

Исследование спектральных характеристик поверхности Фобоса по данным HRSC (High-Resolution Stereo Camera) с космического аппарата «Марс-Экспресс»

В.С. Пацын, В.А. Малинников, А.В. Гречищев

Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК),
105064, Москва, Гороховский пер., 4,
e-mail: v_patsyn@mexlab.ru

В статье представлены результаты спектральных исследований поверхности Фобоса по данным дистанционного зондирования с помощью аппаратуры HRSC (High-Resolution Stereo Camera) европейской миссии «Марс Экспресс». Авторами проведены исследования спектральных характеристик поверхности Фобоса, используя метод «цветового соотношения». Рассчитаны индексы для изображений, полученных при разных условиях съёмки. Было выявлено, что цветовое отношение V/NIR изменяется в интервале от 0,70 до 1,40.

Ключевые слова: Фобос, HRSC, «Марс Экспресс», реголит, индексы, Марс, спектральные характеристики.

Объект исследования

Фобос является малым астрономическим телом неправильной формы. Поверхность Фобоса может быть представлена эллипсоидом, размеры которого $13,3 \times 11,1 \times 9,3$ км (Wählisch et al., 2010).

Большая ось Фобоса направлена на Марс (рис. 1). Фобос имеет круговую орбиту, радиус которой 9515 км (рис. 2) (Willner et al., 2008). Орбита Фобоса близка к экваториальной плоскости Марса и наклонена под углом $\sim 240^\circ$ к плоскости эклиптики. Фобос обращается вокруг Марса за 7 ч 39 мин, при этом продолжительность марсианских суток 24 ч 39,5 мин. Таким образом, Фобос за марсианские сутки три раза восходит над горизонтом Марса на востоке и заходит на западе.

На Фобосе отсутствует какая-либо эндогенная тектоническая активность. Внешний слой реголита модифицируют такие факторы, как солнечный ветер, космические лучи и метеориты. Таким образом, Фобос может представлять собой тот первородный материал, из которого и образовались планеты Солнечной системы. Поэтому его исследования представляют особый интерес. Анализ материала поверхности этого спутника Марса может дать информацию о ранних этапах образования солнечной системы, об эволюции планет, в том числе и Земли.

Доступные данные и геометрия съёмки

Для исследования спектральных характеристик поверхности Фобоса были использованы данные четырех спектральных каналов (IR, Red, Green, Blue) полученные прибором HRSC с космического аппарата «Марс-Экспресс» (Jaumann et al., 2007).

Характеристики спектральных каналов

Канал	Угол отклонения от надирного, град	Спектральный диапазон, нм
Инфракрасный	+15,9	970 ± 45
Зелёный	+3,3	530 ± 45
Синий	-3,3	440 ± 45
Красный	-15,9	750 ± 20

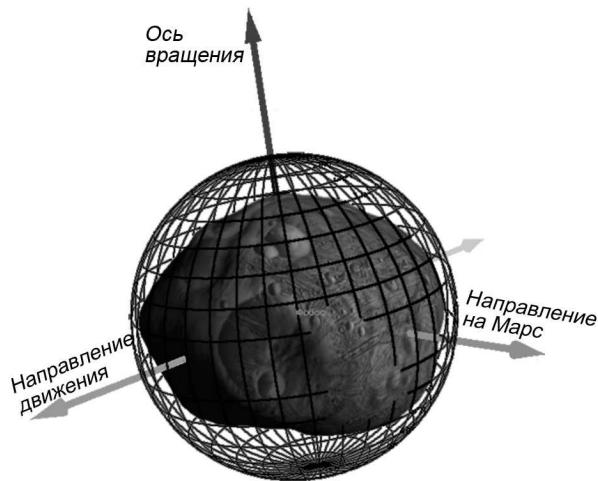


Рис. 1. Направления осей Фобоса

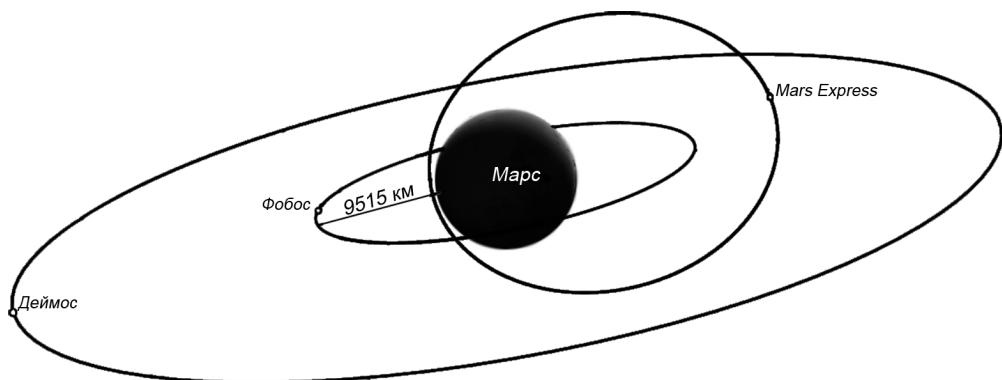


Рис. 2. Положения орбит Фобоса, Деймоса, КА «Марс-Экспресс»

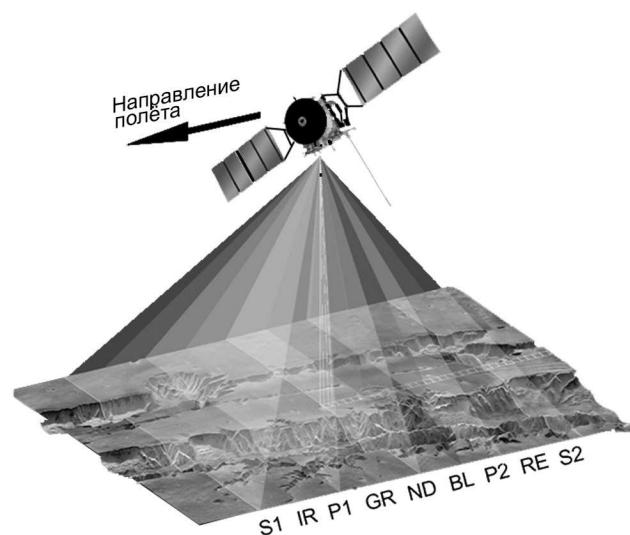


Рис. 3. Геометрия съёмки КА «Марс-Экспресс»

Из всего набора данных только 56 орбит содержали изображения Фобоса во всех четырех каналах (рис. 3).

Для геометрического проецирования изображений Фобоса (рис. 4), полученных камерой HRSC КА «Марс Экспресс» в картографическую систему координат, использовалось программное обеспечение (ПО) ISIS (Integrated Software for Imagers and Spectrometers), работающее под операционной системой Linux. При проецировании изображений в ISIS используются данные о положении космического аппарата, форме небесного тела и его ориентации, положении солнца и другая информация необходимая для расчета значений широты/долготы Фобоса и фотометрических углов наблюдения (рис. 5). Эта информация содержится в SPICE ядрах, доступных на сайте <http://wwwnaif.jpl.nasa.gov/naif/>.

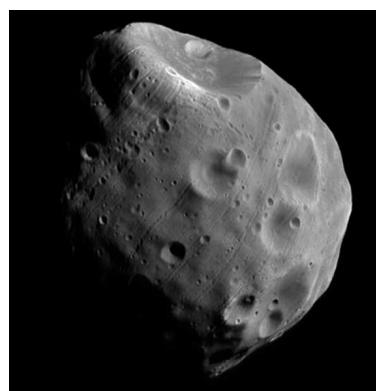


Рис. 4. Изображение до трансформирования, орбита № 0756 GR-канал



Рис. 5. Изображение после трансформирования, орбита № 0756 GR-канал

Таким образом, были преобразованы все спектральные снимки 56 орбит, при этом, после анализа полученных изображений, было выявлено, что для дальнейшей обработки подходят только 29 из них. Это связано с тем что, множество изображений оказались сбоями либо имели не полный комплект данных для отдельных каналов (в равной степени часто отсутствовали RED-канал и IR-канал).

Спектральная обработка данных HRSC

Из 29 орбит были отобраны изображения с наименьшими фазовыми углами от 2 до 40° (при больших фазовых углах, на поверхностьную яркость сильное влияние оказывает рельеф). Таких изображений оказалось девять (орбиты № 0715, 2446, 2756, 2805, 4332, 4373, 5362, 5381 и 8017), при этом практически все они покрывали один и тот же участок Фобоса (рис. 6).

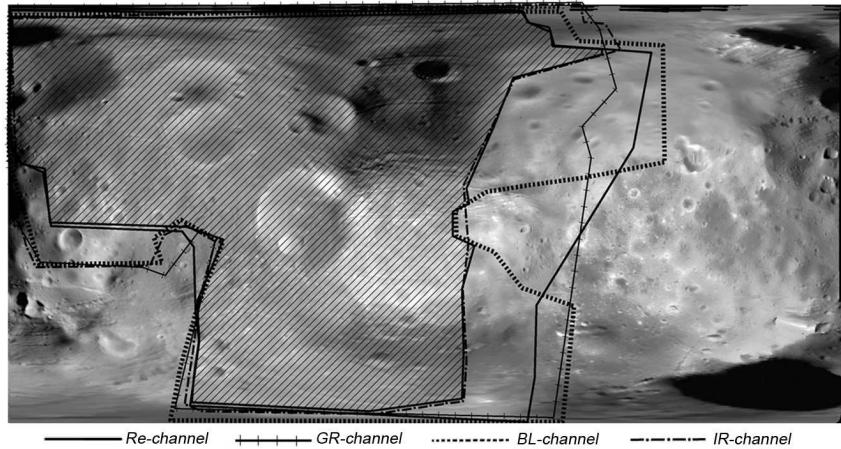


Рис. 6. Покрытие ортофотоплана поверхности Фобоса (Wählsch et al., 2010), преобразованными данными HRSC в каждом из четырех каналов; штриховкой обозначена область перекрытия всех каналов для орбит № 0715, 2446, 2756, 2805, 4332, 4373, 5362, 5381 и 8017

Фотометрическая нормализация трансформированных изображений выполнена в программном комплексе ISIS путём деления каждого пикселя изображения на косинус угла падения солнечного излучения в этом пикселе (рис. 7).

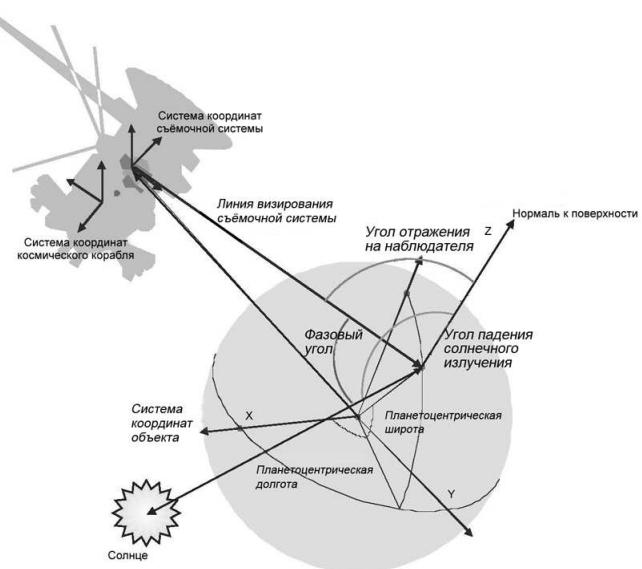


Рис. 7. Схема определения фазового угла, угла падения и отражения солнечного излучения

На основе этих изображений были рассчитаны спектральные индексы — цветовые отношения V/NIR, где V — спектральная яркость в «видимом» диапазоне (получена путём сложения синего и зелёного каналов и делением суммы на два), а NIR — спектральная яркость в ближнем инфракрасном канале.

Таким образом, рассчитаны индексы для изображений, полученных при разных условиях съёмки. Выявлено наличие вариации цветового отношения между разными пролётами. Величина этих вариаций была уменьшена, по отношению к эталонному изображению, путём введения поправочного коэффициента, значение которого варьировалось от 0,87 до 1,25 для различных орбит. При этом изображение витка 5381 принято в качестве эталонного ввиду того, что оно имеет небольшой ($\sim 32^\circ$), а самое главное, практически одинаковый во всех спектральных каналах, фазовый угол.

Поверхность Фобоса была сегментирована по значениям спектрального отношения V/NIR на следующие типы реголита (рис. 8). При этом «красный» материал имеет более высокую отражательную способность в ближнем инфракрасном диапазоне, а «синий» в видимом.

- а) «красный» - $V/NIR = 0,7 \div 0,8$;
 - б) «оранжевый» - $V/NIR = 0,8 \div 0,9$;
 - в) «коричневый» - $V/NIR = 0,9 \div 1,0$;
 - г) «голубой» - $V/NIR = 1,0 \div 1,1$;
 - д) «синий» - $V/NIR = 1,1 \div 1,3$.
 - е) «зеленовато-синий» - $V/NIR = 1,3 \div 1,4$.
- 

Рис. 8. Типы реголита поверхности Фобоса по значениям спектрального отношения V/NIR

Далее приведены примеры индексных и цветосинтезированных изображений для соответствующих орбит (рис. 9, 10, 11).

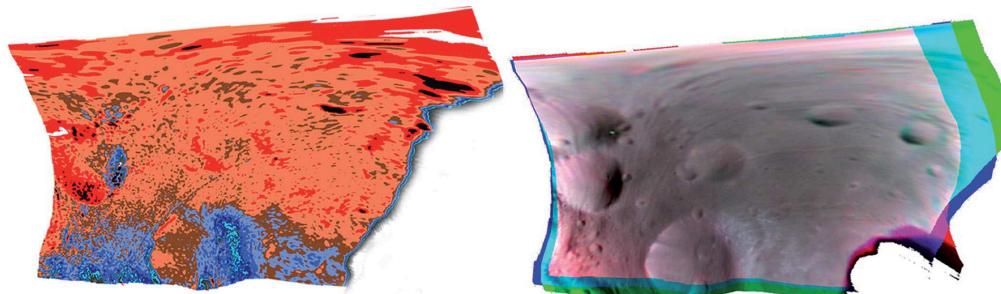


Рис. 9. Индексное и цветосинтезированное изображения Фобоса (красный, зелёный и синий каналы), орбита № 5381

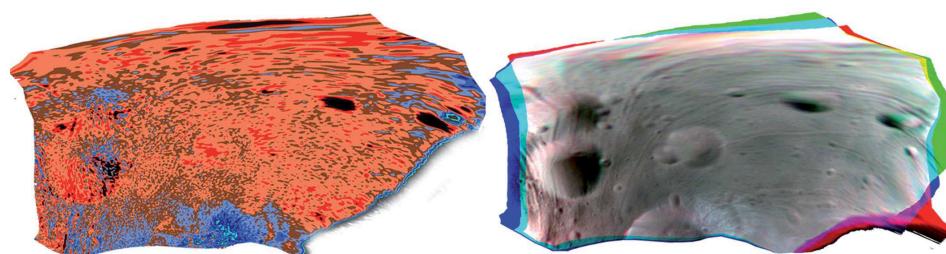


Рис. 10. Индексное и цветосинтезированное изображения Фобоса (красный, зелёный и синий каналы), орбита № 2805

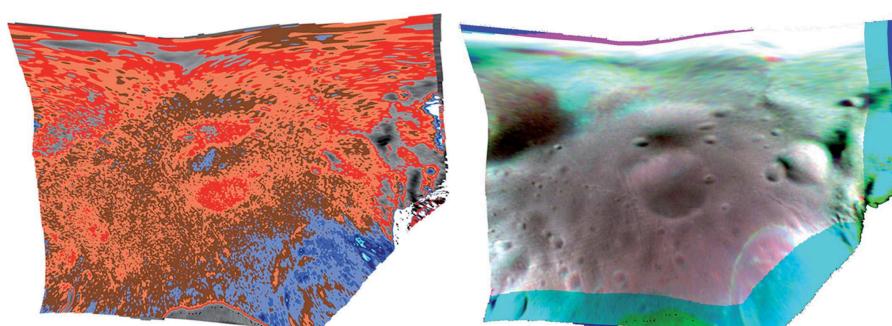


Рис. 11. Индексное и цветосинтезированное изображения Фобоса (красный, зелёный и синий каналы), орбита № 5362

Индексные изображения подтверждают, что реголит является спектрально неоднородным, при этом цветовое отношение V/NIR изменяется от 0,70 до 1,40. Встречаются аномальные значения цветового отношения на границах между освещёнными и неосвещёнными участками (дно и стенки кратеров), а также на участках неточного совмещения изображений. Эти аномалии легко определяются по цветосинтезированному изображению, и исключаются из анализа спектральной неоднородности Фобоса.

Повторяемость значений спектральных индексов оценивалась по результатам их воспроизведения на отдельных участках изображений Фобоса, которые получены с разных орбит при различных условиях съёмки. Пространственное распределение значений V/NIR воспроизводится практически на всех индексных изображениях, несмотря на различное пространственное разрешение и условия наблюдения.

На основе обработанных снимков, построена мозаика цветосинтезированных изображений и индексных изображений V/NIR на территорию Фобоса, покрытую данными HRSC во всех четырех каналах (рис. 12).

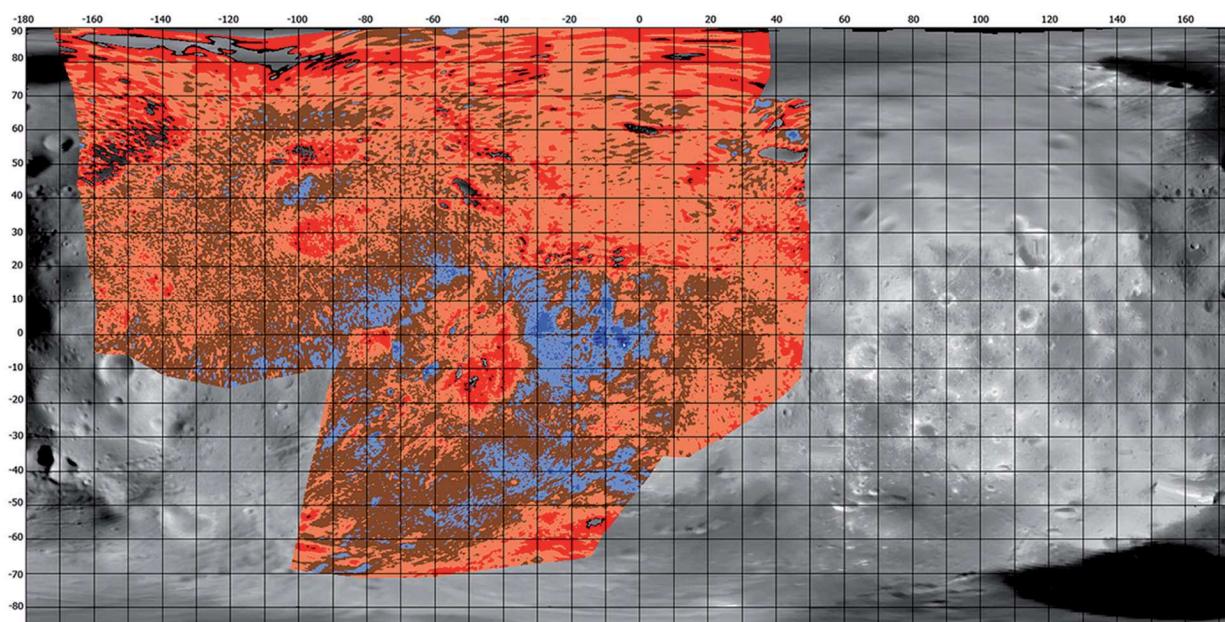


Рис. 12. Мозаика индексных изображений V/NIR, совмещенная с ортофотопланом поверхности Фобоса

Анализ результатов

Анализ индексных изображений показал, что существует связь между пространственным распределением цветового отношения V/NIR и поверхностными структурами Фобоса. «Голубой» материал присутствует на кромке кратера Стикни и распространяется к югу и юго-востоку от него, имея при этом небольшие вкрапления «синего» материала и совсем небольшие «зеленовато-синего». Этот участок хорошо распознается на изображениях камеры HRSC КА «Марс-Экспресс». «Красный» материал покрывает юго-восточную бровку кратера Стикни, а также сосредоточен внутри и вокруг небольших кратеров, таких как Кластил, Друнло и др. «Коричневый» и «оранжевый» материалы занимают остальную поверхность, при этом «коричневый» материал преобладает в районе кратера Стикни, на подмарсианской стороне Фобоса. Практически все валы молодых кратеров имеют на индексном изображении «оранжевый» цвет.

Цветовое отношение является одним из важных критериев при анализе вещественного состава Фобоса и его сравнении с имеющимися метеоритами-аналогами. Используя значения спектральной яркости для небольшого ряда метеоритов с низким альбедо, приведённые в работе (Аванесов и др., 1994), были проведены сопоставления значений V/NIR индексных изображений и значений V/NIR метеоритов-аналогов.

Цветовое отношение V/NIR для углистых хондритов находится в интервале 0,7÷1,0, т.е. по нашей шкале они являются более «красными», чем чёрные хондриты отношение V/NIR которых 0,9…1,1; обыкновенные хондриты и ахондриты имеют значения 1,0…1,1; 1,1…2,3 соответственно. Цветовое отношение V/NIR «красного», «оранжевого» и «коричневого» материалов 0,7…1,0 характерны для углистых хондритов. Однако «голубой», «синий» и «зеленовато-синий» цвет на бровке и снаружи кратера Стикни (V/NIR 1,1…1,4) скорее всего, соответствует чёрным хондритам, обыкновенным хондритам или базальтовым ахондритам.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ по постановлению № 220 «О мерах по привлечению ведущих учёных в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования» по договору № 11.G34.31.0021, заключенного между Министерством образования и науки РФ, профессором Юргеном Оберстом и Московским государственным университетом геодезии и картографии.

Литература

1. Аванесов Г.А. и др. Телевизионные исследования Фобоса. М.: Наука, 1994. 168 с.
2. Wählisch M. et al. A new topographic image atlas of Phobos // Earth and Planetary Science Letters. 2010. V. 294. P. 547–553.
3. Willner K. et al. New astrometric observations of Phobos with the SRC on Mars Express // Astronomy and Astrophysics. 2008. V. 488. P. 361–364.
4. Jaumann R. et al. The high-resolution stereo camera (HRSC) experiment on Mars Express: Instrument aspects and experiment conduct from interplanetary cruise through the nominal mission // Planetary and Space Science. 2007. V. 55. P. 928–952.

Research of spectrometric characteristics of the surface of Phobos on the HRSC data from the Mars Express spacecraft

V.S. Patsyn, V.A. Malinnikov, A.V. Grechishchev

The Moscow state university of geodesy and cartography,
105064, Moscow, Gorohovsky pereulok, 4,
e-mail: v_patsyn@mexlab.ru

The article presents results of the spectral research of Phobos' surface from remote sensing data by the HRSC of the Mars Express European mission. The authors have conducted research into Phobos' surface spectral reflectance, using the “color ratio” method. Spectral indexes for a set of images have been calculated. A variation of the color relation V/NIR within range from 0.70 to 1.40 has been revealed.

Keywords: Phobos, HRSC, Mars Express, regolith, indexes, Mars, the spectral characteristics.