeO₂ [21]. Длина акустооптического взаимодействия составляет 20 мм. Разделение выходных пучков происходит по углу без использования поляризатора. Отфильтрованное АОПФ излучение через щель попадает в эшелле-спектрометр.

Спектрометр построен по автоколлимационной схеме Литтрова, в которой роль коллимирующих и изображающих элементов играет внеосевое параболическое зеркало. Входной и выходной пучки разнесены по вертикали. В приборе используются серийная эшелле-решетка компании Spectra-Physics, Richardson Grating Laboratories (рабочий угол 70°, 24,355 штр/мм, размер подложки 50×100×16 мм) и внеосевое (10°) параболическое зеркало (фокусное расстояние $F = 200$ мм, размер 50×50×15 мм). Размер входной щели – 0,05×0,7 мм. Полная ширина спектрального профиля прибора на полувысоте определяется шириной щели и эквивалентна двум пикселям детектора (50 мкм).

В качестве детектора используется InGaAs-линейка производства компании Hamamatsu, модель G9214-512S (CMOS, 512 элементов, площадь 25×500 мкм). Рабочий диапазон детектора 0,73–1,68 мкм (по уровню 10% от максимальной чувствительности) определяет спектральный диапазон всего прибора. Охлаждение детектора выполняется однокаскадной системой Пельтье, которая используется приблизительно на 20% от максимальной мощности,

поддерживая температуру линейки вблизи 0 °С ($\Delta T \approx 25^\circ$).

Полоса пропускания АОПФ должна быть согласована с областью свободной дисперсии эшелле-спектрометра. Для прибора “РУСАЛКА” область свободной дисперсии составляет $129,6 \text{ см}^{-1}$, при этом проектная полуширина полосы пропускания АОПФ равнялась 50 см^{-1} . Измеренная полоса пропускания АОПФ составляет $44,2 \text{ см}^{-1}$. Спектральный диапазон прибора (0,73–1,68 мкм) соответствует порядкам дифракции с 46 по 104. Для излучения с длинами волн короче 0,9 мкм этот диапазон больше

чем область свободной дисперсии и, следовательно, выбранный порядок не будет полностью покрывать детектор. Для порядков с длинами волн более 0,9 мкм ситуация обратная: ширина детектора равна или меньше области свободной дисперсии и края спектра теряются. Значения центральной длины волны (λ_0) для каждого порядка (M), волновые числа, попадающие на первый (ν_1), средний и последний (ν_{512}) пиксел детектора (левый и правый край, а также центр спектра в каждом порядке), и соответствующая λ_0 (ν_0) частота ультразвука в акустооптическом фильтре представлены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры спектральных диапазонов, соответствующих порядкам дифракции эшелле-спектрометра “РУСАЛКА” и соответствующие частоты настройки АОПФ. Выделены наиболее используемые порядки (см. текст)

Порядок	$\nu_1, \text{ см}^{-1}$	$\nu_0, \text{ см}^{-1}$	$\nu_{512}, \text{ см}^{-1}$	$\lambda_0, \text{ мкм}$	Ширина порядка, см^{-1}	Перекрытие порядков, см^{-1}	Частота АОПФ, МГц
46	5926,4	5959,4	5995,7	1,678	69,3	0	40,6
47	6055,2	6089	6126	1,6423	70,8	0	41,52
48	6184	6218,5	6256,4	1,6081	72,3	0	42,44
49	6312,9	6348,1	6386,7	1,5753	73,9	0	43,36
50	6441,7	6477,6	6517,1	1,5438	75,4	0	44,28
51	6570,5	6607,2	6647,4	1,5135	76,9	0	45,21
52	6699,4	6736,7	6777,8	1,4844	78,4	0	46,13
53	6828,2	6866,3	6908,1	1,4564	79,9	0	47,06
54	6957,1	6995,8	7038,4	1,4294	81,4	0	47,99
55	7085,9	7125,4	7168,8	1,4034	82,9	0	48,93
56	7214,7	7254,9	7299,1	1,3784	84,4	0	49,86
57	7343,6	7384,5	7429,5	1,3542	85,9	0	50,8
58	7472,4	7514,1	7559,8	1,3308	87,4	0	51,74
59	7601,2	7643,6	7690,1	1,3083	88,9	0	52,69
60	7730,1	7773,2	7820,5	1,2865	90,4	0	53,63
61	7858,9	7902,7	7950,8	1,2654	91,9	0	54,58
62	7987,7	8032,3	8081,2	1,245	93,4	0	55,53
63	8116,6	8161,8	8211,5	1,2252	94,9	0	56,49
64	8245,4	8291,4	8341,8	1,2061	96,5	0	57,44
65	8374,2	8420,9	8472,2	1,1875	98	0	58,4
66	8503,1	8550,5	8602,5	1,1695	99,5	0	59,36
67	8631,9	8680	8732,9	1,1521	101	0	60,33
68	8760,7	8809,6	8863,2	1,1351	102,5	0	61,29
69	8889,6	8939,1	8993,6	1,1187	104	0	62,26
70	9018,4	9068,7	9123,9	1,1027	105,5	0	63,23
71	9147,2	9198,2	9254,2	1,0872	107	0	64,21
72	9276,1	9327,8	9384,6	1,0721	108,5	0	65,19
73	9404,9	9457,3	9514,9	1,0574	110	0	66,17

Продолжение табл. 2

Порядок	$\nu_1, \text{см}^{-1}$	$\nu_0, \text{см}^{-1}$	$\nu_{512}, \text{см}^{-1}$	$\lambda_0, \text{мкм}$	Ширина порядка, см^{-1}	Перекрытие порядков, см^{-1}	Частота АОПФ, МГц
74	9533,7	9586,9	9645,3	1,0431	111,5	0	67,15
75	9662,6	9716,4	9775,6	1,0292	113	0	68,13
76	9791,4	9846	9905,9	1,0156	114,5	0	69,12
77	9920,2	9975,5	10036,3	1,0025	116,1	0	70,11
78	10049,1	10105,1	10166,6	0,9896	117,6	0	71,11
79	10177,9	10234,7	10297	0,9771	119,1	0	72,1
80	10306,7	10364,2	10427,3	0,9649	120,6	0	73,1
81	10435,6	10493,8	10557,6	0,9529	122,1	0	74,11
82	10564,4	10623,3	10688	0,9413	123,6	0	75,11
83	10693,2	10752,9	10818,3	0,93	125,1	0	76,12
84	10822,1	10882,4	10948,7	0,9189	126,6	0	77,13
85	10950,9	11012	11079	0,9081	128,1	0	78,14
86	11079,7	11141,5	11209,4	0,8975	129,6	0	79,16
87	11208,6	11271,1	11339,7	0,8872	131,1	0,78	80,18
88	11337,4	11400,6	11470	0,8771	132,6	2,28	81,21
89	11466,2	11530,2	11600,4	0,8673	134,1	3,79	82,23
90	11595,1	11659,7	11730,7	0,8577	135,6	5,29	83,26
91	11723,9	11789,3	11861,1	0,8482	137,2	6,8	84,3
92	11852,7	11918,8	11991,4	0,839	138,7	8,32	85,33
93	11981,6	12048,4	12121,7	0,83	140,2	9,82	86,37
94	12110,4	12177,9	12252,1	0,8212	141,7	11,33	87,41
95	12239,3	12307,5	12382,4	0,8125	143,2	12,83	88,46
96	12368,1	12437	12512,8	0,804	144,7	14,34	89,51
97	12496,9	12566,6	12643,1	0,7958	146,2	15,84	90,56
98	12625,8	12696,2	12773,4	0,7876	147,7	17,35	91,62
99	12754,6	12825,7	12903,8	0,7797	149,2	18,86	92,68
100	12883,4	12955,3	13034,1	0,7719	150,7	20,37	93,74
101	13012,3	13084,8	13164,5	0,7642	152,2	21,88	94,81
102	13141,1	13214,4	13294,8	0,7568	153,7	23,38	95,88
103	13269,9	13343,9	13425,2	0,7494	155,2	24,89	96,95
104	13398,8	13473,5	13555,5	0,7422	156,7	26,4	98,03

Конструкция и электроника прибора

Все оптические элементы спектрометра "РУСАЛКА" (рис. 2) размещены на механической плите-основании размерами 270×30 мм. На ней же на кронштейнах установлены электронные платы и вспомогательные элементы. Входной телескоп, диафрагма поля и коллимирующая оптика АОПФ собраны в единой

жесткой трубчатой конструкции. Блок АОПФ размерами 162×62×35 мм, содержащий акусто-оптический кристалл, элементы согласования и синтезатор радиочастоты, закреплен на телескопе. Блок АОПФ и телескоп юстируются отдельно. Взаимная юстировка всех элементов спектрометра производится в собранном приборе. Для этого оптические элементы, как то зеркала, щель и дифракционная решетка, за-

креплены на основании с помощью механических подач. Совпадение оптических осей спектрометра и телескопа обеспечивается точностью изготовления.

В прибор интегрирован блок управления (пульт), предназначенный для управления прибором оператором в течение сеанса измерений. Пульт позволяет включить и выключить спектрометр, выбрать режим его работы и вид измерения, отображает текущие состояния спектрометра. На пульте находятся разъемы для установки сменных карт памяти, интерфейса RS-232 для связи с бортовым ноутбуком и разъем кабеля синхронизации с фотоаппаратом.

К плите-основанию крепится переходной адаптер для установки фотоаппаратуры (Nikon D2Xs с объективом AF VR Nikkor ED 80–400 f/4,5–5,6D) и аккумулятора (Anton Bauer TrimPac 14). На том же кронштейне может быть установлен прибор для определения координат ТИУС. В нижней части плиты-основания установлены невыпадающие винты для крепления собранной научной аппаратуры на кронштейн, устанавливающийся на иллюминатор. В сборе научная аппаратура “РУСАЛКА” представляет собой функционально-законченный электронно-оптический прибор с размерами 180×370×230 мм и массой 7,7 кг (не считая кронштейна для иллюминатора).

Электрическая схема спектрометра состоит из следующих функциональных частей: программируемого усилителя, аналого-цифрового преобразователя, центрального процессора (ЦП), программируемого синтезатора радиочастоты, усилителя мощности и элементов согласования импеданса, образующих блок управления АОПФ, платы пульта управления и преобразователей напряжений питания.

Электрические сигналы с выхода детектора после усилителя с программируемым коэффициентом усиления подаются на 16-разрядный АЦП. Измеренные данные направляются через ЦП в контроллер платы управления и записываются в сменную память. Коэффициент усиления и время экспозиции выбираются автоматически по командам ЦП в процессе проведения каждого измерения. ЦП изменяет спектральный диапазон в зависимости от вида измерений, передает команды в электронику управления АОПФ. Электроника управления АОПФ состоит из программируемого синтезатора частоты, усилителя мощности и платы согласования импеданса с акустооптическим

преобразователем АОПФ. Синтезатор состоит из широкополосного генератора, управляемого напряжением, с кварцевой стабилизацией через фазовую обратную связь. Рабочий диапазон частот генератора 40–100 МГц, шаг перестройки 20 кГц. Частота определяет длину волны АОПФ (зависимость частота – длина волны можно найти в табл. 2 и на рис. 6). Управление усилителем мощности позволяет менять мощность, приложенную к акустооптическому преобразователю. Кроме того, АОПФ выполняет функцию электронно-оптического затвора прибора, определяя время экспозиции. Максимально возможная экспозиция равна 5,6 с. Возможен как режим предустановленной экспозиции, так и режим ее автоматического определения. Температура узлов прибора контролируется с помощью термодатчиков, размещенных на АОПФ, на детекторе и на плите основания. Информация о температуре вместе с другими данными служебного характера записывается в блок информации.

Питание спектрометра осуществляется от аккумуляторной батареи, закрепленной на кронштейне научной аппаратуры. Зарядка батареи осуществляется от бортовой сети станции. Емкости батареи хватает на 3–4 сеанса наблюдений (среднее время сеанса около 30 мин). Напряжение питания подается на два преобразователя напряжения, обеспечивающих независимым питанием узел АОПФ и электронику спектрометра. Потребление прибора не превышает 10 Вт. Технические характеристики спектрометра “РУСАЛКА” приведены в табл. 1.

Режимы работы

Измерения в каждом из трех упомянутых выше основных режимов наблюдения могут происходить в соответствии с одной из 15 программ, записанных в память прибора. Программа выбирается с помощью пульта управления. При необходимости прибор может быть перепрограммирован с помощью бортового ноутбука МКС. Каждая из 15 программ предназначена для измерения нескольких, выбранных заранее, участков спектра с учетом яркости объекта наблюдения (режимы *Надир*, *Блик*, *Солнце*). Возможен автоматический или предустановленный выбор экспозиции. Запись спектров для выбранного режима происходит с начала съемки цифровой фотокамерой и запускается через кабель синхронизации. Снимки используются как для привязки точки наблюдения,

так и для визуального определения наличия облаков и аэрозоля в зоне наблюдения. Например, наиболее часто используемая программа в режиме *Надир* включает последовательность следующих измерений: запись спектра в окрестности 7900 см^{-1} (полоса поглощения O_2 , порядок 61), затем в окрестности 6090 см^{-1} (CH_4 , порядок 47), далее запись фонового сигнала (АОПФ выключен), далее участок на 6220 см^{-1} (CO_2 , порядок 48), затем 7650 см^{-1} (H_2O , порядок 59) и последним снова порядок 61 для уточнения степени изменения метеословий и альbedo поверхности за время измерений.

Для каждого выбранного спектрального интервала задается частота ультразвука в кристалле, при этом уровень акустической мощности одинаков для всех порядков. Экспозиция определяется в начале каждой серии измерений в зависимости от выбранной программы: значение экспозиции в базовом спектральном канале (порядок 59), определяется либо автоматически, либо задается из табличных настроек. Для остальных порядков значение экспозиции умножается на коэффициент относительной спектральной чувствительности, определенный заранее в ходе наземных калибровок и учитывающий для каждого порядка спектральные зависимости чувствительности прибора, яркости солнечного излучения, альbedo Земли и пропускания иллюминатора. В автоматическом режиме экспозиция определяется путем циклического двукратного увеличения, пока интенсивность сигнала не достигнет 40% уровня насыщения детектора, либо пока не будет достигнуто максимальное значение экспозиции. После выполнения измерений в каждом спектральном диапазоне ЦП формирует блок данных и пакет служебной информации. Все полученные данные записываются в сменную память. Объем доступной памяти отображается на пульте: “МАЛО”, “НОРМА” или “ЗАМЕНА”.

Калибровки

В рамках подготовки эксперимента “РУСАЛКА” созданы два комплекта аппаратуры – летная и квалификационная (для наземной отработки) модели. Модели выдержали функциональные, квалификационные и приемосдаточные испытания на механическую прочность, устойчивость к климатическим воздействиям и ресурсные испытания.

Для калибровки летной модели прибора были использованы несколько лабораторных источников непрерывного и линейчатого спектра: галогенные лампы, диодные (1224, 1565 нм) и He-Ne (1152 нм) лазеры, газоразрядные лампы низкого давления ртуть-аргон (Hg-Ar) и ксенон (Xe). Ксеноновая лампа (Oriel Instruments) имеет несколько сильных линий, удачно расположенных в спектральном диапазоне ИК спектрометра: 823, 980, 1083, 1262 и 1541 нм. Входная апертура спектрометра засвечивалась либо с помощью фотометрической сферы, либо напрямую.

Для калибровки и проверки работоспособности прибора был проведен ряд наблюдений прямого солнечного излучения с поверхности Земли. Наблюдения проводились из здания ИКИ РАН зимой 2008–2009 года. Пример спектра пропускания земной атмосферы в четырех основных рабочих порядках приведен на рис. 5.

Калибровки АОПФ

Поскольку разделение порядков в эшелле-спектрометре происходит с помощью акусто-оптического фильтра, функция пропускания АОПФ определяет относительный уровень сигнала на детекторе в пределах выбранного порядка дифракции, а наличие боковых лепестков функции пропускания приводит к появлению мешающих сигналов из соседних порядков. Таким образом, калибровка аппаратной функции АОПФ особенно важна. Также необходимы измерения эффективности дифракции в зависимости от длины волны и мощности радиочастоты, и соответствие частота – длина волны. Калибровки АОПФ проводились перед его установкой в спектрометр “РУСАЛКА”.

Функция пропускания АОПФ

Измерения профиля пропускания фильтра были выполнены с использованием линий ксеноновой лампы, которые можно считать узкими (823, 980, 1083, 1262, 1541 нм), а также с линиями диодного лазера (1560 нм) и He-Ne лазера (1152 нм). Теоретически, аппаратная функция АОПФ описывается функцией $(\sin x/x)^2$, а полуширина пропускания, выраженная в обратных сантиметрах, в первом приближении постоянна в пределах спектрального диапазона. На рис. 6а представлены записанные линии излучения ксеноновой лампы, а также нормированная функция пропускания АОПФ

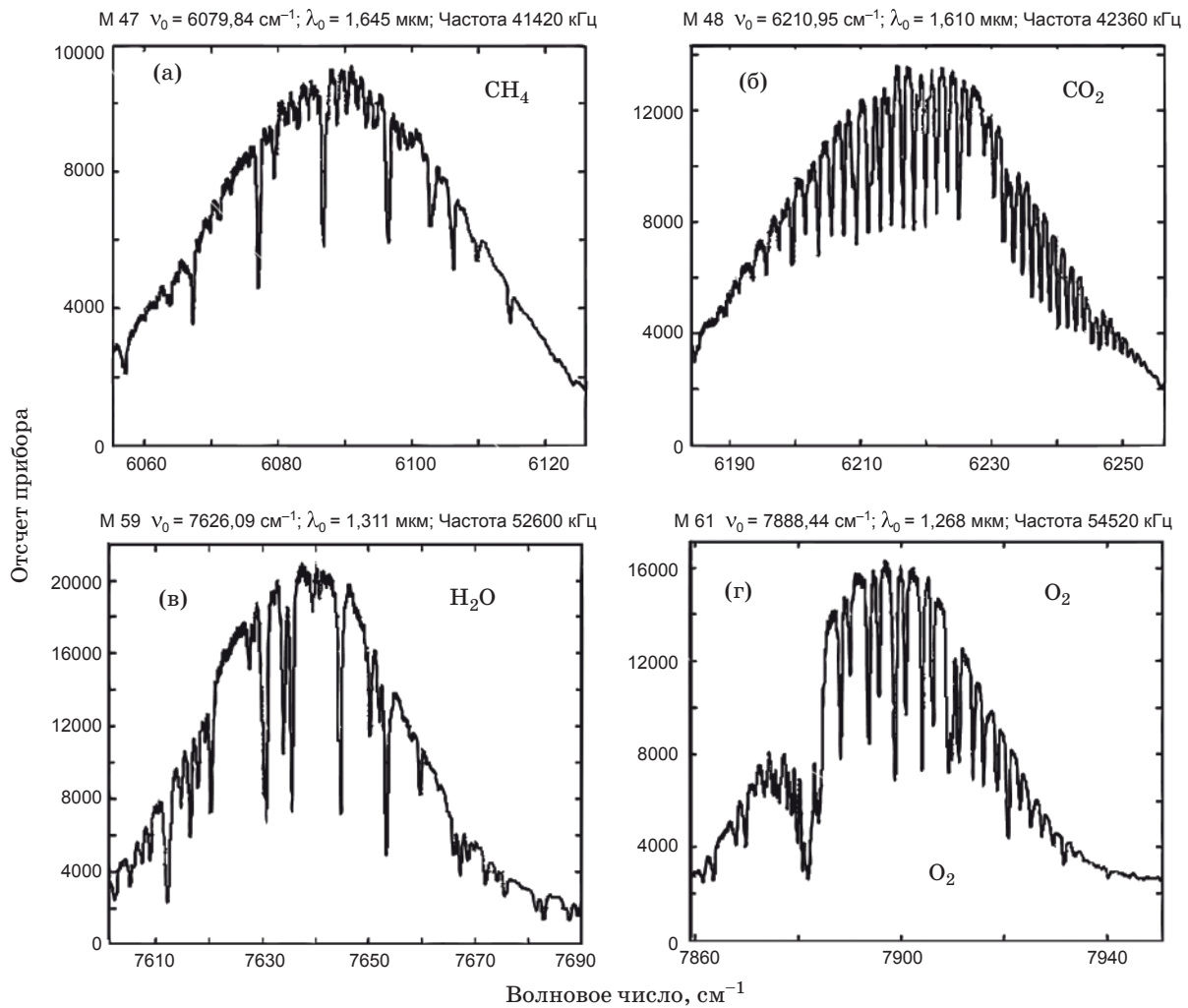


Рис. 5. Атмосферные спектры, зарегистрированные прибором “РУСАЛКА”, при наблюдениях прямого солнечного излучения в четырех основных рабочих порядках дифракции. М = 47, полоса поглощения метана 1,65 мкм (а), М = 48, полоса поглощения углекислого газа 1,6 мкм (б), М = 59, спектр поглощения водяного пара на краю полосы 1,38 мкм (в), М = 61, спектр поглощения молекулярного кислорода в полосе 1,27 мкм (г). Спектр снят 01.02.2009 около 13:45, что соответствует солнечному зенитному углу $\approx 76,7^\circ$.

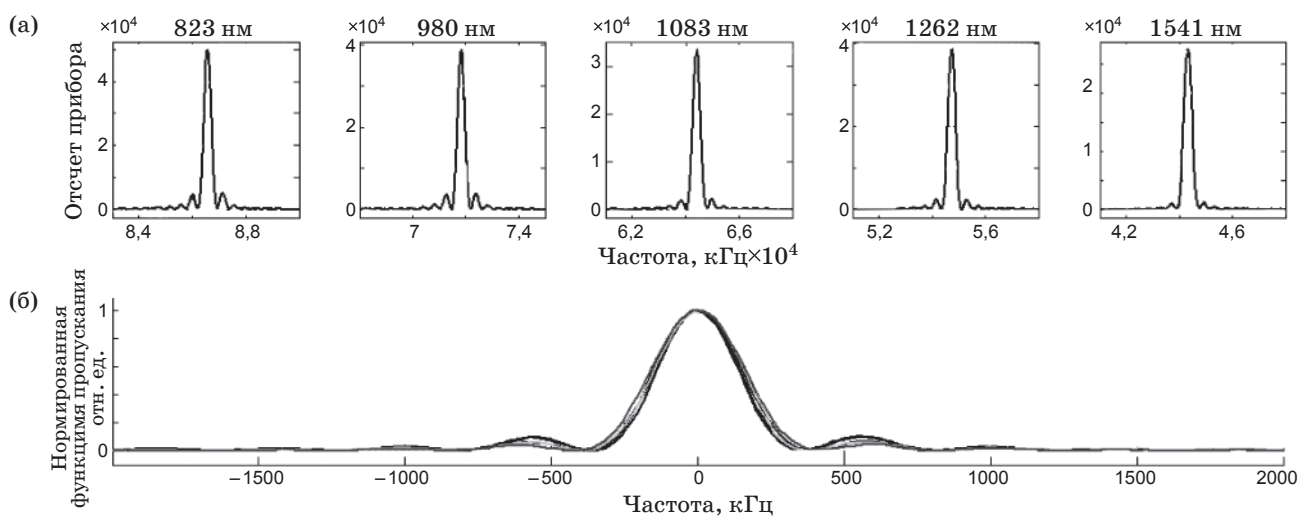


Рис. 6. Калибровка аппаратной функции АОПФ: измерения 5 линий излучения ксеноновой лампы (а), нормированная функция пропускания АОПФ в зависимости от частоты, рассчитанная для пяти калибровочных спектральных линий излучения ксеноновой лампы (б).

в зависимости от частоты (рис. 6б). Из приведенных результатов следует, что нормированные функции пропускания АОПФ, рассчитанные для пяти использованных при калибровке спектральных линий практически совпадают. Была получена зависимость полуширины пропускания фильтра от длины волны и ее среднее значение, составляющее $44,2 \text{ см}^{-1}$.

Относительная интенсивность боковых лепестков функции пропускания АОПФ убывает с уменьшением мощности радиочастоты, однако при этом убывает и общая эффективность дифракции. Поэтому при выборе рабочей мощности выбирался оптимум между двумя этими параметрами. Так, эффективность дифракции на длине волны 1560 нм , близкой к полосе поглощения углекислого газа, составляет 34% .

Калибровка “частота – длина волны”

Соответствие длины волны фильтрации и частоты возбуждения АОПФ установлено с помощью линейчатого спектра гелий-неонового лазера и ксеноновой лампы. Частота настройки АОПФ, соответствующая каждой из линий, определялась по максимуму дифракции на выбранной длине волны. Дисперсия кристалла АОПФ зависит от температуры, и калибровка по длине волны заметно меняется при прогреве кристалла в процессе работы или при изменении внешних условий. Для учета температурного дрейфа акустооптическая ячейка снабжена температурным датчиком. Условия эксплуатации прибора предполагают небольшие отклонения от комнатной температуры и поэтому основные калибровки проводили при температуре $20\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для уточнения калибровки “частота – длина волны”, помимо лабораторных источников линейчатого спектра, были использованы характерные линии поглощения в атмосферных спектрах (рис. 7, 5). Атмосферные спектры зарегистрированы спектрометром “РУСАЛКА” в целом, и для калибровки частота – длина волны АОПФ длины волн были пересчитаны с учетом дисперсионной зависимости спектрометра (пиксел – длина волны, см. ниже).

Дисперсионная кривая АОПФ в общем случае описывается функцией

$$\lambda = a/f + b. \quad (1)$$

Для волнового числа она может быть представлена в виде полинома второй или третьей степени

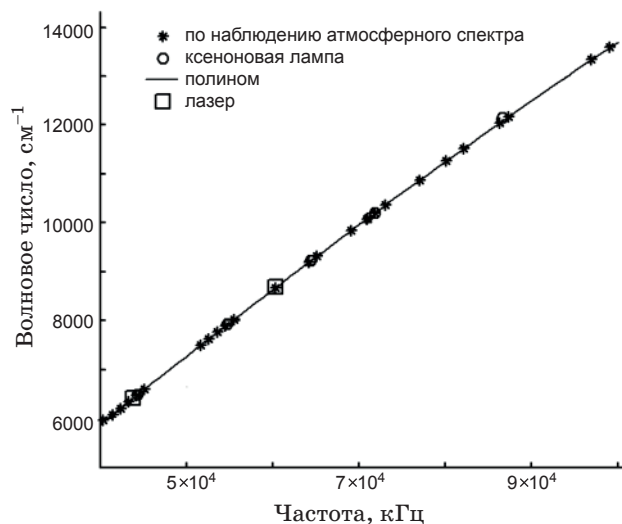


Рис. 7. Калибровка зависимости “частота – волновое число” АОПФ по двум лазерным линиям (He-Ne и диодный лазеры), линиям ксеноновой лампы и измерениям атмосферного спектра.

Таблица 3. Значения коэффициентов для аппроксимации дисперсионной зависимости АОПФ (2)

a	$-1,0333083 \cdot 10^{-12}$
b	$2,6418301 \cdot 10^{-8}$
c	$1,4270388 \cdot 10^{-1}$
d	$1,9714922 \cdot 10^2$

$$\nu = af^3 + bf^2 + cf + d, \quad (2)$$

где a , b , c и d зависят от температуры, λ – длина волны в нм, ν – волновое число в см^{-1} , f – частота в кГц. Значения коэффициентов приведены в табл. 3. Точность такой калибровки в рабочем диапазоне прибора получилась не хуже $\pm 8 \text{ см}^{-1}$.

Калибровки прибора в целом.

Чувствительность прибора

Пороговая чувствительность прибора оценивалась на основании измерений спектра солнечного излучения, прошедшего через земную атмосферу. Среднее отношение сигнал/шум в центре порядка для полосы поглощения CO_2 (1580 нм) составляет 800 единиц. В пределах каждого порядка дифракции чувствительность прибора определяется сверткой функции пропускания АОПФ, блеском решетки и неравномерностью отклика детектора. Так как функция пропускания АОПФ имеет вид $(\sin x/x)^2$ с центром в окрестности середины детектора (см. рис. 5), то отношение сигнал/шум в каж-

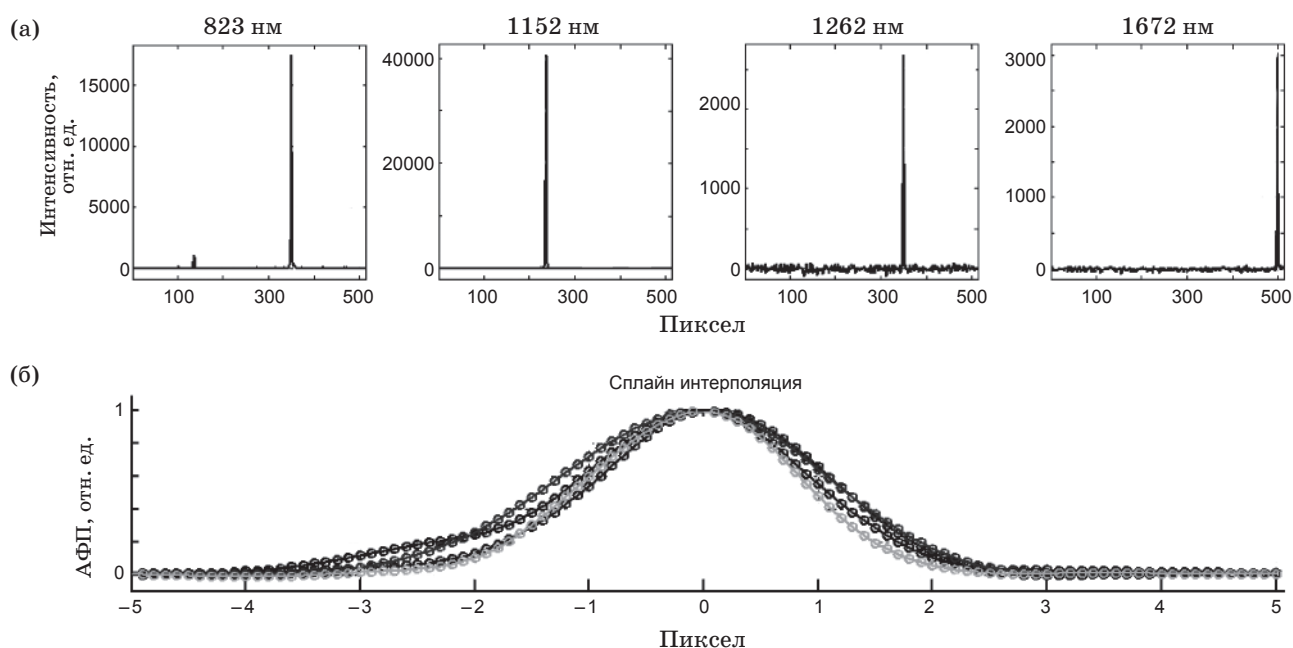


Рис. 8. Калибровка аппаратной функции спектрометра: а – результаты измерения четырех линий ксеноновой лампы, б – нормированная и интерполированная аппаратная функция прибора (АФП), рассчитанная для четырех калибровочных спектральных линий излучения ксеноновой лампы.

дом порядке максимально в центре и убывает к краям спектра.

Калибровка “пиксел – длина волны”

Границы порядков дифракции определяются геометрией спектрометра и характеристиками решетки (табл. 2), при этом они слабо зависят от температуры. Точные значения длин волн, соответствующие границам и центрам порядков дифракции при комнатной температуре, получены с использованием спектров пропускания земной атмосферы.

Аппаратная функция прибора

Аппаратную функцию спектрометра определяли по линиям ксеноновой лампы во всем диапазоне работы прибора. Примеры измеренных линий показаны на рис. 8. Интерполяция данных на рис. 8б применена для того, чтобы снизить эффект “расползания” аппаратной функции, когда спектральная линия попадает между двух пикселей детектора. Полуширины всех измеренных линий соответствуют примерно двум пикселям детектора. Для длины волны 1,67 мкм это соответствует $0,27 \text{ см}^{-1}$ (0,075 нм), для 0,77 мкм – $0,6 \text{ см}^{-1}$ (0,035 нм). Разрешающая сила при этом в рабочем диапазоне составляет около 22 000.

Заключение

ИКИ РАН проводит на РС МКС эксперимент “РУСАЛКА” для отработки методики измерений содержания парниковых газов в атмосфере с участием экипажа. Спектрометр “РУСАЛКА” представляет собой комбинацию акустооптического перестраиваемого фильтра и эшелле-спектрометра. Прибор имеет высокую разрешающую способность ($\lambda/\Delta\lambda \approx 22\,000$), обеспечивает быстрый доступ к любому участку спектрального диапазона в пределах 0,73–1,68 мкм и не содержит движущихся частей. Содержание парниковых газов определяется по изолированным ненасыщенным линиям слабых полос CO_2 (1,58 мкм) и CH_4 (1,65 мкм). Для коррекции влияния воздушной массы и рассеяния на аэрозоле используются полосы поглощения атмосферного кислорода 1,27 и 0,76 мкм. Параметры прибора подтверждены проведенными калибровками. Аппаратура “РУСАЛКА” доставлена на борт МКС 23 июля 2009 г. С августа 2009 г. проведено более 45 сеансов в различных режимах наблюдения. “РУСАЛКА” – спектральный прибор высокого разрешения с малым потреблением (не более 10 Вт) и малой массой (3,3 кг без механических интерфейсов и фотоаппаратуры) может быть легко адаптирован для использования в автоматическом режиме вне герметизированного отсека на различных космических аппаратах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арефьев В.Н., Кашин Ф.В., Каменоградский Н.Е. Систематические измерения концентраций углекислого газа в атмосфере // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 26. № 6. С. 584.
2. Rayner P.J., O'Brien D.M. The utility of remotely sensed CO₂ concentration data in surface source inversions // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. № 1. P. 175–178.
3. Buchwitz M., de Beek R., Burrows J.P., Bovensmann H., Warneke T., Notholt J., Meirink J.F., Goede A.P.H., Bergamaschi P., Körner S., Heimann M., Schulz A. Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: initial comparison with chemistry and transport models // Atmospheric Chemistry and Physics. 2005. V. 5. № 4. P. 941–962.
4. 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.
5. Engelen R.J., Andersson E., Chevallier F., Hollingsworth A., Matricardi M., McNally A.P., Thépaut J.-N., Watts P.D. Estimating atmospheric CO₂ from advanced infrared satellite radiances within an operational 4D-Var data assimilation system: Methodology and first results // J. Geophys. Res. 2004. V. 109 (D19). CiteID D19309.
6. Chédin A., Saunders R., Hollingsworth A., Scott N., Matricardi M., Etcheto J., Clerbaux C., Armante R., Crevoisier C. The feasibility of monitoring CO₂ from high-resolution infrared sounders // J. Geophys. Res. 2003. V. 108 (D2). P. ACH 6-1. CiteID 4064. DOI 10.1029/2001JD001443.
7. Rayner P.J., Law R.M., O'Brien D.M., Butler T.M., Dilley A.C. Global observations of the carbon budget 3. Initial assessment of the impact of satellite orbit, scan geometry, and cloud on measuring CO₂ from space // J. Geophys. Res. 2002. V. 107 (D21). P. ACH 2-1. CiteID 4557. DOI 10.1029/2001JD000618.
8. Crisp D., Atlas R.M., Breon F.-M., et al. (31 co-authors), The Orbiting Carbon Observatory (OCO) mission // Adv. Space Res. 2004. V. 34. P. 700–709.
9. Crisp D., Miller C.E., DeCola P.L. NASA Orbiting Carbon Observatory: measuring the column averaged carbon dioxide mole fraction from space // J. Applied Remote Sensing. 2008. V. 2 (1). P. 023508.
10. Kuze A., Suto H., Nakajima M., Hamazaki T. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring // Appl. Opt. 2009. V. 48. № 35. P. 6716–6733.
11. Saitoh N., Imasu R. CO₂ Profile from Thermal Infrared Spectra of GOSAT/TANSO-FTS: First Results // American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, abstract #A51A-0093.
12. Yoshida Y., Eguchi N., Ota Y., Tanaka T., Kikuchi N., Morino I., Uchino O., Maksyutov Sh., Watanabe H., Yokota T. Global column abundances of carbon dioxide and methane retrieved from Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT) observation // EGU General Assembly 2010, held 2-7 May, 2010 in Vienna, Austria. 7210 p.
13. Aben I., Hasekamp O., Hartmann W. Uncertainties in the space-based measurements of CO₂ columns due to scattering in the Earth's atmosphere // J. Quant. Spectr. Rad. Trans. 2007. V. 104. № 3. P. 450–459.
14. Baker D.F., Bosch H., Doney S.C., O'Brien D., Schimel D.S. Carbon source/sink information provided by column CO₂ measurements from the Orbiting Carbon Observatory // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10. P. 4145–4165. doi:10.5194/acp-10-4145-2010.
15. Hartmann J.-M., Boulet C., Tran H., Nguyen M. T. Molecular dynamics simulations for CO₂ absorption spectra. I. Line broadening and the far wing of the ν₃ infrared band // J. Chemical Phys. 2010. V. 133. № 14. P. 144313-144313-6.
16. Korablev O.I., Bertaux J.-L., Vinogradov I.I. Compact high-resolution IR spectrometer for atmospheric studies // Proc. SPIE. 2002. V. 4818. P. 272–280.
17. 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 // ESA publications. 2004. V. SP-554.
18. Беляев Д.А., Виноградов И.И., Калинин Ю.К., Киселев А.В., Кораблев О.И., Родин А.В., Федорова А.А. Малогабаритный эшелле-спектрометр высокого разрешения с использованием акустооптической фильтрации для атмосферных исследований // Проблемы управления и информатики. 2005. №1. С. 153–155.
19. Nevejans D., Neefs E., Van Ransbeeck E., Berkenbosch S., Clairquin R., De Vos L., Moelans W., Glorieux S., Baeke A., Korablev O., Vinogradov I., Kalinnikov Yu., Bach B., Dubois J.P., Villard E. Compact high-resolution space-borne echelle grating spectrometer with AOTF based order sorting for the infrared domain from 2,2 to 4,3 micrometer // Appl. Opt. 2006. V. 45 № 21. P. 5191–5206.

20. Bertaux J.-L., Nevejans D., Korablev O., Villard E., Quemerais E., Neefs E., Montmessin F., Leblanc F., Dubois J.-P., Dimarellis E., Hauchecorne A., Lefevre F., Rannou P., Chaufray J.-Y., Cabane M., Cernogora G., Souchon G., Semelin F., Reberac A., Van Ransbeek E., Berkenbosch S., Clairquin R., Muller C., Forget F., Hourdin F., Talagrand O., Rodin A., Fedorova A., Stepanov A., Vinogradov I., Kiselev A., Kalinnikov Yu., Durry G., Sandel B., Stern A., Gerard J.-C. SPICAV/SOIR on Venus Express: Three Spectrometers to Study the Global Structure and Composition of the Venus Atmosphere // Planet. Space Sci. 2007. V. 55. № 12. P. 1653–1672.
21. Chang I.C. Tuneable acousto-optic filters: an overview // Opt. Eng. 1977. V. 16:5. P. 455–460.
-