

## Исследование поверхности Меркурия картографическими методами с использованием новейших топографических данных, полученных на основе обработки изображений КА MESSENGER

А.Ю. Жаркова<sup>1</sup>, И.П. Карачевцева<sup>1</sup>, А.Э. Зубарев<sup>1</sup>, Е.С. Брусникин<sup>1</sup>, А.А. Коханов<sup>1</sup>,  
М.А. Креславский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет геодезии и картографии  
Москва, Россия

E-mail: a\_zharkova@miigaik.ru

<sup>2</sup>Университет Калифорнии – Санта Круз, Санта Круз, США

В 2015 г. космический аппарат (КА) MESSENGER завершил свою миссию, которая продолжалась в течение четырёх лет. При этом получено более 277 тысяч изображений, что обеспечило формирование цифровых моделей рельефа (ЦМР) со средним и низким разрешением (от 0,5 до 22 км/пиксель). Корреляционный анализ существующих топографических моделей показал значительные различия между глобальными ЦМР, что связано с разными методами определения высот, а также сильным влиянием температурного режима на параметры съемочной системы КА MESSENGER (Becker et al., 2014). Новые цифровые модели местности (ЦММ) с разрешением 30–150 м/пиксель и высотной точностью до  $\pm 10$  м, созданные на основе фотограмметрической обработки детальных стереоизображений КА MESSENGER (10–20 м/пиксель), обеспечили возможность проведения картометрических измерений плоскодонных кратеров и ям (Zharkova et al., 2016). Эти данные, а также каталог малых кратеров, сформированный с их использованием, доступны на Геопортале планетных данных МИИГАиК (<http://cartsrv.mexlab.ru/geoport/>). Данные, полученные КА MESSENGER за годы миссии, ещё не исчерпали весь свой научный потенциал, поскольку набор обработанной информации постоянно расширяется: например, с использованием новейшей глобальной ЦМР с разрешением 665 м/пиксель нами рассчитаны статистические характеристики морфометрических параметров рельефа Меркурия, благодаря которым можно оценить относительный геологический возраст вулканических равнин на всей планете.

**Ключевые слова:** Меркурий, КА MESSENGER, стереоизображения MDIS NAC, ЦМР/ЦММ, картометрические измерения, морфометрический анализ, статистические характеристики морфометрических параметров рельефа

Одобрена к печати: 26.08.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-265-274

### Введение

В последние годы возрос интерес к изучению Меркурия, ближайшей к Солнцу планеты, что связано с новейшими данными, полученными космическим аппаратом (КА) MESSENGER (McNutt et al., 2014), а также с подготовкой будущей европейской миссии BepiColombo (<http://sci.esa.int/bepicolombo/>), старт которой ожидается в 2017 г. Недавно закончившаяся миссия MESSENGER (2015 г.) обеспечила северное полушарие планеты детальной топографической информацией, полученной с помощью лазерного высотомера (MLA) (Zuber et al., 2012). В связи с особенностями орбиты съемка южного полушария осуществлялась с помощью узкоугольной камеры (NAC), входящей в систему камер КА MESSENGER - Mercury Dual Imaging System, MDIS (Hawkins et al., 2007). Для северного полушария эта камера обеспечивает топографические данные высокого разрешения с возможностью детальных геоморфологических исследований.

### 1. Анализ современных источников топографической информации о Меркурии

Доступные ранее цифровые модели рельефа (ЦМР) покрывали поверхность планеты неравномерно (рис. 1). Так, топографические данные, полученные в результате обработки

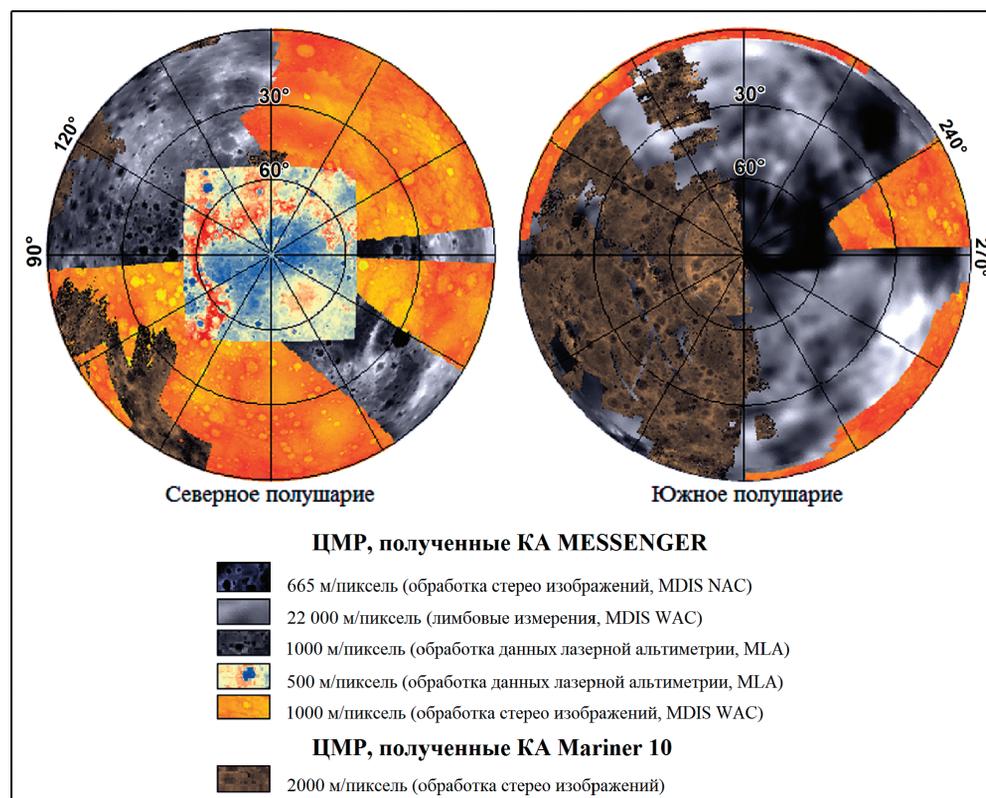
снимков КА Mariner 10 (Cook, Robinson, 2000), имеют разрешение 2 км/пиксель и охватывают значительную часть южного полушария, а также северную часть планеты - от 65° с.ш. до 65° ю.ш. между 200° в.д. и 0° в.д., и от 50° с.ш. до 90° с.ш. (<http://euoplanet.dlr.de/Mariner10/index.html>).

Высотные данные, полученные на основе лазерной альтиметрии КА MESSENGER, охватывают всё северное полушарие планеты (от 90° с.ш. до 4° ю.ш.) с разрешением 1 км/пиксель, и дополнительно для зоны от 55° с.ш. до 90° с.ш. – с разрешением 0,5 км/пиксель (<http://ode.rsl.wustl.edu/mercury/index.aspx>). Кроме того, на отдельные участки северного полушария имеются несколько ЦМР с разрешением 1 км/пиксель (<http://euoplanet.dlr.de/MESSENGER/index.html>), созданные после первых пролетов КА MESSENGER на основе фотограмметрической обработки стереоизображений (Oberst et al., 2010), полученных широкоугольной камерой (WAC), входящей в систему камер MDIS. Глобальная модель рельефа Меркурия, покрывающая всю поверхность тела, также создана на основе изображений MDIS WAC путем лимбовых измерений (Elgner et al., 2014). Её разрешение (22 км/пиксель) не позволяет отобразить детальные особенности рельефа, но даёт информацию о перепадах высот на всей планете. Эта модель была использована для создания первого гипсометрического глобуса Меркурия (Zharkova et al., 2015), при этом было выполнено обновление ранее созданного каталога кратеров ([http://www.planetary.brown.edu/html\\_pages/mercury\\_craters.htm](http://www.planetary.brown.edu/html_pages/mercury_craters.htm)), включая параметры глобальных структур, таких как кольцевые и лучевые кратеры.

Для детального картографирования Меркурия наибольший интерес представляет новейшая глобальная ЦМР с разрешением 665 м/пиксель (<http://solarsystem.nasa.gov/news/2016/05/06/first-global-topographic-model-of-mercury>), которая впервые позволяет получить информацию о высотах сравнительно небольших элементов рельефа на всей планете, включая южное полушарие; при формировании этой ЦМР было использовано около 100 000 изображений, полученных камерой MDIS NAC КА MESSENGER.

Для оценки ЦМР глобального и регионального охвата, созданных в разное время, выполнено их сопоставление и корреляционный анализ в ГИС. В результате выявлены значительные расхождения абсолютных высот между различными моделями, например, ЦМР, полученная по лимбовым измерениям изображений MDIS WAC, значительно расходится с остальными топографическими данными (максимальные расхождения с данными лазерной альтиметрии MLA достигают 3 км). Корреляционный анализ ЦМР, полученных по данным MLA, и ЦМР, созданных фотограмметрическими методами по стереоизображениям MDIS WAC и КА Mariner 10, показал меньшие различия в абсолютных высотах (около 1 км). Вероятно, расхождения ЦМР КА MESSENGER и КА Mariner 10 можно объяснить конструктивными различиями камер, а также разными возможностями определения положения аппаратов на орбите, значительно улучшенными в настоящее время по сравнению с миссиями прежних лет.

Между новой глобальной ЦМР с разрешением 665 м/пиксель и моделью MLA с разрешением 500 м/пиксель выявлен горизонтальный сдвиг до 7 км, а расхождения по абсо-



*Рис. 1. Глобальное покрытие Меркурия имеющимися топографическими данными*

лютым высотам в среднем составляют 1 км; сравнение со второй моделью MLA с разрешением 1000 м/пиксель выявило минимальные расхождения между ЦМР (до 1%), в абсолютных высотах не более 10 м. Разница высот между новой глобальной ЦМР и предварительными моделями, полученными по стереоизображениям MDIS WAC (1000 м/пиксель), составляет по абсолютной высоте в среднем до 2 км, тогда как сопоставление с моделями, созданными по стереоизображениям КА Mariner 10 (2000 м/пиксель), показывает разницу, не превышающую 100 м.

Расхождения между ЦМР, сформированными разными способами по данным КА MESSENGER, связаны с различиями в методах определения высот (лазерная альтиметрия, лимбовые измерения, стереофотограмметрия), а также сильным влиянием температурного режима на параметры съемочной системы MDIS (Becker et al., 2014). Кроме того, на результаты корреляционного анализа могут влиять артефакты на границах изображений, использованных при создании новой глобальной ЦМР, и разница в их разрешении (Becker et al., 2016).

## **2. Вычисление статистических характеристик морфометрических параметров рельефа Меркурия с использованием ЦМР, полученной на основе фотограмметрической обработки**

Статистические параметры рельефа позволяют выделять на поверхности тел нетипичные геологические образования или другие особенности поверхности, иногда давая

больше информации, чем видно на космических изображениях (рис. 2). Так, например, с помощью статистического анализа высот, выполненного по данным лазерной альтиметрии на небольшом участке в северном полушарии Меркурия, выявлены четкие различия между относительно гладкими равнинами и шероховатыми областями (Kreslavsky et al., 2014). С помощью новой глобальной ЦМР с разрешением 665 м/пиксель, сформированной с помощью фотограмметрических методов, нами впервые выполнена оценка статистических характеристик рельефа всей поверхности планеты. Расчеты проводились с использованием методики, разработанной ранее и апробированной на примере Луны (Коханов и др., 2013). Статистические параметры рельефа Меркурия вычислялись как межквартильный размах второй производной функции высот (лапласиана) с помощью специально разработанного ГИС-инструментария (Kokhanov et al., 2016). Результаты сравнительного анализа наших расчетов со статистическими параметрами, вычисленными на эту область по данным лазерной альтиметрии (Kreslavsky et al., 2014), показывают схожие результаты: хорошо заметно разделение на относительно гладкие и кратерированные (шероховатые) участки (см. рис. 2). Вместе с тем, в отличие от вычислений по данным лазерной альтиметрии, покрывающей лишь область высоких широт в северном полушарии (от 65° с.ш. до 90° с.ш.), новые расчеты обеспечивают оценку статистических характеристик морфометрических параметров рельефа всей поверхности Меркурия и доступны на геопортале МИИГАиК (<http://cartsrv.mexlab.ru/geoportal>).

С использованием новой глобальной карты статистических параметров можно оценить относительный геологический возраст вулканических равнин Меркурия на всей планете. Так, например, на Луне наиболее поздние крупные ударные структуры (т.н. ударные бассейны) четко выделяются на картах статистических характеристик рельефа (Kreslavsky et al., 2013). Этой особенностью можно воспользоваться для выделения наиболее молодых ударных бассейнов на Меркурии.

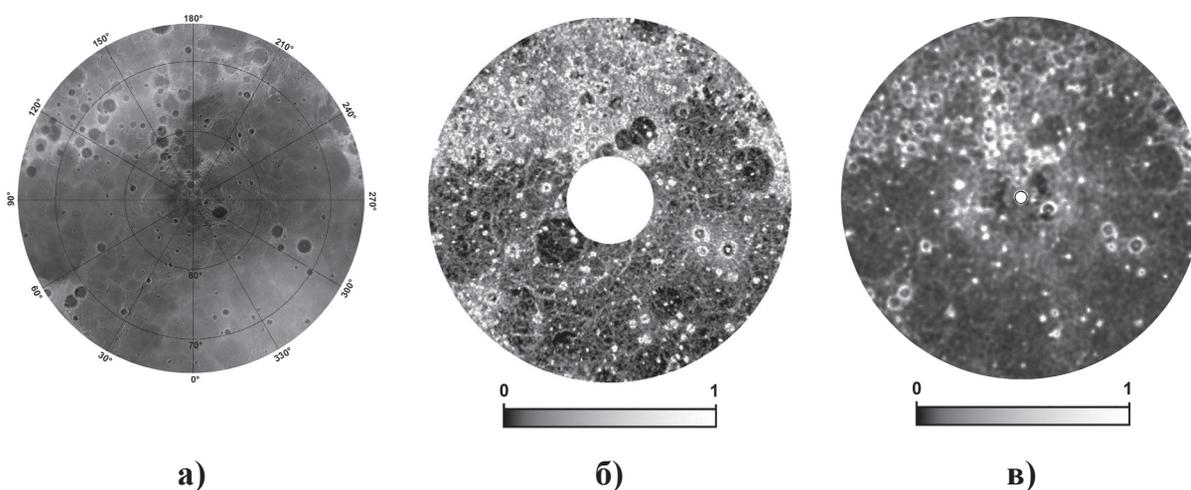
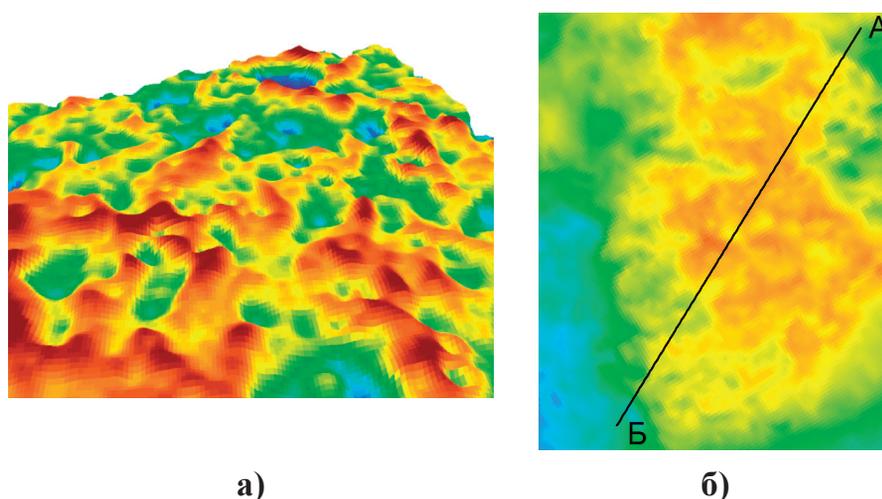


Рис. 2. Параметры рельефа Северного полушария Меркурия: а) распределение высот; б) межквартильный размах кривизн, рассчитанный по трекам лазерной альтиметрии MOLA (Kreslavsky et al., 2014); в) межквартильный размах лапласиана, вычисленный на основе глобальной ЦМР, полученной из фотограмметрической обработки стереоизображений, (наши исследования)

### 3. Стереопроцессинг данных КА MESSENGER высокого разрешения

Детальная топографическая информация, создаваемая на основе фотограмметрической обработки стереоизображений высокого разрешения (10–20 м/пиксель), полученных с помощью узкоугольной камеры MDIS NAC с низкой орбиты над северным полушарием, обеспечивает геоморфологические исследования малых форм рельефа на Меркурии. Метод съемки КА MESSENGER обеспечивает получение лишь межвиткового стерео с разных орбит; кроме того, часть изображений, полученных из разных перекрывающихся пролетов, имеет недостаточный угол конвергенции, что не позволяет провести их фотограмметрическую обработку для формирования ЦМР. Поэтому для поиска стереопар с подходящими параметрами создан специальный программный модуль с использованием алгоритма, учитывающего параметры изображений (Zubarev et al., 2016), с помощью которого удалось найти 338 изображений, имеющих межмаршрутные перекрытия и удовлетворяющих требованиям стерео обработки для формирования топографических моделей. Вследствие того, что изображения MDIS NAC имеют шумы, при фотограмметрической обработке связывающие точки в стереопарах измерялись вручную. Совместное уравнивание данных выполнено на основе 2353 измерений в цифровой фотограмметрической станции PHOTOMOD ([http://www.racurs.ru/index.php?page=97&news\\_id=361](http://www.racurs.ru/index.php?page=97&news_id=361)). Из 338 изображений, отобранных для интересных участков Меркурия, сформированы 120 стереопар, из которых в настоящий момент обработаны и размещены на Геопортале более 30 (<http://cartsrv.mexlab.ru/geoportal/#body=mercury&proj>), см. также *рис. 3* и *4*.



*Рис. 3. Результаты стерео обработки данных КА MESSENGER: а) 3D модель рельефа, созданная на один из участков с ямами; б) линия профиля на участке с ямами*

При создании детальных ЦМР пикеты набирались вдоль характерных элементов отдельных форм рельефа: по бровкам и дну кратеров, ям, борозд. В результате нерегулярная сеть высотных точек включала структурные линии объектов поверхности (*рис. 4*), что позволило сформировать цифровые модели местности (ЦММ).

Высотная точность сформированных ЦММ составляет величину от  $\pm 5,9$  до  $\pm 9,9$  м, и включает, помимо влияния условий съемки и разрешения исходных изображений, ошибку оператора (около 0,5 пикселя). Новейшая топографическая информация с разрешением от 30 до 150 м/пиксель, созданная по данным КА MESSENGER, обеспечила возможность картометрических измерений малых форм рельефа Меркурия с размерами от 300 м до 1 км.

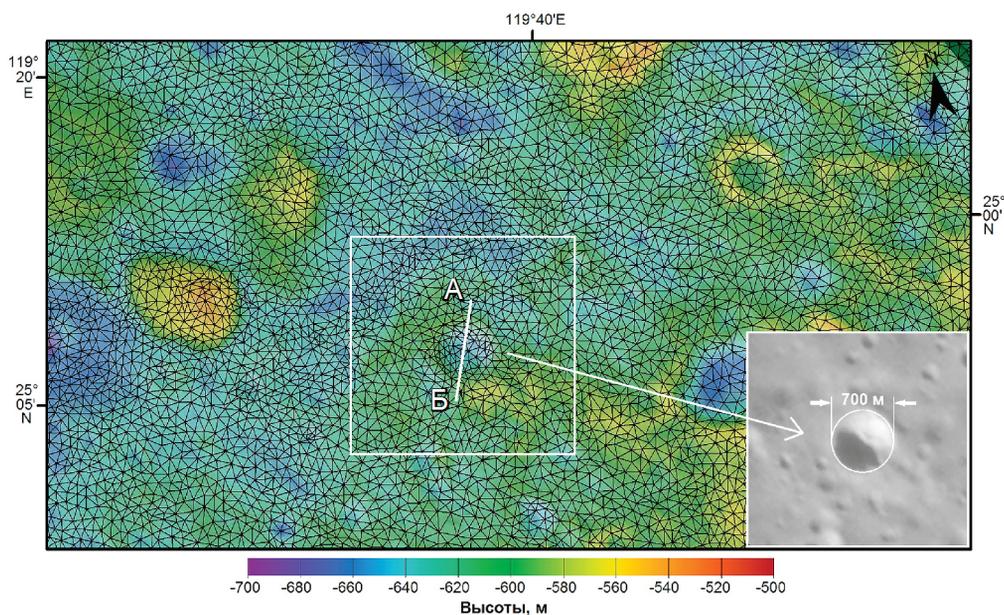


Рис. 4. ЦММ с разрешением 30 м/пиксель и высотной точностью  $\pm 8$  м: стереопара MDIS NAC (EN0221109644M, 16 м/пиксель и EN0221196065M, 18 м/пиксель) для измерений плоскодонных кратеров Меркурия (на врезке)

#### 4. Картометрические измерения малых форм рельефа Меркурия с помощью новых ЦММ высокого разрешения

Новые топографические данные высокого разрешения интегрированы в ГИС для морфометрического анализа плоскодонных кратеров и ям (рис. 5), найденных на основе визуального дешифрирования более 1400 изображений MDIS NAC. Кратеры оцифрованы в ArcGIS 10.3 (<http://www.esri.com/>) и представлены в виде пространственного каталога. Глубины кратеров измерены двумя способами: 1) согласно методике, аналитически учитывающей высоту бровки кратера относительно высоты окружающей поверхности (Bart, 2014); 2) на основе созданных ЦММ с помощью специального автоматизированного инструмента СгаМо (Коханов и др., 2015), который интегрирован в среду ArcGIS. По результатам картометрических измерений малых кратеров с плоским дном (рис. 4а), а также ям, которые представляют собой сложные по форме провалы (рис. 5б), мы выполнили оценку толщины реголита на Меркурии. Эта толщина, как оказалось, на десятки метров превосходит толщину реголита на Луне (Zharkova et al., 2016).

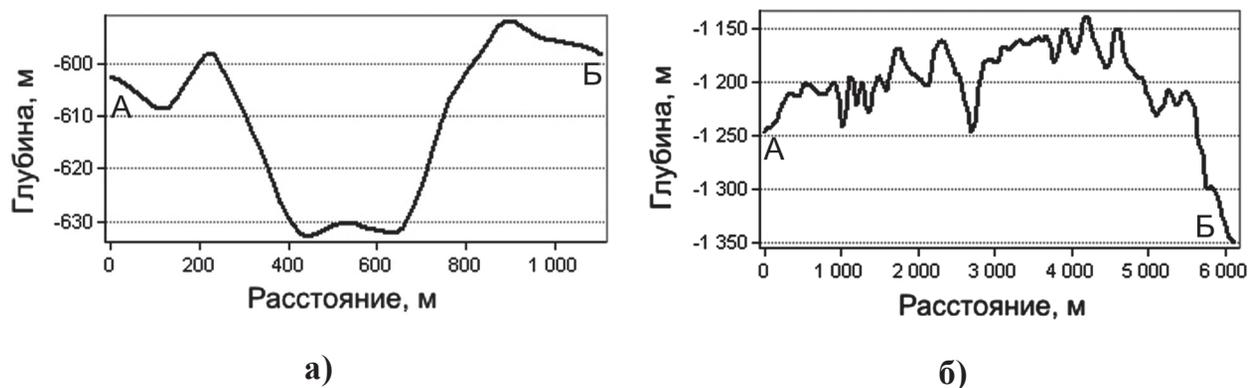


Рис. 5. Высотные профили малых форм рельефа Меркурия, измеренных на основе новых ЦММ: а) плоскодонный кратер (см. также рис. 3); б) яма (см. также рис. 2б)

Интересно отметить, что кратеры с плоским дном чаще обнаруживались вблизи ям, глубина которых примерно совпадает с глубиной кратеров. Это указывает на то, что малые плоскодонные кратеры могут формироваться при наличии на конкретном участке неустойчивого подвижного материала, участвующего в формировании ям. Возможно, этот материал связан с плоскими вулканическими равнинами Меркурия, относительно молодыми с геологической точки зрения (Denevi et al., 2013), поскольку наличие и малых плоскодонных кратеров, и ям чаще всего отмечается на сглаженных равнинных территориях. Морфометрический анализ, выполненный на основе изображений MDIS NAC с использованием созданных ЦММ, подтвердил оценки, полученные по данным лазерной альтиметрии (Kreslavsky et al., 2014), которые ранее показали, что толщина реголита на Меркурии значительно превосходит толщину реголита на Луне.

### Заключение

Новая топографическая информация обеспечила возможность изучать особенности поверхности Меркурия на разных масштабах. Для понимания геологических процессов, происходивших в прошлом на Меркурии на планетарном уровне, например, оценки относительного геологического возраста вулканических равнин, выполнены расчеты статистических параметров, полученные с помощью новой глобальной ЦМР. Для изучения особенностей малых форм рельефа использованы изображения высокого разрешения, полученные камерой MDIS NAC для северного полушария. С помощью созданных ЦММ высокого разрешения выполнены морфометрические измерения более 200 плоскодонных кратеров, диапазон глубин которых составил 10–100 м. Это позволило выполнить оценку толщины слоя реголита на Меркурии и выполнить сравнительный анализ с толщиной лунного реголита (Zharkova et al., 2016). Результаты анализа топографической информации Меркурия на разных уровнях детальности использованы для создания новой настенной карты рельефа Меркурия (Жаркова и др., 2016).

Обработка огромного массива данных миссии MESSENGER продолжается – изображения, полученные относительно недавно, на последних витках аппарата вокруг планеты, отличаются лучшим разрешением (10 м/пиксель), что позволило нам обнаружить интересные объекты: камни вблизи вторичных кратеров и следы выбросов, а также необычные структуры, происхождение которых еще не совсем ясно. Расширенные картометрические измерения и морфометрический анализ вновь выявленных объектов помогут лучше понять поверхностные процессы на Меркурии.

**Благодарности.** Работа выполнена в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) при поддержке Российского научного фонда, проект № 14-22-00197.

### Литература

1. *Жаркова А.Ю., Родионова Ж.Ф., Пугачева С.Г., Карачевцева И.П.* Разработка настенной карты Меркурия по данным КА MESSENGER // Тезисы конференции «Международный год карт в России: объединяя пространство и время». Москва, 2016.
2. *Коханов А.А., Креславский М.А., Карачевцева И.П., Матвеев Е.Н.* Картографирование топографической расчлененности поверхности Луны на основе глобальной цифровой модели рельефа GLD100 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т.10. № 4. С. 136–153.
3. *Коханов А.А., Креславский М.А., Карачевцева И.П.* Особенности морфометрических характеристик малых ударных кратеров в полярных областях Луны // *Астрономический вестник*. 2015. Т. 49. № 5. С. 1–8. DOI: 10.7868/S0320930X15050060.
4. *Bart G.* The quantitative relationship between small impact crater morphology and regolith depth // *Icarus*, 2014. Vol. 235. P. 130–135. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.03.020.
5. *Becker K.J., Robinson M.S., Becker T.L., Weller L.A., Edmundson K.L., Neumann G.A., Perry M.E., Solomon S.C.* First Global Digital Elevation Model of Mercury // 47th Lunar and Planetary Science Conference. 2016. LPI Contribution No. 1903. P. 2959. URL: <http://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2016/pdf/2959.pdf>.
6. *Becker K.J., Becker T.L., Edmundson K.L., Gaskel R.W., McNutt R.L., Murchie S.L., Neumann G.A., Perry M.E., Prockter L.M., Robinson M.S., Solomon S.C., Stephens G.K., Turner F.S., Weller L.A.* Progress Towards a Global Digital Elevation Model for Mercury // 45th Lunar and Planetary Science Conference. Texas, 2014. LPI Contribution No. 1777. P. 2243.
7. *Cook A.C., Robinson M.S.* Mariner 10 stereo image coverage of Mercury // *Journal of Geophysical Research*. 2000. Vol. 105. Issue E4. P. 9429–9444. DOI: 10.1029/1999JE001135.
8. *Denevi B.W., Ernst C.M., Meyer H.M., Robinson M.S., Murchie S.L., Whitten J.L., Head J.W., Watters Th.R., Solomon S.C., Ostrach L.R., Chapman C.R., Byrne P.K., Klimczak Ch., Peplowski P.N.* The distribution and origin of smooth plains on Mercury // *Journal of Geophysical Research*. 2013. Vol. 118. Issue 5. P. 891–907. DOI: 10.1002/jgre.20075.
9. *Elgner S., Stark A., Oberst J., Perry M.E., Zuber M.T., Robinson M.S., Solomon S.C.* Mercury's global shape and topography from MESSENGER limb images // *Planetary and Space Science*. 2014. Vol. 103. P. 299–308. DOI: 10.1016/j.pss.2014.07.019.
10. *Hawkins S.E., Boldt J.D., Darlington E.H., Espiritu R., Gold R.E., Gotwols B., Grey M. P., Hash C.D., Hayes J.R., Jaskulek S.E., Kardian C.J., Keller M.R., Malaret E.R., Murchie Scott L., Murphy P.K., Peacock K., Prockter L.M., Reiter R.A., Robins M. S., Schaefer E.D., Shelton R.G., Sterner R.E., Taylor H.W., Watters Th.R., Williams B.D.* The Mercury Dual Imaging System on the MESSENGER Spacecraft // *Space Science Reviews*. 2007. Vol. 131. Issue 1–4. P. 247–338. DOI: 10.1016/j.icarus.2011.07.017.
11. *Kokhanov A.A., Bystrov A.Y., Kreslavsky M.A., Matveev E.V., Karachevtseva I.P.* Automation of morphometric measurements for planetary surface analysis and cartography // *Int. Arch. Photogramm Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2016. XLI-B4. P. 431–433.
12. *Kreslavsky M.A., Head J.W., Neumann G.A., Zuber M.T., Smith D.E.* Kilometer-scale topographic roughness of Mercury: Correlation with geologic features and units // *Geophysical Research Letters*. 2014. Vol. 41. Issue 23. P. 8245–8251. DOI: 10.1002/2014GL062162.
13. *Kreslavsky M.A., Head J.W., Neumann G.A., Rosenburg M.A., Aharonson O., Smith D.E., Zuber M.T.* Lunar topographic roughness maps from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) data: Scale dependence and correlation with geologic features and units // *Icarus*, 2013. 226. 52–66. DOI:10.1016/j.icarus.2013.04.027.
14. *McNutt R.L., Solomon S.C., Bedini P.D., Anderson B.J., Blewett D.T., Evan L.G., Gol R.E., Krimigis S.M., Murchie S.L., Nittle L.R., Phillips R.J., Prockter L.M., Slavin J.A., Zuber M.T., Finnegan E.J., Grant D.G.* MESSENGER at Mercury: Early orbital operations // *Acta Astronautica*. 2014. Vol. 93. P. 509–515. DOI: 10.1016/j.actaastro.2012.08.012.
15. *Oberst J., Preusker F., Phillips R.J., Watters T.R., Head J.W., Zuber M.T., Solomon S.C.* The morphology of Mercury's Caloris basin as seen in MESSENGER stereo topographic models // *Icarus*, 2010. Vol. 209. Issue 1. P. 230–238. DOI: 10.1016/j.icarus.2010.03.009.

16. Zharkova A.Yu., Kreslavsky M.A., Brusnikin E.S., Krasilnikov S.S., Zubarev A.E., Head J.W., Karachevtseva I.P. Small flat-floored craters on Mercury: implications for regolith thickness // *Icarus*, 2016 (in press).
17. Zharkova A.Yu., Rodionova Jh.F., Kokhanov A.A., Karachevtseva I.P. New cartography of Mercury: maps and globe // 6th Moscow Solar System Symposium, Space Research Institute RAS. Moscow, 2015. [http://ms2015.cosmos.ru/sites/ms2015.cosmos.ru/files/6m-s3\\_abstract\\_book.pdf](http://ms2015.cosmos.ru/sites/ms2015.cosmos.ru/files/6m-s3_abstract_book.pdf).
18. Zubarev A.E., Nadezhdina I.E., Kozlova N.A., Brusnikin E.S., Karachevtseva I.P. Special software for planetary image processing and research // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Prague, 2016. P. 529–536. DOI:10.5194/isprs-archives-XLI-B4-529-2016.
19. Zuber M.T., Smith D.E., Phillips R.J., Solomon S.C., Neumann G.A., Hauck II S.A., Peale S.J., Barnouin O.S., Head J.W., Johnson C.L., Lemoine F.G., Mazarico E., Sun X.L., Torrence M.H., Freed A.M., Klimczak C., Margot J.-L., Oberst J., Perry M.E., McNutt Jr. R.L., Balcerski J.A., Michel N., Talpe M.J., Yang D. Topography of the northern hemisphere of Mercury from MESSENGER laser altimetry // *Science*. 2012. Vol. 336. P. 217–220. DOI: 10.1126/science.1218805.

## The study of Mercury's surface by cartography methods based on the newest topographic data derived from MESSENGER image processing

A.Yu. Zharkova<sup>1</sup>, I.P. Karachevtseva<sup>1</sup>, A.E. Zubarev<sup>1</sup>, E.S. Brusnikin<sup>1</sup>,  
A.A. Kokhanov<sup>1</sup>, M.A. Kreslavsky<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia*

*E-mail: a\_zharkova@miigaik.ru*

<sup>2</sup>*University of California Santa Cruz, Santa Cruz, CA, United States*

In 2015 MESSENGER completed its mission that lasted for four years. As a result over 277 000 images were obtained that provide creation of digital elevation models (DEMs) with medium and low resolution (from 0.5 to 22 km/pixel). Correlation analysis of current topographic models showed big discrepancies between global DEMs, related to differences in methods of determining heights and also with strong influence of temperature on the parameters of MDIS system (Becker et al., 2014). New digital terrain models (DTMs) with resolution 30–150 m/pixel and elevation accuracy up to ±10 m were created based on photogrammetric processing of detailed MESSENGER stereo images (10–20 m/pixel). Using new DTMs quantitative measurements of flat-floored craters and hollows were carried out (Zharkova et al., 2016). These data as well as small crater catalogue and high resolution DTMs are available via MEXLab Planetary Geoportal (<http://carsrv.mexlab.ru/geoportal/>). Data received by MESSENGER during the years of the mission has not exhausted all its scientific potential because detailed dataset is currently being extended. For example, using the latest global DEM with resolution 665 m/pixel we calculated the statistical characteristics of morphometric parameters of Mercury relief that can be used to assess the relative geological age of the volcanic plains on the planet.

**Keywords:** Mercury, MESSENGER, MDIS NAC stereo images, DEM/DTM, quantitative measurements, morphometric analysis, statistical characteristics of the relief morphometric parameters

*Accepted: 26.08.2016*

*DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-265-274*

### References

1. Zharkova A.Yu., Rodionova Zh.F., Pugacheva S.G., Karachevtseva I.P., Razrabotka nastennoi karty Merkuriya po dannym KA MESSENGER (Development of Mercury wall map by MESSENGER data), *Conf. "International Map Year in Russia, combining space and time"*, Abstracts, Moscow, 2016.
2. Kokhanov A.A., Kreslavskiy M.A., Karachevtseva I.P., Matveev E.N., Kartografirovanie raschlenennosti poverkhnosti Luny na osnove global'noy tsifrovoy modeli rel'efa GLD100 (Mapping of the statistical characteristics of the lunar relief on the basis of the global digital elevation model GLD-100), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 136–153.
3. Kokhanov A.A., Kreslavskiy M.A., Karachevtseva I.P., Small impact craters in the polar region of the Moon: peculiarities of morphometric characteristics, *Solar System Research*, 2015, 49 (5), pp. 295–302. DOI: 10.1134/S0038094615050068.
4. Bart G., The quantitative relationship between small impact crater morphology and regolith depth, *Icarus*, 2014, Vol. 235, pp. 130–135. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.03.020.

5. Becker K.J., Robinson M.S., Becker T.L., Weller L.A., Edmundson K.L., Neumann G.A., Perry M.E., Solomon S.C., First Global Digital Elevation Model of Mercury, *Abstract 47th Lunar and Planetary Science Conference*, 2016, LPI Contribution No. 1903, p. 2959. URL: <http://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2016/pdf/2959.pdf>.
6. Becker K.J., Becker T.L., Edmundson K.L., Gaskel R.W., McNutt R.L., Murchie S.L., Neumann G.A., Perry M.E., Prockter L.M., Robinson M.S., Solomon S.C., Stephens G.K., Turner F.S., Weller L.A., Progress Towards a Global Digital Elevation Model for Mercury, *45th Lunar and Planetary Science Conference*, 2014, Abstract # 1777.
7. Cook A.C., Robinson M.S., Mariner 10 stereo image coverage of Mercury, *Journal of Geophysical Research*, 2000, Vol. 105, Issue E4, pp. 942–9444. DOI: 10.1029/1999JE001135.
8. Denevi B.W., Ernst C.M., Meyer H.M., Robinson M.S., Murchie S.L., Whitten J.L., Head J.W., Watters Th.R., Solomon S.C., Ostrach L.R., Chapman C.R., Byrne P.K., Klimczak Ch., Peplowski P.N., The distribution and origin of smooth plains on Mercury, *Journal of Geophysical Research*, 2013, Vol. 118, Issue 5, pp. 891–907.
9. Elgner S., Stark A., Oberst J., Perry M.E., Zuber M.T., Robinson M.S., Solomon S.C., Mercury's global shape and topography from MESSENGER limb images, *Planetary and Space Science*, 2014, Vol. 103, pp. 299–308. DOI: 10.1016/j.pss.2014.07.019.
10. Hawkins S.E., Boldt J.D., Darlington E.H., Espiritu R., Gold R.E., Gotwols B., Grey M. P., Hash C.D., Hayes J.R., Jaskulek S.E., Kardian C.J., Keller M.R., Malaret E.R., Murchie Scott L., Murphy P.K., Peacock K., Prockter L.M., Reiter R.A., Robinson M. S., Schaefer E.D., Shelton R.G., Sterner R.E., Taylor H.W., Watters Th.R., Williams B.D., The Mercury Dual Imaging System on the MESSENGER Spacecraft, *Space Science Reviews*, 2007, Vol. 131, Issue 1–4, pp. 247–338.
11. Kokhanov A.A., Bystrov A.Y., Kreslavsky M.A., Matveev E.V., Karachevtseva I.P., Automation of morphometric measurements for planetary surface analysis and cartography, *Int. Arch. Photogramm Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2016, XLI-B4, pp. 431–433.
12. Kreslavsky M.A., Head J.W., Neumann G.A., Zuber M.T., Smith D.E. Kilometer-scale topographic roughness of Mercury: Correlation with geologic features and units, *Geophysical Research Letters*, 2014, Vol. 41, Issue 23, pp. 8245–8251. DOI: 10.1002/2014GL062162.
13. Kreslavsky M.A., Head J.W., Neumann G.A., Rosenberg M.A., Aharonson O., Smith D.E., Zuber M.T., Lunar topographic roughness maps from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) data: Scale dependence and correlation with geologic features and units, *Icarus*, 2013, 226, pp. 52–66. DOI:10.1016/j.icarus.2013.04.027.
14. McNutt R.L., Solomon S.C., Bedini P.D., Anderson B.J., Blewett D.T., Evan L.G., Gol R.E., Krimigis S.M., Murchie S.L., Nittle L.R., Phillips R.J., Prockter L.M., Slavin J.A., Zuber M.T., Finnegan E.J., Grant D.G., MESSENGER at Mercury: Early orbital operations, *Acta Astronautica*, 2014, Vol. 93, pp. 509–515.
15. Oberst J., Preusker F., Phillips R.J., Watters T.R., Head J.W., Zuber M.T., Solomon S.C., The morphology of Mercury's Caloris basin as seen in MESSENGER stereo topographic models, *Icarus*, 2010, Vol. 209, Issue 1, pp. 230–238. DOI: 10.1016/j.icarus.2010.03.009.
16. Zharkova A.Yu., Kreslavsky M.A., Brusnikin E.S., Krasilnikov S.S., Zubarev A.E., Head J.W., Karachevtseva I.P., Small flat-floored craters on Mercury: implications for regolith thickness, *Icarus*, 2016 (in press).
17. Zharkova A.Y., Rodionova Jh.F., Kokhanov A.A., Karachevtseva I.P. New cartography of Mercury: maps and globe, *6th Moscow Solar System Symposium, Space Research Institute, Moscow*, 2015. [http://ms2015.cosmos.ru/sites/ms2015.cosmos.ru/files/6m-s3\\_abstract\\_book.pdf](http://ms2015.cosmos.ru/sites/ms2015.cosmos.ru/files/6m-s3_abstract_book.pdf).
18. Zubarev A.E., Nadezhdina I.E., Kozlova N.A., Brusnikin E.S., Karachevtseva I.P. Special software for planetary image processing and research, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Prague, 2016, pp. 529–536. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B4-529-2016.
19. Zuber M.T., Smith D.E., Phillips R.J., Solomon S.C., Neumann G.A., Hauck II S.A., Peale S.J., Barnouin O.S., Head J.W., Johnson C.L., Lemoine F.G., Mazarico E., Sun X.L., Torrence M.H., Freed A.M., Klimczak C., Margot J.-L., Oberst J., Perry M.E., McNutt Jr. R.L., Balcerski J.A., Michel N., Talpe M.J., Yang D., Topography of the northern hemisphere of Mercury from MESSENGER laser altimetry, *Science*, 2012, Vol. 336, pp. 217–220. DOI: 10.1126/science.1218805.