

## Характеристики марсианского атмосферного аэрозоля для различных местных времён, широт и сезонов по данным спектрометра OMEGA европейской миссии MARS-EXPRESS

Б.С. Майоров <sup>1</sup>, А.В. Васильев <sup>2</sup>, Ж.-П. Бибринг <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН,  
117997 Москва, Профсоюзная, 84/32  
E-mail: Bogdan.Mayorov@iki.rssi.ru ;

<sup>2</sup>Физический факультет СПбГУ,  
198504 Санкт-Петербург, Ульяновская, 1  
E-mail: vsa@lich.phys.spbu.ru ;

<sup>3</sup>Институт космической астрофизики,  
Франция, 91405, Орсей, 120-121  
E-mail: jean-pierre.bibring@ias.u-psud.fr

На основе разработанного авторами алгоритма восстановления оптических и микрофизических свойств аэрозоля Марса по лимбовым профилям интенсивности излучения в нескольких спектральных интервалах интерпретировались данные спектрометра OMEGA европейской миссии Mars-Express. Предполагалось, что в атмосфере доминирует одна аэрозольная фракция с заданным комплексным показателем преломления. Аэрозоль рассматривался как полидисперсная система однородных сферических частиц с распределением по радиусам, описываемым одномодовым модифицированным гамма-распределением. Моделирование переноса излучения осуществлялось на основе разработанного авторами радиационного кода. В основе расчёта - метод статистического моделирования (Монте-Карло), позволяющий учесть многократное рассеяние излучения в сферически-симметричной атмосфере. Для нескольких десятков сеансов лимбовых наблюдений прибора OMEGA, отличающихся ареографической широтой области наблюдения, местным временем и марсианскими сезонами, были восстановлены высотные профили счётной концентрации частиц и модального радиуса функции распределения частиц по размерам.

**Ключевые слова:** аэрозоль, Марс, OMEGA, спектрометр, измерения, моделирование, атмосфера, лимб.

### Измерительный прибор и полученные данные

Картирующий спектрометр видимого и инфракрасного спектральных диапазонов для исследования минерального состава поверхности Марса OMEGA [1] успешно работает с 2004 г. в рамках европейской миссии Mars-Express [2]. Для задач изучения атмосферы наиболее подходят лимбовые режимы наблюдений, поскольку в этом случае минимизируется вклад в наблюдаемое излучение поверхности планеты (свойства которой сильно меняются в пространстве), а вклад атмосферы увеличивается ввиду возрастания воздушной массы.

Отметим некоторые характеристики гиперспектрометра OMEGA [1]: рабочий спектральный диапазон 0.37-5.1 мкм по длинам волн; спектральная дискретизация находится в пределах от 0.005 (для видимой области спектра) до 0.020 мкм (в инфракрасной); пространственная дискретизация составляет от 0.4 (в видимой и ближней инфракрасной области спектра) до 1.2 мрад (мгновенное поле зрения): с расстояния около 250 км от поверхности планеты (перицентр орбиты космического аппарата) это соответствует линейному размеру на лимбе около 2 км.

Прежде всего, предполагается, что твёрдая поверхность планеты имеет строго сферическую форму с радиусом 3390 км [3], и оптические свойства поверхности и атмосферы

обладают сферической симметрией (рис. 1). Также считается, что Солнце находится бесконечно далеко от области наблюдения: отсутствует солнечный параллакс. Не вдаваясь в детали, отметим, что для описания «геометрии наблюдений» прибора OMEGA с учётом указанных приближений достаточно использовать известные параметры  $i$ ,  $e$ ,  $\varphi$ ,  $h_t$ , представленные на рис. 1.

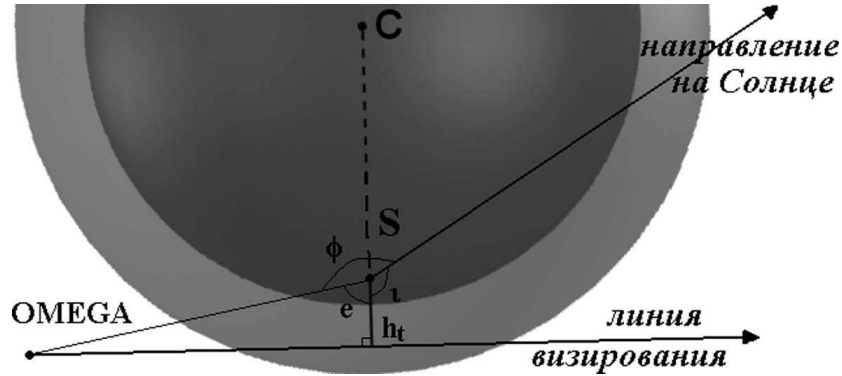


Рис. 1. Геометрические параметры, описывающие измерения прибора в рамках рассматриваемой модели:  $C$  - центр сферической симметрии оптических свойств поверхности (тёмно-серым) и атмосферы (светло-серым) планеты;  $S$  - точка пересечения перпендикуляра из  $C$  к линии визирования с поверхностью планеты;  $i$  - incidence угол;  $e$  - emergence угол;  $\varphi$  - phase угол;  $h_t$  - прицельная высота

Примеры измеренных интенсивностей  $I$  для нескольких длин волн представлены на рис. 2 в зависимости от прицельной высоты. В рамках рассматриваемой модели каждому измерению на рис. 2 соответствует четыре указанных на рис.1 параметра. Отметим, что гиперспектрометром OMEGA получены уже тысячи подобных лимбовых профилей интенсивности для различных длин волн, для разных условий наблюдения и марсианских сезонов.

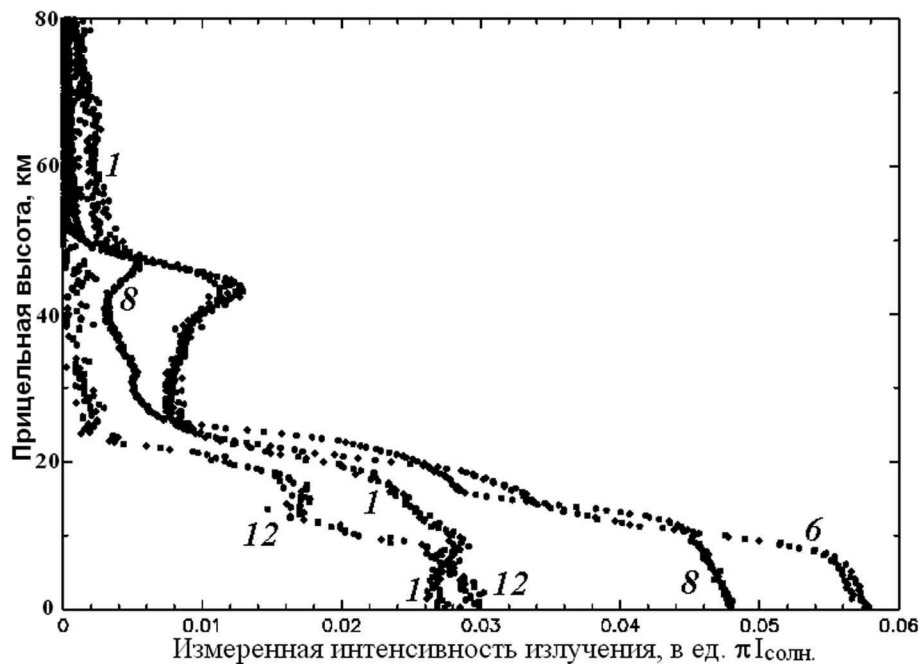


Рис. 2. Орбита № 291 (первое наблюдение). Длины волн указаны на рисунке в соответствии с табл.1

Таблица 1. Выбранные аэрозольные каналы и соответствующие (выбранные на основе данных [3-4] и) использованные в расчётах значения альbedo поверхности Марса  $A$ .

Номер	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
$\lambda$ , мкм	0.424	0.461	0.484	0.521	0.610	0.677	0.9978	1.2561	1.7291	2.2188	2.2869	3.4434
$A$	0.069	0.091	0.11	0.14	0.28	0.32	0.35	0.35	0.35	0.34	0.34	0.18

### Восстановление микрофизических характеристик аэрозоля

Рассмотрим задачу получения микрофизических свойств марсианской аэрозольной среды из лимбовых данных гиперспектрометра OMEGA.

В основе модели расчёта радиационного поля лежат «стандартные» приближения и уравнение переноса монохроматического солнечного излучения для неоднородной рассеивающей, поглощающей и излучающей среды произвольной формы, определяющее интенсивность излучения через оптические свойства среды (атмосферы) (см. [5-6]).

В рабочем диапазоне длин волн спектрометра OMEGA были выбраны интервалы («аэрозольные каналы») свободные от полос поглощения газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}$ ) с учётом разрешения и особенностей прибора (табл. 1) [6]. При расчётах учитывалась только аэрозольная экстинкция; молекулярное рассеяние и тепловое излучение поверхности и атмосферы планеты не учитывались.

Уравнение переноса излучения дополняется соответствующими граничными условиями. Падающее солнечное излучение рассматривается как пучок параллельно распространяющихся фотонов. Отражение от поверхности считается изотропным; зависимость альbedo поверхности Марса от длины волны излучения представлена в табл. 1.

Расчёт интенсивности рассеянного солнечного излучения осуществлён на основе радиационного кода SCATRD [7], адаптированного к анализу орбитальных спектральных измерений (код SCATRD-OFOS [8]). В основе расчёта - метод статистического моделирования (Монте-Карло), позволяющий учесть многократное рассеяние монохроматического излучения в сферически-симметричной атмосфере. Отметим некоторые особенности этого кода (применительно к решаемой задаче). Прежде всего, оптические параметры атмосферы - непрерывные кусочно-линейные функции высоты над сферической поверхностью планеты: т.е. слои, на которые разбивается атмосфера, неоднородны. Кроме того, индикатрисы рассеяния задаются в виде таблиц (т.е. можно использовать произвольные индикатрисы).

Не учитывается конечность мгновенного поля зрения прибора и его движение в процессе измерения. Измерения, в которых поверхность Марса попадает в поле зрения прибора, не рассматривались.

Аэрозольная модель, как формальная, математическая функция может быть достаточно сложной и содержать много параметров (характеризующих различные фракции и моды, несферичность формы частиц и т.п.), но, чем сложнее модель, тем, в общем случае, меньше точность восстановления её многочисленных параметров и тем сложнее их интерпретация. Поэтому здесь (как и в работе [6]), ввиду отсутствия достаточной статистики прямых измерений, мы ограничились моделью, описывающей оптические свойства аэрозоля небольшим числом варьируемых (искомых) параметров. Возможность параметризации спектральной зависимости оптических характеристик аэрозоля для задач дистанционного зондирования атмосферы Марса подробно рассмотрена в [6] и была применена при обработке результатов измерений прибора OMEGA.

Основные предположения таковы:

- доминирует одна аэрозольная фракция с известным комплексным показателем преломления вещества – фиксированная функция  $m(\lambda)$ ;
- аэрозоль – полидисперсная система однородных сферических частиц с непрерывным распределением по радиусам  $r$ , которое аппроксимируется одномодовым модифицированным гамма-распределением (традиционно применяемым в исследованиях атмосфер планет [9-11]) вида:

$$f(r) = \frac{\gamma(r/r_m)^\alpha (\alpha/\gamma)^{(\alpha+1)/\gamma} \exp(-(\alpha/\gamma)(r/r_m)^\gamma)}{r_m \Gamma((\alpha+1)/\gamma)},$$

причём  $\gamma \equiv 0.5$  [6, 10-11], т.е. вышенаписанная функция  $f(r)$  – функция двух параметров: модального радиуса  $r_m$  и безразмерного параметра  $\alpha$ ; однако, для упрощения алгоритма на данном этапе исследования отвечающий за ширину функции распределения параметр был зафиксирован:  $\alpha \equiv 1.5$  [11].

Были использованы данные по  $m(\lambda)$  из популярной полуэмпирической модели MarsDust [12]. В основе вычислений – теория Ми и известный алгоритм расчёта оптических параметров ансамбля частиц для единичной концентрации [13].

Варьировались высотные профили-параметры  $n(h)$  и  $r_m(h)$ . Подробное описание метода приведения расчётных интенсивностей к измеренным можно найти в [6].

## Результаты

В результате были получены аэрозольные профили  $n(h)$  и  $r_m(h)$  (рис. 3) для нескольких десятков сеансов наблюдений. Заметим, что ошибки восстановленных профилей составляют  $\sim 100\%$  и были оценены на основе вариаций исходных параметров в пределах  $\approx \pm 10\%$ . Зависимость результирующих профилей аэрозольных свойств от альбеда поверхности, параметра  $\alpha$ , химического состава вещества аэрозоля представлена в [6].

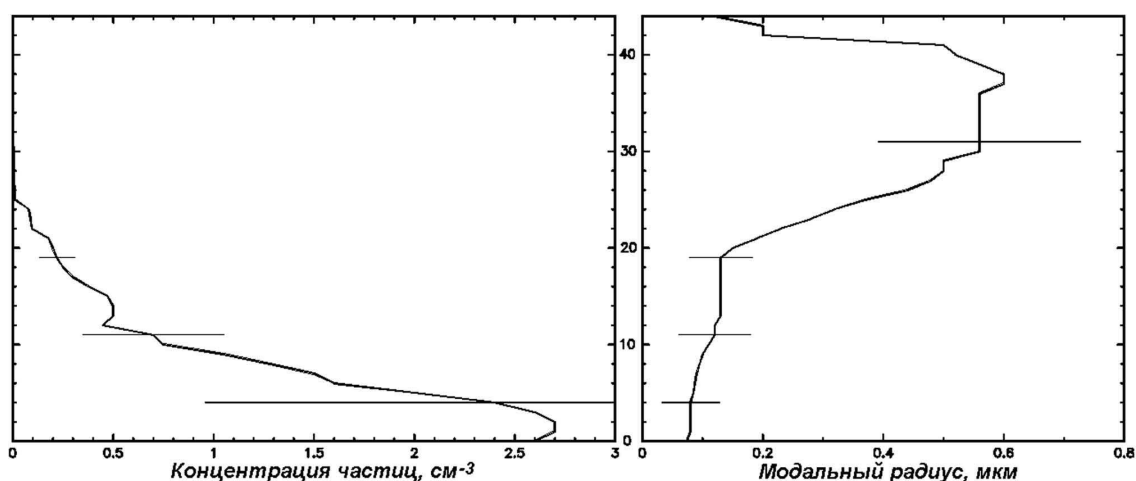


Рис. 3. Восстановленные вертикальные профили концентрации и размера аэрозольных частиц для орбиты № 567 (второе наблюдение)

Проанализированы данные нескольких десятков сеансов наблюдений, для которых получены вертикальные профили аэрозольных характеристик в атмосфере Марса, полученная слоистая структура аэрозольных свойств по вертикали. Обработанные сеансы наблюдений относятся к различным локальным временам, ареографическим широтам и сезонам Марса, что позволяет исследовать поведение аэрозольных характеристик в зависимости от этих параметров. Для получения детальных таких зависимостей планируется обработать сотни лимбовых сеансов измерений гиперспектрометра OMEGA. На рис. 4 представлены некоторые результаты обработки, выполненные к настоящему времени.

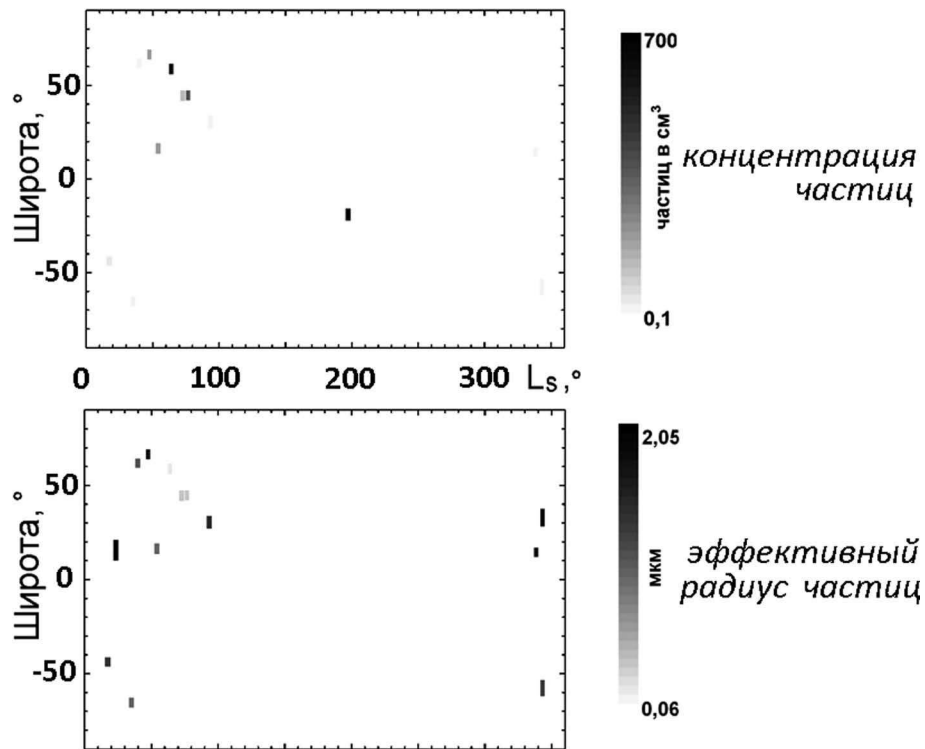


Рис. 4. Зависимость свойств аэрозоля от широты и сезона ( $L_s$ ) на Марсе.  $h = 10$  км.  
Комплексный показатель преломления пыли из модели MarsDust

Большую часть полученных (но не приведённых здесь) вертикальных профилей (в виде графиков и численных значений) можно найти на интернет-странице <http://spectrum.iki.rssi.ru/optics/>, на официальном сайте Института космических исследований РАН (<http://www.iki.rssi.ru/>).

## Литература

1. Bibring J.-P., Soufflot A., Berthé M. и др. Omega: observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glacés et l'Activité // Mars Express. The scientific payload. SP-1240 "Mars Express: a European mission to the Red planet" / A. Wilson (ed.): ESA, ESTEC, 2004. P.37-49.
2. Wilson A. (ed.) Mars Express. The scientific payload. SP-1240 "Mars Express: a European mission to the Red planet", 2004. ESA, ESTEC, 216 p.
3. Kieffer H.H., Jakosky B.M., Snyder C.W., Matthews M.S. (ed.) Mars // The university of Arizona press, Tucson, 1992. p. 1498.
4. Erard S. A spectro-photometric model of Mars in the near-infrared // Geophysical Research Letters, 2001. V. 28, №7, P.1291-1294.

5. *Ленюль Ж.* (ред.) Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах: стандартные методы расчёта // Л., Гидрометеиздат, пер. с англ., 1990. 263 с.
6. *Васильев А.В., Майоров Б.С., Бибринг Ж.-П.* Восстановление высотных профилей микрофизических характеристик марсианского аэрозоля по лимбовым измерениям спектрометра OMEGA миссии Mars Express // *Астрономический вестник*, 2009. Т. 43, №5, С.406-418.
7. *Васильев А.В.* Численное моделирование интенсивности многократно рассеянного солнечного излучения и производных от нее с учетом сферической геометрии атмосферы (компьютерный код SCATRD). *Вестник Санкт-Петербургского университета*, сер.4: Физика, химия. 2006. Вып. 3, С.3-14.
8. *Майоров Б.С., Васильев А.В., Vibration J.-P., Засова Л.В.* Восстановление высотных профилей оптических характеристик марсианского аэрозоля по лимбовым измерениям спектрометра OMEGA миссии Mars-express // V конференция молодых учёных "Фундаментальные и прикладные космические исследования" 8-9 апреля 2008г., г.Москва. ИКИ РАН, посвящённая Дню космонавтики / Тезисы докладов. Москва. ИКИ РАН, 2008. С.27.
9. *Дейрменджан Д.* Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами // М.: Мир, пер. с англ., 1971. 167 с.
10. *Маров М.Я., Шарп В.П.* Оптические характеристики модельных аэрозолей атмосфер Марса и Венеры // *Астрономический вестник*, 1997. Т. 31. №4. С.291-313.
11. *Korablev O.I., Moroz V.I., Petrova E.V., Rodin A.V.* Optical properties of dust and the opacity of the Martian atmosphere // *Advances in Space Research*, 2005. V. 35. №1. P.21-30.
12. *Ockert-Bell M.E., Bell J.F., Pollack J.B. и др.* Absorption and scattering properties of the Martian dust in the solar wavelengths // *Journal of Geophysical Research*, 1997. V. 102. №E4, P.9039-9050.
13. *Васильев А.В.* Универсальный алгоритм расчёта оптических характеристик однородных сферических аэрозольных частиц // *Вестник Санкт-петербургского университета*. Сер.4. Физика, химия. I.Одиночные частицы, 1996. Вып. 4. №25. С.3-11, II.Ансамбли частиц, 1997. Вып. 1. №4. С.14-24.

## **Characteristics of Martian atmosphere aerosol for various local times, latitudes, and seasons from the data of OMEGA spectrometer of Mars-Express European mission**

**B.S. Mayorov<sup>1</sup>, A.V. Vasilyev<sup>2</sup>, J.-P. Bibring<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Space research institute of RAS  
117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.  
E-mail: Bogdan.Mayorov@iki.rssi.ru ;*

<sup>2</sup>*The Physical Faculty of St. Petersburg State University  
198504, St. Petersburg, Petrodvorets, 1 Ulyanovskaja str.  
E-mail: vsa@lich.phys.spbu.ru ;*

<sup>3</sup>*L'Institut d'Astrophysique Spatiale  
France, 91405 Orsay cedex, 120-121  
E-mail: jean-pierre.bibring@ias.u-psud.fr*

The OMEGA spectrometer limb intensity profiles of European Mars-Express mission were analyzed by the algorithm of optical and microphysical Martian aerosol properties retrieval in some spectral bands designed by authors. It was supposed that the only one aerosol fraction with a determined complex refraction index dominates in the atmosphere. Aerosol is described as a polydisperse system of homogeneous spherical particles with the single-mode modified gamma particle size distribution function. The modeling of radiation transfer is based on the code designed by the authors. The computations are based on statistical modeling (Monte-Carlo method) to take into account a multiple scattering of radiation in the spherically symmetric atmosphere. Altitude profiles of aerosol concentration and modal radius of particle size distribution function were retrieved for several decades of limb observation sessions of OMEGA device for various Martian latitudes of observed regions, local times and seasons.

**Keywords:** aerosol, Mars, OMEGA, spectrometer, measurements, simulation, atmosphere, limb.