

---

УДК 629.7

## **Исследование возможности использования метода Differential Optical Absorption Spectroscopy для перспективной отечественной научной аппаратуры**

**Вороков А. В.**

*Корпорация „Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы“ имени А. Г. Иосифьяна, «Корпорация «ВНИИЭМ»,  
Хоромный тупик, 4, строение 1, Москва, 107078, Россия  
e-mail: vorokovpost@yandex.ru*

### **Аннотация**

Данная работа посвящена актуальной проблеме – исследованию возможности использования метода DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) для восстановления содержания малых газовых составляющих (МГС) атмосферы Земли по данным спектрометра для определения газового состава атмосферы СА-МП.

Высокая разрешающая способность аппаратуры СА-МП позволит обнаружить следы газовых компонент атмосферы на уровне пикселя, при этом её можно использовать для измерений концентраций МГС как естественного, так и антропогенного происхождения.

Использование метода DOAS при обработке данных с СА-МП позволит с высокой точностью определять количественное содержание газов и аэрозолей в атмосфере Земли, характеристики облаков. В данной работе рассмотрены некоторые проблемы его использования и математические методы их устранения.

**Ключевые слова:** метод DOAS, закон Бугера-Ламберта-Бэра, эффект Ринга, линии Фраунгофера.

### **Введение**

Задача измерения состава и характеристик атмосферы Земли является одной из приоритетных для целого ряда наук и сфер человеческой деятельности. Особенно актуальной

она является для экологии (определение количества вредных выбросов антропогенного происхождения, контроль состояния озонового слоя и т. д.) и метеорологии (характеристики облаков). Отечественных приборов, проводящих подобные измерения с космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли, на данный момент не существует. Данных только с зарубежной научной аппаратуры недостаточно для решения задачи контроля газового состава атмосферы на отдельных локальных участках поверхности Земли (например, на всей территории России).

В настоящее время в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» ведутся работы по созданию гидрометеорологического и океанографического космического комплекса мониторинга Земли четвертого поколения, в состав которого входит космический аппарат (КА) «Метеор-МП» №1. Основные орбитальные и технические характеристики КА «Метеор-МП» №1. Одной из основных задач данного КА является контроль динамики малых газовых составляющих атмосферы (МГС), влияющих на парниковый эффект и измерение отраженного от поверхности Земли солнечного излучения, рассеянного в атмосфере. Создание КА «Метеор-МП» №1 включен в Федеральную Космическую Программу (ФКП) России на 2006 – 2015 годы.

Таблица 1

Основные орбитальные и технические характеристики КА «Метеор-МП» №1

Тип орбиты	Солнечно-синхронная
Высота орбиты, км	820,7
Наклонение орбиты, град.	98,68
Эксцентриситет	0,00124
Аргумент перигея, град.	68,9
Период обращения, мин	101,307
Масса, кг	3200
Срок активного существования, лет	7

Для решения этих задач планируется использовать перспективную аппаратуру – спектрометр для определения газового состава атмосферы СА-МП (рис. 1), работающий в ультрафиолетовом, видимом, ближнем и среднем инфракрасных (ИК) диапазонах. Данные, полученные с СА-МП, позволят исследовать широкую область явлений, связанных с физико-химическими превращениями в атмосфере:

- в тропосфере: горение биомассы, природные и промышленные загрязнения, арктический туман, лесные пожары, штормовая пыль;
- в стратосфере: химия озона, вулканические процессы и солнечные протонные явления.

Восстановление содержания атмосферных МГС основано на знании процессов поглощения, рассеяния и эмиссии электромагнитного излучения в атмосфере, таких как:

- рассеяние молекулами воздуха (рэлеевское рассеяние, рамановское вращательное рассеяние);
- рассеяние и поглощение аэрозолями и облачной поверхностью (рассеяние Ми);
- поглощение и излучение молекулами МГС;
- рефракция из-за градиента плотности атмосферы;
- отражение и излучение Земной поверхности.

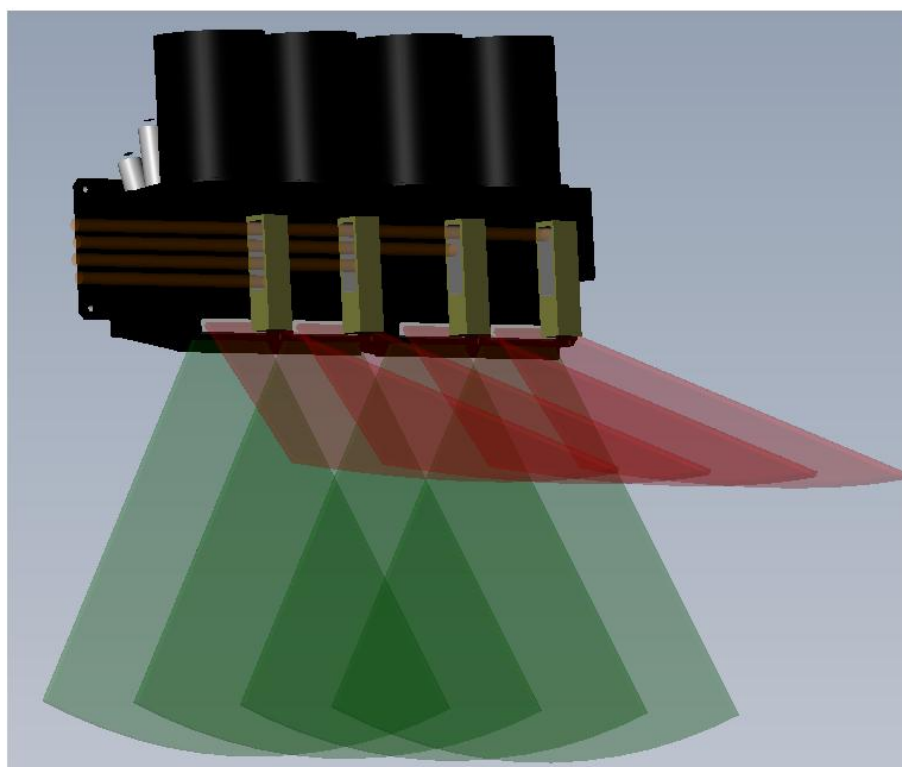


Рис. 1. Общий вид аппаратуры СА-МП

Основные характеристики аппаратуры СА-МП представлены в таблице 2.

## Основные технические характеристики СА-МП

№	Параметр	Значение
1	Спектральный диапазон каналов, нм (спектральное разрешение, нм)	240 – 334 (0,3) 320 – 452 (0,3) 430 – 800 (0,8) 755 – 910 (0,5) 900 – 1210 (0,5) 1200 – 1770 (1,0) 1934 – 2044 (0,3) 2259 – 2386 (0,3)
2	Режимы работы	лимбовый надирный
3	Пространственное разрешение, не хуже, км: - в лимбовом режиме - в надирном режиме*	3 x 130 30 x 60
4	Полоса обзора при надирных наблюдениях, км	1000
5	Радиометрическое разрешение, бит	14
6	Режим полетной калибровки	по излучению Солнца
* В настоящее время рассматривается возможность увеличения пространственного разрешения в надирном режиме до 16 x 20 км.		

Высокая разрешающая способность аппаратуры СА-МП позволит обнаружить следы газовых компонент атмосферы на уровне пикселя, при этом можно измерить концентрации МГС естественного и антропогенного происхождения. Ширина рабочих спектральных диапазонов также позволит определять концентрации аэрозолей и характеристики облаков.

Для количественного определения содержания малых газовых составляющих атмосферы предлагается использовать обработку спектральной плотности энергетической яркости рассеянного и поглощенного в атмосфере солнечного излучения при помощи метода

DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy), разработанного Бременским университетом (IUP). В данной статье будут рассмотрены основные положения данного метода и сделан вывод о целесообразности его применения для аппаратуры СА-МП.

### Описание метода DOAS

Метод DOAS основан на физическом принципе ослабления пучка излучения при его распространении в поглощающей среде. Свет, проходящий через атмосферу и отражающийся от поверхности Земли, частично поглощается находящимися на его пути газовыми компонентами, в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бэра [1]:

$$I_{\lambda}(S) = I_0 e^{-\sigma(\lambda)\rho S} \quad (1),$$

где  $I_{\lambda}(S)$  – интенсивность солнечного света, выходящего из исследуемой среды,  $I_0$  – интенсивность солнечного света, входящего в исследуемую среду,  $S$  – толщина слоя вещества, через которое проходит свет (оптический путь светового луча),  $\sigma(\lambda)$  – коэффициент, характеризующий взаимодействие молекулы поглощающего вещества со светом длины волны  $\lambda$ ,  $\rho$  – концентрация исследуемого вещества. Исходя из этой зависимости по характерным линиям поглощения можно установить тип и количество газовых составляющих в разных участках атмосферы.

Для наглядного представления метода восстановления газовых составляющих DOAS рассмотрим следующий опыт. На рисунке 2 представлена схема установки для проведения такого опыта [2].

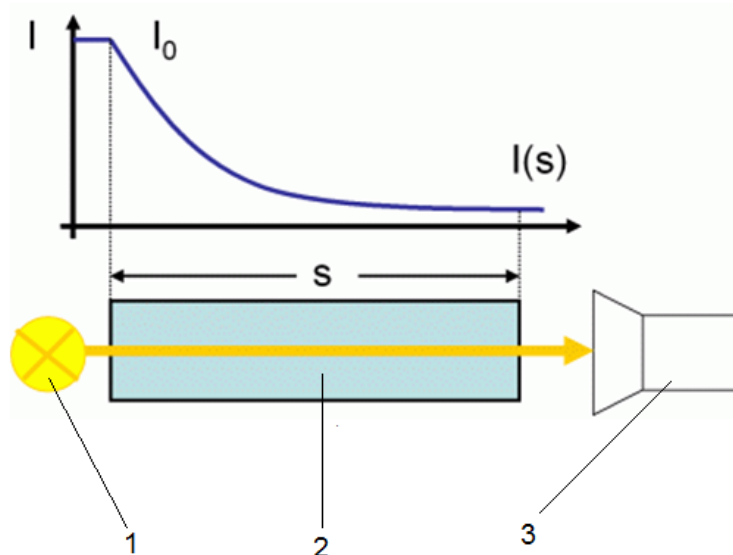


Рис. 2. Применение закона Бугера-Ламберта-Бэра для определения концентрации газовых составляющих в опыте

Свет от вторичного эталонного источника 1 проходит через ёмкость с различными газовыми составляющими 2 и регистрируется фотоприемным устройством (ФПУ) 3. При этом за счет поглощения света на молекулах газов можно оценить их химический состав и уровень содержания в ёмкости, используя метод DOAS.

Если ФПУ включить в состав какой-либо аппаратуры и расположить на спутнике дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), расположив входное окно перпендикулярно поверхности Земли (в надир), то суть проводимых измерений не изменится.

Метод DOAS применяется при обработке целевой информации, поступающей с аппаратуры GOME-2 (MetOp-A) и SCIAMACHY (Envisat). Для улучшения качественных характеристик информации, получаемой с российских КА, с учетом зарубежного опыта предлагается рассмотреть возможность использования метода DOAS для перспективной аппаратуры СА-МП, устанавливаемой на КА «Метеор-МП» №1.

Метод DOAS позволяет решать следующие задачи, необходимые для определения газового состава атмосферы:

- определение общего положения и рассеяния солнечного света путем нормирования измеренного спектра на спектр излучения Солнца (получение коэффициента отражения, необходимого для определения уровня сплошного фона поглощения);

- определения содержания газовой компоненты в наклонном столбе по линии визирования по степени поглощения в структурированном молекулярном (остаточном) спектре, для чего логарифм фона аппроксимируется полиномом и вычитается как базовый уровень и учитываются сечения поглощения компоненты (методики WFM-DOAS и AMC-DOAS);

- определение среднего оптического пути луча света в атмосфере. Этот путь, как правило, характеризуется коэффициентом воздушной массы (Airmass Factor), который имеет смысл его отношения к вертикальному оптическому пути света (надирный режим наблюдения);

- вычисление содержания газовой компоненты в вертикальном столбе.

Особенности метода DOAS:

- выделение структурированного молекулярного спектра поглощения на фоне широкополосного рассеянного излучения (рассеяние Ми, Рэлеевское рассеяние) с помощью высокочастотного фильтра;
- разделение процесса восстановления содержания МГС и расчетов газового излучения.

## Проблемы применения метода DOAS и предложения по использованию методик для обработки целевой информации аппаратуры СА-МП

При проведении спутниковых измерений с помощью аппаратуры СА-МП необходимо учитывать невозможность определения интенсивности световой волны, входящей в атмосферу ( $I_0$ ). Для устранения этого неизвестного из уравнения могут быть использованы два способа [2].

**Способ 1.** Сравнение нескольких измерений с различной длиной оптического пути света  $s$  (например измерения одного и того же атмосферного столба в надире и в лимбе, сделанные при нахождении КА «Метеор-МП» №1 на различных участках траектории полета). Если считать начальную интенсивность примерно одинаковой, то в результате деления одной формулы на другую ее можно исключить:

$$I(\lambda, S_1) = I_0 e^{-\sigma(\lambda)\rho S_1} \quad (2);$$

$$I(\lambda, S_2) = I_0 e^{-\sigma(\lambda)\rho S_2} \quad (3);$$

$$\frac{I(\lambda, S_1)}{I(\lambda, S_2)} = e^{-\sigma(\lambda)\rho(S_1 - S_2)} \quad (4).$$

**Способ 2.** Сравнение нескольких измерений в различных каналах аппаратуры СА-МП (на разных длинах волн):

$$I(\lambda_1, S) = I_0 e^{-\sigma(\lambda_1)\rho S} \quad (5);$$

$$I(\lambda_2, S) = I_0 e^{-\sigma(\lambda_2)\rho S} \quad (6);$$

$$\frac{I(\lambda_1, S)}{I(\lambda_2, S)} = e^{-\rho S(\sigma(\lambda_1) - \sigma(\lambda_2))} \quad (7).$$

В реальных условиях эксплуатации аппаратуры СА-МП в атмосфере Земли аэрозоли и облака будут рассеивать свет и, тем самым, снижать интенсивность прямого пучка света, при этом интенсивность в других направлениях увеличится. Кроме того, в достаточно редких случаях оказывается, что одной длине волны соответствует только один поглотитель и это также необходимо учитывать.

Решение этих проблем заключается в использовании измерений на нескольких длинах волн. Каждая молекула имеет характерный спектр поглощения и, следовательно, одновременные измерения на различных длинах волн позволяют разделить и оценить влияние различных поглотителей на интенсивность солнечного света. По существу, используется множество уравнений типа:

$$\begin{cases} I(\lambda_1, S) = I_0 e^{(-\sigma_1(\lambda_1)\rho_1 S - \sigma_2(\lambda_1)\rho_2 S - \sigma_3(\lambda_1)\rho_3 S \dots)} \\ I(\lambda_2, S) = I_0 e^{(-\sigma_1(\lambda_2)\rho_1 S - \sigma_2(\lambda_2)\rho_2 S - \sigma_3(\lambda_2)\rho_3 S \dots)} \\ I(\lambda_3, S) = I_0 e^{(-\sigma_1(\lambda_3)\rho_1 S - \sigma_2(\lambda_3)\rho_2 S - \sigma_3(\lambda_3)\rho_3 S \dots)} \end{cases} \quad (8).$$

Использование большого количества длин волн  $\lambda_i$  облегчает определение концентрации газовых составляющих  $\rho_i$  в атмосферном столбе. За счет большого количества спектральных каналов аппаратура СА-МП позволяет с высокой степенью точности измерять содержание МГС в атмосфере в различных спектральных диапазонах.

Использование метода DOAS предполагает независимость дифференциального сечения поглощения от высоты, т.е. от температуры. Хотя в действительности сечения поглощения озона и  $\text{NO}_2$  зависят от температуры, для определения эффективного сечения поглощения достаточно взять температуру, соответствующую максимуму среднего профиля.

Для определения наклонного содержания восстанавливаемого газа по измерениям в УФ и видимой области спектра, необходимо учитывать так называемый «Ринг-эффект», заключающийся в заполнении линий Фраунгофера в спектре уходящего излучения. Эффект Ринга связан с «неэластичным» рассеянием на молекулах  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$ , и рассматривается в данном методе как эффект поглощения солнечного излучения неким эффективным поглотителем.

Спектр такого эффективного поглотителя может быть рассчитан на основе радиационной модели. Эффекты молекулярного (рэлеевского) и аэрозольного рассеяния и плавно меняющиеся по спектру компоненты молекулярного поглощения описываются с помощью аппроксимирующего полинома по методу наименьших квадратов (методики WFM-DOAS и AMC-DOAS) [3].

Также существуют определенные проблемы оценки качества проведенных измерений при помощи метода DOAS в инфракрасных спектральных каналах аппаратуры СА-МП, связанные в первую очередь не с самим методом, а с применением в аппаратуре СА-МП иностранных ФПУ и недостаточностью опыта использования метрологического стенда для калибровки аппаратуры в ИК-диапазоне.

Метод DOAS состоит из нескольких условных методик, являющихся специфическими для учета конкретных измеряемых газовых компонент в различных спектральных диапазонах. Методики, которые предлагается использовать для обработки целевой информации аппаратуры СА-МП, перечислены в таблице 3:



Методики DOAS, планируемые к использованию для обработки целевой информации аппаратуры СА-МП

Молекула	Спектральный диапазон, нм	Обозначение методики	Назначение методики
O <sub>3</sub>	325 – 335	WFM-DOAS  SDOAS	Валидация на полувитке данных полного содержания озона с привлечением наземных измерений. Обработка вне структурированного спектрального интервала данных по содержанию МГС в УФ и видимом диапазонах при наблюдении в надир.
NO <sub>3</sub>	425 – 450	DOAS  SDOAS	Восстановление МГС методом дифференциальной оптической спектроскопии поглощения. Обработка вне структурированного спектрального интервала данных по содержанию МГС в УФ и видимом диапазонах при наблюдении в надир.
BrO	335 – 347(355)	DOAS	–"–
SO <sub>2</sub>	315 – 327	DOAS	–"–
HCHO	335 – 347(355)	DOAS	–"–
OCIO	365 – 389	DOAS	–"–
H <sub>2</sub> O	688 – 700	AMC-DOAS	Восстановление содержания водяного пара в вертикальном столбе.
CH <sub>4</sub>	1627(1630) – 1671	WFM-DOAS	–"– Определение содержания CH <sub>4</sub> в атмосфере Земли.

CO <sub>2</sub>	1558(1563) – 1594(1585)	WFM-DOAS	Определение содержания CO <sub>2</sub> в атмосфере Земли.
CO	2321 – 2335	WFM-DOAS	Определение содержания CO в атмосфере Земли.

### **Заключение**

Для улучшения качественных характеристик целевой информации, получаемых с российских КА, в данной работе предлагается использовать метод DOAS. Исследование возможности применения данного метода предлагается провести на спектрометре для определения газового состава атмосферы СА-МП перспективного КА «Метеор-МП» №1.

В данной работе были определены как положительные, так и отрицательные стороны применения данного метода.

К положительным сторонам метода DOAS можно отнести достаточно высокую точность результатов обработанных измерений, а также успешный опыт его использования при обработке данных с различных европейских спутников силами Института Физики Окружающей Среды (Institute of Environmental Physics IUP, Bremen, Germany).

Отрицательная сторона применения метода DOAS заключается в трудности установления степени достоверности проводимых измерений. Оценить качество получаемой информации можно только при помощи использования нескольких методов обработки и сравнении результатов СА-МП с результатами другой аналогичной аппаратуры зарубежных спутников или полигонными измерениями. Недостатком этого метода также является независимость дифференциального сечения поглощения от температуры, разной на разных высотах атмосферного столба.

Но не смотря на отрицательные стороны можно сделать вывод, что применение данного метода в качестве основного позволит обеспечить высокое качество получаемой информации на уровне зарубежных стандартов.

### **Список литературы**

1. Ю.Г. Якушенков «Теория и расчёт оптико-электронных приборов», г. Москва, «Машиностроение», 1989 г., 360 стр.
2. Andreas Richter «What is DOAS» (дата обращения - 21.08.2012) <http://www.iup.uni-bremen.de>

3. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук «Исследования точности спутниковых методов измерений газового состава атмосферы (аппаратура GOME и SCIAMACHY) / Ионов Д.В. // СПбГУ, 181 с., 2000.