

Геоинформационное картографирование Фобоса по результатам обработки данных дистанционного зондирования космического аппарата Mars Express

И.П. Караваевцева, К.Б. Шингарева, А.А. Конопихин, Б.В. Мукаленова,
И.Е. Надеждина, А.Э. Зубарев

Московский государственный университет геодезии и картографии
121552, Москва, Гороховский переулок, 4
Комплексная лаборатория исследования внеземных территорий (КЛИВТ)
E-mail: i_karachevtseva@mexlab.ru

В Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) организована новая Комплексная лаборатория исследования внеземных территорий (КЛИВТ), в которой основными направлениями исследований являются малые тела Солнечной системы. В рамках этих работ в КЛИВТ разрабатывается технология обработки данных дистанционного зондирования, используемая для геоинформационного картографирования небесных тел. Первые результаты, полученные на основе новой технологии, применены при создании карт марсианского спутника Фобос. При картографировании использованы данные европейского космического аппарата Mars Express.

Ключевые слова: Фобос, геоинформационное картографирование, ГИС, исследование внеземных территорий.

Исходные данные для картографирования Фобоса

С 2004 г. активные наблюдения марсианского спутника ведутся с европейского космического аппарата Mars Express (КА MEX), который производит съемку Фобоса с расстояний до 100 км, позволяя получать цифровые изображения с разрешением до 10 м/пиксель, в том числе впервые в 3D. По результатам этих съемок в Немецком аэрокосмическом центре (DLR) сформированы ортомозаика и цифровая модель рельефа (ЦМР) с разрешением 100 м/пиксель (Wählisch et al., 2010), которые использованы нами как исходные данные для тематического картографирования Фобоса, выполненного в целях поддержки миссии Фобос-Грунт (Oberst et al., 2011). Разработка технологии фотограмметрической обработки кадровых изображений и формирование в МИИГАиК нового каталога опорной сети (Зубарев и др., 2012) обеспечили возможность геоинформационного картографирования Фобоса на основе новейших данных, результаты которого представлены ниже.

Формирование информационного обеспечения ГИС «Фобос»

Миссия «Фобос-Грунт» была предназначена для доставки образцов с поверхности спутника Марса (Маров, 2010; Базилевский, Шингарева, 2010). В МИИГАиК в рамках подготовки картографо-геодезического обеспечения миссии «Фобос-Грунт» использованы как данные, полученные на основе результатов обработки съемок КА MEX DLR в 2009 г. (<http://europlanet.dlr.de/node/index.php?id=214>), так и новейшие результаты обработки, выполненные в Комплексной лаборатории исследования внеземных территорий (КЛИВТ МИИГАиК). Для целей геоинформационного картографирования была начата разработка ГИС «Фобос», при формировании которой помимо глобальной ортомозаики, предоставленной DLR, нами также использовались отдельные космические изображения КА MEX и Viking Orbiter (VO), имеющие различные параметры освещенности и разрешение (~4...80 м/пиксель). Большинство этих изображений имеют перекрытия, что позволяло выполнять более уверенное дешифрирование объектов поверхности исследуемого тела. Данные КА VO (<http://pds-geosciences.wustl.edu/viking/>) ис-

пользовались для заполнения лакун в покрытии Фобоса данными КА МЕХ. ГИС «Фобос» в настоящее время включает растровые и векторные данные, включая различные производные продукты, полученные в ходе обработки данных дистанционного зондирования (ДДЗ).

Формирование глобального каталога кратеров в ГИС

Подсчет числа кратеров широко применяют для исследований небесных тел. С этой целью в ГИС оцифрованы кратеры по космическим изображениям Фобоса КА МЕХ и VO, интегрированным в ГИС. Несмотря на неоднородный характер исходных данных, затрудняющих возможность проведения однозначных геоморфологических измерений, было решено создать глобальный каталог кратеров Фобоса, и на его основе выполнить морфологическую оценку поверхности, так как новые изображения высокого разрешения, впервые полученные для отдельных областей, позволяют отчетливо увидеть мелкие детали на поверхности спутника.

Глобальный каталог кратеров Фобоса создан в ГИС и содержит все кратеры, полученные в результате оцифровки, вне зависимости от разрешения использованных изображений. Всего было оцифровано более 5000 кратеров (рис. 1). В базе данных кратеров хранятся параметры объекта: диаметр кратера (D), глубина (H) и относительная глубина (H/D), полученные с использованием глобальной ЦМР. Кроме того, содержатся координаты центральной точки кратера, его название (если имеется), разрешение изображений, использованных при оцифровке.

Использование глобального каталога кратеров для анализа поверхности Фобоса в ГИС

Созданный в ГИС глобальный каталог кратеров позволяет оценить распределение кратеров на поверхности Фобоса с использованием различных картографических способов визуализации (рис. 2, 3).

На карте плотности кратеров хорошо заметно, что наиболее кратерированные области Фобоса — подмарсовая, (Sub-Mars), антимарсовая (Anti-Mars) и ведущая стороны. Полярные регионы и ведомая сторона — наименее кратерированные зоны Фобоса.

На картодиаграмме (см. рис. 3) отражено нормализованное по площади каждой зоны распределение кратеров по размеру. На поверхности Фобоса наиболее распространены кратеры диаметром от 50 до 100 м, общее количество таких кратеров 1573. Примерно такое же количество кратеров (1460 шт.) диаметром от 100 до 200 м. Также имеются кратеры диаметром от 200 до 500 м и от 500 до 1000 м, общее количество таких кратеров 1067 и 148, соответственно. На марсианском спутнике 68 крупных кратеров имеют диаметр равный или более 1 км, в разных областях Фобоса их одинаковое количество кратеров (по 14 шт.), в северной и южной полярных областях их примерно в 2 раза меньше (соответственно 7 и 5 кратеров). По данным высокого разрешения КА МЕХ оцифрованы малые кратеры, размер которых составляет от 20 до 50 м, всего таких кратеров 722.

Использование ЦМР для анализа поверхности Фобоса в ГИС

Использование цифровых моделей рельефа для проведения морфометрического анализа — сравнительно новая и бурно развивающаяся область планетологии. Вместе с тем, очевидно, что информация о высотах поверхности необходима для детального анализа геоморфологических параметров поверхностных образований (объектов), которые обеспечивают решение многих вопросов в планетных исследованиях.

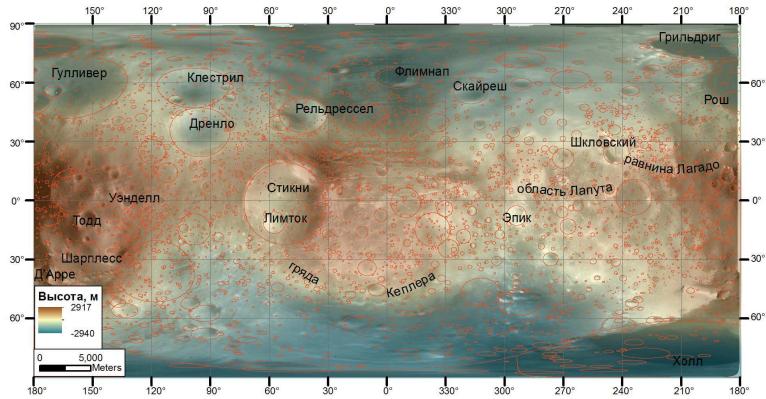


Рис. 1. Карта распределения кратеров Фобоса, фон — глобальная ЦМР (DLR)

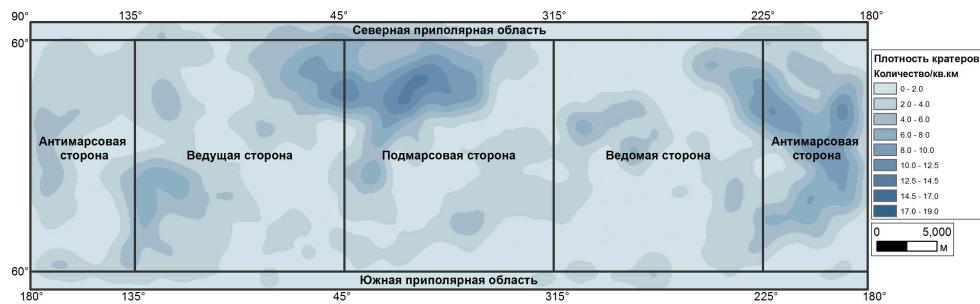


Рис. 2. Карта плотности кратеров Фобоса

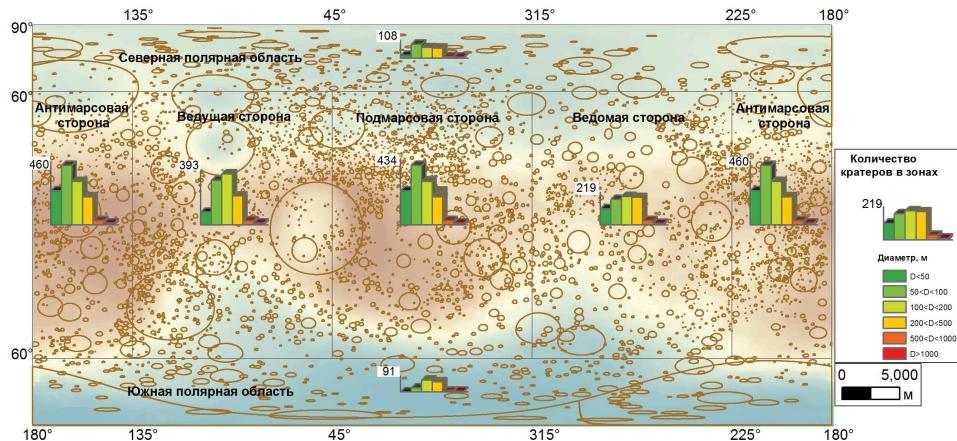


Рис. 3. Картодиаграмма распределения кратеров по размеру в зонах Фобоса

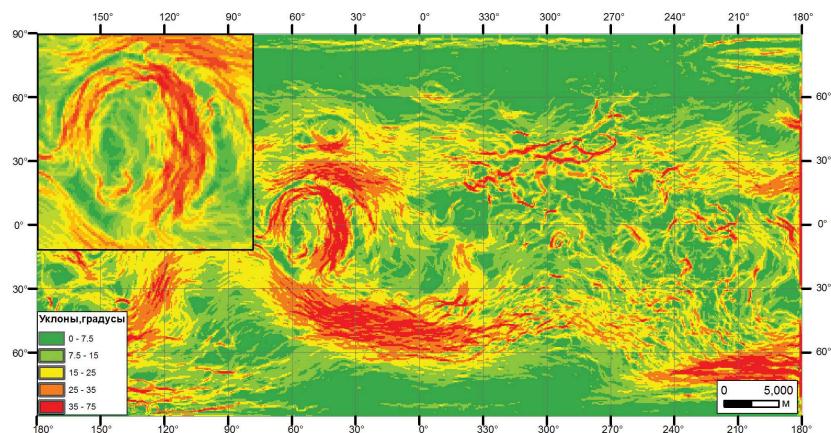


Рис. 4. Карта уклонов поверхности Фобоса, построенная по ЦМР (DLR)

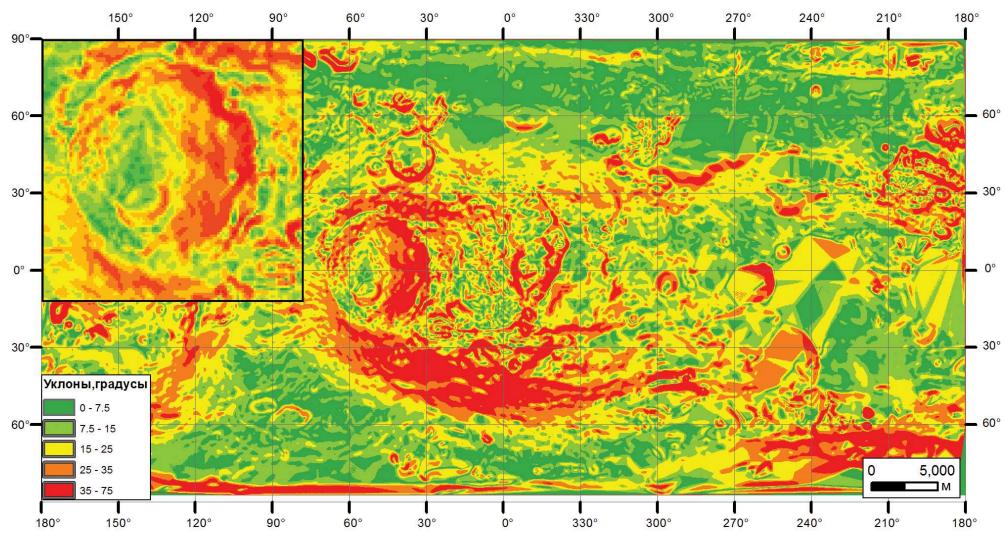


Рис. 5. Карта уклонов поверхности Фобоса, построенная на основе новой ЦМР (МИИГАиК)

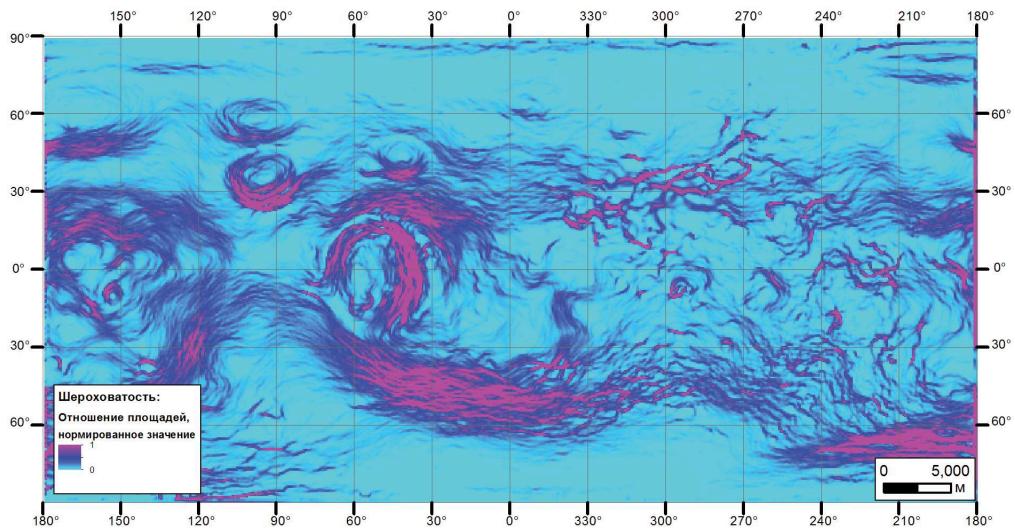


Рис. 6. Карта шероховатости поверхности Фобоса, полученная на основе расчета отношения площадей, которое показывает, во сколько раз площадь топографической поверхности отличается от площади на плоскости (нормализованные значения)

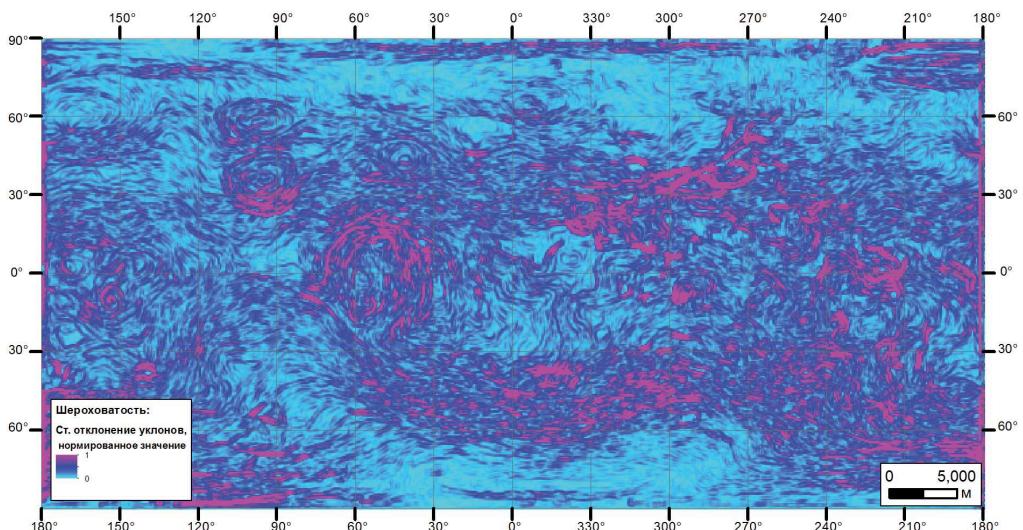


Рис. 7. Карта шероховатости поверхности Фобоса, полученная на основе расчета стандартного распределения уклонов (нормализованные значения)

Для глобальной оценки поверхности Фобоса использовалось несколько геоморфологических параметров, полученных на основе расчетов с помощью ЦМР: уклоны (рис. 4, 5) и шероховатость (рис. 6, 7), которые характеризуют вариативность топографической поверхности.

Поскольку разрешение глобальной ЦМР (DLR) хуже, чем разрешение космических изображений, это приводит к тому, что положение некоторых кратеров на базовой мозаике смещено относительно ЦМР (Wählisch et al., 2010). Заметим также, что малые кратеры вообще не отражены на ЦМР (DLR). С учетом этой проблемы, при формировании новой ЦМР на основе технологии МИИГАиК использованы отметки высот вдоль структурных линий, отражающих положение объектов на Фобосе (брюки кратеров и борозд). Такая, более детализированная ЦМР (МИИГАиК), позволяет добиться соответствия между топографическим представлением данных и изображением поверхности на ортомозаике. Различие подходов при формировании ЦМР продемонстрировано при расчете уклонов в районе кратера Стикни (см. рис. 4, 5, врезки). Расчета уклонов выполнен на базе 100 м.

Шероховатость – это еще один способ оценки вариаций высот, для которого нет универсального метода определения, так как в зависимости от целей и объекта исследований применяются различные методы вычислений (Grohmann et al., 2010). Часто используются нормальное распределение уклонов (standart deviation of slope) и нормальное распределение высот (standart deviation of elevation). Шероховатость, рассчитанная как отношение площадей (area ratio), показывает меру отличия площади трехмерной поверхности от плоскости, в каждой ячейке выходного растра. При этом для каждой ячейки ЦМР при расчете шероховатости учитываются значения высот соседних 8-ми ячеек (http://www.jennessent.com/arcgis/surface_area_poster.htm).

Этот метод является внemасштабным, поскольку обеспечивает устойчивые результаты независимо от детальности данных, что позволяет корректно его использовать для оценки шероховатости поверхности при крупномасштабном картографировании, даже в случае отсутствия ЦМР высокого разрешения. На рис. 6, 7 показаны нормированные значения шероховатости, которые позволяют сравнивать данные, полученные разными способами: 0 — плоская гладкая поверхность, 1 — сильно шероховатая поверхность. Максимальные значения ненормированного показателя, полученные по глобальной ЦМР Фобоса с помощью метода отношения площадей, показывают, что площадь некоторых ячеек, измеренная с учетом высот, отличается от измерений плоской ячейки в 5,5 раз.

Новая карта Фобоса

Новые методы и технологии фотограмметрической обработки ДДЗ, разрабатываемые в МИИГАиК, позволяют создавать опорные сети на поверхности любого небесного тела по кадровым изображениям (Зубарев и др., 2012), что обеспечивает широкие возможности для исследования планет и спутников Солнечной системы, в том числе с помощью картографических методов. Для создания новейшей карты Фобоса используется ортомозаика (рис. 8), сформированная на основе вновь созданного Каталога опорных точек (МИИГАиК-2012) и новой ЦМР (Зубарев и др., 2012), полученных по результатам фотограмметрической обработки кадровых (SRC) изображений КА MEX (Oberst et al., 2008). Новая ортомозаика откорректирована с выравниванием яркости на основе автоматизированных функций в ПО PHOTOMOD.

Для новейшего картографирования Фобоса применена нормальная цилиндрическая равноугольная проекция для трехосного эллипсоида или видоизмененная проекция Бугаевского (рис. 9). Впервые данная проекция была разработана и применена при картографировании Фобоса (Бугаевский, 1987) в Атласе планет земной группы и их спутников (Шингарева и др.,

1992; <http://planetmap.ru/atlas/phobos-surface-maps.html>). Карты Фобоса в Атласе создавались при подготовке проектов ФОБОС-1 и -2 на основе результатов обработки данных съемок поверхности Фобоса с космических аппаратов «Маринер-9» и «Викинг-1».

Помимо проекции Бугаевского, для новейшего картографирования Фобоса (рис. 10, 11), применялись также новые методы расчета проекций для трехосного эллипсоида (Нырцов и др., 2012; http://geocnt.geonet.ru/ru/3_axial).

Результаты геоинформационного картографирования, выполненного в МИИГАиК на основе новых каталога опорных точек, ЦМР и ортомозаики, также могут быть использованы для подготовки новых будущих российских миссий к Фобосу.

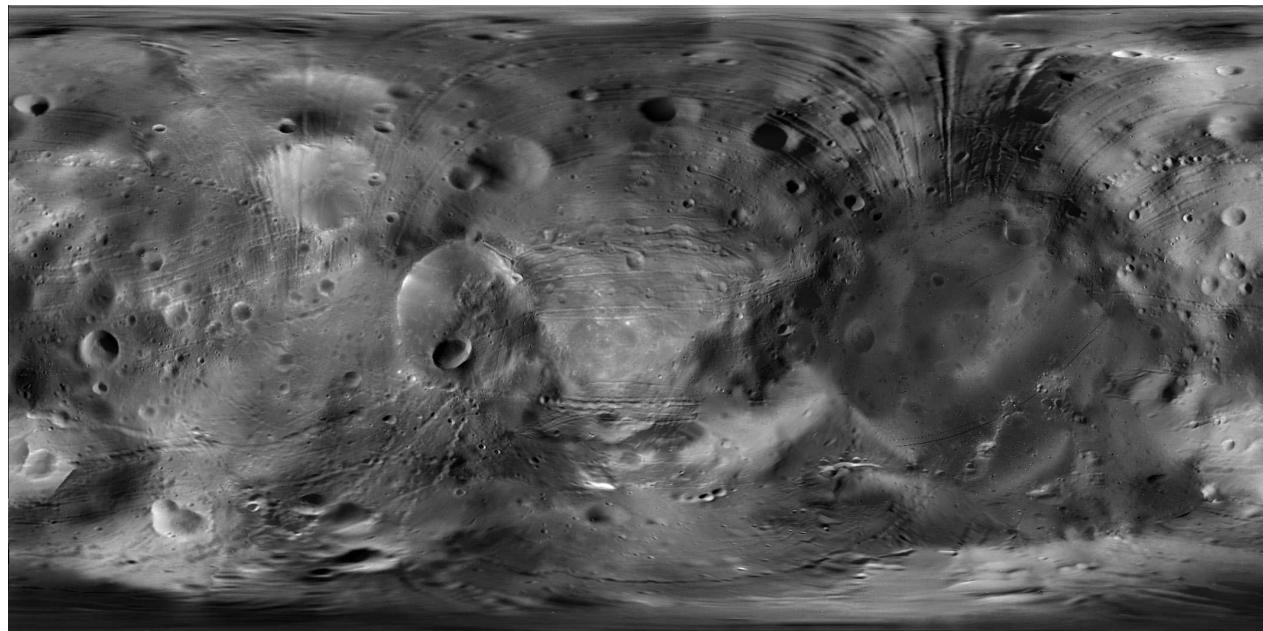


Рис. 8. Новая ортомозаика Фобоса, полученная на основе вновь созданного Каталога опорных точек (МИИГАиК-2012)

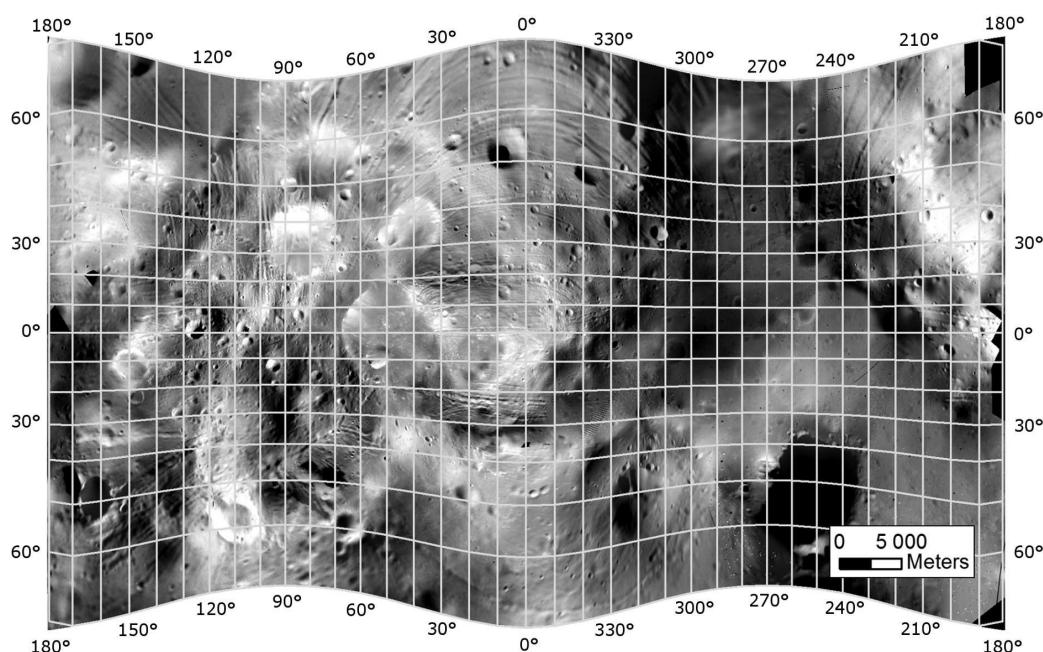


Рис. 9. Новая ортомозаика Фобоса: цилиндрическая равноугольная проекция для трехосного эллипсоида (видеоизмененная проекция Бугаевского)

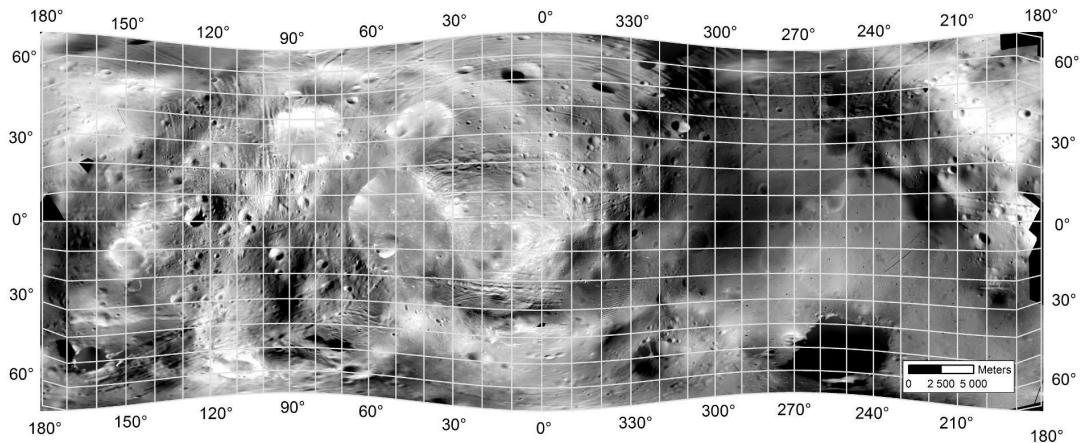


Рис. 10. Новая ортомозаика Фобоса, экваториальная зона: цилиндрическая равнопромежуточная вдоль меридианов проекция для трехосного эллипсоида

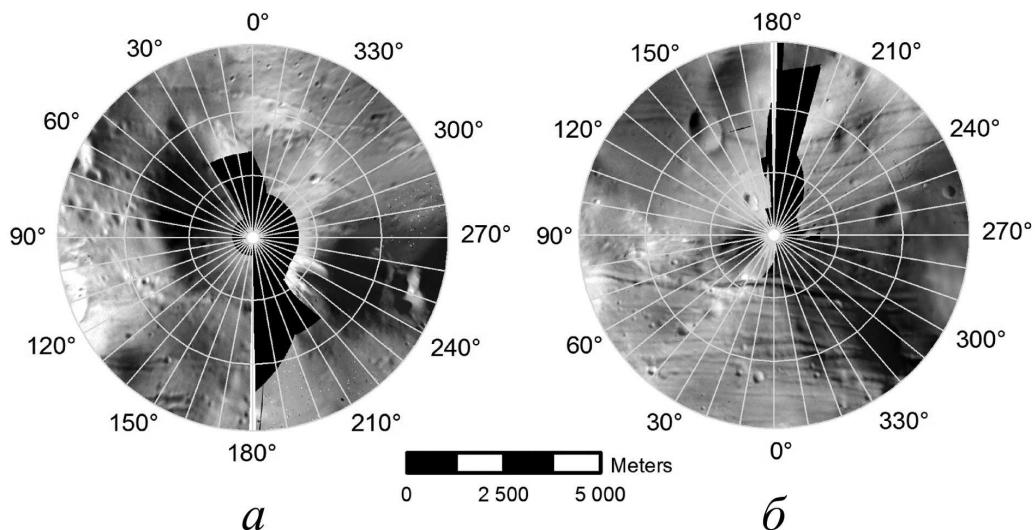


Рис. 11. Новая ортомозаика Фобоса, северная (а) и южная (б) полярные области: азимутальная равнопромежуточная вдоль меридианов проекция для трехосного эллипсоида

Заключение

Для целей анализа и задач геоинформационного картографирования выполнен сбор данных для формирования ГИС «Фобос». В качестве информационного обеспечения ГИС выполнена оцифровка космических изображений с созданием векторных слоев объектов на поверхности Фобоса (кратеры, борозды). С использованием различных модулей ГИС выполнен анализ данных с формированием производных информационных картографических продуктов, характеризующих поверхность небесного тела, а также проведено 3D-моделирование топографической поверхности. С использованием новых данных, полученных в МИИГАиК как результаты обработки данных КА Mars Express (новый каталог опорных точек, ЦМР и ортомозаика), создана новая карта Фобоса. Эти результаты могут быть использованы для картографо-геодезического обеспечения при подготовке нового полета к спутнику Марса.

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 поддержаны Правительством Российской Федерации (Мегагрант по теме «Геодезия, картография и изучение планет и спутников», договор № 11.G34.31.0021).

Литература

1. Базилевский А.Т., Шингарёва Т.В. Выбор и характеристика мест посадки КА Фобос-Грунт // Астрон. вестн. 2010. Т. 44. № 1. С. 41–47.
2. Бугаевский Л.М. К вопросу о получении изометрических координат и равноугольной цилиндрической проекции трехосного эллипсоида // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1987. № 4. С. 79–90.
3. Зубарев А.Э., Надеждина И.Е., Конопихин А.А. Проблемы обработки данных дистанционного зондирования для моделирования фигур малых тел солнечной системы // В настоящем сборнике.
4. Маров М.Я. Космический проект Фобос-Грунт: новый этап Российской планетной программы // Астрон. вестн. 2010. Т. 44. № 1. С. 3–6.
5. Нырцов М.В., Флейс М.Э., Борисов М.М. Картографирование астероида 433 Эрос в равнопромежуточных вдоль меридианов цилиндрической и азимутальной проекциях трехосного эллипсоида // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. Вып. 1. С. 54–61.
6. Шингарева К.Б. и др. Атлас планет земной группы и их спутников. М.: Изд-во МИИГАиК, 1992.
7. Grohmann C.H., Smith M.J., Riccomini C. Multiscale Analysis of topographic Surface Roughness in the Midland Valley, Scotland // Geoscience and Remote Sensing. IEEE Trans. 2010. V. PP. N. 99. P. 1–14.
8. Oberst J., Karachevtseva I.P., Shingareva K.B., Konopikhin A.A., Cherepanova E.V., Wählisch M., Willner K. Development global crater catalog of Phobos and GIS-analysis of the distribution of craters // 2nd Moscow Solar System Symposium. 10–14 Oct., 2011.
9. Oberst J., Schwarz G., Behnke T., Hoffmann H., Matz K.-D., Flohrer J., Hirsch H., Roatsch T., Scholten F., Hauber E., Brinkmann B., Jaumann R., Williams D., Kirk R., Duxbury T., Leu C., Neukum G. . The imaging performance of the SRC on Mars Express // Planet. Space Sci. 2008. N. 56. P. 473–491.
10. Wählisch M., Willner K., Oberst J., Matz K.-D., Scholten F., Roatsch T., Hoffmann H., Semm S., Neukum G. A new topographic image atlas of Phobos // Earth and Planetary Science Letters. 2010. N. 294. P. 547–553.

GIS mapping of Phobos on the results of data processing of remote sensing satellite Mars Express

**I.P. Karachevtseva, K.B. Shingareva, A.A. Konopikhin, B.V. Mukabenova,
I.E. Nadezhdina, A.E. Zubarev**

*Moscow State University of Geodesy and Cartography
121552, Moscow, Gorokhovskiy per, 4
MIIGAiK Extraterrestrial Laboratory (MExLab)
E-mail: i_karachevtseva@mexlab.ru*

In the Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK) organized the new MIIGAiK Extraterrestrial Laboratory (MExLab) in which the main lines of research are the small bodies of the solar system. As part of these works in MExLab developed processing technology of remote sensing data used for GIS mapping of celestial bodies. The first results obtained on the basis of the new technology used to create maps of the Martian satellite Phobos. For new mapping was used data of European spacecraft Mars Express.

Keywords: Phobos, GIS-mapping, GIS, the study of extraterrestrial territories.