

Алгоритм автономного выбора места посадки КА «Фобос-Грунт» по телевизионным изображениям

Б.С. Жуков, С.Б. Жуков

*Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32
E-mail: bzhukov@nserv.iki.rssi.ru*

Для информационной поддержки автоматической посадки КА «Фобос-Грунт» на поверхность Фобоса в реальном времени будет проводиться обработка изображений, получаемых широкоугольной телевизионной камерой (ШТК), которая входит в состав телевизионной системы навигации и наблюдения (ТСНН). В частности, будет строиться карта неоднородности поверхности, по которой может оцениваться пригодность места посадки, прогнозируемого по текущим траекторным измерениям, а в случае его непригодности приниматься решение о перенацеливании КА на наиболее ровный участок в поле зрения ШТК. Карта неоднородности строится по признаку относительной дисперсии яркости изображения с дополнительным учетом наличия теней и близости крупных неоднородностей. Время выполнения операций по построению карты неоднородности на процессорах камер ШТК составляет около 0.1 с. Алгоритм и реализующее его бортовое программное обеспечение отработаны по реальным изображениям Фобоса, Марса и Луны высокого разрешения, а также по изображениям специально подготовленных шероховатых поверхностей.

Ключевые слова: КА «Фобос-Грунт», посадка на Фобос, ТСНН, бортовая обработка изображений, карта неоднородности поверхности.

Задачи ТСНН по выбору места посадки КА «Фобос-Грунт»

Основной задачей миссии «Фобос-Грунт» является посадка на Фобос и доставка на Землю образцов его грунта.

Важную роль в проекте отводится Телевизионной системе навигации и наблюдения (ТСНН), которая будет использоваться для решения как научных, так и навигационных задач, включая информационную поддержку посадки на Фобос (Аванесов и др., 2010). В состав ТСНН входят две узкоугольные (УТК) и две широкоугольные (ШТК) телевизионные камеры, характеристики которых приведены в табл.1. Каждая камера имеет процессор ADSP-21060 с тактовой частотой 24 МГц, позволяющий проводить обработку получаемых изображений в реальном времени.

Приоритетной задачей съемок Фобоса с орбит искусственного спутника Марса является уточнение района посадки. При этом разрешение изображений УТК будет достигать 0,4 м.

К выбору места посадки предъявляются следующие требования (рис.1):

- размер площадки – 10 м, что примерно в 3 раза превышает диаметр посадочного модуля (около 3 м);
- угол α наклона КА – не более 20° для того, чтобы избежать опрокидывания КА;
- отсутствие выступов поверхности высотой h более 20 см на базе 3 м, на которые может опереться днище КА, сделав невозможным фиксацию части опор КА на поверхности Фобоса.



Рис.1. Схема положения посадочного модуля КА «Фобос-Грунт» на поверхности Фобоса

Таблица 1. Основные характеристики камер ТСНН

Параметры	ТСНН	
	УТК	ШТК
Фокусное расстояние, мм	500	18
Отн. отверстие	1 : 7	1 : 2
Спектральные зоны, мкм	0,4...1,0	0,4...1,0
Размер элемента ПЗС, мкм	7,4	7,4
Кол-во активных элементов	1000x1000	1000x1000
Угл. разрешение, угл. с	3,05	84,8
Поле зрения, град	0,85	23,3
Радиометр. разрешение, бит	10	10
Объем флэш-памяти, Мбайт	16	16
Масса, кг	2,8	1,6
Энергопотребление, Вт	8	8
Количество приборов	2	2

Рельеф поверхности Фобоса определяют кратеры, борозды, а также небольшое количество валунов. Предварительно район посадки выбран на основании имеющихся в настоящее время снимков Фобоса с разрешением ~ 4 м. Его размеры соответствуют размерам эллипсу рассеяния точки посадки, составляющим по оценкам 400 x 800 м соответственно по широте и долготе. Хотя этот район будет уточнен по орбитальным изображениям УТК, разрешение которых будет на порядок лучше, вряд ли удастся выбрать район указанных размеров без неровностей рельефа, которые могут представлять опасность при посадке. Поэтому по полученным с орбиты снимкам необходимо выбрать для посадки район с минимальным количеством опасных неровностей, а выбор конкретного места посадки проводить автономно при спуске с высоты 300...50 м по телевизионным изображениям. При этом по получаемым при спуске изображениям в реальном времени должна строиться и передаваться в бортовой вычислительный комплекс (БВК) карта, характеризующая пригодность поверхности для посадки, по которой может оцениваться место посадки, прогнозируемое по текущим траекторным измерениям, и в случае его непригодности приниматься решение о выполнении дополнительного бокового маневра КА для его приведения к оптимальному месту посадки.

Кроме того, в процессе посадки по телевизионным изображениям будут проводиться измерения высоты и боковых смещений КА, резервирующие измерения, выполняемые штатными средствами – лазерным высотомером и доплеровским измерителем скорости и дальности. Алгоритмы этих измерений описаны в (Гришин и др., 2007; Гришин, 2008; Гришин, Белинская, 2009,2010) и в данной работе не рассматриваются.

Фотометрический метод характеристики рельефа поверхности

Поскольку вычислительных ресурсов процессоров камер ТСНН не достаточно для построения в реальном времени трехмерной модели поверхности Фобоса, был выбран фотометрический способ характеристики рельефа. При расчетном фазовом угле (угле Солнце – объект – наблюдатель) при посадке, равном 50° , большие камни могут распознаваться по отбрасываемым ими теням, а склоны кратеров и борозд – по перепадам яркости, связанным с их наклонами и определяемым индикатрисой рассеяния поверхности.

Возможность применения фотометрического метода для характеристики рельефа поверхности Фобоса определяется следующими факторами:

– поверхность Фобоса относительно однородна по составу, вследствие чего неоднородность ее изображения определяется, в основном, рельефом;

– предварительный выбор района посадки должен обеспечить отсутствие в этом районе крупных неровностей рельефа, например, кратеров диаметром ~ 100 м или более, на склонах которых могут быть плоские площадки размером ~ 10 м (фотометрический метод учитывает неровность поверхности лишь в пределах указанной площадки).

Угловое распределение яркости поверхности небесных тел, покрытых темным реголитом, хорошо описывается теоретическими моделями (Нарке, 1966, 1993; Lumme, Bowell, 1981), которые представляют его в виде

$$L(i, e, g) = \frac{2F\rho_0 \cos i}{\pi(\cos i + \cos e)} f(i, e, g), \quad (1)$$

где F – поток падающего солнечного излучения, ρ_0 – нормальное альbedo, i и e – углы падения и наблюдения для наблюдаемого элемента поверхности, g – фазовый угол. Функция $f(i, e, g)$, зависящая от микро- и макро-шероховатости поверхности и учитывающая эффекты многократного рассеяния, несколько отличается в разных моделях. Особенностью закона рассеяния (1) является то, что при малых значениях фазового угла яркость поверхности слабо зависит от ее наклона, а при нулевом фазовом угле зависимость яркости от наклона поверхности вообще отсутствует.

Рассмотрим, например, структуру изображений кратеров, которые, вероятно, будут основной формой рельефа в выбранном районе посадки. Согласно (Duxbury, 1991), профиль кратеров на поверхности Фобоса может быть аппроксимирован функцией

$$z(r) = \begin{cases} -kD \cos(\pi r / D), & 0 \leq r \leq D/2, \\ 0, & r > D/2, \end{cases} \quad (2)$$

где D – диаметр кратера, k – коэффициент глубины кратера, равный отношению его глубины к диаметру и составляющий 0.1-0.2, r – радиальное расстояние от центра кратера, z – высота точки над средней поверхностью Фобоса. Значение $k = 0,2$ соответствует молодым кратерам с четкими краями, а $k = 0,1$ является типичным для старых полуразрушенных кратеров.

Рис. 2 иллюстрирует модельные изображения кратеров при $k = 0,1$ и $0,2$, рассчитанные по соотношению (1), где для простоты пренебрегалось эффектами многократного рассеяния. Молодые кратеры, которые представляют наибольшую опасность при посадке, имеют наибольший контраст и потому должны быть более легко опознаваемы.

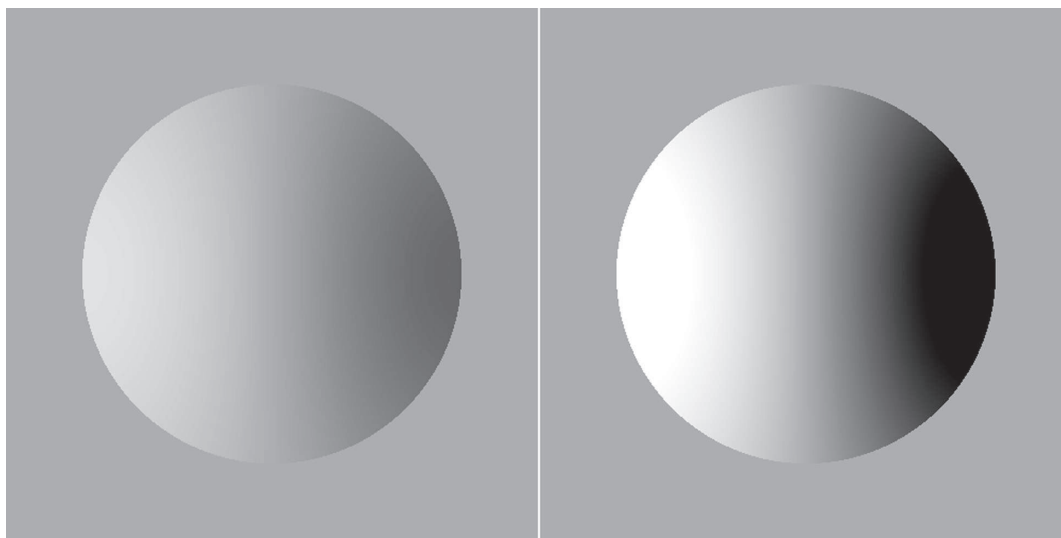


Рис. 2. Модельные изображения старых ($k = 0,1$, слева) и молодых ($k = 0,2$, справа) кратеров при фазовом угле 50°

Рис.3 показывает максимальную величину выступов поверхности (на базе 3 м) и максимальных наклонов КА в случае, когда часть или все опоры КА попадают в кратер. Диаметр кратера, при котором размер выступа может превышать критическую величину в 20 см, уменьшается от 4 м при $k = 0,1$ до 2 м при $k = 0,2$. Ограничения по наклону КА менее критичны: максимальный угол наклона в 20° реализуется на склоне кратеров диаметром более 5 м при $k = 0,2$ и более 20 м при $k = 0,1$.

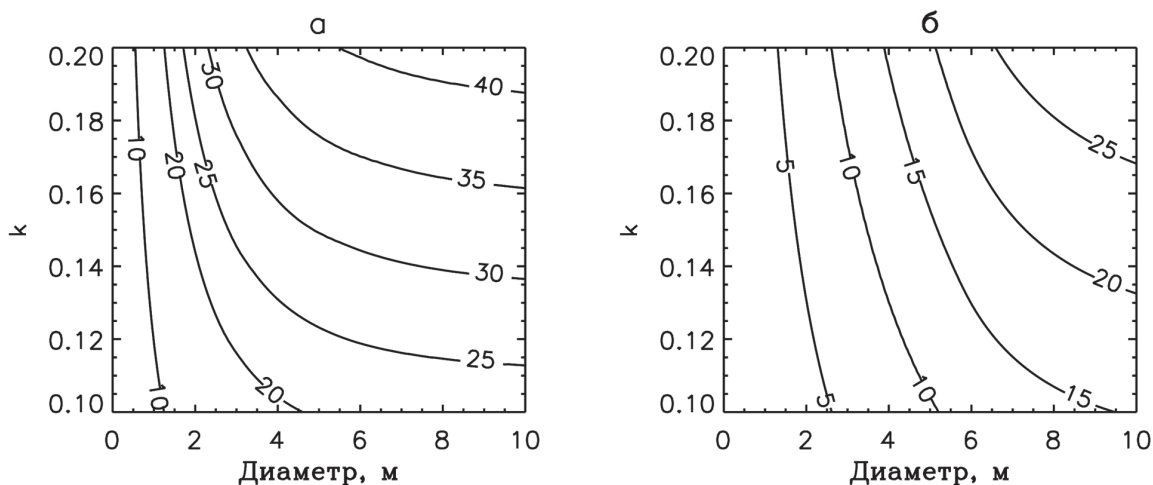


Рис. 3. Зависимость максимальной высоты выступов профиля кратеров на базе 3 м (а) и максимального наклона КА (б) от диаметра и коэффициента глубины k кратера. Цифры у кривых: высота выступов в сантиметрах (а) и угол наклона КА в градусах (б)

Выбор параметров карты неоднородности

В номинальном режиме карта неоднородности будет использоваться на высотах от 300 до 50 м, для которых и необходимо оптимизировать ее параметры так, чтобы:

(1) разрешение изображений находилось в интервале 10...50 см с тем, чтобы, с одной стороны, распознавать опасные неровности, а с другой стороны – избежать влияния

на неоднородность изображения мелкомасштабной структуры реголита, не влияющей на безопасность посадки, но могущей иметь высокий контраст;

(2) размер окна соответствовал площадке требуемого размера $L = 10$ м на поверхности Фобоса (на малых высотах допустимо уменьшение размера площадки).

Однако и вне указанного интервала высот необходимо обеспечить разумное построение карты неоднородности, хотя, возможно, и не с оптимальными параметрами.

Как показывает табл. 2, использование 4-кратно загрубленного изображения, позволяющее резко сократить вычислительные затраты по сравнению с обработкой исходного изображения, обеспечивает в интервале высот 300...50 м требуемое разрешение 50...8 см. Для адекватного функционирования алгоритма также на высотах менее 50 м требуется загрузка исходного изображения в 8 раз, а на высотах менее 25 м – в 20 раз.

Структура получаемых изображений анализируется в движущемся окне, размер которого соответствует требуемому размеру площадки L на поверхности Фобоса. На высотах $H = 300...100$ м выполняется требование по размеру площадки $L = 10$ м. На больших высотах, где карта неоднородности использоваться не будет, целесообразно по-прежнему выполнять вычисления по 4-кратно загрубленному изображению, чтобы не увеличивать время обработки, но при этом допуская ухудшение разрешения и увеличение размеров площадки (табл.2).

Таблица 2. Характеристики карты неоднородности в зависимости от высоты

Высота, м	1000	500	300	200	100	50	25	10
Разрешение изображения, см:								
– исходного	42.0	21.5	13.2	9.1	5.0	3.0	1.9	1.3
– 4-кратно загрубленного	165	83.1	50.2	33.8	17.3	9.1		
– 8-кратно загрубленного						17.3	9.1	
– 20-кратно загрубленного							21.5	9.1
Поле зрения, м	400	200	120	80	40	20	12	4
Размер площадки, м	32.9	16.4	10	10	10	6.1	4.2	3.0
Размер окна в числе ячеек	2	2	2	3	6	7	10	18
Перекрытие окон	1/2	1/2	1/2	2/3	5/6	6/7	9/10	17/18

На высотах менее 100 м возможности выбора площадки размером 10 м в поле зрения ШТК ухудшаются из-за уменьшения линейного размера поля зрения камеры, которое, например, составляет 20 м при $H = 50$ м, 10 м при $H = 25$ м и 4 м при $H = 10$ м. Поэтому на высотах ниже $H_1 = 100$ м принят линейный закон уменьшения размера площадки:

$$L(H) = 10 \cdot c(H_1 - H)$$

При $c = 0.0778 \text{ м}^{-1}$ размер площадки уменьшается от 10 м при $H = 100$ м до 3 м при $H = 10$ м. При необходимости закон изменения размеров площадки с высотой может быть модифицирован в полете.

Вычислительный алгоритм

В качестве основного критерия неоднородности изображения выбрана относительная дисперсия яркости в пределах окна:

$$d = \sigma_2 / a_2, \quad (3)$$

где σ и a – среднеквадратическое отклонение и среднее значение яркости в окне.

Рис. 4 иллюстрирует изменение критерия (3) в зависимости от диаметра D и коэффициента глубины k модельного кратера (2). Сопоставление с рис. 3а показывает, что критерий $d > 0.002$ адекватно идентифицирует кратеры, представляющие опасность для посадки: В реальной ситуации мелкомасштабные неровности поверхности будут приводить к более высоким значениям d как на ровных, так и на опасных участках.

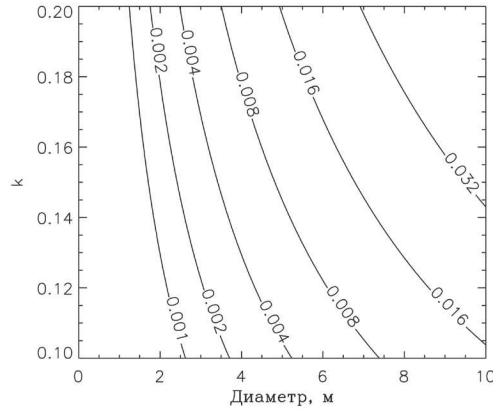


Рис. 4. Относительная дисперсия яркости к окну размером 10 м, содержащем модельный кратер с диаметром D и коэффициентом глубины k

Для расчета карты неоднородности разработан следующий эффективный в вычислительном отношении алгоритм:

(1) Четырехкратно заглубленное изображение делится на 25×25 ячеек размером 10 x 10 макро-пикселей (1 макропиксел = 4 x 4 исходных пикселей). На высотах менее 50 м изображение в пределах каждой ячейки дополнительно заглубляется с коэффициентом 2, а на высотах менее 25 м – с коэффициентом 5.

(2) В каждой ячейке вычисляется дисперсия и среднее значение, образуя массивы $disp(i,j)$ и $mean(i,j)$ размерности 25×25 . Далее обрабатываются только эти массивы, что позволяет для оптимального выбора места посадки анализировать перекрывающиеся окна без существенного увеличения вычислительных затрат.

(3) Находится максимум средней яркости ячеек $mean_{max}$ и по нему определяется порог для идентификации теней: $thresh_{dark} = 0.2 \cdot mean_{max}$.

(4) Рассчитывается количество ячеек в окне: $W_s = L(H) / (0.001644H) / 10$, где 0.001644H – размер пикселя 4-кратно заглубленного изображения с высоты H . Если $W_s < 2$, то полагается $W_s = 2$.

(5) Окно $W_s \times W_s$ перемещается по изображению с шагом в 1 ячейку и для каждого положения окна, которое задается координатами i, j своего ближайшего к началу координат угла, вычисляется среднее и дисперсия в окне через среднее и дисперсию входящих в окно ячеек:

$$a(i, j) = \frac{1}{W_s^2} \sum_{m,n=W_s-1} mean(i, j),$$

$$Disp(i, j) = \frac{1}{W_s^2} \sum_{m,n=0..W_s-1} [disp(i+m, j+n) + (mean(i+m, j+n) - a(i, j))^2].$$

Окну (i,j) присваивается значение $map0(i,j) = 1000 \cdot Disp(i,j) / a^2(i,j)$, где коэффициент 1000 подобран так, чтобы для реальных изображений градации значений карты, в основном, лежали в интервале от 0 до 255. Если значение $map0(i,j)$ превышает 255, что может быть на сильно неоднородных участках, то оно заменяется на 255.

Если в пределах окна содержатся затененные ячейки, которые идентифицируются по признаку $mean(i,j) < thresh_{dark}$ то всему окну присваивается максимальное значение критерия неоднородности - 255.

Минимальное перекрытие окон, которое реализуется на высотах выше 300 м, составляет 50% и возрастает при уменьшении высоты как $(W_s - 1) / W_s \cdot 100\%$.

(6) Хотя размер окна выбран так, чтобы он соответствовал безопасному размеру площадки на поверхности Фобоса с учетом ошибок исполнения маневра КА, для дополнительного обеспечения безопасности посадки в окончательной карте неоднородности с весом 0.2 учитывается также «наихудшее» из соседних окна с тем, чтобы выбранная площадка не граничила с крупными неровностями поверхности:

$$Map(i,j) = 0.8 \cdot map0(i,j) + 0.2 \cdot \max \{map0(i \pm \delta, j \pm \delta)\} \quad (4)$$

Здесь при $W_s \leq 3$ рассматриваются окна, центр которых находится на расстоянии $\delta = W_s$ ячеек от данного окна, т.е. не перекрывающиеся с ним. При $W_s > 3$ полагается $\delta = 3$, т.е. рассматриваются окна, частично перекрывающиеся с данным, т.к. иначе в условиях ограниченности поля зрения камеры чрезмерно ограничиваются возможности выбора оптимального окна. Во избежание выбора места посадки на краю изображения, где невозможно контролировать близость крупных неровностей, полосе шириной в 3 ячейки у границы изображения присваивается максимальное значение критерия неоднородности 255.

(7) Оптимальным местом посадки является окно (i,j) , в котором значение (4) карты неоднородности минимально.

Алгоритм был отработан на изображениях Фобоса, Луны и Марса высокого разрешения, а также на изображениях специально подготовленных шероховатых поверхностей. Для иллюстрации на рис.5 приведено построение карты неоднородности по полученному с КА Mars-Express изображению Фобоса, содержащему предполагаемый район посадки.

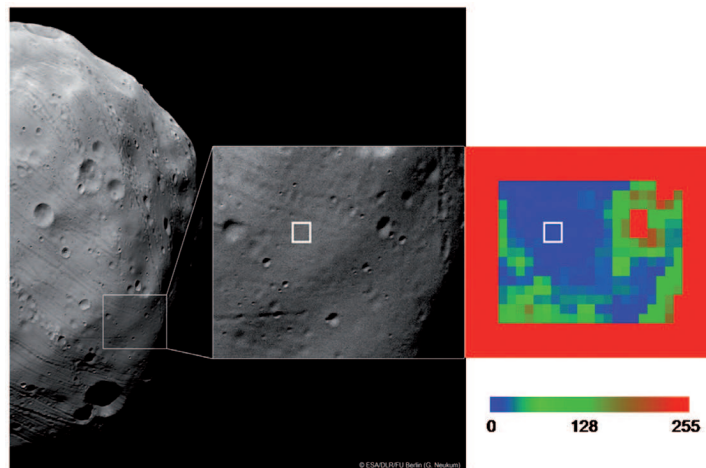


Рис.5. Построение карты неоднородности поверхности и выбор места посадки в предполагаемом районе посадки КА «Фобос-Грунт». Исходное изображение Фобоса (слева) получено HRSC-SRC на КА Mars-Express и имеет разрешение 4,4 м (предоставлено ESA/DLR/FU Berlin, G.Neukum). Его увеличенный фрагмент (в центре) соответствует предварительно выбранному району посадки. Построенная для этого района карта неоднородности (справа) цветокодирована так, что при увеличении неоднородности поверхности цвет карты изменяется от синего к красному. Оптимальное место посадки отмечено белым квадратом

Данный пример показывает, что получаемая карта неоднородности поверхности адекватно отображает опасные неровности и позволяет выбрать оптимальное место посадки.

Литература

1. Аванесов Г.А., Гордеев Р.В., Гришин В.А., Жуков Б.С., Жуков С.Б., Коломеец Е.В., Краснопецева Е.Б., Куделин М.И., Крутин А.А., Муравьев В.М., Фори А.А. Телевизионная система навигации и наблюдения // *Астрон. Вестник*, 2010. Т.4. №5. С.473-479.
2. Гришин В.А., Книжский И.М., Хрекин К.Е. Алгоритмы установления соответствия при обработке изображений для решения задач управления посадкой летательных аппаратов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2007. Вып.4. Т.1. С.25-32.
3. Гришин В.А. Оптимизация состава спектральных коэффициентов базиса преобразования Адамара для решения задач установления соответствия изображений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2008. Вып.5. Т.1. С.77-83.
4. Гришин В.А., Белинская Е.В. Сравнение спектральных представлений образов окрестностей точек для решения задач установления соответствия // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2009. Вып.6. Т.1. С.105-112.
5. Гришин В.А., Белинская Е.В. Анализ влияния динамики космического аппарата на характеристики алгоритмов обработки изображений в монокулярном режиме // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. Т.7. №4. С.79-86.
6. *Hapke B.W.* An improved theoretical lunar photometric function // *Astron. J.* 1966. Vol.71. No.5. P.333-339.
7. *Hapke B.W.* Theory of reflectance and emittance spectroscopy. New York, Cambridge Univ. Press, 1993.
8. *Lumme K., Bowell E.* Radiative transfer in the surfaces of atmosphereless bodies. 1 Theory // *Astron. J.* 1981. Vol.86. P.1694-7004.
9. *Duxbury T.C.* An analytic model for Phobos surface // *Planet. and Space Sci.* 1991. Vol.39. P.355-376.

Algorithm for autonomous landing site selection of the Phobos-Grunt spacecraft

B.S. Zhukov, S.B. Zhukov

*Space Research Institute
117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.
E-mails: bzhukov@nserv.iki.rssi.ru;*

The landing of the Phobos-Grunt s/c on the surface of Phobos will be supported by real-time processing of the images obtained by the Wide-Angle Camera (WAC) of the Television System for Navigation and Observation (TSNN). In particular, a surface non-homogeneity map will be generated that will be used to estimate suitability for landing of the currently forecasted site and in case it proves unsuitable to direct the s/c to the most flat site in the WAC field of view. The relative radiance dispersion is chosen as the principal non-homogeneity criterion, with additional accounting for shadows and proximity of strong non-homogeneities. The map computation time on camera processors is approximately 0,1 s. The algorithm and the on-board software were tested using high-resolution images of Phobos, Mars and the Moon, as well as of specially designed rough surfaces.

Keywords: Phobos-Grunt mission, landing on Phobos, TSNN, on-board image processing, surface non-homogeneity map.