

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Институт космических исследований

Представлено к печати
заместителем директора
Р.Р. Назировым

Пр-XXXX

Г.А. Аванесов, Б.С. Жуков, Е.Б. Краснопевцева, М.М. Железнов

АНАЛИЗ ЗАДАЧ И УСЛОВИЙ
ТЕЛЕВИЗИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ФОБОСА И МАРСА
С КА «ФОБОС-ГРУНТ»

Москва

2006

УДК

G.A. Avanesov, B.S. Zhukov, E.B. Krasnopevtseva, M.M. Zheleznov

ANALYSYS OF OBJECTIVES AND CONDITIONS OF IMAGING OF PHOBOS AND MARS FROM THE PHOBOS-GRUNT S/C

Television System of Navigation and Observation (TSNN) was developed both for scientific investigations of Phobos and Mars and to support navigation in the Phobos-Grunt project. TSNN data will be complemented with measurements by star sensors BOKZ-MF. High-resolution structure of geological features and regolith on the surface of Phobos, the center of mass, the moments-of-inertia and the rotational librations of Phobos, as well as the dust environment of Mars are among the principal scientific objectives of the TV experiment. Navigational tasks of TSNN/BOKZ-MF, which include s/c and Phobos orbit measurements, an autonomous selection of the landing site and the informational support of the landing are also crucial for a success of the whole mission.

Телевизионная Система Навигации и Наблюдения (ТСНН) была разработана для научных исследований Фобоса и Марса, а также для поддержки решения навигационных задач в проекте «Фобос-Грунт». Данные ТСНН будут дополняться измерениями с помощью датчиков звездной ориентации БОКЗ-МФ. Среди основных научных задач ТВ эксперимента исследования с высоким пространственным разрешением геологических структур и реголита на поверхности Фобоса, уточнение центра масс, моментов инерции и вращательных либраций Фобоса и определение характеристик околосмарсианской пылевой среды. Важнейшими для успеха всей миссии являются также решаемые с помощью ТСНН/БОКЗ-МФ навигационные задачи по уточнению орбит КА и Фобоса, автономному выбору места посадки и ее информационной поддержке.

© Институт космических исследований (ИКИ) РАН, 2006

Введение

Проекту «Фобос-Грунт», возможно, суждено открыть новую страницу в истории космических планетных исследований в России, начатую в 50–60-х годах прошлого века в СССР полетами к Луне, Венере и Марсу и прерванную не менее, чем на 20 лет в конце 80-х годов. Последним по-настоящему успешным планетным проектом советского времени можно считать осуществленный в 1984–86 гг. проект «Вега», когда два космических аппарата (КА) при пролете Венеры сбросили в ее атмосферу шары-зонды, выполнившие в ходе дрейфа уникальные измерения ее характеристик, а затем те же КА достигли кометы Галлея и впервые выполнили исследования ее ядра и околоядерной области.

Следующий планетный проект «Фобос» (1988–89 гг.) не был столь успешным. Один КА погиб на трассе перелета. Второй вышел на эллиптическую орбиту вокруг Марса, выполнил исследования взаимодействия солнечного ветра с плазменным окружением Марса, затем на орбите, близкую к орбите Фобоса, сделал серию снимков Фобоса, получил ИК-спектры поверхности, после чего прекратил свое существование, не выполнив основную задачу миссии – сближение с Фобосом и сброс на его поверхность посадочных станций. Однако полученные в этом проекте снимки и спектральные измерения Фобоса дали новую информацию о характеристиках кратеров и борозд на поверхности Фобоса, а также о свойствах покрывающего ее реголита.

Гибель КА «Марс-96» похоронила надежды целого поколения ученых и специалистов на успешное продолжение космических планетных исследований в нашей стране.

Включение проекта «Фобос-Грунт» в Федеральную космическую программу вселяет надежду на возрождение планетного направления космических исследований в России. Результатом

подготовки к выполнению проекта станет не только получение новых знаний о спутнике Марса, но и в воспитании нового поколения исследователей планет и малых тел Солнечной системы, строящих свою работу на базе отечественной космической техники.

Как и в предыдущих космических миссиях, в проекте «Фобос-Грунт» большое внимание уделяется телевизионным средствам, которые должны решать как научные задачи по исследованию Фобоса и пылевых колец Марса, так и служебные задачи по навигационному обеспечению полета, автономному выбору места посадки и приведению к нему КА. Телевизионные средства, используемые в этом проекте, строятся на основе разработанного в ИКИ РАН и хорошо зарекомендовавшего себя на ряде космических аппаратов семейства датчиков звездной ориентации БОКЗ, содержащих в своем составе камеры на основе ПЗС-матриц и мощные процессоры (к моменту старта КА «Фобос-Грунт» в космосе побывает уже около 30 таких приборов). Телевизионные средства, разрабатываемые для проекта «Фобос-Грунт», являются дальнейшим развитием «интеллектуальных» телевизионных систем, использовавшихся ранее для решения научных и навигационных задач в проектах «Вега», «Фобос» и «Марс-96».

В данной работе анализируются задачи и условия наблюдения Фобоса и Марса ТВ средствами в проекте «Фобос-Грунт» на уровне сложившегося к настоящему времени понимания проблемы. На последующих этапах проекта по мере детализации общих и частных задач и проработки соответствующих алгоритмов возможно внесение изменений в изложенную ниже концепцию. Вместе с тем, для обеспечения заданных сроков реализации проекта следует стремиться минимизировать изменения в аппаратной части, перенося их в область математического обеспечения.

1. Основные элементы сценария полета КА «Фобос-Грунт»

Основная цель полета космического аппарата (КА) «Фобос-Грунт» – доставка на Землю образцов грунта спутника Марса – Фобоса и исследования Фобоса с помощью комплекта научной аппаратуры, установленного на борту КА. Достижение этой цели требует, чтобы КА осуществил мягкую посадку в заранее выбранном районе Фобоса. На данном этапе проекта НПО имени Лавочкина и ИПМ РАН разработали сценарий полета, а специалистами ГЕОХИ РАН предварительно выбраны возможные районы посадки. Общий вид КА «Фобос-Грунт» показан на Рис.1.1, а основные этапы полета и условия наблюдения Марса и Фобоса суммированы в Табл.1.1.

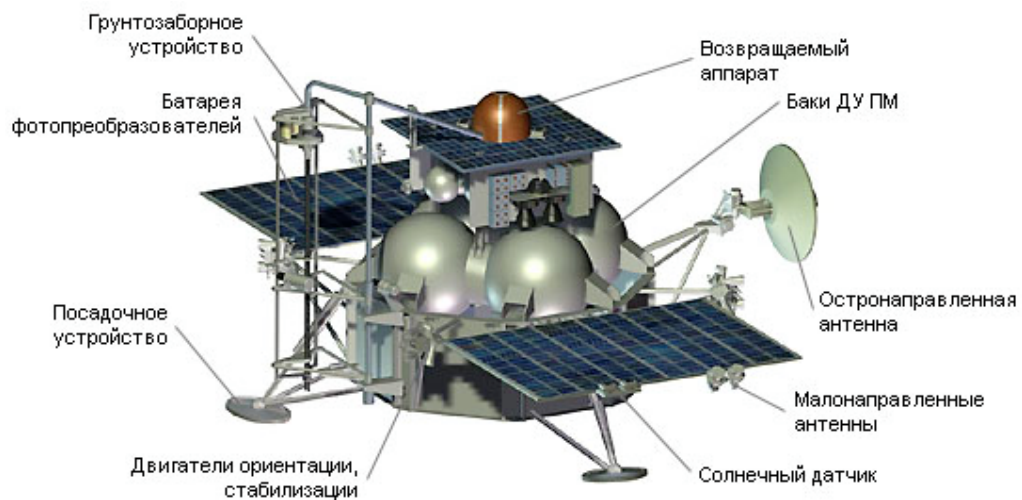


Рис.1.1. Общий вид КА «Фобос-Грунт»

Старт КА «Фобос-Грунт» намечен на октябрь 2009 г. Во время длящегося примерно один год перелета к Марсу будет выполнено несколько коррекций траектории КА. Две заключительные коррекции, которые должны обеспечить выход КА на эллиптическую орбиту спутника Марса, будут выполнены за 20–30 и 7–10 суток до

подлета к Марсу, когда расстояние до него будет составлять 6 млн. км и 3 млн. км, соответственно. В результате погрешность в координатах КА при входе в сферу притяжения Марса не должна превышать ± 100 км.

Войдя в сферу притяжения Марса, КА начинает движение по вытянутой в сторону Солнца эллиптической орбите с осями эллипса 45000×5000 км и периодом около трех суток, плоскость которой совпадает с плоскостью орбиты Фобоса.

Сделав несколько витков по эллиптической орбите, КА с помощью двигательной установки переводится на орбиту наблюдения. Эта круговая орбита лежит в плоскости орбиты Фобоса и имеет период обращения 8.3 час. Высота орбиты наблюдения превышает высоту орбиты Фобоса примерно на 500 км. Так как КА переходит на орбиту наблюдения с некоторой погрешностью, то в течение нескольких суток проводятся коррекции ее параметров. Сближения КА с Фобосом на орбите наблюдения будут происходить раз в четверо суток и будут длиться около 4 часов, из которых 40 минут Фобос будет находиться на минимальном расстоянии от КА (500–600 км) на фоне диска Марса. Планируемое время нахождения КА на орбите наблюдения – 30–40 суток.

Затем КА переводится на квазиспутниковую орбиту (КСО), имеющую период обращения вокруг Марса, равный периоду обращения Фобоса. При этом в связанной с Фобосом системе координат КА обращается вокруг Фобоса по траектории, близкой к эллипсу. Тяготение Фобоса приводит к тому, что центр этого эллипса испытывает временные осцилляции, в результате чего траектория является незамкнутой. При движении по КСО расстояние до центра масс Фобоса будет изменяться от 40 до 80 км (до поверхности Фобоса – от 30 до 70 км). Переход на указанную

«финальную» КСО может осуществляться через промежуточную (промежуточные) КСО. Время нахождения КА на КСО составит около 30 суток. За это время планируется снять поверхность Фобоса с высоким пространственным разрешением и на основе полученных снимков уточнить выбор района посадки.

Посадка на Фобос начинается с расстояния до поверхности ~30 км и длится около 30 мин. При выходе КА в район посадки телевизионные наблюдения могут использоваться для того, чтобы выбрать в этом районе место посадки – ближайшую площадку размером ~10 м без опасных неровностей, направить к ней КА и контролировать расстояние до поверхности и компоненты относительной скорости КА-Фобос. Параллельно в процессе посадки будет проводиться передача на Землю изображений поверхности Фобоса со все улучшающимся разрешением.

После забора образцов грунта Фобоса возвратный модуль возвращается на Землю, причем во время отлета с него будет проводиться съемка места посадки.

После отлета возвратного модуля предусмотрено проведение экспериментов на поверхности Фобоса с посадочного модуля.

Таблица 1.1. Основные этапы полета и условия наблюдения Марса и Фобоса в проекте «Фобос-Грунт»

Орбита	Период орбиты (часы)	Параметры орбиты (км.)	Время нахождения на орбите	Объект наблюдения	Дальность до объекта наблюдения (км.)	Угл. размеры объекта наблюдения	Тангенциальная скорость КА отн. объекта наблюдения		Фазовый угол, град
							Угловая скорость (град/сек.)	Линейная скорость (м/сек.)	
1. Трасса перелета	Дальние расст. от Марса			Звезды	-	-	-	-	-
	Подлетная траектория			Звезды	-	-	-	-	-
				Марс	3–6 млн.	4–8'	-	-	50
2. Эллиптическая орбита	72	44500×5000 (вытянута в сторону Солнца)	3 сут.	Звезды	-	-	-	-	
				Марс	30–40 тыс.	8–12°			
				Фобос	25–45 тыс.	2–3'			0–20
3. Орбита наблюдения	8.3	9900	30–40 сут.	Звезды	-	-	-	-	
				Марс	9900	8–10°	0.012	2080	0–180
				Фобос	500–20000	1–3°	0–0.012	0–4200	
4. Квазиспутниковая орбита	7.7	9400	30 сут	Звезды	-	-	-	-	
				Марс	9400	30°	0.013	2140	0–180
				Фобос	30–70	20°–40°	0.01–0.03	10–20	
5. Посадка	Участок баллистического спуска		30 мин.	Фобос	30 – 0.7	40°–140°	-	5–7	0–60
	Участок заключительного торможения		2 мин.	Фобос	0.7 – 0	-		0–0.4 (у пов-ти)	60–30
6. Отлет			17 мин.	Фобос	0–10	-	-		
7. Эксперименты на поверхности			1 год	Звезды	-	-	0.013	-	-

Навигационные и научные задачи ТВ наблюдений

Основными навигационными задачами ТВ наблюдений в проекте «Фобос-Грунт» являются:

- припланетная навигация,
- картирование поверхности Фобоса и уточнение района посадки,
- информационная поддержка посадки.

Хотя на всех этапах полета предусмотрен радиоконтроль орбиты КА с Земли, достижимая этим методом точность определения местоположения КА как на подлете к Марсу, так и на орбите спутника Марса по отношению к Фобосу недостаточна для высокоточного маневрирования. Повысить точность определения местоположения КА и Фобоса можно, используя метод припланетной навигации, основанный на одновременных телевизионных наблюдениях Фобоса и звезд. Этот метод уже использовался в проекте «Вега» в 1984 –1986 гг. и в проекте «Фобос» в 1988 г. и дал положительные результаты. С тех пор техника наблюдения значительно усовершенствовалась и позволяет надежно решить задачу получения информации, необходимой для высокоточной припланетной навигации.

Задача картирования поверхности Фобоса помимо самостоятельного научного значения связана с уточнением района посадки. В предыдущие десятилетия съемку Фобоса выполняли КА "Маринер-9", "Викинг-1,2", «Фобос-2», "Марс-Экспресс". Восточная часть западного и западная часть восточного полушарий между 70° и 280° по долготе и 75° – 60° по широте снята с разрешением 50–200 м (КА "Фобос-2"), зона от 25° до 270° по долготе, включая кратер Стикни снята с разрешением 200–1000 м (КА "Фобос-2"), район к западу от Кратера Стикни (70° – 160° западной долготы) картирован с

разрешением 40–80 м (КА "Викинг" и "Фобос-2"), а обращенная к Марсу сторона Фобоса снята с разрешением 7 метров (КА "Марс-Экспресс"). По результатам съемок созданы цифровые и аналитические модели Фобоса, описывающие его фигуру и рельеф (*Duxbury, 1989; Садовничий, Даксбери и др., 1994*). Недостатком этих моделей с точки зрения осуществления посадки является относительно низкая детальность сведений о рельефе. Материалы съемки, положенные в основу указанных моделей, имели максимальную разрешающую способность по поверхности Фобоса не лучше 7 м, а точность модели фигуры Фобоса оценивается как ~50 м.

При относительно малых размерах посадочного аппарата и, возможно, не полной компенсации к моменту посадки боковых составляющих скорости «безопасной» считается площадка, не имеющая выпуклостей и впадин с размером более 0.5 м (в проекции на поверхность). Кроме того, должны отсутствовать выступы высотой более ~0.2 м на базе 3 м. Телевизионные средства наблюдения должны позволить выполнить съемку поверхности Фобоса с квазиспутниковой орбиты с высоты 30–50 км с разрешением, позволяющим исследовать и при необходимости уточнить район(ы) посадки, предварительно выбранные в настоящее время на основании снимков относительно низкого разрешения.

Однако, учитывая, что эллипс рассеяния при посадке равен 800×400 м (соответственно по долготе и широте) и что среднее расстояние между кратерами, которые могут представлять опасность для посадки, составляет ~40 м (данные ГЕОХИ), нельзя ожидать, что в пределах выбранного района посадки (размеры которого должны соответствовать эллипсу рассеяния) будут отсутствовать опасные неровности. Можно лишь надеяться найти

район с минимальным количеством опасных неровностей, вывести в него КА и при приближении к поверхности выбрать место посадки – ближайшую достаточно ровную площадку размером ~10 м (точность исполнения КА команд наведения) и направить к ней КА.

Помимо автономного выбора места посадки и приведения к ней КА, телевизионные средства могут использоваться в ходе снижения для измерения расстояния до поверхности и компонентов скорости КА относительно Фобоса. Эти измерения рассматриваются как функциональное резервирование измерений, выполняемых основными средствами измерения этих параметров – лазерного высотомера ЛВВ и доплеровского измерителя скоростей ДИСД. Кроме того, для поддержки алгоритмов обработки данных ЛВВ и ДИСД по телевизионным снимкам будет определяться наличие края Фобоса в ТВ кадре. Все ТВ измерения в процессе посадки должны проводиться автономно.

Параллельно с этим при снижении КА будет проводиться передача на Землю изображений поверхности Фобоса со все улучшающимся разрешением в количестве, ограниченном пропускной способностью канала связи. Остальные изображения будут запоминаться в бортовом ЗУ и передаваться на Землю после посадки КА на Фобос.

Помимо рассмотренных навигационных задач, разрабатывается научная программа телевизионного эксперимента, которая будет выполняться как с орбиты спутника Марса, так и с поверхности Фобоса. Телевизионные снимки, полученные с орбиты спутника Марса, будут использоваться для:

- исследования основных форм рельефа поверхности Фобоса – кратеров и борозд,
- исследования пространственных вариаций отражательных

характеристик поверхности Фобоса и оценки по ним характеристик грунта Фобоса,

- уточнения массы Фобоса и положения центра масс в модели фигуры Фобоса, что позволит сделать заключение о внутренней однородности Фобоса,
- исследования пылевого тора Фобоса.

После посадки КА на поверхность Фобоса будут проводиться исследования:

- характеристик пыли в непосредственной близости от поверхности Фобоса и
- характеристик собственного вращения Фобоса, что позволит получить дополнительную информацию для анализа его внутренней однородности.

Перечень основных задач наблюдения Фобоса и Марса в проекте «Фобос-Грунт» суммирован в таблице 2.1.

В качестве подготовительных операций для решения указанных задач на трассе перелета, на орбите наблюдения и на КСО должна проводиться геометрическая и радиометрическая калибровка ТВ камер путем съемки звездного неба.

Таблица 2.1. Перечень основных задач ТВ наблюдений Фобоса и Марса в проекте «Фобос-Грунт»

Задачи	Этап полета	Бортовая обработка	Наземная обработка
1. Припланетная навигация	Трасса перелета, эллиптическая орбита, орбита наблюдения, КСО	Сжатие видеоинформации	Уточнение орбит КА и Фобоса
2. Картирование поверхности Фобоса и уточнение района посадки	КСО	Сжатие видеоинформации	Построение карт и 3-мерных моделей рельефа
3. Съёмки Фобоса при посадке и информационная поддержка посадки: - автономный выбор места посадки и слежение за ним, - измерения расстояния и компонент скорости, - индикация края Фобоса	Посадка	Сжатие видеоинформации Автономное решение задач информационной поддержки посадки	
4. Научные задачи: - формы рельефа и отражательные характеристики поверхности Фобоса, – пылевой тор Фобоса, – уточнение массы, модели фигуры и положения центра масс Фобоса, – собственное вращение Фобоса	Орбита наблюдения, КСО, функционирование на поверхности Фобоса	Сжатие видеоинформации	Научная обработка полученной информации

2. Выбор характеристик ТСНН

Для решения навигационных и научных задач проекта «Фобос-Грунт» в ИКИ РАН разрабатывается Телевизионная Система Навигации и Наблюдения (ТСНН). С целью обеспечения высокой надежности эти камеры базируются на созданном в ИКИ РАН и хорошо зарекомендовавшем себя в реальных космических проектах семействе звездных датчиков БОКЗ. Необходимая модификация этих камер будет, в частности, включать:

- замену объектива,
- замену ПЗС-матрицы на матрицу большего размера (Kodak-1020 монохр. с числом активных элементов 1004 x 1004),
- модификацию программного обеспечения.

Необходимость сочетания высокого разрешения для выбора района посадки с КСО и достаточно широкого поля обзора поверхности с относительно малых расстояний в процессе посадки определяют включение в состав ТСНН:

- Узкоугольной Телевизионной Камеры (УТК) высокого разрешения
- и Широкоугольной Телевизионной Камеры (ШТК).

Фокусное расстояние УТК выбиралось из условия обеспечения разрешения ~ 0.5 м с минимального ожидаемого на финальной КСО расстояния до поверхности Фобоса ~ 30 км. Это требование выполняется при использовании объектива «Рефлекруссар-Ф» с фокусным расстоянием $F = 500$ мм и относительным отверстием 1:7, обеспечивающего с указанного расстояния разрешение 0.45 м и поле зрения 450 м. При этом время накопления при съемке Фобоса составит ~ 10 мс, что приведет на финальной КСО к смазу изображения 0.02–0.3 м в зависимости от того, какой режим ориентации при съемке Фобоса будет выбран: с разворотом КА или

с сохранением постоянной инерциальной ориентации (см. п. 6). Дальнейшее увеличение фокусного расстояния (и соответственно разрешения) объектива привело бы к:

- увеличению смаза за счет увеличения времени накопления, что может нивелировать эффект увеличения разрешения при инерциальной ориентации КА, или к уменьшению отношения сигнал/шум при сохранении времени накопления,
- уменьшению поля зрения УТК, что может привести к необходимости организации дополнительных сеансов съемок с КСО,
- резкому увеличению массы объектива.

Фокусное расстояние ШТК выбиралось исходя из требования получения максимального поля зрения при обеспечении возможности автономного выбора места посадки с высоты 0.5–1 км. В результате был выбран объектив «Астрар-6» с фокусным расстоянием $F = 18$ мм, обеспечивающий с высоты 0.5–1,0 км необходимое разрешение 0.2–0.4 м по поверхности и имеющий поле зрения 23° . Дальнейшее увеличение поля зрения привело бы к:

- уменьшению высоты, с которой возможен выбор места посадки,
- усложнению объектива и существенному увеличению его массы для того, чтобы избежать ухудшения разрешения к краю поля зрения,
- сложности размещения ШТК на КА, учитывая необходимость обеспечить отсутствие других приборов и элементов конструкции КА на расстоянии не менее 10° от поля зрения ШТК.

При использовании указанного объектива время накопления при съемке Фобоса составит ~ 0.8 мс.

Для обеспечения возможности стереоизмерений при посадке, а также для повышения надежности решения других задач по

диаметру платформы посадочного модуля с базисом 2 м.

Привязка измерений ТСНН к инерциальной системе координат обеспечивается звездными датчиками БОКЗ-МФ. Приборы БОКЗ-МФ также дублированы и имеют неперекрывающиеся направления наблюдения для облегчения реализации необходимых углов их оптической оси к Солнцу и Марсу. Каждая пара камер УТК-ШТК жестко сопряжена с соответствующим прибором БОКЗ-МФ (Рис. 3.1).

Основные характеристики ТСНН и БОКЗ-МФ приведены в Табл. 3.1.

Все камеры имеют свои процессоры. Связь между камерами осуществляется через Бортовой Вычислительный Комплекс (БВК) – см. Рис. 3.1.

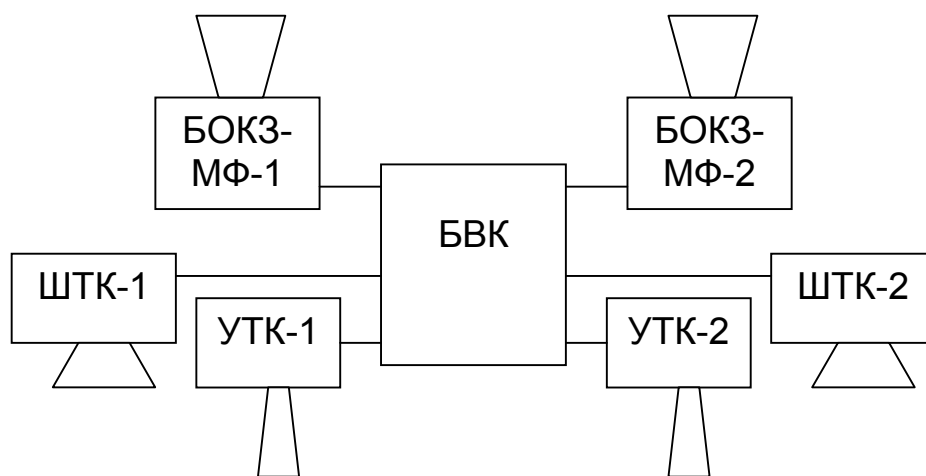


Рис. 3.1. Состав ТСНН и БОКЗ-МФ и их связь с БВК

**Таблица 3.1. Характеристики ТСНН и БОКЗ-МФ
на КА «Фобос-Грунт»**

Параметры	ТСНН		БОКЗ-МФ
	УТК	ШТК	
Фокусное расстояние, мм	500	18	32
Отн. отверстие	1 : 7	1 : 2	1 : 1.7
Спектр. Зоны	панхром.	панхром.	панхром.
Размер элемента ПЗС, мкм	7.4	7.4	20
Кол-во активных элементов	1004 x 1004	1004 x 1004	512 x 512
Угл. разрешение, угл. сек	3.05	84.8	129 ¹
Поле зрения, град.	0.85	23.3	18.0
Мин. угол оптич. Оси к Солнцу, град	80	60	36
Мин. угл. расстояние элементов конструкции КА от поля зрения, град.	10	10	10
Радиометр. разрешение, бит	12	12	12
Масса, кг	2.8	1.6	2.0
Энергопотребление, Вт	8	8	8
Кол-во приборов	2	2	2

¹Точность угловых измерений БОКЗ-МФ составляет $\sigma_{x,y}/\sigma_z = 5/12$ угл. сек

Общий объем ТВ информации, которая может быть передана на Землю за один сеанс связи, рассчитывался исходя из следующих предположений:

- скорость передачи информации на Землю: 16 кбит/с,
- длительность сеанса связи: 3 часа,
- коэффициент, учитывающий увеличение объема информации за счет помехоустойчивого кодирования и служебной информации: 1.2.

В результате объем передаваемой ТВ информации за один сеанс составляет 18 Мбайт. Это достаточно для передачи:

- 12 несжатых изображений,
- 18 сжатых без потерь изображений (принимая коэффициент сжатия 1.5),
- или 60–80 изображений, сжатых с коэффициентом сжатия 5–7.

Перекодировка реального динамического диапазона изображений с 12 до 8 бит и применение алгоритмов сжатия, адаптированных к Фобосу, позволяет надеяться, что сжатие с коэффициентом 5–7 не приведет к существенной потере информации.

4. Калибровочные сеансы

Задачами калибровочных сеансов являются проверка и уточнение (в дополнение к наземным калибровкам):

- внутренней геометрической калибровки УТК и ШТК,
- взаимной привязки систем координат УТК, ШТК и БОКЗ-МФ,
- взаимной привязки систем координат телевизионных средств и БИБ,
- радиометрической калибровки УТК и ШТК,

а также анализ динамики работы системы ориентации КА.

Калибровочные сеансы проводятся на трассе перелета, орбите наблюдения и КСО. Калибровочные сеансы на орбите наблюдения и КСО можно совместить с экспериментами по исследованию пылевого тора Фобоса (см. п. 8.5).

Калибровки осуществляются путем одновременной съемки звездного неба УТК, ШТК и БОКЗ-МФ. Максимальная распознаваемая звездная величина и ожидаемое количество звезд

в поле зрения УТК и ШТК при времени накопления 0.25 с приведены в Табл.4.1. Для УТК критично, чтобы наблюдения проводились вблизи галактического экватора. Альтернативой является повышение времени накопления, что однако приведет к увеличению смаза.

Таблица 4.1. Максимальная распознаваемая звездная величина и ожидаемое количество звезд в поле зрения УТК и ШТК в калибровочных сеансах

Параметр	УТК	ШТК
Максимальная распознаваемая звездная величина	11	6
Ожидаемое количество звезд в поле зрения:		
- среднее по небесной сфере	12	45
- вариация между галактическим полюсом и экватором	5–30	25–110

Для оценки ожидаемой точности привязки систем координат ТВ камер необходимо учитывать следующие параметры:

- скорость углового дрейфа КА: 0.005 град/с = 18 угл. сек / с, приводящая за время накопления 0.25 сек к угловому дрейфу в 5 угл. сек,
- угловая точность измерений ориентации БОКЗ-МФ:
 $\sigma_{x,y}/\sigma_z = 5/12$ угл. сек., где $\sigma_{x,y}$ – среднеквадратичная ошибка измерения ориентации вокруг осей, перпендикулярных оптической оси БОКЗ-МФ, σ_z – среднеквадратичная ошибка измерения ориентации вокруг оси, параллельной оптической оси БОКЗ-МФ,
- угловое разрешение УТК = 3 угл. сек.,
- угловое разрешение ШТК = 85 угл. сек.

Точность определения ориентации УТК и ШТК не ограничивается их угловым разрешением: она может быть сделана значительно лучше за счет: (а) возможности определения координат центра звезды с субпиксельной точностью и (б) увязки измерений положения всех звезд в поле зрения камеры. Кроме того, дрейф КА с постоянной скоростью может не только не ухудшать, а напротив улучшать точность определения координат взвешенного центра звезды за счет размазывания изображения. Поэтому реально ожидать точность мгновенной привязки систем координат УТК и БОКЗ-МФ в единицы угловых секунд, а ШТК и БОКЗ-МФ – в пределах 10–20 угл. сек. Насколько эта привязка окажется стабильной в полете необходимо выяснить с помощью повторных калибровочных сеансов.

Для анализа динамики работы системы ориентации КА, а также для исследования пылевой среды вблизи орбиты Фобоса может потребоваться проведение длительных (до 1 часа) сеансов съемки. При интервале съемки ~3 сек за 1 час может быть получено 1200 изображений в каждой камере (при этом периодичность измерения ориентации БОКЗ-МФ составляет 1 с). Изображения звездного неба допускают эффективное сжатие путем выделения звезд и определения координат их взвешенных центров яркости и интегрального потока интенсивности излучения, используя программы бортовой обработки, аналогичные хорошо отлаженным программам БОКЗ-МФ. Для исследования характеристик регистрируемых частиц пыли необходима небольшая модификация этих программ для выделения фрагментов с изображениями объектов, размер которых превышает типичный размер изображения звезд (в настоящей версии программ такие объекты отфильтровываются). Учитывая научную новизну детектирования

пылевых колец Марса, предполагается передавать эти фрагменты на Землю со сжатием без потерь с тем, чтобы обеспечить максимальную достоверность результатов.

На Землю могут передаваться, например:

- 2 сжатых без потерь изображения от каждой камеры (всего 8 Мбайт),
- характеристики звезд (исходя из 8 байт на звезду): до 2.5 Мбайт за 1 час съемки,
- сжатые без потерь фрагменты изображений пыли: до 0.5 Мбайт за 1 час съемки (см. п. 8.5).

5. Припланетная навигация

5.1. Навигационные съемки Марса

5.1.1. Съемки Марса на подлетной траектории

Навигационные съемки Марса предусмотрены на подлетной траектории на расстоянии около 6 и 3 млн. км с целью уточнения параметров двух заключительных коррекций траектории КА перед входом в сферу притяжения Марса. При этом угловой размер Марса будет составлять 4 и 8 угл. мин. соответственно, т.е. на изображениях УТК он будет иметь диаметр 80–160 пикселей, а на изображениях ШТК – 3–6 пикселей.

Возможны два варианта съемки Марса:

- (1) съемка Марса с помощью УТК или ШТК с привязкой к инерциальной системе координат по данным БОКЗ-МФ,
- (2) съемка Марса с помощью ШТК на реальном фоне звезд.

В первом варианте съемка Марса проводится без его переэкспонирования и направление на Марс в инерциальной системе координат определяется с использованием данных БОКЗ-МФ.

Съемка Марса на реальном фоне звезд возможна с помощью ШТК, где Марс будет занимать относительно малую площадь и создавать относительно слабый фон (за счет рассеяния света в объективе) при наблюдении звезд. Учитывая, что антиблужинг в используемых ПЗС-матрицах позволяет переэкспонировать изображение Марса в 300 раз без растекания заряда, возможно детектирование звезд 5-ой звездной величины в одном кадре с Марсом. В кадре ШТК в среднем может наблюдаться ~15 звезд, при вариации от 10 до 35 в зависимости от галактической широты. Такие съемки можно использовать также для калибровки ШТК. В случае УТК, где Марс будет занимать значительную часть изображения, наблюдение Марса в одном кадре со звездами невозможно из-за фона, создаваемого рассеянным в объективе светом Марса.

Эффективное сжатие изображений достигается выделением на изображении Марса и определением координат его взвешенного центра и интегрального потока интенсивности излучения, а в варианте съемки на реальном фоне звезд – этих же параметров для звезд, как описано в п.3. На Землю передается эта информация наряду с несколькими изображениями, сжатыми без потерь.

5.1.2. Съемки Марса на эллиптической орбите

Телевизионные съемки Марса на эллиптической орбите могут проводиться с помощью ШТК для уточнения параметров орбиты перед переходом на орбиту наблюдения. Съемка может проводиться под разными углами с расстояний 30–40 тыс. км, когда угловой размер Марса составляет от трети до половины поля зрения ШТК, т.е. обеспечивается наблюдение полного лимба Марса. При этом привязка к инерциальной системе координат

должна осуществляться с использованием данных БОКЗ-МФ. Значительный размер Марса на изображении не позволяет снимать Марс на реальном фоне звезд. На Землю могут передаваться до 60–80 сжатых изображений.

5.2. Навигационные съемки Фобоса

Навигационные съемки Фобоса могут проводиться на орбите наблюдения и КСО. Основной задачей навигационных съемок Фобоса является уточнение орбит КА и Фобоса для обеспечения перехода на КСО и в конечном итоге сближения с Фобосом и посадки. Параллельно должны решаться задачи уточнения массы и модели фигуры Фобоса. На КСО решение навигационных задач проводится параллельно с картированием Фобоса с целью выбора района посадки (п.6).

Уточнение орбит КА и Фобоса проводится путем определения направления на центр Фобоса в инерциальной системе координат при различных углах наблюдения. Изменение углов наблюдения можно реализовать с помощью:

- (1) переориентации КА,
- (2) наблюдения прохождения Фобоса через поле зрения ШТК.

5.2.1. Съемки Фобоса с переориентацией КА

Данный метод навигационных наблюдений основан на проведении съемки сериями из нескольких снимков с переориентацией КА между сериями для изменения углов наблюдения. Съемка может проводиться как с помощью ШТК, так и (при достаточной точности прогноза орбит) с помощью УТК. При

этом привязка к инерциальной системе координат осуществляется по данным БОКЗ-МФ в ходе наземной обработки. На ближних расстояниях направление на центр Фобоса определяется по характерным деталям рельефа с использованием модели Фобоса, а на дальних расстояниях, когда Фобос занимает малую площадь на изображении и детали рельефа не различаются – по взвешенному центру яркости изображения Фобоса (с коррекцией фазового угла). Как показывает Табл. 5.1, за исключением случая съемки Фобоса с помощью ШТК на дальних расстояниях на орбите наблюдения, разрешение по поверхности Фобоса достаточно для проведения привязки по деталям рельефа. Съемка Фобоса на фоне Марса (Рис. 5.1) позволяет осуществить взаимную привязку системы Марс-Фобос-КА.

Бортовая обработка включает сжатие изображений, позволяющее передать на Землю 60–80 изображений за сеанс связи.

Табл. 5.1. Пространственное разрешение и поле зрения на поверхности Фобоса, получаемое с помощью УТК и ШТК на КСО и орбите наблюдения

Параметр	Расстояние до поверхности Фобоса			
	КСО		Орбита наблюдения	
	30 км	100 км	500 км	20000 км
УТК:				
Разрешение, м	0.45	1.5	7.5	300
Поле зрения, км	0.45	1.5	7.5	300
ШТК:				
Разрешение, м	12	40	200	8000
Поле зрения, км	12	40	200	8000

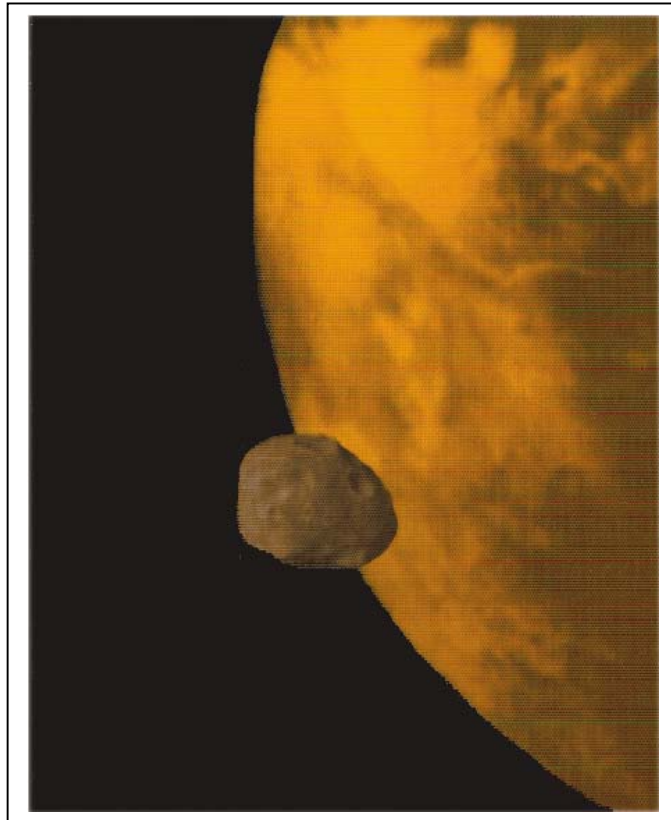


Рис. 5.1. Снимок Фобоса на фоне Марса, полученный ВСК на КА «Фобос-2» с расстояния 326 км

5.2.2. Наблюдение прохождения Фобоса через поле зрения ШТК

Данный метод предусматривает наблюдение прохождения Фобоса через достаточно широкое поле зрения ШТК при сохранении постоянной инерциальной ориентации КА. Он применим при съемке Фобоса на реальном фоне звезд на орбите наблюдения. Привязка к инерциальной системе координат возможна как по данным БОКЗ-МФ, так и, как вариант, путем съемки Фобоса на реальном фоне звезд. В последнем случае для выявления на изображении звезд необходимо переэкспонирование изображения Фобоса. Этот вариант съемки можно совместить с экспериментом по

исследованию пылевого тора Фобоса (см. п. 8.5).

Рекомендуемая геометрия съемки Фобоса в этом режиме показана на Рис. 5.2. Она обеспечивает прохождение Фобоса через все поле зрения ШТК (23.3°) при максимальных углах A между краем поля зрения камеры и Марсом.

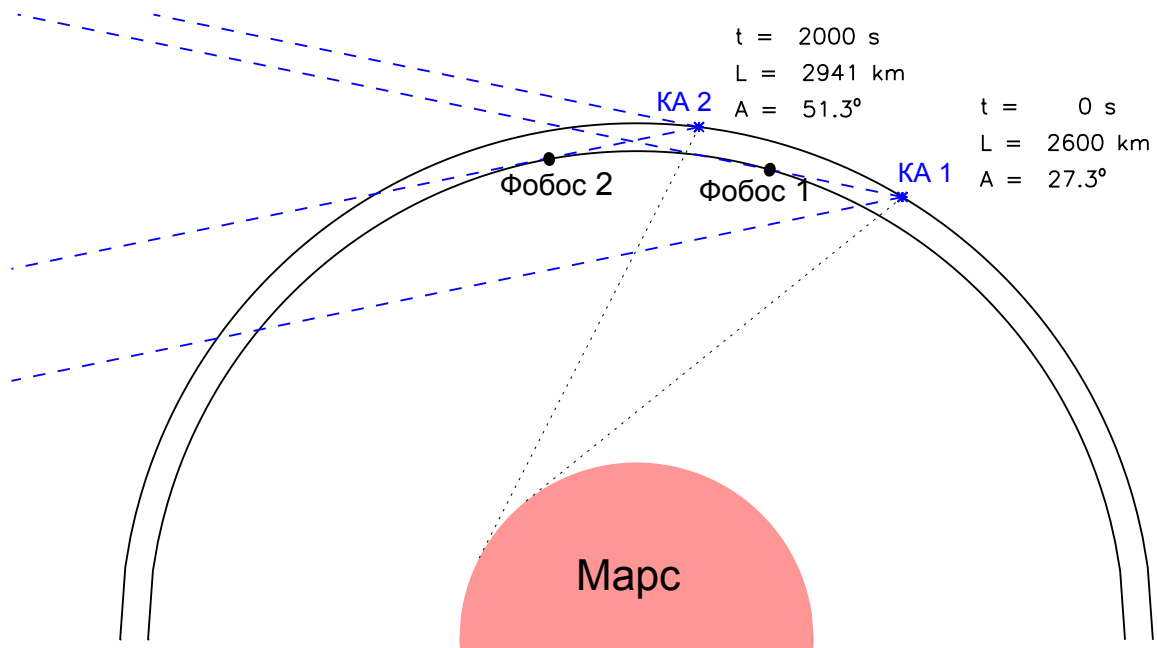


Рис. 5.2. Геометрия наблюдения Фобоса с помощью ШТК на орбите наблюдения: Фобос проходит через все поле зрения ШТК при максимальных углах поля зрения к Марсу

При наблюдении Фобоса без переэкспонирования (т.е. без звезд в кадре) эффективное сжатие информации достигается путем выделения фрагментов с Фобосом и их сжатия без потерь (~300 байт на фрагмент), что позволяет сжать 670 изображений до ~200 кбайт. На Землю могут передаваться несколько сжатых без потерь изображений и выделенные фрагменты с Фобосом.

При съемке Фобоса с переэкспонированием на реальном фоне

звезд возможно детектирование звезд 6-ой величины. Ожидаемое количество звезд в кадре примерно такое же, как и в калибровочных сеансах (п. 4). При этом на Землю передаются фрагменты изображений Фобоса, фрагменты возможных изображений пыли и характеристики звезд как описано в п. 4.

6. Картирование Фобоса и уточнение района посадки

Съемки с КСО позволят выполнить картирование Фобоса и стереореконструкцию его поверхности с субметровым разрешением, что на 1–2 порядка лучше разрешения существующих карт Фобоса. Помимо научного значения (см. п. 8), эти данные дадут возможность уточнить выбор наиболее безопасного района посадки. С этой целью программа съемки должна обеспечить:

- конвергентную съемку района посадки с двух направлений под углом конвергенции близком к 45° (в идеале под углами $\pm 22.5^\circ$ к нормали к аппроксимирующему Фобос эллипсоиду) для обеспечения оптимальной стереореконструкции поверхности,
- перекрытие изображений $\sim 60\%$ для взаимной привязки соседних снимков,
- сочетание съемок УТК, обеспечивающих высокое пространственное разрешение, и ШТК, позволяющих привязать узкоугольные снимки УТК к модели фигуры Фобоса.

Рис. 6.1 иллюстрирует возможную геометрию конвергентной съемки Фобоса, а табл. 6.1 – соответствующие этой геометрии съемочные параметры. При этом последовательно проводятся съемки одного и того же участка поверхности двумя сериями с переориентацией КА между сериями: КА1 и КА2 на рис. 6.1 обозначают положение КА в начале и конце первой серии снимков,

а КА3 и КА4 – в начале и конце второй серии снимков. Положение Солнца в эти моменты времени обозначено соответственно цифрами 1, 2, 3 и 4. При этом принималось, что в начале съемки фазовый угол Солнца (угол Солнце – объект съемки – наблюдатель) равен 35° . Тогда в конце съемки фазовый угол Солнца возрастает до 56° , и таким образом интервал фазовых углов находится в требуемом диапазоне $30\text{--}60^\circ$ (см. п. 9).

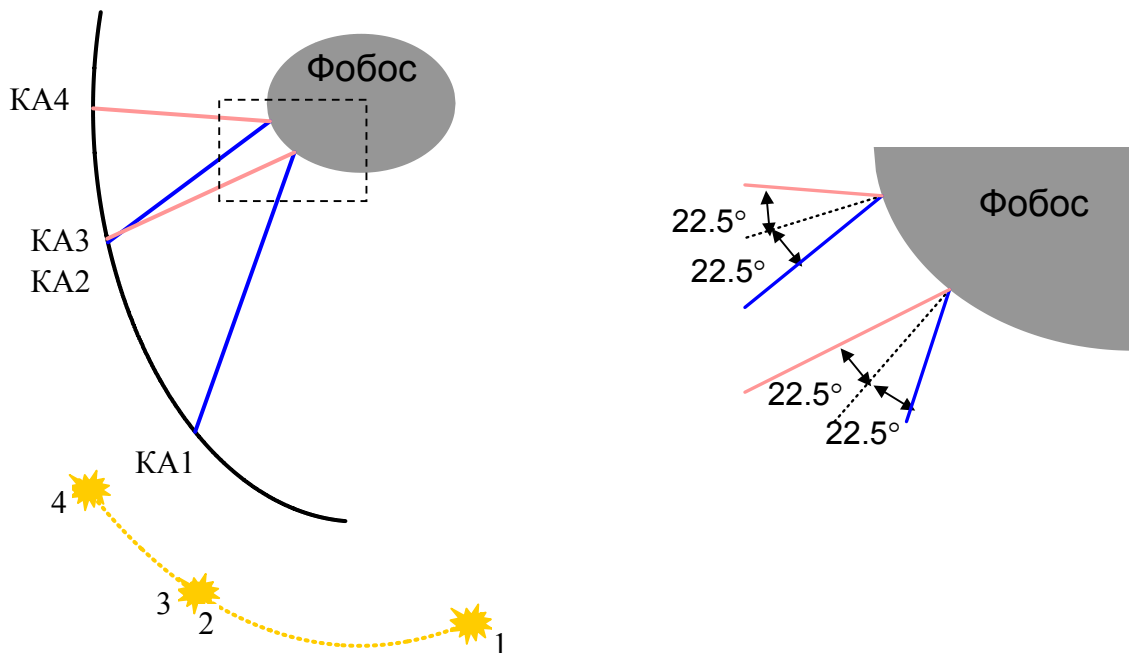


Рис. 6.2. Геометрия съемки района посадки с финальной КСО (слева) и увеличенный фрагмент, иллюстрирующий постоянство углов наблюдения к местной нормали (справа)

В этом примере закон изменения ориентации в пределах каждой серии выбран таким образом, что в пределах каждой серии обеспечиваются постоянные оптимальные углы наблюдения к нормали аппроксимирующего Фобос эллипсоида ($+22.5^\circ$ и -22.5°).

При этом вращение КА для поддержания ориентации должно быть неравномерным, хотя и монотонным. Параметры съемки меняются несущественно также в случае, если обеспечивается равномерное вращение КА в течение каждой серии с угловой скоростью, обеспечивающей наилучшее приближение углов наблюдения к оптимальным. Однако, если в течение серии сохраняется постоянная инерциальная ориентация, то интервал между снимками УТК сокращается до 6 с, а смаз увеличивается до 0.3 м и становится сопоставимым с пространственным разрешением.

Табл. 6.2. Параметры сеанса съемки на финальной КСО

Параметр	Серия 1	Серия 2
Длина участка	6.7 км	6.7 км
Длительность съемки	35 мин	20 мин
Расстояние до поверхности	30 – 47 км	25 – 30 км
Разрешение:		
УТК	0.45 – 0.70 м	0.37 – 0.45 м
ШТК	12 – 19 м	10 – 12 м
Смаз:		
УТК	0.02 м	0.03 м
ШТК	0.001 м	0.002 м
Ширина трассы:		
УТК	0.45 – 0.70 км	0.37 – 0.45 км
ШТК	12 – 19 км	10 – 12 км
Среднее перекрытие снимков УТК	60%	60%
Количество снимков:		
УТК	13	19
ШТК	1	1
Интервал съемки УТК	162 с	62 с
Фазовый угол	35–42°	42–56°

7. Съёмки Фобоса при посадке и информационная поддержка посадки

В процессе посадки ТСНН будет вести съёмку Фобоса для передачи изображений на Землю, а также решать следующие задачи по информационной поддержке процесса посадки:

- автономный выбор места посадки и слежение за ним,
- измерения высоты и компонентов скорости,
- индикация края Фобоса.

УТК и ШТК будут проводить обработку информации независимо друг от друга (см. функциональные схемы на Рис. 7.1 и 7.2). В нормальной ситуации функции двух комплектов камер (УТК-1 и УТК-2 или соответственно ШТК-1 и ШТК-2) разделены и дополняют друг друга для экономии времени обработки. Тем не менее, оба комплекта камер будет иметь полный набор программ обработки, и при выходе одной из камер из строя всю обработку (за исключением стереоизмерений) может взять на себя дублирующая камера.

Съёмки целесообразно начать в момент схода с орбиты или за некоторое время до него с тем, чтобы автономно протестировать правильность функционирования компонентов ТСНН и при необходимости соответствующим образом автономно адаптировать алгоритмы обработки. Полученная информация поступает в Бортовой Вычислительный Комплекс (БВК), который в соответствии с программой посадки и учитывая состояние ТСНН и других бортовых систем, обеспечивающих посадку, решает вопрос об использовании информации ТСНН при управлении посадкой. В зависимости от высоты съёмки БВК должен также осуществлять выбор между информацией УТК или ШТК для решения конкретных задач (см. Табл. 7.1).

Таблица 7.1. Функции УТК и ШТК при посадке на Фобос

Функция	УТК	ШТК
1. Съёмка для передачи изображений на Землю	С момента схода с орбиты до высоты 3 км (разрешение от 45 см до 4.5 см)	От высоты 3 км до поверхности (разрешение от 1.2 м до 1 мм)
2. Автономный выбор места посадки и слежение за ним		От высоты 0.5–1 км до высоты 15 м (разрешение от 0.2–0.4 м до 0.6 см)
3. Измерения расстояния и компонент скорости	С момента схода с орбиты до высоты 300 м	От высоты 300 м до высоты 10 м
4. Индикация края Фобоса		С момента схода с орбиты до высоты 10 м

Ниже указанные задачи анализируются более подробно.



Рис.7.1. Общая схема обработки информации УТК по время посадки

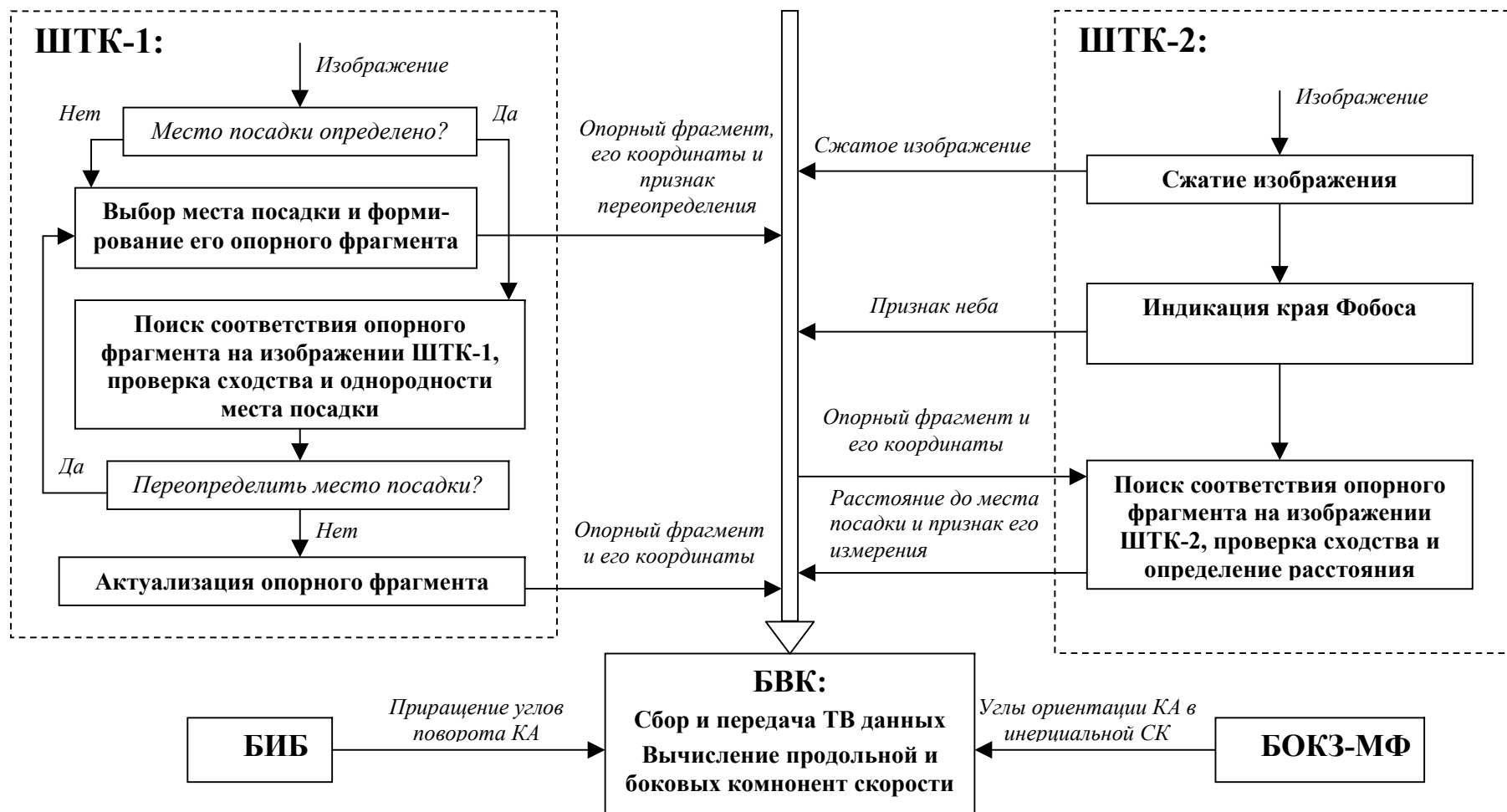


Рис.7.2. Общая схема обработки информации ШТК по время посадки

7.1. Съёмка Фобоса в процессе посадки

Съёмка Фобоса со все улучшающимся разрешением будет проводиться УТК и ШТК, начиная с момента схода с орбиты. С момента схода с орбиты до высоты $H = 3$ км в ЗУ следует передавать изображения УТК (УТК-2 на Рис.7.1), разрешение которых будет возрастать с 0.45 м до 4.5 см (при соответствующем уменьшении поля зрения с 450 м до 45 м). При дальнейшем снижении разрешение УТК будет ограничено смазом (5–7 см при боковой скорости 5–7 м/с) и поэтому необходимо будет переключиться на передачу изображений ШТК (ШТК-2 на Рис.7.2). Разрешение ШТК будет возрастать от 1.2 м при поле зрения 1.2 км с $H = 3$ км до ~1 мм при поле зрения 0.8 м с $H = 2$ м. При дальнейшем снижении разрешение будет ухудшаться из-за дефокусировки (влияние смаза на разрешение ШТК будет менее существенным: при боковой скорости при посадке не более 0.4 м/с смаз не будет превышать 0.3 мм).

Количество снимков, передаваемое в ЗУ, ограничивается пропускной способностью шины, связывающей ТВ камеры с БВК, а количество снимков, передаваемых в процессе посадки на Землю – пропускной способностью канала связи КА-Земля. Принимая, что в процессе посадки 50% от максимальной скорости передачи данных в БВК, т.е. 0.5 Мбит/с может быть использовано для передачи изображений, получаем, что для передачи в БВК одного изображения, сжатого с коэффициентом 5–7, т.е. имеющего объем 0.2–0.3 Мбайт, потребуется 3–5 с, что соответствует планируемой периодичности съёмки при посадке. Если процесс посадки будет длиться 32 мин, в бортовое ЗУ может быть передано максимум 380–640 сжатых изображений, имеющих общий объем 120 Мбайт. Для уменьшения объема информации возможна передача изображений

в ЗУ с некоторой скважностью. На Землю в процессе посадки может быть передано 13–19 сжатых изображений (при скорости передачи информации 16 Кбит/с), а остальные изображения должны запоминаться в ЗУ и передаваться на Землю после посадки.

7.2. Автономный выбор места посадки и слежение за ним

При приближении КА к поверхности Фобоса по данным ШТК будет проводиться автономный выбор места посадки – наиболее ровной площадки с размером, соответствующим ошибке приведения КА к месту посадки (~10 м). Выбор места посадки может проводиться, начиная с высоты 0.5–1 км, когда разрешение ШТК составляет 0.2–0.4 м при поле зрения 200–400 м, и при необходимости повторяться вплоть до высоты ~15 м, когда поле зрения ШТК составляет 6 м, что в два раза превышает диаметр КА.

Для выбора места посадки изображение ШТК условно разбивается на окна и выбирается наиболее однородное окно по заданному критерию однородности. При этом используется то обстоятельство, что большие наклоны поверхности при достаточно низком положении Солнца над горизонтом могут быть распознаны по отбрасываемым ими теням, а меньшие наклоны – по перепаду яркости (см. п. 9). Выбор наиболее однородного окна проиллюстрирован на рис.7.3 на реальном изображении Фобоса низкого разрешения (~100 м) с использованием относительного среднего абсолютного отклонения яркости в качестве критерия однородности. Этот пример является чисто иллюстративным – реально такой выбор должен проводиться по изображениям, имеющим на 2–3 порядка лучшее разрешение. В зависимости от мощности процессора разбивка на окна может происходить с

перекрытием (например, 50% или более высоким). Выбор наиболее адекватного критерия однородности требует дополнительных исследований.

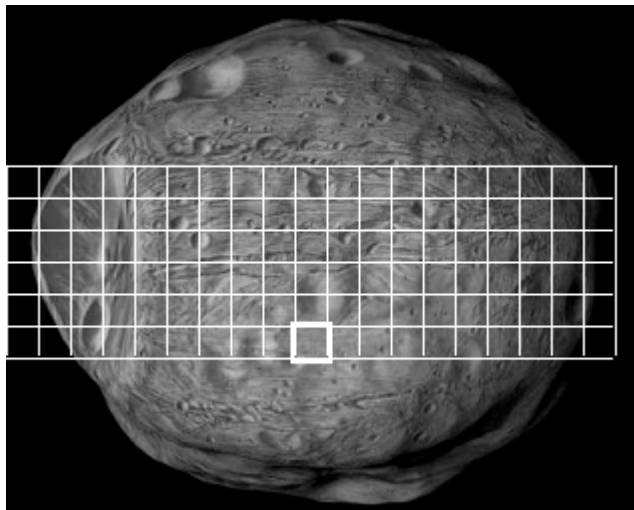


Рис. 7.3. Иллюстрация выбора наиболее однородного участка на поверхности Фобоса по критерию минимума относительного среднего абсолютного отклонения (выбранное окно выделено жирной рамкой)

Абсолютный размер окна (в метрах) можно постепенно уменьшать, например как линейную функцию высоты: от 10 м × 10 м на $H = 1$ км до 3 м × 3 м на $H = 15$ м. При этом размер окна в пикселах будет возрастать от 25 × 25 до 500 × 500 пикселей. Начиная с высоты ~100 м, когда размер пиксела уменьшится до 4 см, целесообразно перед анализом однородности окна закруглять разрешение до 5–10 см с тем, чтобы исключить влияние малых неровностей – шероховатости поверхности, которые не представляют опасности при посадке, но могут иметь высокий контраст и поэтому дестабилизировать выбор места посадки.

Возможная общая схема обработки информации ШТК для выбора места посадки показана на Рис. 7.2. Если место посадки

еще не было определено, на полученном ШТК-1 изображении проводится начальный выбор места посадки как центра наиболее однородного окна и формируется опорный фрагмент изображения места посадки. Опорный фрагмент может иметь значительно меньший размер, чем окно, что позволит ускорить дальнейшую обработку и минимизировать передачу информации между камерами. Однако он должен содержать достаточное количество неоднородностей для его однозначной идентификации на последующих изображениях. Отметим, что это требование находится в определенном противоречии с критерием выбора места посадки как наиболее однородного участка поверхности. Поэтому размер опорного фрагмента целесообразно сделать адаптивным и выбирать в зависимости от степени однородности окна. Опорный фрагмент вместе с координатами его центра и признаком его (пере)определения передается в БВК и через него в ШТК-2 (для проведения стереоизмерений – см. п. 7.3).

После получения каждого следующего изображения на нем осуществляется поиск соответствия с текущим опорным фрагментом (с учетом прогноза его смещения) и проверяется однородность места посадки. При этом возможно использование различных площадных и/или векторных методов установления соответствия и различных функций сходства, выбор которых требует дальнейшей проработки с учетом ограничений на вычислительные ресурсы бортового процессора. При превышении значением функции сходства заданного порога и при нахождении критерия однородности в заданных пределах опорный фрагмент актуализируется (заменяется соответствующим фрагментом на новом изображении) с тем, чтобы учесть постоянное изменение масштаба, и вместе с координатами места посадки передается в

БВК и ШТК-2. В противном случае проводится новый выбор места посадки как описано выше.

7.3. Измерение расстояния стереометодом

Измерение расстояния до поверхности в процессе посадки осуществляется стереометодом – по параллаксу произвольного контрастного объекта на поверхности Фобоса при наблюдении на стереобазе 2 м. С момента схода с орбиты до высоты 300 м для этой цели могут использовать две камеры УТК, позволяющих в силу высокого разрешения получить хорошую точность (см. Табл. 7.2). В этих расчетах предполагалось, что точность измерения параллакса составляет 1 пиксел (учитывая точность взаимной геометрической калибровки камер), а в случае УТК на высотах ниже 5 км ограничена смазом в 7 см (как худший случай).

Таблица 7.2. Ошибка измерения высоты стереометодом с помощью УТК и ШТК (м)

Камера	Высота						
	10 км	1 км	500 м	300 м	100 м	30 м	10 м
УТК	740	35	18	11			
ШТК		206	51	19	2.1	0.19	0.021

На высоте 300 м, где перекрытие полей зрения УТК-1 и УТК-2 уменьшается до 50%, целесообразно перейти на стереоизмерения с помощью двух камер ШТК. Хотя на больших высотах точность стереоизмерений с помощью ШТК недостаточна, на высоте 300 м она составляет ~6% и быстро улучшается при уменьшении высоты.

Стереои́змерения ШТК применимы до высоты ~ 10 м, где перекрытие полей зрения ШТК-1 и ШТК-2 уменьшается до 50%.

Стереои́змерения в двух камерах УТК могут проводиться следующим образом (Рис. 7.1). На начальном изображении УТК-1 выбирается опорный фрагмент (как вариант – нескольких опорных фрагментов, что позволяет также оценивать нормаль к поверхности и осуществлять фильтрацию измерений) размером, например, 10×10 пикселей, который расположен вблизи оптической оси и является достаточно неоднородным (по выбранному критерию) по двум направлениям. Этот фрагмент вместе с координатами его центра и признаком его (пере)определения передается через БВК в УТК-2 и в некотором окне, размер которого выбирается с некоторым запасом для учета параллакса и геометрического рассогласования камер, проводится поиск соответствия опорного фрагмента на изображении УТК-2. По разности координат центра опорного фрагмента в обеих камерах, скорректированному с использованием результатов взаимной геометрической калибровки камер, рассчитывается расстояние до поверхности Фобоса вдоль оптической оси УТК. Это расстояние, а также признак проведенного измерения, характеризующего успех установления соответствия (т.е. при превышении функцией сходства заданного порога), передается в БВК. Выбор метода установления соответствия и функции сходства требует дальнейших исследований.

Каждая следующая стереопара изображений обрабатывается по следующему алгоритму. На вновь полученном изображении УТК-1 ищется положение текущего опорного фрагмента (с учетом прогноза его смещения) и проверяется его неоднородность. При успехе установления соответствия и при нахождении критерия неоднородности в заданных пределах опорный фрагмент

актуализируется (заменяется соответствующим фрагментом на новом изображении) с тем, чтобы учесть постоянное изменение масштаба и вместе с его координатами передается в БВК и УТК-2. В противном случае проводится новый выбор опорного фрагмента как описано выше.

В ШТК стереоизмерения проводятся сходным способом с той разницей, что в качестве опорного фрагмента или одного из опорных фрагментов можно использовать опорный фрагмент места посадки (этот вариант показан на Рис. 7.2). Это позволяет сэкономить время обработки в ШТК-1 за счет устранения дублирования аналогичных операций.

7.4. Определение компонент относительной скорости

Компоненты относительной скорости КА – поверхность Фобоса определяются в БВК по изменению расстояния до выбранного опорного объекта на поверхности Фобоса (в частности, до центра места посадки) между соседними изображениями и по изменению направления на него в приборной системе координат. Для того, чтобы отделить влияние бокового смещения от изменения масштаба изображения и ориентации КА, необходимо дополнительно использовать данные БИБ и/или БОКЗ-МФ.

7.4.1. Определение продольной скорости

Продольная (вдоль оптической оси z ТВ камер) компонента относительной скорости КА определяется по изменению расстояния R до выбранного опорного объекта на поверхности Фобоса (в случае ШТК – места посадки) за интервал времени Δt между

последовательными изображениями:

$$V_z = \frac{R_1 - R_2}{\Delta t} \quad (7.1)$$

Ошибка измерения продольной скорости $\sigma(V_z)$ на интервале Δt определяется ошибкой измерения расстояния $\sigma(R)$:

$$\sigma(V_z) = \sqrt{2}\sigma(R)/\Delta t, \quad (7.2)$$

где предполагается, что ошибки измерения расстояния по различным снимкам независимы. Используя ошибки измерения расстояния из Табл. 7.2 и предполагая, что $\Delta t = 3$ с, получим приведенные в Табл. 7.3 ошибки измерения продольной компоненты скорости,

Таблица 7.3. Ошибка определения продольной компоненты относительной скорости по данным УТК и ШТК (м/с)

Камера	Высота						
	10 км	1 км	500 м	300 м	100 м	30 м	10 м
УТК	350	16.5	8.5	5.2			
ШТК		97	24	8.7	0.97	0.087	0.0097

Эти расчеты показывают, что удовлетворительная точность определения продольной скорости обеспечивается лишь по данным ШТК на высотах менее 100 м. Точность определения V_z можно повысить за счет увеличения интервала усреднения Δt .

Хотя V_z определяется согласно (7.1) как проекция скорости на направление на опорный объект, ее отличие от проекции скорости на направление оптической оси несущественно: даже если опорный объект наблюдается на краю поля зрения, разность между этими проекциями составляет не более 0.01% для УТК и не более 4% для ШТК. С другой стороны, рельеф может вносить значительные ошибки в измерения продольной скорости, если расстояния R_1 и R_2 в (7.1) определены для разных объектов. Поэтому, при переопределении опорного объекта (в частности, места посадки) определение продольной скорости не проводится.

7.4.2. Определение боковых компонент скорости

Боковые компоненты относительной скорости КА – поверхность Фобоса (вдоль осей x и y , лежащих в плоскости изображения ТВ камер) определяются по смещению центра изображения опорного объекта (в частности, места посадки) за интервал времени Δt между соседними изображениями. При этом, однако, надо учитывать, что в смещение опорного объекта на изображении помимо бокового сноса могут вносить вклад также вращение КА и изменение масштаба, влияние которых необходимо скорректировать.

Примем, что смещение центра опорного объекта на изображении может быть определено с точностью ~ 1 пиксел, а для УТК на высотах менее 5 км ограничено смазом в 7 см. Связанные с этим ошибки определения боковой скорости при интервале съемки $\Delta t = 3$ незначительны (см. Табл. 7.4). Отметим, что в случае УТК они остаются постоянными на высотах ниже 5 км, поскольку там они

определяются смазом.

Таблица 7.4. Ошибка определения боковых компонент относительной скорости по данным УТК и ШТК, связанная с ошибкой измерения смещения опорного объекта на изображении (м/с)

Камера	Высота						
	10 км	1 км	500 м	300 м	100 м	30 м	10 м
УТК	0.049	0.023	0.023	0.023			
ШТК		0.14	0.069	0.041	0.014	0.0041	0.0014

Ошибка коррекции эффекта вращения КА по данным БИБ определяется точностью угловых измерений БИБ. В соответствии со спецификацией БИБ, шумовая составляющая угловых измерений на уровне 3σ не превышает 0.3 угл. сек, а угловой уход БИБ за интервал времени 3 с не превышает 0.6 угл. сек. Обе этих величины значительно меньше углового размера пиксела УТК (3 угл. сек), а тем более ШТК (85 угл. сек) и поэтому их влиянием можно пренебречь по сравнению с ошибкой измерения смещения объекта на изображении.

Другим источником ошибок коррекции эффекта вращения КА может быть различие систем координат ТВ-камер и БИБ. Для того, чтобы влияние этого фактора на ошибки коррекции эффекта вращения КА не превышала значения, указанные в Табл. 7.4, привязка систем координат ТВ-камер и БИБ должна быть выполнена с точностью не хуже 0.1° .

Для коррекции эффекта вращения КА могут использоваться также данные БОКЗ-МФ, который будет иметь хорошую взаимную геометрическую калибровку с ТСНН. Однако в этом случае необходимо учитывать возможность сбоя в работе БОКЗ-МФ при

посадке из-за подъема пыли с поверхности Фобоса в результате работы двигателей. При точности измерений БОКЗ-МФ в 5/12 угл. сек ошибка коррекции остается пренебрежимой в случае ШТК. Хотя в случае УТК ошибка коррекции может в несколько раз превысить уровень ошибок, приведенных в Табл. 7.4, однако и в этом случае она остается незначительной.

Если объект находится не на оптической оси, его положение на изображении смещается при изменении расстояния R до поверхности вследствие изменения масштаба изображения даже при отсутствии бокового смещения и вращения КА. В этом случае остается постоянным радиус-вектор между опорным объектом и проекцией оптической оси ТВ камеры на поверхность Фобоса. Продифференцируем, например, x -компоненту этого радиус-вектора, которая связана с координатой x изображения опорного объекта соотношением xR/F , где F – фокусное расстояние. Тогда получаем, что скорость изменения координаты x изображения опорного объекта связана с продольной скоростью КА соотношением $\dot{x} = xV_z/R$ и, следовательно, кажущаяся скорость КА вдоль оси x из-за изменения масштаба равна $\dot{\tilde{x}} = \dot{x}R/F = tg \vartheta_x V_z$, где ϑ_x – угловое отклонение вдоль оси x опорного объекта от оптической оси ТВ камеры. Отсюда следует, что ошибка коррекции $\tilde{\sigma}_x$ связана с ошибкой определения продольной скорости соотношением

$$\sigma(\tilde{V}_x) = tg \vartheta_x \sigma(V_z), \quad (7.3)$$

(здесь пренебрегается ошибкой измерения угла ϑ_x по сравнению с ошибкой определения продольной скорости V_z).

В Табл. 7.5 приведены значения ошибки (7.3), рассчитанные с использованием ошибки измерения продольной скорости из Табл. 7.4. Предполагалось, что опорный объект находится на краю кадра, где эффект ошибок коррекции изменения масштаба максимален. Эти расчеты показывают, что ошибка коррекции изменения масштаба также не приводит к значительным ошибкам определения боковых компонент скорости при использовании УТК до высоты 300 м, а затем при переключении на ШТК.

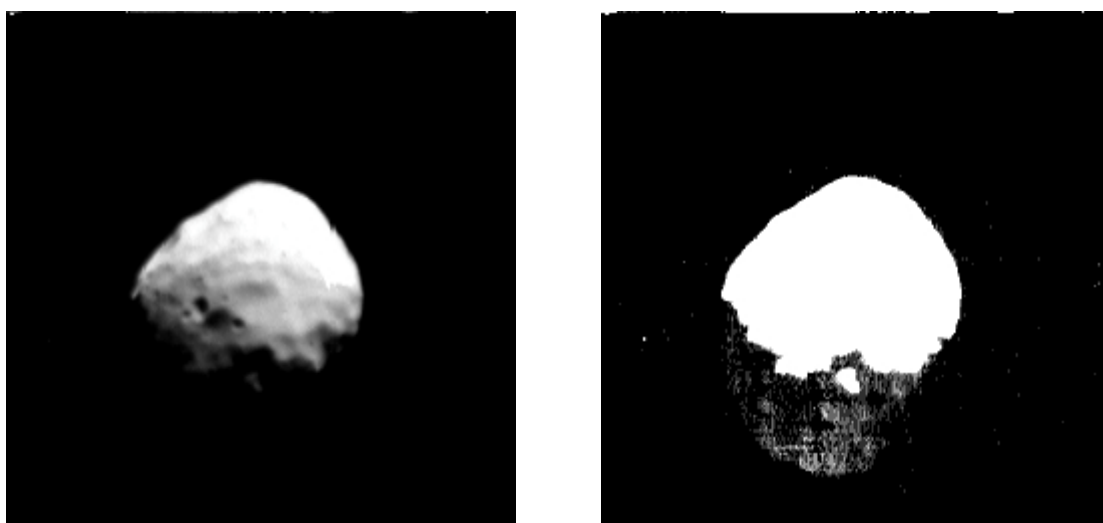
Таблица 7.5. Ошибка определения боковых компонент относительной скорости по данным УТК и ШТК, связанная с ошибкой коррекции масштаба (м/с)

Камера	Высота						
	10 км	1 км	500 м	300 м	100 м	30 м	10 м
УТК	2.6	0.12	0.062	0.038			
ШТК		20	4.9	1.8	0.20	0.017	0.0020

7.5. Индикация края Фобоса

Для оптимизации алгоритмов обработки данных лазерного высотомера ЛВВ и доплеровского измерителя скоростей ДИСД необходима информация о попадании края Фобоса в поле зрения ШТК. С этой целью на изображениях ШТК пороговым методом определяется пропорция освещенной части Фобоса как пропорция пикселей, яркость которых превышает заданный порог. Величина порога должна подбираться экспериментально, чтобы с некоторым запасом превышать уровень радиометрического шума ШТК.

К сожалению, на изображениях ШТК вероятно не удастся надежно различить небо и неосвещенную Солнцем часть Фобоса, подсвечиваемую только слабым отраженным излучением Марса. Расчеты показывают, что ее яркость примерно в 200 раз меньше яркости освещенной Солнцем поверхности Фобоса и на изображениях может быть сопоставима с уровнем шума. Это подтверждается показанным на Рис. 7.4 изображением Фобоса, которое было получено ВСК на КА «Фобос-2». На изображении слева динамический диапазон изображения (256 градаций) адаптирован ко всему диапазону яркости поверхности. При этом яркость неосвещенной части, как правило, не превышает 1 градации и на этом изображении она не видна. Характер сигнала от неосвещенной части Фобоса виден на изображении справа, где динамический диапазон изображения адаптирован к малым уровням



яркости (при этом практически вся освещенная поверхность Фобоса находится в насыщении).

Рис. 7.4. Изображение Фобоса, полученное ВСК на КА «Фобос-2»: слева – динамический диапазон изображения адаптирован ко всему диапазону яркости поверхности Фобоса; справа – выделение малых уровней яркости

Вместе с тем, тени из-за неровностей рельефа на освещенной поверхности Фобоса на порядок ярче, поскольку они подсвечиваются окружающей освещенной поверхностью Фобоса. Поэтому они не будут смешиваться с «небом».

В этой ситуации близкую к 100% пропорцию освещенной части Фобоса в кадре ШТК следует интерпретировать как удаленность оптической оси ШТК не менее $\sim 10^\circ$ от направления на край Фобоса. Если эта пропорция существенно меньше, чем 100%, это указывает на близость края Фобоса или терминатора. Данный метод индикации края Фобоса не функционирует, если Фобос наблюдается на фоне Марса.

8. Научные задачи телевизионного эксперимента

8.1. Исследования основных форм рельефа поверхности Фобоса

Съемки Фобоса с КА «Маринер-9», «Викинг» и «Фобос» позволили выполнить топографическое и геологическое картирование Фобоса с разрешением 7–100 м (Turner, 1978; Thomas, 1979; Watson, 1989; Duxbury, 1989; Аванесов и др., 1994). Картированы крупные кратеры и борозды на поверхности Фобоса, выявлена неоднородность кратеров по глубине, предложены ряд гипотез о происхождении борозд.

В проекте «Фобос-Грунт» могут представлять интерес съемки поверхности Фобоса с разрешением лучше 1 м, что позволит исследовать мелкомасштабную структуру кратеров и борозд, вариации их характеристик по глубине, толщину слоя реголита и уточнить механизмы формирования борозд. Полученная

информация будет представлять интерес для:

- исследования характеристик грунта Фобоса и их пространственных вариаций,
- исследования механизмов, формирующих природу Фобоса,
- проверки гипотез о происхождении Фобоса,
- сравнительно-планетных исследований.

Информация для этих исследований будет получена в ходе картирования поверхности Фобоса с КСО (п. 6), а также при съемке Фобоса в процессе посадки (п. 7.1).

8.2. Исследование отражательных характеристик поверхности Фобоса

Снимки Фобоса, полученные в широком диапазоне значений фазового угла, позволяют исследовать вариации отражательных характеристик его поверхности, которые могут быть связаны с вариациями рельефа и микроструктуры поверхности. Влияние рельефа может быть скорректировано с использованием трехмерных моделей поверхности Фобоса, построенных по результатам его стереосъемок. Анализ индикатрисы рассеяния поверхности Фобоса позволяет оценить характеристики реголита: нормальное альbedo, размер частиц и размер неровностей поверхности субпиксельного масштаба путем обращения моделей рассеяния излучения на шероховатых поверхностях. В качестве примера можно указать модель (*Lumme and Bowell, 1980*), которая реально применялась для анализа отражательных характеристик поверхности Фобоса (*Аванесов, 1994*).

Для фотометрических исследований Фобоса необходимо получить снимки его поверхности в возможно более широком

диапазоне значений фазового угла. В отличие от задач картирования Фобоса, фотометрические исследования требуют обязательных наблюдений при малых значениях фазового угла, когда яркость поверхности слабо чувствительна к рельефу и наоборот очень чувствительна к характеристикам шероховатости поверхности. Примером являются показанные на Рис. 8.1 снимки Фобоса, полученные при различных фазовых углах. Только на снимках, полученных при фазовом угле в 6.7° , хорошо видны яркие образования вокруг многих кратеров, по-видимому, связанные с выбросами вещества из них.

Исследования отражательных характеристик Фобоса могут проводиться по снимкам, полученным с КСО (п. 6), и дополняться снимками, полученными в процессе посадки (п. 7.1).

8.3. Уточнение массы Фобоса и положения его центра масс

Анализ динамики КА при движении на КСО вблизи Фобоса, который будет проводиться при решении навигационных задач (п. 5.2), даст возможность уточнить массу Фобоса и положение центра масс в модели фигуры Фобоса, что в частности позволит сделать заключение о внутренней однородности Фобоса.

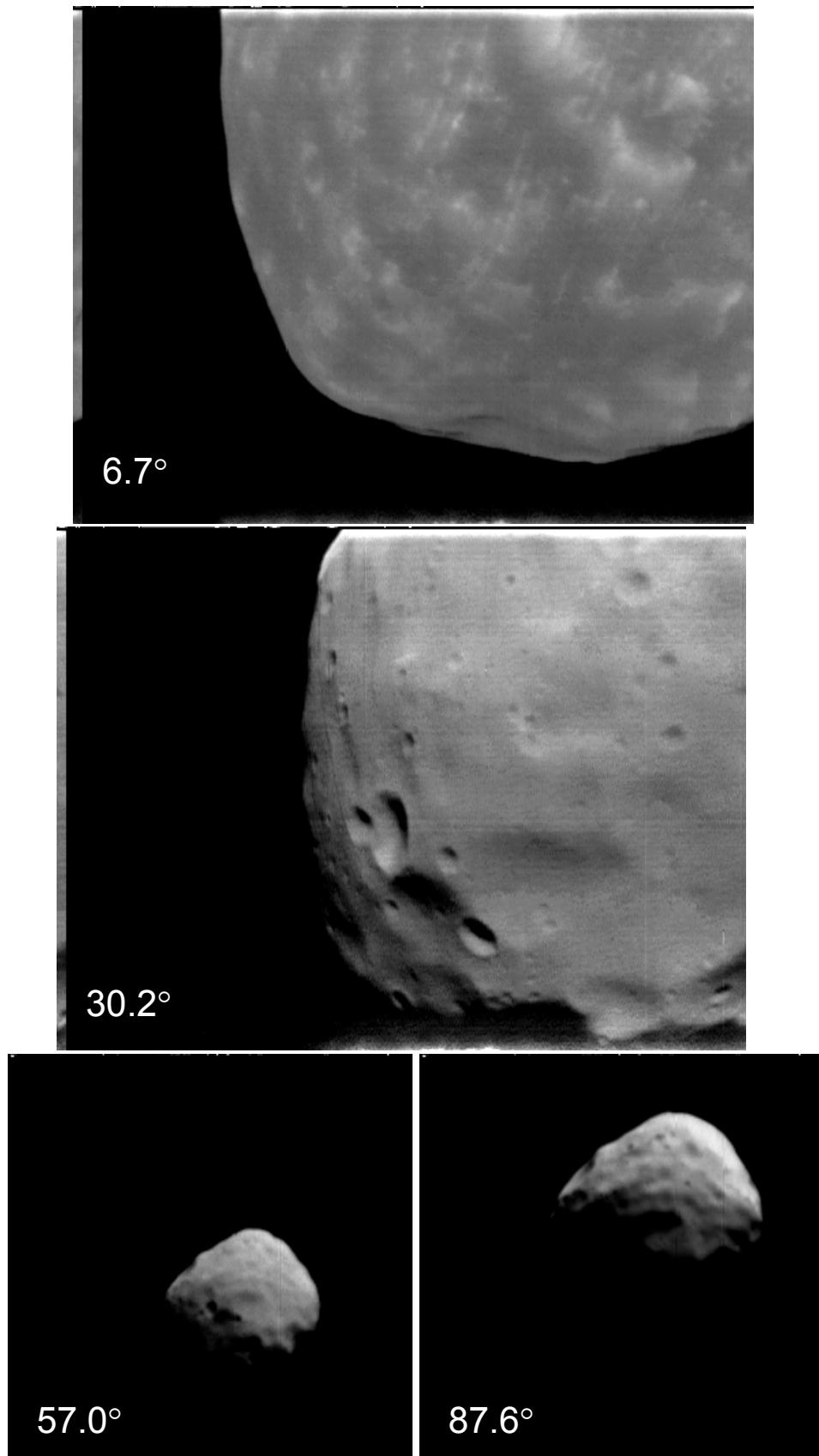


Рис. 8.1. Снимки Фобоса, полученные ВСК на КА «Фобос-2» при различных значениях фазового угла (указаны на снимках)

8.4. Исследование характеристик собственного вращения Фобоса

В течение всего времени функционирования КА на поверхности Фобоса с помощью двух звездных камер БОКЗ-МФ будут проводиться измерения ориентации КА, в результате чего будет получена информация для исследования как коротко-, так и длиннопериодических либраций Фобоса относительно всех трех осей. Это позволит:

- определить главные и смешанные моменты инерции Фобоса,
- определить положение центра масс Фобоса в связанной системе координат,
- путем сопоставления указанных параметров с моделями фигуры Фобоса сделать заключение о внутренней однородности Фобоса.

Для проведения этих исследований необходимо регистрировать измерения углов ориентации двух смотрящих в разных направлениях звездных датчиков БОКЗ-МФ с периодичностью порядка 1 мин, т.е. при смещении Фобоса по орбите менее, чем на 1° . При кодировании каждого угла 4 байтами скорость поступления информации с обоих приборов будет составлять 35 кбайт/сутки.

8.5. Исследование пылевого тора Фобоса

Согласно теоретическим представлениям, у Марса должны существовать пылевые кольца (пылевые торы), происхождение которых обязано выбиванию пылевых частиц с поверхности Фобоса и Деймоса, а также самого Марса в результате метеоритной бомбардировки. Хотя косвенные указания на их существование получены в ходе плазменных экспериментов на КА «Фобос-2»,

требуются прямое экспериментальное подтверждение этих результатов. Поскольку КА «Фобос-Грунт» будет длительное время находиться вблизи орбиты Фобоса, данные ТСНН и БОКЗ-МФ могут дать ценную информацию для подтверждения существования пылевого тора Фобоса и оценки характеристик пыли. Эти исследования будут дополнены измерениями характеристик пыли в непосредственной близости от поверхности Фобоса, которые могут быть выполнены с помощью БОКЗ-МФ после посадки на Фобос.

Частица пыли может быть распознана среди звезд как яркий объект, не имеющий соответствия в звездном каталоге. Для частиц, находящихся на относительно близком расстоянии (менее 100 фокусных расстояний от камеры), по размеру пятна дефокусировки на изображении может быть оценено расстояние до частицы, а по нему и по интегральному потоку излучения от частицы пыли – размер частицы. Кроме того, величина смаза изображения частицы позволяет оценить ее скорость и таким образом отличить частицы пылевого тора Фобоса от частиц межпланетной пыли, имеющих на порядок более высокую скорость.

Пример изображения пылевой частицы, полученного приборами серии БОКЗ на ИСЗ «Ямал-200», показан на Рис. 8.2. Частица пыли изображается как яркое дефокусированное пятно в верхней правой части изображения. Расстояние до частицы оценено в 2.8 м, а ее размер – в 150 мкм.

Принимая, что максимальная плотность частиц в пылевом торе Фобоса равна $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-3}$, типичная масса частиц равна $10^{-7} - 10^{-6} \text{ г}$ и отражательные характеристики частиц и их плотность такие же, как и у Фобоса, получим приведенные в Табл. 8.1 значения максимального расстояния, на котором эти частицы могут быть детектированы с помощью УТК, ШТК и БОКЗ-МФ, а также среднее количество детектированных частиц на одном изображении.

Таблица 8.1. Условия детектирования пыли телевизионными средствами

Параметр	УТК	ШТК	БОКЗ-МФ
Максимальное расстояние до частицы, м	600–1200	12–25	29–57
Ожидаемое число частиц на одном изображении	0.2–1.8	0.002–0.01	0.006–0.05

Как следует из этих расчетов, наиболее эффективно частицы пыли могут быть детектированы с помощью УТК. Как обсуждалось в п. 4, этот эксперимент можно совместить с калибровкой УТК на орбите наблюдения и КСО. При этом за 1 час съемок с интервалом 3 с можно ожидать, что будет детектировано 240–2200 частиц в каждой из двух камер.

С поверхности Фобоса исследования пыли могут проводиться с помощью двух приборов БОКЗ-МФ. При интервале съемки 1 с можно ожидать, что каждая из камер будет регистрировать от 500 до 4300 частиц в сутки.

Бортовая обработка информации ТСНН и БОКЗ-МФ для исследования пылевых частиц должна включать:

- определение координат взвешенного центра яркости и интегрального интенсивности излучения всех объектов, не имеющих соответствия в звездном каталоге потока (8 байт на объект),
- выделение и сжатие без потерь фрагментов изображений объектов, размер которых превышает размер изображений звезд (например, 100 байт на фрагмент 10 x 10).

При этом объем передаваемой информации составит:

- до 0.5 Мбайт при часовом сеансе съемок двумя камерами УТК с

- орбиты наблюдения и КСО и
- до 1 Мбайт в сутки при наблюдении с помощью двух приборов БОКЗ-МФ с поверхности Фобоса.



Рис. 8.2. Изображение пылевой частицы, полученное звездной камерой БОКЗ на ИСЗ «Ямал-200». Расстояние до частицы составляет 2.8 м, а ее размер – 150 мкм.

9. Требования к фазовому углу Солнца при съемках Фобоса

Индикатриса рассеяния поверхности небесных тел, покрытых темным реголитом, хорошо описывается функцией Хапке, показанной на Рис. 9.1. Особенностью этой функции является то, что при малых значениях фазового угла g (угла Солнце – объект – наблюдатель) коэффициент яркости поверхности слабо зависит от угла наклона поверхности, а при $g = 0^\circ$ зависимость от наклона поверхности вообще отсутствует. Этот же эффект подтверждают снимки Фобоса, полученные ВСК на КА «Фобос-2» при различных

фазовых углах (Рис. 8.1). При $g = 6.7^\circ$ на снимке практически не видно деталей рельефа (как обсуждалось в п. 8.2, более яркие образования на поверхности, по-видимому, связаны с выбросами вещества из кратеров, изменяющих индикатрису рассеяния поверхности). Рельеф проявляется на изображении, полученном при $g = 30.2^\circ$, и его контрастность усиливается при $g = 57^\circ$. При $g = 86.7^\circ$ контрастность изображения рельефа еще выше, однако при этом значительные участки поверхности могут быть в тени

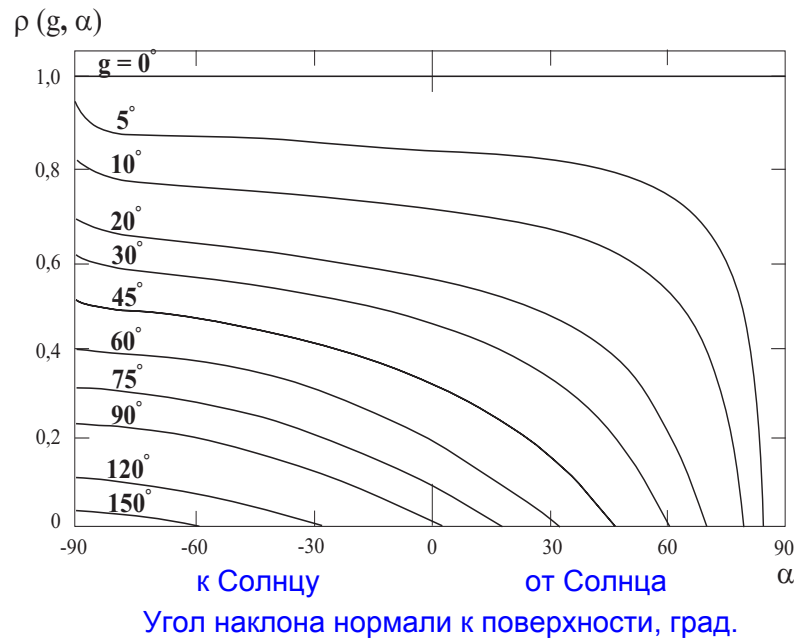


Рис. 9.1. Функция Хапке, описывающая коэффициент яркости темного реголита как функцию фазового угла и угла наклона нормали к поверхности

При посадке КА на поверхность Фобоса опасность могут представлять неровности высотой более 0.2 м на базе 3 м. Пример таких неровностей показан на Рис. 9.2. При этом на изображениях наиболее трудно распознаются пологие неровности с малым изменением угла наклона – такие, как показанная на Рис. 9.2 сплошной линией. Острые выступы той же высоты, например, как

показанный на этом же рисунке пунктирной линией, имеют значительно больший перепад углов наклона и поэтому будут иметь на изображении значительно больший контраст.

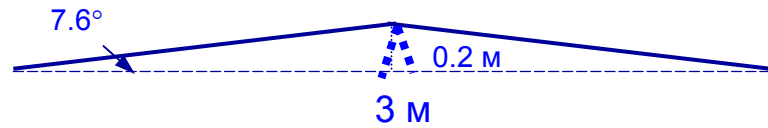


Рис. 9.2. Примеры неровностей поверхности, которые должны распознаваться по ТВ изображениям

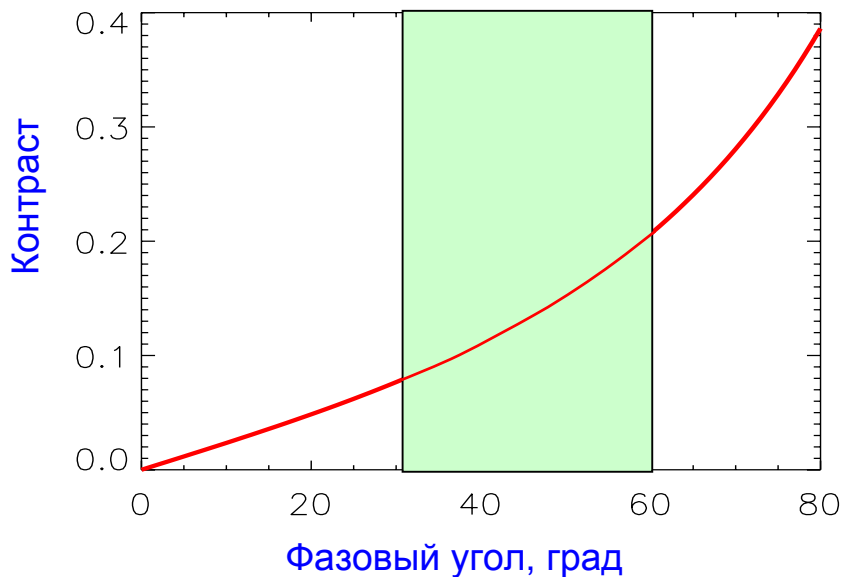


Рис. 9.3. Относительный контраст изображения неровности поверхности, показанной на Рис. 9.2 сплошной линией, как функция фазового угла. Затенением показан рекомендованный диапазон значений фазового угла 30–60°.

Контраст показанной на Рис.9.2 пологой неровности приведен на Рис. 9.3 как функция фазового угла. Контраст определен как отношение перепада яркости на неровности к ее средней яркости. Для того, чтобы контраст таких неровностей был не меньше 10–20%, съемку необходимо проводить в диапазоне фазовых углов 30–

60°, предпочтительнее в середине этого интервала при фазовых углах 40–50°. При больших значениях фазового угла контраст еще более возрастает, однако, как отмечалось выше, при этом резко возрастает площадь затененных участков.

Вместе с тем, для исследования характеристик грунта Фобоса необходимо предусмотреть съемки также и при малых значениях фазового угла, когда коэффициент яркости поверхности слабо зависит от ее наклона. (см. п. 8.2).

Список литературы

Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Зиман Я.Л. и др. (1994) Телевизионные исследования Фобоса. М.: Наука.

Садовничий В.А., Даксбери Т., Сербенюк С.Н. и др. Априорные модели поверхности Фобоса. В сб.: *Телевизионные исследования Фобоса*, ред. Г.А.Аванесов, Б.С.Жуков, Я.Л.Зиман и др., М: Наука, 1994, 31–39.

Batson R., Bridges P. M., Edwards K (1989) *Maps of Phobos*. Wash. (D.C.): USGS.

Duxbury T. C. (1989) The figure of Phobos. *Icarus*, vol. 78, 169.

Lumme K. and Bowell E. (1980) Radiative transfer in the surfaces of atmosphereless bodies. *Astron. J.*, vol. 86, no. 11, p. 1694 and 1705.

Thomas P. (1979) Surface features of Phobos. *Icarus*, vol. 40, 223–243.

Turner R. (1978) A model of Phobos. *Icarus*, vol. 33, 116.