

О результатах обработки данных дистанционного зондирования внеземных территорий

А.В. Гречищев, И.П. Карачевцева, И.Е. Надеждина, В.С. Пацын

*Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК),
Москва, Россия*

Работы по изучению и картографированию планет и спутников Солнечной системы в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) активизировались с 2010 года в связи созданием Комплексной лаборатории исследования внеземных территорий (КЛИВТ). В рамках этих работ разрабатываются методы и технологии фотограмметрической, тематической и др. видов обработки данных дистанционного зондирования (ДДЗ) для комплексного геоинформационного картографирования небесных тел, причем спутники Земли и Марса (Луна и Фобос), а также другие малые тела Солнечной системы (спутник Юпитера Ио, спутник Сатурна Энцелад) являются приоритетными объектами исследований на данном этапе.

При проведении исследований в МИИГАиК используются различные ДДЗ, полученные в прошлых (Викинг, Вояджер-1 и – 2, Галилео, Кассини) и текущих миссиях: наблюдения Фобоса с европейского космического аппарата Mars-Express (КА МЕХ), а также съёмка Луны с американского КА «Lunar Reconnaissance Orbiter» (LRO), японского Kaguya и др. В отличие от миссий прошлых лет, современные аппараты предоставляют данные с очень высоким пространственным разрешением (до 0,5 м/пиксел), что обеспечивает детальное изучение поверхности небесных тел, сравнимое с исследованиями Земли из космоса. Доступ к планетным данным обеспечивается, в основном, через американскую систему Planetary Data System (PDS), которая представляет собой обширное распределенное информационное хранилище со сложной структурой архивных массивов и их описания.

Основой успешного решения задач геоинформационного картографирования внеземных объектов являются результаты фотограмметрической обработки космических изображений поверхности. Однако фотограмметрическая обработка ДДЗ небесных тел является сложней-

шей научно-технической проблемой, что обусловлено целым рядом причин [1]. Во-первых, космические изображения небесных тел очень разнородны, так как выполнены в течение разных космических миссий. Во-вторых, данные для глобального покрытия всего тела могут быть получены разными миссиями, через значительный временной интервал и разными камерами, которые функционируют, как правило, на основе различных технологических принципов.

Кроме того, как показывает анализ коммерческих цифровых фотограмметрических систем (ЦФС), таких как INPHO, PHOTOMOD, Талка, SoccetSet, ни одна из этих систем не ориентирована на обработку космических изображений малых небесных тел, что связано с особенностями съёмки таких объектов, включая удаленность КА от снимаемого тела и недостаточную точность положения КА на орбите. Это приводит к значительным трудностям в обработке таких данных вследствие следующих причин [1, 9]:

- алгоритм классической «земной» фотограмметрии базируется на предположении, что углы взаимного ориентирования достаточно малы (менее 5-10 градусов), в противном случае ошибки определения координат объекта очень велики;

- углы внешнего и взаимного ориентирования для поперечных и продольных углов наклона космических изображений малых тел могут быть значительны (до 50-60 градусов); в этих случаях автоматическая корреляция изображений не даёт удовлетворительных результатов;

- процедура определения элементов взаимного ориентирования является итерационным процессом и при значительных углах взаимного ориентирования, при решении задачи без хорошего начального приближения, итерации не приведут к корректному результату;

- почти все космические изображения имеют разные масштабы, что дополнительно ослож-

няет процессы идентификации и автоматизации определения связующих точек;

- необходимо точно определять углы внешнего ориентирования, так как ошибки в измерениях связующих точек, препятствуют итерационному уравниванию; точность значений углов внешнего ориентирования определяет и метод уравнивания.

- существенное усложнение процедуры ортотрансформирования из-за искажений перспективных снимков.

Для решения перечисленных выше проблем на базе ЦФС PHOTOMOD разработаны новые алгоритмы фотограмметрической обработки космических изображений малых тел Солнечной системы, которые апробированы на различных небесных объектах исследований, включая Луну, Фобос, а также Ио и Энцелад (Рис. 7-8). В результате обработки ДДЗ впервые в России получены новые данные с различными характеристиками внеземных объектов: каталоги опорных точек и параметры фигуры небесных тел, глобальные и детальные ЦМР, на основе которых сформированы ортомозаики и отдельные ортоизображения [7, 9].

Для каждого из исследуемых небесных тел формируются базы геоданных для обеспечения дальнейшего изучения поверхности, включая геоморфологический, спектрометрический и др. виды анализа [2]. В частности, показателен выполненный комплекс тематической обработки ДДЗ Фобоса по результатам его спектро-фотометрической съёмки с КА МЕХ и сравнения с данными других миссий.

Исследования выполнялись в несколько этапов, которые в обобщенном виде можно охарактеризовать как:

1. Фильтрация шумов индивидуально для каждого снимка.
2. Фотометрическая коррекция спектральных данных HRSC.
3. Координатная привязка и геометрическое трансформирование в картографическую проекцию.
4. Совмещение спектральных каналов методом ко-регистрации.
5. Составление мозаики поверхности Фобоса для каждого спектрального канала.
6. Формирование карт альbedo.

7. Формирование цветосинтезированных изображений поверхности Фобоса.

8. Расчет спектральных индексов и формирование карт их пространственного распределения по поверхности.

9. Анализ полученных результатов.

Чтобы построить тематические карты Фобоса и выполнить попиксельное сравнение снимков в различных спектральных зонах, необходимо точно совместить эти снимки между собой и перейти от системы координат исходного снимка к картографической системе координат. В ходе работ предложена двухступенчатая процедура: сначала снимки проецируются на сферу среднего радиуса Фобоса и преобразуются в подходящую картографическую проекцию, затем с использованием методов корреляции изображений они совмещаются между собой и с ортофотопланом.

Для геометрической трансформации сканерных спектральных изображений Фобоса в систему координат заданной картографической проекции с учетом параметров орбиты и ориентации космического аппарата, а также формы и ориентации Фобоса, используется программное обеспечение ISIS (1-я ступень). На следующем этапе (2-я ступень) выполняется совмещение спектральных снимков методом ко-регистрации с использованием программного обеспечения Scanex Image Processor, предназначенного для обработки данных дистанционного зондирования Земли [10]. В ПО Scanex Image Processor реализован метод иерархической корреляции растровых изображений, позволяющий выполнять поиск опорных точек с субпиксельной точностью для изображений различного пространственного разрешения. При этом трансформирование проводится с учетом цифровой модели рельефа. Спектральные изображения и цифровая модель предварительно проходят процедуру Gdalwar открытой библиотеки GDAL, чтобы обойти ограничения по обработке в ПО Scanex Image Processor изображений внеземных территорий.

Поскольку съёмка с КА МЕХ в разных каналах проводилась под различными углами, в качестве базового решено использовать снимок, имеющий наименьший наклон к поверхности. Среди снимков набора таковыми являются на-

дирные панхроматические снимки. При отсутствии в каком-либо случае указанного снимка, в качестве базового используется снимок зеленого канала, как правило, имеющий наилучшее пространственное разрешение на каждом витке.

По совмещенным спектральным снимкам строится мозаичное покрытие поверхности спутника для каждого из четырех каналов с учетом коэффициента перевода значений пикселей из density в альbedo и с привязкой спектрального изображения к ортофотоплану Фобоса (рис. 3). Используя мозаики спектральных каналов, можно получить также и цветосинтезированные изображения как в естественных цветах (рис. 4), так и в псевдоцветах с применением инфракрасного канала.

На основе этих изображений рассчитаны различные спектральные индексы, в том числе цветовые отношения V/NIR , где V – спектральная яркость в видимом диапазоне (получена путем сложения синего и зеленого каналов и деления суммы на два), NIR – спектральная яркость в ближнем инфракрасном канале. Поверхность Фобоса сегментирована по значениям спектрального отношения V/NIR на типы реголита (рис. 5). При этом «красный» материал имеет более высокую отражательную способность в ближнем инфракрасном диапазоне, а «синий» – в видимом.

Эти и аналогичные информационные продукты использованы для геоинформационного картографирования внеземных территорий на основе ПО ArcGIS. Разработка ГИС небесных тел, также как и первичная обработка космических изображений, является непростой задачей, связанной с тем, что существуют технологические особенности при использовании ДДЗ небесных тел в ГИС, включая:

- преобразование данных из форматов хранения или систем обработки;
- необходимость использования вместо декартовой системы координат в ГИС (от -180° до $+180^\circ$) систем координат Международного Астрономического Союза (МАС), связанных с направлением вращения того или иного небесного тела (счет долгот от 0° до 360° , в том числе с положительным счетом на запад);
- необходимость поддержки моделей фигу-

ры различных небесных тел;

- разнообразие используемых проекций и неоднозначность их описания в системах хранения (таких как PDS) или системах обработки (ISIS, PHOTOMOD, Scanex Image Processor).

Вместе с тем, несмотря на эти проблемы, использование ГИС является необходимым средством, обеспечивающим интеграцию и унификацию всех данных о небесном теле в рамках единой информационной системы, основанной на общем пространственном представлении.

По результатам обработки данных ДЗ выполнено картографирование Луны на разных уровнях детальности, глобальное картографирование Фобоса (Рис. 1-2), Ио, Энцелада [7]. В рамках картографических работ выполнена оценка кратерированности исследуемых территорий с разработкой карт пространственной плотности и оценки кумулятивной плотности кратеров, рассчитаны уклоны и шероховатость топографической поверхности (Рис. 6, 9), на основе которых выполнена оценка безопасности посадочных площадок спускаемых модулей КА будущих российских миссий, включая Фобос и приполярные районы Луны [4, 6].

Результаты обработки в ГИС новейших ДДЗ используются также для сравнения с данными, полученными в рамках советских лунных проектов: выполнен анализ территорий мест посадок автоматических межпланетных станций (АМС) и уточнение маршрутов, пройденных Луноходом-1 и -2 [3, 5]; ведутся работы по реконструкции лунных панорам, полученных камерами советских лунных роверов [8]. По результатам детального исследования и ГИС-анализа маршрута Лунохода-1 (Рис. 10) предложены и утверждены МАС новые названия 12 лунных кратеров (<http://lpod.wikispaces.com/June+16%2C+2012>).

Таким образом, в МИИГАиК получены новые значительные результаты, обеспечивающие базовую координатно-картографическую и тематическую основу для исследования небесных тел Солнечной системы.

Литература:

1. А.Э. Зубарев, И.Е. Надеждина, А.А. Конопихин. Проблемы обработки данных дистанционного зондирования для моделирования фигур малых тел Солнечной системы // Совре-

менные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012 (принято в печать, апрель 2012).

2. В.С. Пацын, В.А. Малинников, А.В. Гречищев. Исследование спектральных характеристик поверхности Фобоса по данным HRSC с космического аппарата «Марс Экспресс». // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012 (принято в печать, апрель 2012).

3. И.П. Карачевцева, А.А. Конопихин, К.Б. Шингарева, Е.В. Черепанова, Е.Н. Гусакова, М.А. Баскакова. Атлас Лунохода-1: геоинформационное картографирование и анализ региона посадки АМС «Луна-17» по данным дистанционного зондирования спутника Lunar Reconnaissance Orbiter // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012 (принято в печать, апрель 2012).

4. Karachevtseva I. et.al. “Global Phobos Geodatabase and GIS analyses”. 43 Lunar and Planetary Science Conference, 19-23 March 2012, The Woodlands, Texas, USA.

5. Karachevtseva I. et.al. “Mapping of the

Lunokhod-1 Landing Site: A Case Study for Future Lunar Exploration”. European General Union General Assembly, Vienna, Austria 22-27, April, 2012.

6. Karachevtseva I. P. et.al. “Cartography Support of the Luna-Globe Landing Sites” ESA Scientific Preparations for Lunar Exploration. The Netherlands, Noordwijk, 6-7 February, 2012.

7. Nadezhdina I. et.al. “Global shape estimates and GIS cartography of Io and Enceladus using new control point network” European General Union General Assembly, Vienna, Austria, 22-27 April, 2012

8. Zubarev A. et.al. “Lunokhod-1 Panoramic Images and Stereo Topography” European Planetary Science Congress 23-28 September 2012, Madrid, Spain. <http://www.epsc2012.eu/home.html>

9. Zubarev A. et.al. “The study and new mapping of Phobos by Mars Express SRC data” Workshop on Mars – Connecting Planetary Scientists in Europe. Budapest, Hungary, 05-07, June 2012.

10. <http://scanex.ru/ru/software/index.html>.

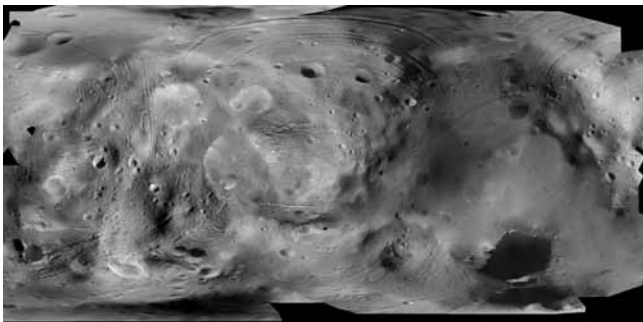


Рис. 1. Оргомозаика Фобоса на основе нового опорного каталога (МИИГАиК, 2012).

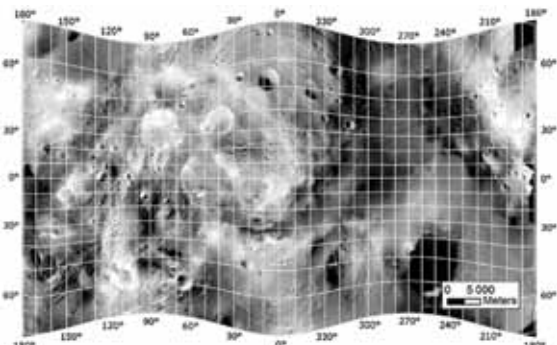


Рис. 2 Карта экваториальной области Фобоса (трехосный эллипсоид, проекция Бугаевского).

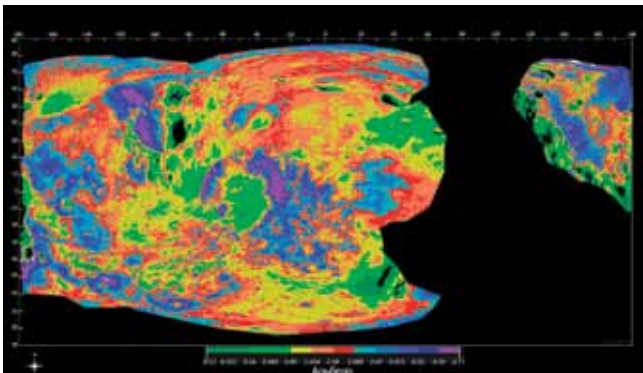


Рис. 3. Карта поверхности Фобоса, показывающая распределение значений альbedo в GR-канале.

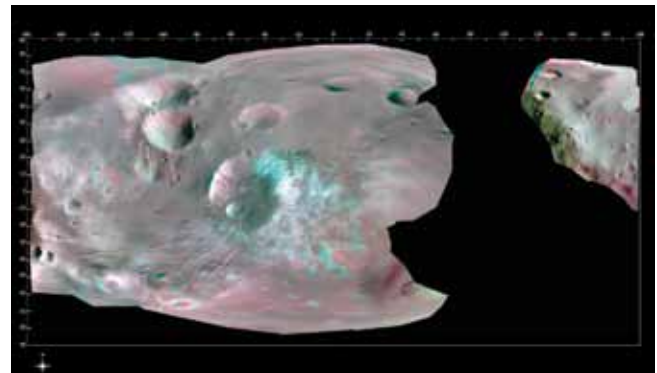


Рис. 4. Цветосинтезированное изображение поверхности Фобоса в естественных цветах (красный, зеленый и синий каналы).

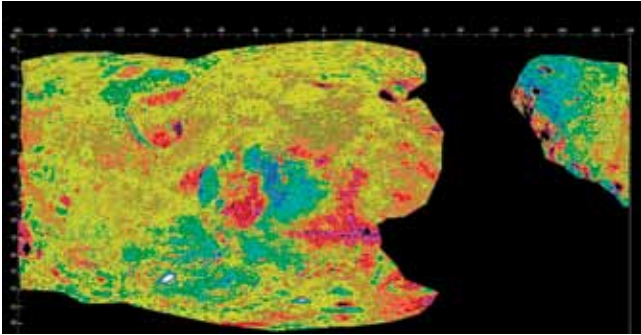


Рис. 5. Мозаика индексных изображений Фобоса по данным КА MarsExpress (индекс V/NIR).

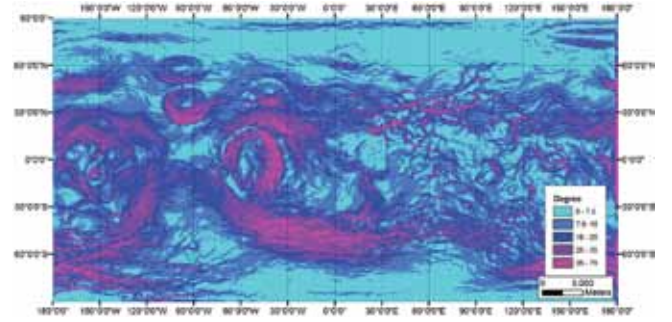


Рис. 6. Карта уклонов Фобоса.

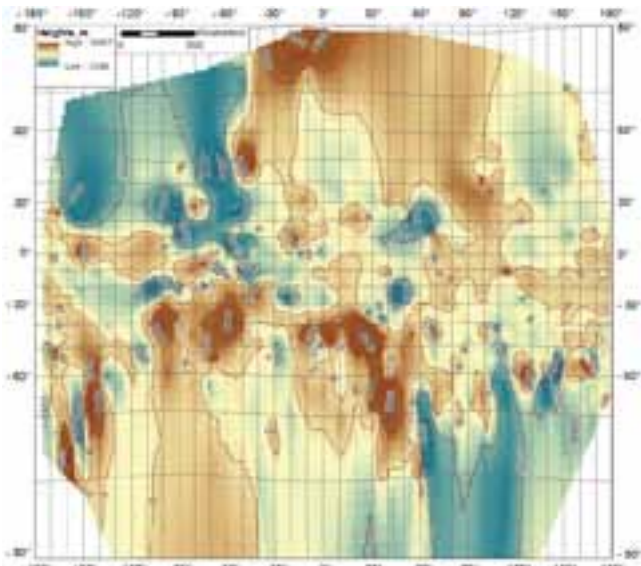


Рис. 7. Глобальная ЦМР Энцелада, высоты на трехосном эллипсоиде, проекция Бугаевского.

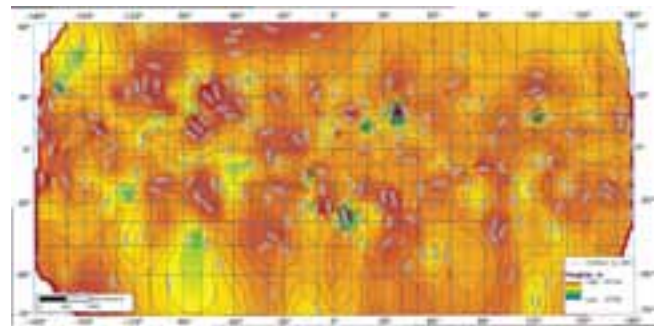


Рис. 8. Глобальная ЦМР Ио, высоты на трехосном эллипсоиде, проекция Бугаевского.

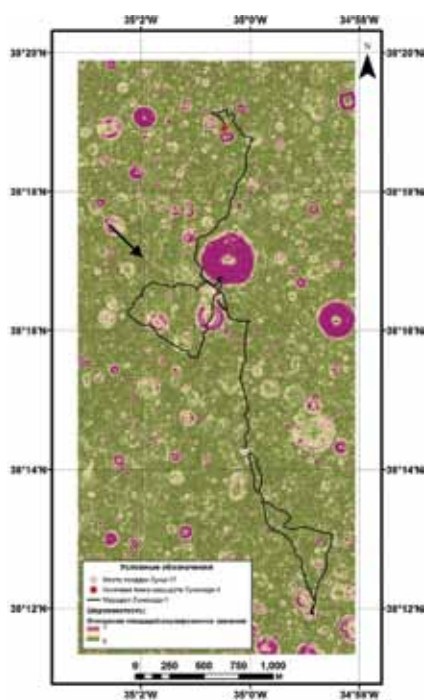


Рис. 9. Карта шероховатости территории в районе посадки АМС Луна-17.

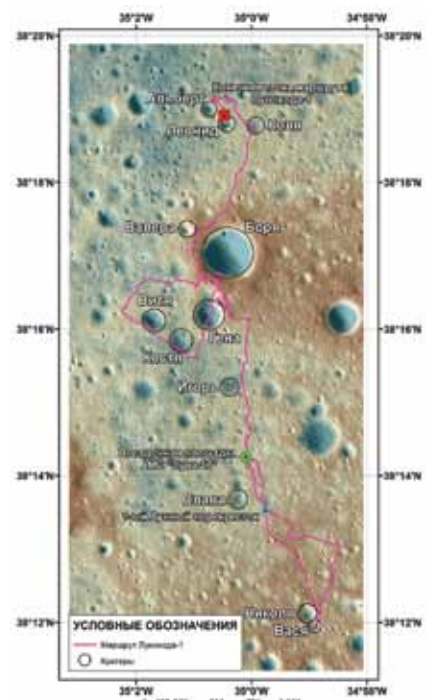


Рис. 10. Карта с новыми названиями лунных кратеров по маршруту Лунохода-1.