

## Восстановление характеристик марсианского атмосферного аэрозоля для двух фракций 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>, М. Винцедон<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  
E-mail: mathieu.vincendon@gmail.com

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 на каждой определённой высоте в атмосфере доминирует лишь одна из двух аэрозольных фракций: пыль или водяной лёд с заданными комплексными показателями 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 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, моделирование, атмосфера, лимб, пыль, водяной лёд.

### Измерительный прибор

Картирующий спектрометр видимого и инфракрасного спектральных диапазонов для исследования минерального состава поверхности Марса OMEGA (Bibring et al., 2004) успешно работает с 2004 г. в рамках европейской миссии Mars-Express (Wilson, 2004). 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 (Bibring et al., 2004): рабочий спектральный диапазон  $0.37\div 5.1$  мкм по длинам волн  $\lambda$ ; 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 (перигеум 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 (Kieffer et al., 1992), 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  $l$ ,  $e$ ,  $\varphi$ ,  $h_t$ , представленные на рис. 1.

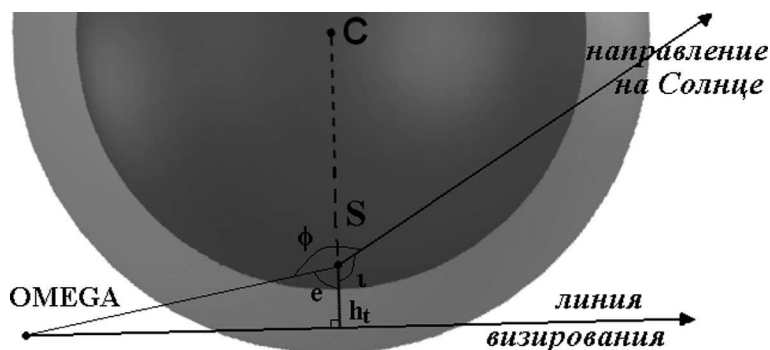


Рис. 1. Геометрические параметры, описывающие измерения прибора в рамках рассматриваемой модели:  $C$  – центр сферической симметрии оптических свойств поверхности (тёмно-серым) и атмосферы (светло-серым) планеты;  $S$  – точка пересечения перпендикуляра из  $C$  к линии визирования с поверхностью планеты;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

### Полученные данные и их подготовка к анализу

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.

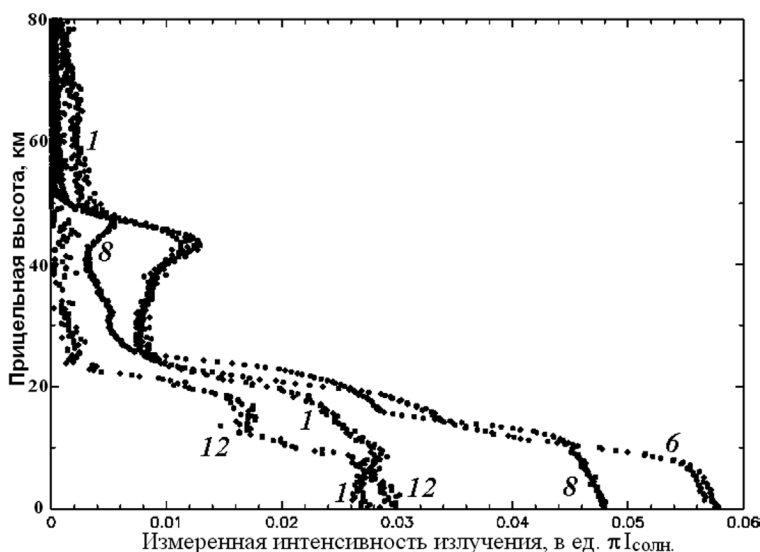


Рис. 2. Орбита № 291. Длины волн указаны на рисунке в соответствии с табл. 1

В каждом сеансе наблюдений прибора были получены несколько десятков профилей подобных представленным на рис. 2, т. к. использовалась целая линейка детекторов. Профили, соответствующие каждому пикселю, близки друг к другу по своим геометрическим параметрам, что позволило усреднить данные и использовать для анализа некоторый средний профиль.

Таблица 1. Выбранные аэрозольные каналы (выбранные на основе данных (Kieffer et al., 1992; Erard, 2001) и использованные в расчётах значения альbedo поверхности Марса А

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	1.0837	1.2561	1.7291	2.2188	2.2869	3.4434
А	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. (Ленобль, 1990; Васильев и др., 2009)).

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) (Васильев и др., 2009). 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 (Васильев, 2006), адаптированного к анализу орбитальных спектральных измерений (код SCATRD-OFOS). 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 (Васильев и др., 2009)), ввиду отсутствия достаточной статистики прямых измерений, мы ограничились моделью, описывающей оптические свойства аэрозоля небольшим числом варьируемых (искомых) параметров (см., например, (Васильев и др., 2009)).

Основные предположения таковы:

- на каждой высоте над поверхностью планеты доминирует только одна из двух аэрозольных фракций с известным комплексным показателем преломления вещества – 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 (Дейрменджан, 1971; Маров, Шари, 1997; Korablev et al., 2005)) 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 для упрощения алгоритма на данном этапе исследования был зафиксирован параметр  $\gamma=0.5$  (Васильев и др., 2009; Маров, Шари, 1997; Korablev et al., 2005), а также безразмерный параметр, отвечающий за ширину функции распределения,  $\alpha=1.5$  (Korablev et al., 2005). Таким образом, вышенаписанная функция  $f(r)$  – функция одного параметра: модального радиуса  $r_m$ . В данном случае эффективный радиус  $r_{eff}=10r_m$  (Васильев, 1997).

Данные по  $m(\lambda)$  для пыли были взяты из популярной полуэмпирической модели MarsDust (Ockert-Bell et al., 1997), а для водяного льда использовались данные из (Warren, 1984). В основе вычислений – теория Ми и известный алгоритм расчёта оптических параметров ансамбля частиц для единичной концентрации (Васильев и др., 1996).

Варьировались высотные профили-параметры  $n(h)$  и  $r_{eff}(h)$ . Подробное описание метода приведения расчётных интенсивностей к измеренным можно найти в (Васильев и др., 2009).

## Результаты

Были проанализированы данные нескольких сеансов наблюдения прибора OMEGA. В результате были получены вертикальные профили аэрозольных характеристик в атмосфере Марса: профили  $n(h)$  и  $r_{eff}(h)$  (рис. 3) для двух вышеуказанных аэрозольных фракций; получена слоистая структура аэрозольных свойств по вертикали. Заметим, что ошибки восстановленных профилей составляют ~100% и были оценены на основе вариаций исходных параметров в пределах  $\approx \pm 10\%$ . Зависимость результирующих профилей аэрозольных свойств от альбедо поверхности, параметра  $\alpha$ , химического состава вещества аэрозоля представлена в (Васильев и др., 2009).

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.

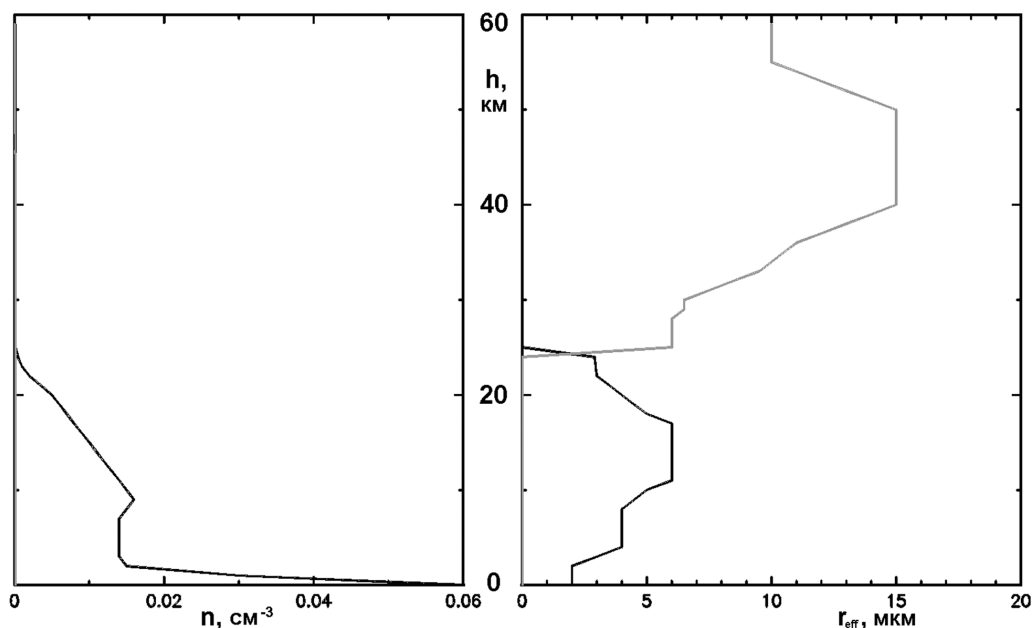


Рис. 3. Восстановленные вертикальные профили концентрации и размера аэрозольных частиц для орбиты № 291. Чёрная кривая – для пыли, серая – для водяного льда

## Литература

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971, пер. с англ., 167 с.
5. Ленобль Ж. (ред.) Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах: стандартные методы расчёта. Л.: Гидрометеиздат, 1990, пер. с англ. 263 с.
6. Маров М.Я., Шарп В.П. Оптические характеристики модельных аэрозолей атмосфер Марса и Венеры // Астрономический вестник, 1997. Т. 31. №4. С.291-313.
7. Bibring J.-P., Soufflot A., Berthé M. и др. Omega: observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces 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.
8. Erard S. A spectro-photometric model of Mars in the near-infrared // Geophysical Research Letters, 2001. V. 28, №7, P.1291-1294.
9. Kieffer H.H., Jakosky B.M., Snyder C.W., Matthews M.S. (ed.) Mars // The university of Arizona press, Tucson, 1992. p. 1498.
10. 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.
11. 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.

12. *Warren S. G.* Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave // *Applied optics*, 1984. V. 23. No. 8, P.1206-1225.
13. *Wilson A.* (ed.) Mars Express: a European mission to the Red planet // *Mars Express. The scientific payload*. SP-1240, ESA, ESTEC, 2004. 216 p.

## **Retrieval of Martian atmosphere aerosol characteristics for two fractions 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>, M. Vincendon<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  
E-mail: mathieu.vincendon@gmail.com*

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 from two ones (dust or water ice) with a determined complex refraction index dominates at the determined atmosphere altitude. 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 limb observation sessions of OMEGA device for various Martian latitudes of observed regions, local times and seasons.

**Keywords:** aerosol, Mars, OMEGA, spectrometer, simulation, atmosphere, limb, dust, water ice.