Измерения содержания парниковых газов в эксперименте «РУСАЛКА» с борта МКС с 2009 по 2012 гг.

Федорова А.А. (1), Трохимовский А.Ю. (1), Пацаева М.В. (1), Жарикова М.С. (1), Назарова Назарова А.В. (1), Кораблев О.И. (1), Виноградов И.И.
(1) Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

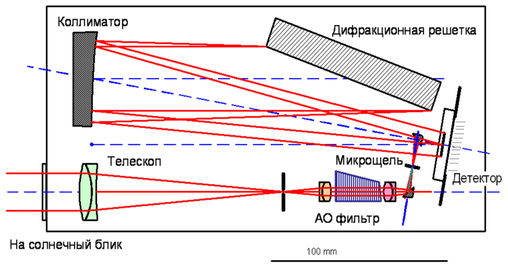
ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемый на Земле парниковый эффект тесно связан с содержанием в атмосфере таких газов, как углекислый газ (CO2) и метан (CH4). Одним из источников является хозяйственная деятельность человека, что приводит к увеличению среднего уровня концентрации газов. В настоящее время концентрация парниковых газов антропогенного происхождения в атмосфере Земли возрастает с каждым годом. Увеличение объемов выбросов, связанных с деятельностью человека, привело к текущему содержанию парниковых газов (ПГ), по данным NOAA, CO2 на март 2024 - 423,4 ppm, на март 2025 - 426,4 ppm (https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html). CH4 на февраль 2024 - 1925.99 ppb, на февраль 2025 - 1933.97 ppb (https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/). Из-за влияния, оказываемого на окружающую среду, возникла необходимость в контроле концентрации выбросов основных парниковых газов и поиска мест их происхождения. Помимо наземных сетей измерения, для отслеживания изменений состава атмосферы необходимы спутники и приборы для дистанционного мониторинга парниковых газов. Наиболее эффективным методом, решающим эту задачу, является спектральный анализ солнечного света, отраженного от поверхности в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне. В данной работе мы представляем исторические измерения спектрометра «Русалка» с борта международной космической станции (МКС), которые проводились с 2009 по 2012 гг. Эксперимент начал работу фактически одновременно с КА GOSAT. Измерения проводились космонавтами станции как вручную, так и с кронштейна через иллюминатор станции. Контроль облачности проводился параллельно съемке спектров видеокамерой. Сложность ручных измерений привела к большой выбраковке полученного набора данных, поэтому результаты не были опубликованы ранее. В данной работе мы представляем результаты измерений углекислого газа выполненные спектрометром.

РУСАЛКА

Спектрометр являлся модификацией прибора SOIR [1] для исследования атмосферы Венеры в рамках проекта «Венера-Экспресс». Прибор Русалка можно было использовать 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.

Прибор состоит из двух ключевых элементов: спектрометра с Эшелле решеткой и акустооптического перестраиваемого фильтра TeO_2, предназначенного для селекции дифракционных порядков решетки (рис.1). Спектрометр построен по автоколлимационной схеме с вертикальным разделением входного и выходного оптических пучков и горизонтальным направлением развертки спектра по отношению к плоскости изображения. Для получения компактной оптической схемы спектрометра использовалась схема Литтроу, в которой обычные коллимирующие и изображающие линзы собираются в одном внеосевом параболическом зеркале, при этом не требуется подстройка двух отдельных линз. [2]



Спектры измеряются детектором, содержащим 512 пикселей. 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′. Измеренная полоса пропускания АОПФ составляет 44,2 $см^{-1}$. Спектральный диапазон прибора (0,73–1,68 мкм) соответствует порядкам дифракции с 46 по 104. Итоговое разрешение прибора Русалка $\lambda/\Delta\lambda$~15000 (0.4 $см^{-1}$ для длины волны 1.6 мкм). На рис.2 представлены модельные функции пропускания для O_2 на 0,76 мкм, O_2 на1,27 мкм, CO_2 на1,58 мкм и CH_4 на 1,65 мкм, полученные для стандартной модели атмосферы.

ИЗМЕРЕНИЯ:

Эксперимент «Русалка» был доставлен на борт МКС 23 июля 2009 года. Орбита МКС имеет наклонение 52º, скорость движения 8 км/с, высота орбиты - 350 км и период 90 минут. Из-за загруженности космонавтов ежедневных наблюдений не планировалось. Запланированное количество сеансов составляло не менее одного в неделю. Специальные требования к географическому месту наблюдений не предъявлялись, но трассы должны быть разнообразны (по поверхности Африки, Европы, Америки и т.д.). Кроме того трассы должны были быть выбраны над сушей, так как водная поверхность в ИК-диапазоне имеет очень малый коэффициент отражения и измерения невозможны.

За время проведения эксперимента было выполнено 75 сеансов наблюдений (рис.2), из них 13 калибровочных измерений (11 – солнечного спектра, 2 – темнового сигнала). Из сеансов наблюдения атмосферы для 12 сеансов не удалось получить геометрии наблюдений по разным причинам. Еще 5 сеансов невозможно было обработать из-за человеческого фактора – ошибок в установке настроек прибора при начале наблюдений. Таким образом, прибор провел 45 значимых сеансов измерений.

Запись спектров для выбранного режима происходила с начала съемки цифровой фотокамерой и запускалась через кабель синхронизации. Снимки использовались как для привязки точки наблюдения, таки для оценки облачности во время наблюдения (рис. 3-4). Дальнейшая фильтрация данных проводилась для исключения наблюдений с высокой облачностью, а также по альбедо поверхности больше 0.1 для исключения наблюдений над океаном (рис.2).

Концентрация CO_2 определяется по полосе 1,58 мкм, CH_4 – по полосе 1,65 мкм. Дополнительно, прибор позволяет проводить измерения водяного пара в области полосы 1,31 мкм. В качестве каналов сравнения используется полоса поглощения O_2 1,27 мкм (табл.1), что отличает эксперимент от GOSAT и OCO-2 [3-4].

Парниковые газы – быстрая запись (для длинных экспозиций)	O_2 пор. 61	CH_4 пор. 47	Фон	CO_2 пор-к 48	H_2O пор. 59	O_2 пор. 61
Спектральный диапазон, $см^{-1}$	7858,9-7950,8	6055,2-6126		6184-6256,4	7601,2-7690,1	7858,9-7950,8
Время экспозиции, мсек	4514.53	5601.28	5601.28	4514.53	3038.8	4515.53

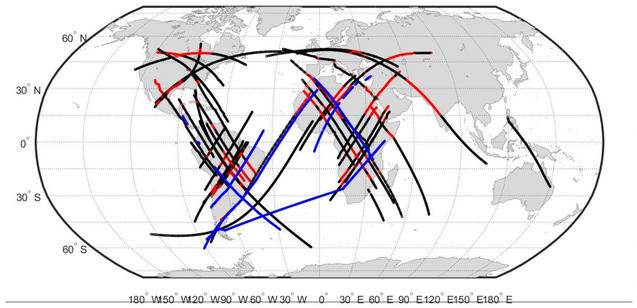


Рис.2. Трассы, вдоль которых проводилась съемка спектров. Синие точки – наблюдения, не подлежащие обработки из-за неправильной настройки; черные точки- наблюдения при высокой облачности и/или низком альбедо поверхности. Красные точки- значимые наблюдения.

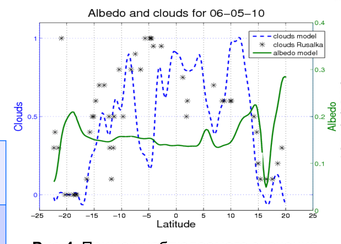


Рис.4. Пример наблюдаемого значения альбедо, а так же сравнение уровня облачности в метеоданных центра ECMWF и реальной облачности.

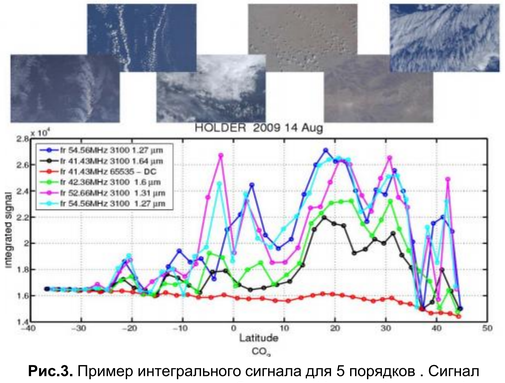


Рис.3. Пример интегрального сигнала для 5 порядков . Сигнал меняется в зависимости от облачности (фотографии сверху) и типа поверхности – слева океан, правее середины – суша.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для расчета спектров, получаемых экспериментом «Русалка» с орбиты Земли, нами была создана модель переноса излучения на базе полинейного расчета в ближнем инфракрасном диапазоне с учетом рассеяния света в атмосфере. В качестве спектроскопической информации использовалась база данных HITRAN 2020, а также континуум водяного пара модели MT_CKD_H2O. В качестве вертикальных профилей температуры и давления, а также атмосферных газов использовались метеоданные Европейского центра прогноза погоды ECMWF. При моделирование использовался солнечный спектра CAVIAR. В модели учитывалось релэевское рассение света. Перенос излучения с учетом рассеяния расчитывался на основе кода SHDOMPP (Spherical Harmonic Discrete Ordinate Method). Для решения обратной задачи мы использовали метод Левенберга — Марквардта. В алгоритме подгоняются от 7 до 8 параметров, такие как содержание CO2, CH4, O2, H2O, в зависимости от порядка дифракции; три параметра, описывающих спектральную зависимость альбедо поверхности с помощью полинома второго порядка. Дополнительно подгоняются спектральный сдвиг и полуширина аппаратной функции. Для всех рассматриваемых газов — CH4, CO2, H2O и O2 — применяется метод масштабирования профилей, при котором определяется коэффициент масштабирования для исходного профиля, полученного из данных ECMWF. Затем, для CO2 и CH4 рассчитывается среднее относительное содержание газа в столбе атмосферы. Случайные погрешности измерений всех определяемых параметров задаются ковариационной матрицей ошибок.

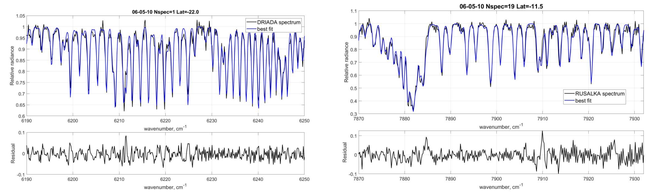


Рис.5. Примеры фитирования спектров при решение обратной задачи для наблюдений 06 мая 2010 года.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для получения результатов в эксперименте был выполнен учет всех возможных факторов влияющих на качество данных. При моделирование спектров были учтены вклад рассеянного света внутри прибора, переналожение порядков за счет формы функции АОТФ, исключены наблюдения с насыщением детектора за счет яркого сигнала при неправильной настройке прибора. Также была проведена дополнительная фильтрация наблюдений, показанных на рис.2. Уже имеющийся опыт экспериментов OCO-2 и GOSAT говорит о том, что только эффективная фильтрация по уровню сигнала для уменьшения случайной ошибки и фильтрация по вкладу аэрозоля могут дать приемлемый результат [5].

Поэтому была проведена дополнительная фильтрация, где рассматривались только наблюдения в порядке 48 с отношением сигнал-к-шуму больше 100. Для фильтрации аэрозоля использовалась полоса кислорода. Наблюдения рассматривалась, если восстановленное содержания кислорода отличается от истинного в пределах коэффициента от 0.95 до 1.05.

Поскольку полоса 1.27 мкм находится близко к полосе CO_2, она может быть эффективнее использована для коррекции воздушной массы, чем полоса кислорода 0.76 мкм Но поскольку порядки дифракции измерялись в эксперименте последовательно, измерения кислорода и углекислого газа, соответствуют разному времени наблюдений и такая коррекция проводилась, если точно участок наблюдений равномерен и значение кислорода не меняется вокруг наблюдения CO2.

В итоге были найдены наблюдения, удовлетворяющие всем условиях для четырех дат (таблица 2), менее 5% всех наблюдений эксперимента «Русалка». Это меньше выборки для больших орбитальных экспериментов, которая составляют около 10-15% и связанна со сложностями проведения эксперимента силами космонавтов. Несмотря на это, сравнение с наблюдениями GOSAT [4] для тех же дат, близких по географическому положению, показало хорошее согласие.

Дата	Координата	Русалка		GOSAT	
		XCO2, ppm	Ошибка	XCO2, ppm	Ошибка
06.05.2010	13S-11S	387.61	3.7	386.78	1.56
	22S-21S	390.1	6.1	387.5	0.99
09.09.2010	9S-11S	386.47	5.1		
	28N-32N	391.5	7.2	385.21	0.91
17.09.2010	25-30N	388.2	6.3	385.76	0.76
31.08.2011	15N	393.2	4.9	393,04 (3S)	1.1

ЛИТЕРАТУРА:

1. Korablev O.I., Bertaux J.-L., Vinogradov I.I. Compact high-resolution IR spectrometer for atmospheric studies. Proc. SPIE 2002 V.4818. P. 272-281;
2. О.И. Кораблев, А.Ю. и др. ПРИБОР «РУСАЛКА» ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ С БОРТА МКС, Оптический журнал, том 78, № 5, с. 44-58, 2011
3. Crisp D. Measuring atmospheric carbon dioxide from space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) //Earth observing systems xx. – SPIE, 2015. – T. 9607. – С. 960702.
4. Kasuya M., Nakajima M., Hamazaki T. Greenhouse gases observing satellite (GOSAT) program overview and its development status //Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan. – 2009. – Т. 7. – №. ists26. – С. To_4_5-To_4_10.
5. T. E. Taylor, C. W. O'Dell, D. M. O'Brien, N. Kikuchi, T. Yokotaet al., “Comparison of cloud-screening methods applied to GOSAT near-infrared spectra,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. **50**, 295 (2012). https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2160270

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-27-00338.