

Проблемы обработки данных дистанционного зондирования для моделирования фигур малых тел Солнечной системы

А.Э. Зубарев, И.Е. Надеждина, А.А. Конопихин

*Московский университет геодезии и картографии (МИИГАиК КЛИВТ)
105064, Москва, Гороховский пер., 4
E-mail: lorencs@mail.ru*

Обсуждаются основные проблемы, возникающие при попытке фотограмметрической обработки кадровых снимков поверхностей малых небесных тел, сделанных КА. Излагается методология и технологические особенности российского подхода к решению возникших задач. На примере стереофотограмметрической обработки космических изображений поверхности марсианского спутника Фобоса показаны результаты реализации новой российской методологии: создание каталога координат опорных точек, результаты определения геометрических параметров фигур, наилучшим образом аппроксимирующих его рельеф, 3D- модель рельефа, полученная по координатам 108 516 измеренных точек, дана иллюстрация глобального ортофотоплана поверхности Фобоса.

Ключевые слова: фотограмметрическая обработка, мозаика, космический аппарат (КА), модель фигуры, система координат, элементы внешнего ориентирования (ЭВО), фототриангуляция, уравнивание, цифровая модель рельефа (ЦМР), Фобос.

Введение

Наиболее полную информацию о рельефе исследуемого небесного тела получают в результате стереофотограмметрической обработки космических изображений, переданных на Землю с космических аппаратов (КА). Чтобы пройти путь от космического снимка до конечного продукта (карте) приходится решать ряд сложных научно-практических задач. Некоторые из таких задач не встречались в практике классической (земной) фотограмметрии, а традиционные методики решения других задач, оказались непригодными для случая обработки снимков поверхностей далеких относительно небольших (по сравнению с Землей) небесных объектов (малые естественные спутники планет, астероиды и т. п.).

До сегодняшнего дня в России не было прецедентов создания мозаики небесных тел, при которых весь цикл фотограмметрической обработки был выполнен российскими специалистами с использованием российских программных продуктов. Научным коллективом КЛИВТ МИИГАиК созданы новые модели фигур спутников небесных тел на базе российского программного обеспечения. В статье авторы приводят технологию создания опорной сети малого небесного тела, иллюстрируя ее результатами работ по Фобосу. Все результаты получены авторами.

Проблематика

Космическая фотограмметрия — это раздел фотограмметрии, освещающий вопросы фотограмметрической обработки снимков, полученных с космических носителей специальной съемочной системой. В нем рассматриваются методы измерения и преобразования космических снимков, определения размеров и формы объекта изучения, пространственного положения изображенных на снимках деталей поверхности. Эффективная обработка космических снимков небесного объекта методами фотограмметрии возможна только в случае, если известны предварительные элементы внешнего ориентирования (ЭВО) каждого снимка в системе координат небесного тела (Урмаев, 1989; Тюфлин, 1986).

Под ЭВО снимка понимают координаты центра фотографирования и три угла ориентации снимка в пространстве. В земной фотограмметрии задача определения ЭВО снимков решена давно и весьма успешно. Разработаны методы, позволяющие получить координаты центров фотографирования с точностью 15...20 см, а угловые элементы — с точностью 0,001°. Такой точности оказывается вполне достаточно для построения общей мозаики (при наличии сведений о рельефе) и формировании стереопар, не прибегая даже к процедуре сгущения координатных точек методами фототриангуляции. Напротив, для случая космических снимков малых небесных тел ошибки в положении КА на орбите могут достигать многих сотен метров, а ошибки в величинах угловых элементов ориентирования нередко превышают 1...2°. Это приводит к необходимости построения специальной фототриангуляционной сети.

При обработке изображений земной поверхности современные фотограмметрические программы «ориентированы» на автоматический или полуавтоматический режим реализации процедуры фототриангуляции. Это оказывается возможным потому, что съёмка выполняется в схожих условиях освещенности и, как правило, с малыми углами отклонения оптической оси камеры от надира. При этом предварительные элементы внешнего ориентирования могут быть известны достаточно точно, по крайней мере, их точность вдвое выше требований к выходному ортофотоплану и допускам на ошибки.

Космическая съёмка небесных тел далеко не всегда выполняется с околообъектной орбиты, нередко реализуются и различные пролетные варианты дистанционного исследования. При такой разновидности съёмки (рис. 1) практически отсутствует возможность получить изображение поверхности небесного тела с одинаковыми условиями освещенности да еще и при небольших углах отклонения оптической оси камеры от надира, что плохо сказывается на автоматизации процедуры предварительного подбора изображений. Из-за больших взаимных углов наклона снимков и малым углом поля зрения возникают трудности при подборе снимков со схожими участками поверхности, что ощутимо осложняет выполнение последующих очень важных измерительных и уравнивательных процедур.

В результате уравнивательных вычислений получают оценки точности искомым неизвестных, а также сведения о распределении невязок, появление которых вызвано неточностью исходной информации и ошибками измерений. Если космические снимки покрывают всю поверхность изучаемого небесного тела, то возможно уравнивание всей глобальной сети пространственной фототриангуляции.



Рис. 1. Изображения Фобоса, полученные при помощи камеры SRC орбитального КА MarsExpress

Все известные на сегодняшний день отечественные Цифровые Фотограмметрические Станции (ЦФС), нацелены на обработку именно «земных» снимков (в том числе и космических), с применением выверенных специально разработанных проекций. При работе с космическими снимками малоразмерных (по сравнению с Землей) небесных тел ощутимо начинает сказываться эффект кривизны снимаемой поверхности, подбор соответствующей проекции оказывается чрезвычайно трудным. Среди космических снимков немало таких, где на одном снимке может быть отображено до 50 % поверхности объекта исследования. Понятно, что перспективные искажения могут быть очень большими, поэтому всю обработку приходится выполнять в пространственной системе координат методом связок.

Очевидны трудности, вызванные полным отсутствием для поверхности снятого объекта какой-либо координатной опоры. Обычно известны только предварительные данные внешнего ориентирования, точность которых определяется точностью знания положения космического аппарата на орбите.

Еще одна трудность связана с выбором поверхности относимости. Например, форма фигуры поверхности Фобоса лишь весьма отдаленно напоминает сферу, не намного лучше обстоят дела при аппроксимации рельефа спутника эллипсоидом вращения (двухосным эллипсоидом). Следовательно, для минимизации искажений за проекцию целесообразно использовать более сложную поверхность — например, трехосный эллипсоид.

Процесс обработки стереопары «земной» съёмки является, по сути, рутинной задачей, поскольку в условиях Земли все геометрические условия съёмки соблюдаются четко, и каждая соседняя пара снимков гарантировано образует стереопары. Для небесных тел, и в особенности малых, геометрию съёмки выдержать практически невозможно. Здесь порой не выполняется даже основное требование стереоскопической съёмки: соблюдение конкретного соотношения базиса фотографирования и фокусного расстояния. Зачастую многие изображения объекта съёмки - это просто набор перекрывающихся снимков.

Выводы

Из вышеизложенного следует, что имеется ряд методических трудностей, которые не были решены в стандартных подходах при обработке фотограмметрической информации, а именно:

- Снимки являются одним из продуктов космических миссий и не удовлетворяют требованиям классической фотограмметрии: большие углы наклона камеры от надира; объект удален, и часто полностью расположен на одном кадре.
- Подбор изображений и измерения связующих точек производятся вручную.
- Большие взаимные углы наклона снимков.
- Отсутствие повсеместного стерео для контроля точности измерения сети.
- Уравнивание измерений возможно только в 3D.
- Отсутствуют опорные точки (мы не можем использовать в качестве опорных точек имеющиеся опорные сети других авторов, так как не известны пиксельные координаты точек на изображении).
- Необходимы качественные элементы внешнего ориентирования.
- Построение мозаики осложняется сильной перспективностью изображений.
- В КЛИВТ разработана методика и технология создания каталога опорных точек малых небесных тел и естественных спутников планет по кадровым изображениям с КА.

Мировой опыт

В мире различными научными группами под эгидой NASA разработаны программные пакеты: ISIS (United States Geological Survey), VICAR (Multi-mission Instrument Processing

Laboratory/Jet Propulsion Laboratory) и наборы библиотек SPICE (Navigation and Ancillary Information Facility), которые позволяют решать описанные проблемы, однако не образуют полный цикл фотограмметрической обработки. Эти программы разработаны под ОС Linux. Примером такой программы является VICAR. Данная программа позволяет связать снимки, проведя измерения на точках, но модуль уравнивания связывающих точек обладает авторскими правами и недоступен для использования сторонними группами.

До 2011 г. в России не было программных комплексов, позволяющих пройти весь путь от снимка космического тела, до ортофотоплана. Однако совместно с компанией «Ракурс» впервые в РФ на базе программы PHOTMOD 5.2 получены новые алгоритмы, позволившие выполнить полный цикл фотограмметрических работ. Разработаны специальные методики, обеспечившие создание российских каталогов опорных сетей спутников небесных тел: Фобоса, Ио, Энцелада.

Технология фотограмметрической обработки космических снимков Фобоса

Информационной основой реализации алгоритма методики взаимного ориентирования, отбраковки и уравнивания измерений явились снимки кадровой камеры SRC КА «Mars Express». Алгоритм обработки предусматривает выполнение следующих процедур:

1. Загрузка исходных изображений с ftp сервера сайта Planetary Data System (PDS) (http://pds-geosciences.wustl.edu/mex/mex-m-hrsc-3-rdr-v2/mexhrsc_0001/). Количество загруженных изображений составило 181.
2. Конвертация изображений из формата *.img (стандартный формат хранения изображений всех космических миссий) в растровый формат *.tif. Для преобразования изображений из формата *.img в общепринятый формат *.tif в КЛИВТ был разработан специализированный конвертер, который позволил в автоматическом режиме считывать информацию, хранящуюся в PDS label и получать сведения о моменте съёмки, разрешении изображения, его битности и прочее, при этом, используя любой текстовый редактор Windows.
3. Визуальная оценка каждого изображения для оценки его качества и условий освещенности.
4. Группировка изображений проводится в несколько этапов. Первый, группировка по территориальному признаку. Выполняется поиск схожих снимков. В качестве критерия схожести выступают хорошо различимые объекты поверхности, например, кратеры. Второй, группировка изображений по взаимному углу наклона. В каждой из установленных территориальных групп, выделяются подгруппы со схожими углами взаимного наклона. Третий, группировка изображений по условиям освещенности.
5. Выполнение взаимного ориентирования в выделенных подгруппах под следующими условиями: 1) измерение не менее 20–30 связующих точек на одну пару снимков; 2) для контроля грубых ошибок, каждая точка должна быть измерена не менее чем на трех изображениях; 3) если визуально снимки получены практически с одной и той же съёмочной точки на орбите, то необходимо подобрать снимки с других орбит при условии монокулярной съёмки. Выполнение взаимного ориентирования в группах. Выполнение взаимного ориентирования между группами. Этот процесс является более трудоёмким и требует высокой квалификации и ответственности оператора, что делает его выполнение близким к экспертному анализу (рис. 2). В результате было измерено 9464 связующих точек.
6. Контроль измерений: визуальный (второй оператор), по поперечному и продольному параллаксу, по триплетам, иными способами.

7. Загрузка элементов внешнего ориентирования. Элементы внешнего ориентирования (ЭВО) хранятся в базах данных в специальном формате (бинарные и ASCII файлы) и распространяются научными группами, принимающими участие в запуске миссий. Для чтения эфемерид из файлов данных NASA в лаборатории JPL (Jet Propulsion Laboratory) были разработаны специализированные библиотеки SPICE, позволяющие считывать указанную информацию. В МИИГАиК КЛИВТ была разработана программа на основе библиотек SPICE, позволяющая преобразовывать ЭВО в формат, требуемый PHOTOMOD 5.2.
8. Пробное уравнивание, с оценкой точности центров фотографирования (рис. 3). Схема покрытия экваториальной области позволяет оценить возможность замыкания опорной сети вдоль экватора, что увеличивает её жесткость и надежность.
9. Уравнивание методом связей. Контроль результатов уравнивания: по ошибкам на стереопарах, по связям, по геометрии засечек, в стерео режиме, по векторам ошибок на снимках. Принятие экспертного решения о необходимости дополнительных измерений и, в случае необходимости, повторение работ, перечисленных в п. 5–9. Окончательное уравнивание. Оценка результатов уравнивания представлена на схеме развертки поверхности Фобоса в проекции Широта-Долгота (рис. 4). Средние ошибки положения контрольных точек сети (800 точек) по результатам уравнивания составили $\sigma_x = 7,9$ м, $\sigma_y = 6,0$ м, и $\sigma_z = 6,1$ м.
10. Сравнение с существующими моделями.

Применение и результаты на примере Фобоса

Координаты точек опорной сети необходимы для решения множества задач в разных сферах космических исследований. В планетарной геодезии они используются для создания модели фигуры небесного тела, определения его гравитационного поля. Космическая геодезия и динамика небесных тел по полученным результатам уточняет и определяет параметры вращения тела, его либрации. Также эти данные используются для астрометрических измерений, фотометрической коррекции. Для картографирования небесных тел необходимы ортофотоизображения, полученные в результате дальнейшей фотограмметрической обработки.

Определение геометрических параметров фигур, наилучшим образом аппроксимирующих Фобос

На основании полученной модели Фобоса были выведены параметры сферы, эллипсоида и трехосного эллипсоида, наилучшим образом подходящих для поверхности выбранного небесного тела.

Сравнение параметров сферы и трехосного эллипсоида с предыдущими работами

Источник	Сфера (км)	Трехосный эллипсоид (км)		
	r	a	b	c
Duxbury, 1989	10,97	12,61	11,33	8,60
Thomas, 1989	11,1±0,15	13,4	11,2	9,2
Willner, 2010*	11,08±0,04	13,00	11,39	9,07
МИИГАиК, 2012	11,09±0,04	13,24	11,49	9,48

* В настоящее время являются параметрами фигуры Фобоса, принятыми МАС (Archinal et al., 2010). Значения параметров, полученных Duxbury, Thomas и Willner, взяты из (Willner, 2010).

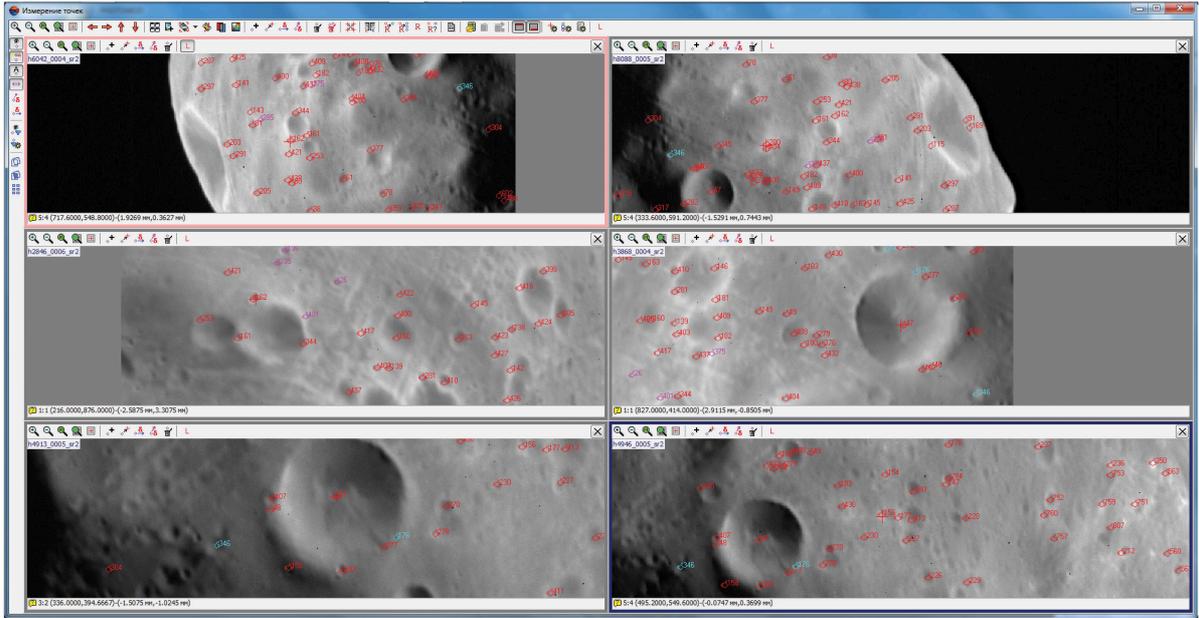


Рис. 2. Измерение связующих точек на снимках Фобоса в ЦФС PHOTOMOD 5.2

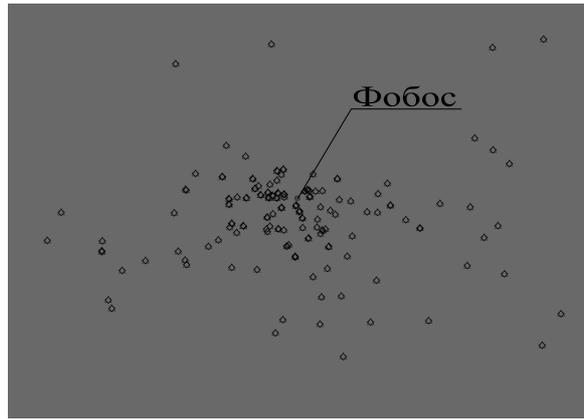


Рис. 3. Расположение центров фотографирования Фобоса в плоскости экватора



Рис. 4. Распределение ошибок опорных точек на поверхности Фобоса

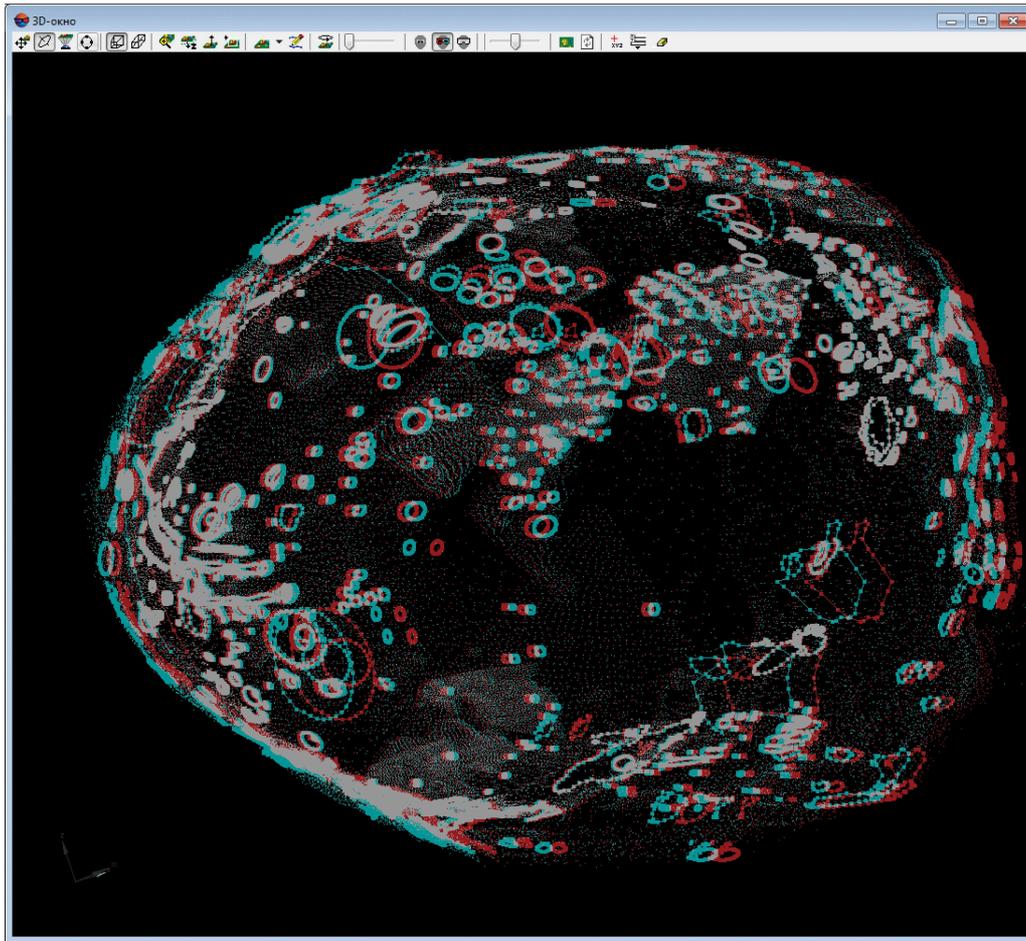


Рис. 5. Анаглифическая стереомодель ЦМР Фобоса в 3D. Содержит 108 516 точек, измеренных операторами вручную. Особенности изображений не позволяют выполнить данную процедуру в автоматическом режиме

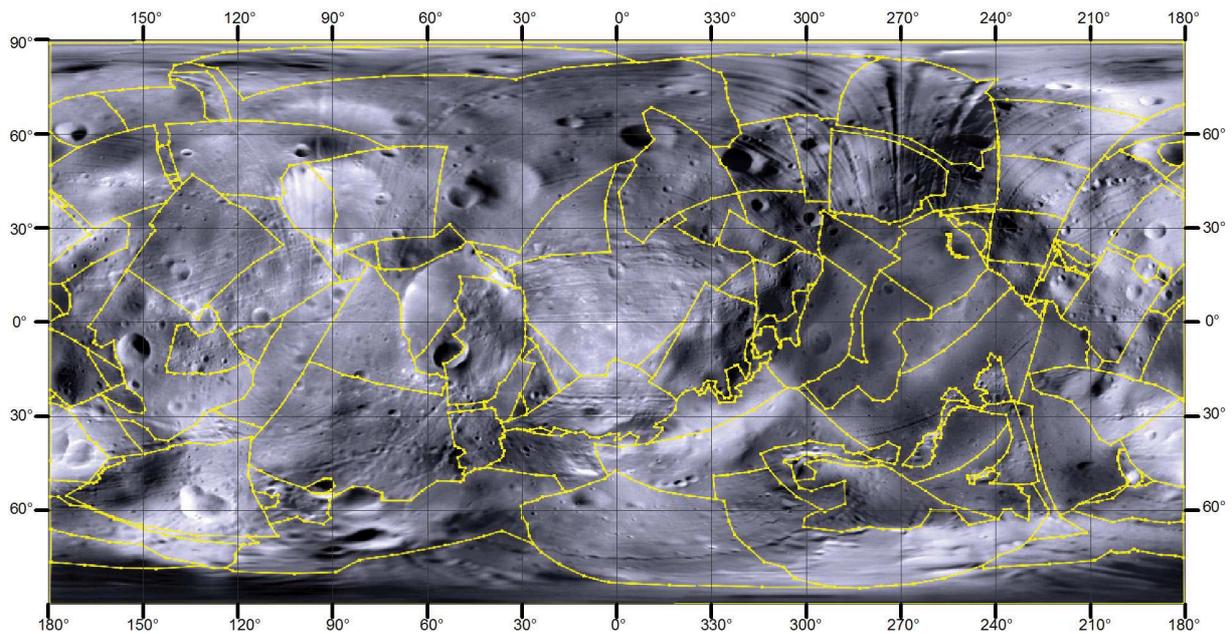


Рис. 6. Новая мозаика Фобоса с границами изображений, созданная в ЦФС PHOTOMOD 5.2

Создание цифровой модели рельефа (ЦМР) Фобоса

Для получения более детальной информации необходима цифровая модель рельефа. Для этого необходимо выполнить измерение точек в 3D по стереопарам. Впервые в мире была создана ЦМР Фобоса с использованием только кадровых изображений, выполненных SRC камерой КА Mars Express (рис. 5). Используются изображения, полученные в марте 2011 г.

Создание ортофотоплана Фобоса

Последующая фотограмметрическая обработка в программном комплексе PHOTOMOD® с помощью таких программных модулей как, Mosaic® и GeoMosaic® позволила создать новый ортофотоплан Фобоса (рис. 6). О картографических работах на основе данного ортофотоплана подробно рассказано в статье (Карачевцева и др., 2012, данный сборник)

Заключение

За 2011 г. в лаборатории МИИГАиК был получен ряд результатов, которые открывают новые возможности для исследования тел солнечной системы в геодезическо-картографическом аспекте. Разработана методика и получен пакет программ, позволяющих создавать опорные сети на поверхности любого космического объекта по кадровым изображениям.

По приведенной методике в лаборатории созданы: опорная сеть Фобоса, Ио, Энцелада (Надеждина и др., 2012, данный сборник).

Получены новые параметры фигур, определены сдвиги геометрических центров имеющихся моделей. Созданы новые ортофотопланы, на базе которых выполнено картографирование Фобоса (Карачевцева и др., 2012, данный сборник). Задача сравнения продуктов обработки Фобоса с работами других научных коллективов не является предметом статьи и будет освещена в следующих публикациях.

Работы выполнены при поддержке РФФИ (проект № 11-05-91323 «Геодезия, картография и исследование спутников Фобос и Деймос» (СИГ_а, совместные исследования с Фондом Гельмгольца)), а также частично грантом правительства Российской Федерации (Мегагрант) по теме: «Геодезия, картография и изучение планет и спутников» (договор № 11. G34.31.0021).

Литература

1. Карачевцева И.П., Кононихин А.А., Шингарева К.Б., Черепанова Е.В. и др. Картографирование Фобоса по данным дистанционного зондирования с использованием ГИС-технологий // В настоящем сборнике.
2. Надеждина И.Е., Зубарев А.Э., Жаров О.А., Жаров А.А. и др. Построение сети опорных точек спутников внешних планет на примере Ио и Энцелада // В настоящем сборнике.
3. Тюфлин Ю.С. Космическая фотограмметрия при изучении планет и спутников. М.: Недра, 1986.
4. Урмаев М.С. Космическая фотограмметрия. М.: Недра, 1989.
5. Archinal B.A., A'Hearn M.F., Bowell E. Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2009 // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2010. doi: 10.1007/s10569-010-9320-4.
6. Willner K., Oberst J., Hussmann H. et al. Phobos control point network, rotation, and shape // *Earth and Planetary Science Letters*. 2010. V. 294. P. 541–546.

Problems of remote sensing data processing for modeling of small bodies of the Solar system

A.E. Zubarev, I.E. Nadezhdina, A.A. Konopikhin

Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK MEXLab)

105064, Moscow, Gorokhovsky, 4

E-mail: lorencs@mail.ru

This paper deals with the main problems related to photogrammetric processing of frame images of small celestial bodies taken by a spacecraft. The methodology and technological peculiarities of the Russian approach to resolving arising issues are introduced. A brief description of other research groups' experience is given. The results of the offered methodology implementation are exemplified through stereophotogrammetric processing of images of the Martian moon Phobos: generation of a control point coordinate catalogue, results of determining of the geometric parameters of the best-fit shape models, 3D model of the relief obtained from 108,516 3D points, an illustration of the global orthophotoplan of Phobos' surface is presented.

Keywords: mosaic, spacecraft, shape model, reference system, exterior orientation parameters, phototriangulation, block adjustment, digital elevation model (DEM), Phobos.