

Построение цифровой модели рельефа Марса по данным сканерной съемочной системы Context Camera (CTX) для дальнейшего геолого-геоморфологического анализа

С.С. Красильников^{1,2}, Е.С. Брусникин², А.Э. Зубарев², У. Бюлер³, Р.О. Кузьмин^{1,4}

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
Москва, 119334, Россия

E-mail: krasilnikovruss@gmail.com

²Московский государственный университет геодезии и картографии
Москва, 105064, Россия

³ВСЛ Институт снега и лавинных исследований, СЛФ
Давос Дорф, 7260 Швейцария

⁴Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

Регион исследований располагается на высоких северных широтах Марса и включает в себя два кратера (70,3° с.ш., 266,45° в.д. и 67,25° с.ш., 249,45° в.д.). На внутреннем борту данных кратеров расположены уникальные для Марса объекты — концентрические мореноподобные гряды. С целью их изучения были построены две цифровые модели рельефа (ЦМР) с высоким разрешением. ЦМР были необходимы для проведения экспериментов по сходу лавины с внутреннего склона кратеров, а также геолого-геоморфологического анализа территории (Krasilnikov et al., 2016). Для построения ЦМР использовалась фотограмметрическая обработка снимков камеры Context Camera, установленной на борту Mars Reconnaissance Orbiter (Malin et al., 2007). Обработка и формирование ЦМР выполнялись в PHOTOMOD (Adrov et al., 1995). Моделирование схода лавины осуществлялось в программе RAMMS::AVALANCHE (Christen, Kowalski, Bartelt, 2010). Для моделирования была проведена коррекция физических параметров используемого модуля, что позволило приблизить их в программе к условиям на поверхности Марса.

Ключевые слова: Марс, MRO, CTX, ЦМР, RAMMS, LMLR, лавина, лед

Одобрена к печати: 11.07.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-265-272

Введение

Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) — многофункциональная автоматическая межпланетная станция, запущенная в 2005 г. Данные, получаемые аппаратурой, установленной на борту MRO, широко используются для проведения исследований Марса. На космическом аппарате имеются следующие инструменты: камеры — High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE), Context Camera (CTX), Mars Color Imager (MARCI); спектрометр — Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) и радиолокатор — Shallow Subsurface Radar (SHARAD). Изображения, получаемые камерой CTX, имеют наиболее приемлемое для нашего исследования отношение площади покрытия к разрешению изображений. Высокая плотность данных позволяет рассматривать изображения CTX как наиболее подходящие для изучения геоморфологических особенностей Марса.

Геолого-геоморфологические исследования охватывают два кратера на высоких северных широтах Марса. Для кратера с координатами 70,3° с.ш., 266,45° в.д. (кратер А) и 67,25° с.ш., 249,45° в.д. (кратер Б) характерно наличие уникальных концентрических мореноподобных гряд (lobate moraine-like ridges (LMLR)) (Krasilnikov et al., 2016). Существует несколько возможных причин формирования LMLR, среди которых выделяется формирование LMLR в результате вязкопластичного течения массивов твердой фазы CO₂ на склонах кратеров (Garvin et al., 2006; Kreslavsky, Head, 2011). Нами было выдвинуто предположение,

что формирование LMLR произошло в результате схода лавины, состоящей из льда (H₂O), с массива льда, располагавшегося в верхней части восточного и юго-восточного внутреннего склона кратеров. Для подтверждения данного предположения было проведено моделирование процесса схода лавины с использованием построенных ЦМР.

На основе геоморфологического анализа поверхности было выделено шесть серий схода лавин для кратера А и три серии схода лавин для кратера Б. Высота LMLR в большинстве случаев не превышает 30 м. Для моделирования схода лавины использована программа Rapid Mass Movement Simulation (RAMMS) с модулем RAMMS::AVALANCHE (Christen, Kowalski, Bartelt, 2010). Программа способна моделировать и визуализировать движение потока частиц льда/снега вниз по склону. Целью моделирования было определение мощности изначального ледяного тела через отношение высоты изначального снежно-ледяного массива к длине пробега лавины.

Съемочная система СТХ

Context Camera (СТХ) (Malin et al., 2007) — сканерная съемочная система с прибором с зарядовой связью (ПЗС) линейкой KODAK длиной 5000 пикс. Позволяет производить съемку в диапазоне 500–800 нм. Оптика телескопической камеры состоит из зеркально-линзовой системы Максутова–Кассегрена с номинальным фокусным расстоянием 350 мм и диафрагмой f/3,25. Углы обзора по оси X = 0,001°, по оси Y = 5,73° (рис. 1).

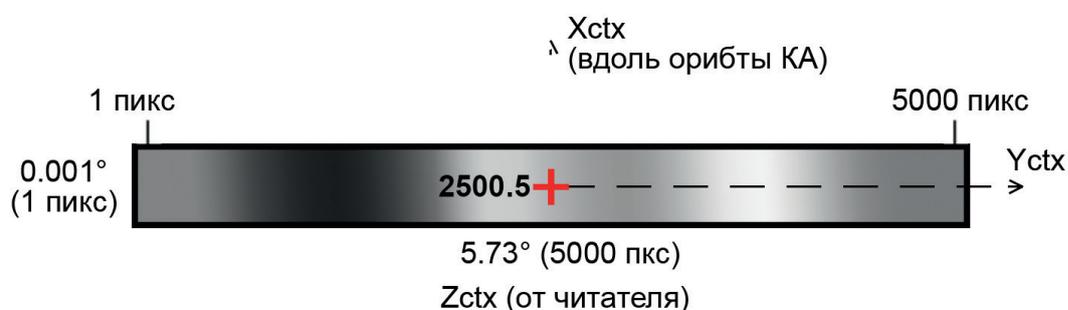


Рис. 1. Фокальная плоскость СТХ; главная точка имеет номинальные координаты (0,5 пикс; 2500,5 пикс); ось X — вдоль траектории движения КА по орбите; ось Y — вдоль полосы ПЗС; ось Z — направлена от читателя; углы обзора вдоль X и Y — 0,001 и 5,73° соответственно

Съемочная система позволяет получить снимок шириной ~30 км и длиной до 290 км. Апогей орбиты КА 350 км, перигей — 250 км. Уточнение параметров дисторсии проводилось спустя шесть лет работы КА на орбите Марса (2012), что повлияло на элементы внутреннего ориентирования сенсора. Уточненные координаты главной точки 352,9 мм (2543,5 и 0,4, координаты x и y соответственно) (1). Коэффициенты радиальной и тангенциальной дисторсии также были уточнены (Bell et al., 2013).

$$\frac{dr}{r} = k_0 + r^2 (k_1 + r^2 k_1), \quad (1)$$

где dr/r — поправка в координаты пикселей ПЗС матрицы; k_0 — положение главной точки; r — радиальная дисторсия; k_1 и k_2 — коэффициенты дисторсии.

На июль 2016 г. изображения включают большую часть поверхности Марса. Стереопары формируются по изображениям с разных орбит. Таким образом, необходим подбор и оценка возможности получения стереоизображения по элементам внешнего ориентирования, угла конвергенции, перекрытия изображений и высоты Солнца.

Набор «сырых» данных СТХ представляет собой бинарный файл формата *.img и набора метаданных. В тегах метафайлов хранится информация об условиях формирования изображения (время, настройки аппаратуры и т. д.). «Сырые» изображения были перекодированы в формат *.geotiff — наиболее универсальный для ЦФС.

Изображение формируется в процессе движения КА по орбите. Причем каждая полоска изображения имеет свое время формирования и, следовательно, элементы внешнего ориентирования (ЭВО). Для определения ЭВО снимков, была использована информация о времени формирования изображения.

Используя библиотеку SPICE API и SPICE TOOL, в которой хранится эфемеридная информация космических аппаратов и тел Солнечной системы, были определены ЭВО съемочной системы на момент формирования изображения. Расчет ЭВО сканерного изображения производился в специальном модуле, разработанном в лаборатории исследований внеземных территорий МИИГАиК (Московский государственный университет геодезии и картографии). ЭВО для сканерного изображения представляют собой систему полиномиальных уравнений (2).

$$\left. \begin{aligned} r_n &= \frac{\sum_{i=1}^{20} LINE_NUM_COEF_i \cdot p_i(P, L, H)}{\sum_{i=1}^{20} LINE_DEN_COEF_i \cdot p_i(P, L, H)}, \\ c_n &= \frac{\sum_{i=1}^{20} SAMP_NUM_COEF_i \cdot p_i(P, L, H)}{\sum_{i=1}^{20} SAMP_DEN_COEF_i \cdot p_i(P, L, H)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где P, L, H — широта, долгота и высота; $-r_n, c_n$ — координаты пикселей изображений в СК изображения (строка, колонка); $LINE_NUM_COEF_i, LINE_DEN_COEF_i, SAMP_NUM_COEF_i, SAMP_DEN_COEF_i$ — коэффициенты функции.

Решением системы являются коэффициенты рациональных полиномов. Функция (1) осуществляет связь между координатами пикселей в СК изображения и геодезическими координатами на поверхности относимости. В качестве поверхности относимости выбиралась минимальная (–3700 м), максимальная (–2100 м) и средняя высота в зоне перекрытия изображений по данным Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA).

Фотограмметрическая обработка данных СТХ для получения ЦМР

Для кратера А были использованы изображения СТХ P22_009658_2505_2505_XI и B01_009935_2505_2505_XN (табл. 1). Снимки привязаны по 15 связующим точкам (рис. 2б) со средним $R_{min} = 0,975$ пикс. Для кратера Б были использованы изображения B20_017399_2459_XN и D22_035807_2474_XN (см. табл. 1) с семью связующими точками со средним $R_{min} = 0,891$. При уравнивании снимков использовались RPC-коэффициенты (Zubarev et al., 2016). Сеть высотных точек была построена в ручном стереорежиме и с помощью полуглобального метода отождествления точек в программе PHOTOMOD (этот метод именуется методом последовательных деформаций). Среднеквадратическая ошибка ЦМР на кратер А составляет 0,4 пикс. для изображения с вертикальной точностью 15 м (рис. 2а).

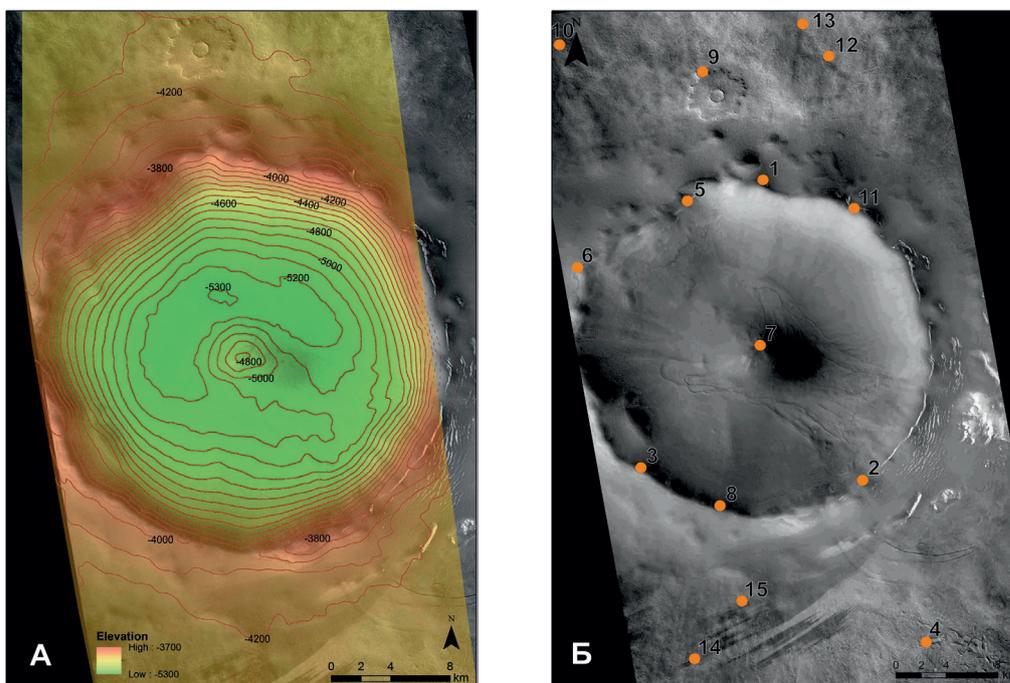


Рис. 2. Цифровая модель рельефа, созданная для кратера А (а). Взаимная привязка снимков по 15 связующим точкам для кратера А (б); показан правый снимок стереопары (P22_009658_2505_2505_XI) со связующими точками; на изображении отчётливо видны LMLR на внутреннем борту кратера

Таблица 1. Характеристики используемых снимков

	Кратер А		Кратер Б	
	Изображение P22_009658_2505_2505_XI	Изображение B01_009935_2505_2505_XN	Изображение B20_017399_2459_XN	Изображение D22_035807_2474_XN
Сезон (SL)	114,22°	124,3°	76,87°	103,58°
Разрешение	6,22 м	6,42 м	6,19 м	6,24 м
Угол съёмки (EA)	1,48°	9,62°	0,1°	5,74°

Изображения кратера Б не удовлетворяли требованиям к условиям получения качественного стереоизображения, поэтому построение ЦМР выполнялось в ручном режиме с расстоянием между пикетами на внутреннем борту кратера до 100 м и ~500 м на внешнем борту кратера. Для стереопары на кратер Б наблюдается наличие погрешности к краям ЦМР. Неточности в позиционировании аппарата привели к плохому внешнему ориентированию. К данным ошибкам добавилась высокая концентрация газа CO_2 в атмосфере, свойственная сезону северной весны в этих широтах (Флоренский и др., 1981). Наличие концентрации газа повлияло на резкость снимка B20_017399_2459_XN. Наложение на эту ошибку низкого различия между углами съемки двух снимков привело к искажению восточного и западного края стереопары на ~500 м по высоте. Данное искажение не свойственно стереопарам СТХ, однако может наблюдаться при определенных условиях.

Для каждого из снимков осуществлялись выравнивание яркости стереопар и радиометрическая обработка. Создавался векторный слой, который и служит для построения точечных векторных объектов, расположенных на поверхности рельефа — пикетов (Adrov et al., 1995). Полученные пикеты используются для построения нерегулярной пространственной сети треугольников (TIN, Triangulation Irregular Network) (рис. 3). TIN является моделью пространственно-координированных данных, которая используется при построении ЦМР, в виде высотных отметок в узлах нерегулярной сети треугольников, соответствующей триангуляции Делоне (Adrov et al., 1995). ЦМР была построена преобразованием TIN с размером ячейки матрицы высот 20 м.

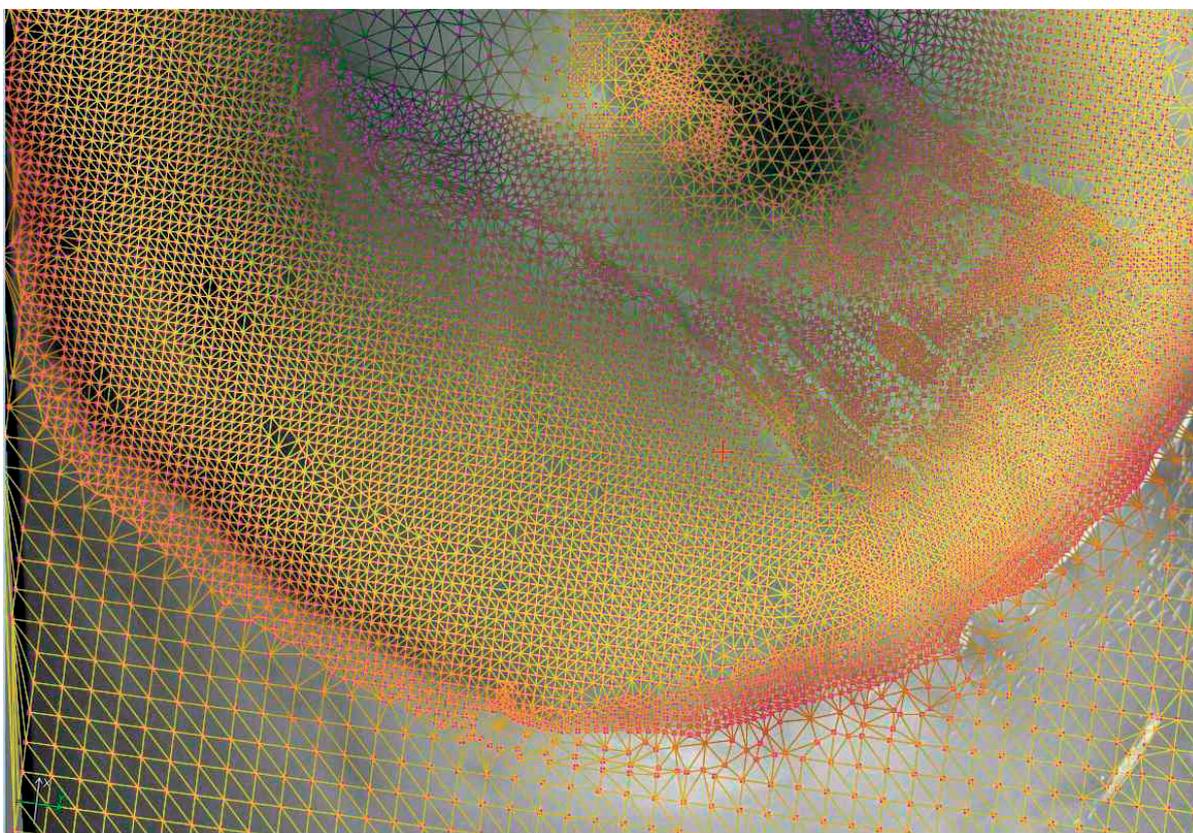


Рис. 3. Нерегулярная триангуляционная сеть (TIN) для формирования ЦМР для кратера А

Моделирование процесса лавинообразования в программе RAMMS::AVALANCHE

Программа RAMMS::Avalanche была специально разработана SLF для использования инженерами по лавинным работам. Она решает проблему движения потока снежной массы вниз по склону в трехмерном пространстве. Моделирование позволяет определить зоны, затронутые лавиной, и провести временной анализ эволюции потока. Кроме того, существует два подхода к моделированию потока лавины: стандартный подход Voellmy-Salm (VS) и подход случайной кинетической энергии (RKE). VS-подход включает в себя два параметра потока (объем и скорость). Данный модуль работает плохо по отношению к снегу, вовлеченному в поток в процессе спуска лавины, а также позволяет рассчитать только максимальную высоту и фронтальную скорость потока. Используя RKE-подход можно учитывать случайное движение и взаимодействие между гранулами льда, что позволяет более точно учитывать влияние среды и внутренних процессов на движение лавины.

Причиной схода моделируемой лавины является сдвиговая деформация нижнего слоя льда/снега, которая могла возникнуть в результате ослабления связи между разными по составу и структуре слоями в толще исходного массива. Возможной причиной разрыва связи между слоями снега/льда в данной работе являлось пороговое превышение нагрузки на нижележащий слой снега/льда в результате накопления чрезмерной массы снега/льда.

Для решения настоящих задач была проведена коррекция физических параметров используемого модуля для уточнения соответствия физическим условиям на поверхности Марса. В результате проведения ряда тестов по моделированию процесса схода лавины была получена модель схода ледяного тела с начальными параметрами мощности массива льда ~150 м (Krasilnikov et al., 2016).

Результаты проведенной работы и применение полученных ЦМР в геолого-геоморфологических исследованиях

В результате работы были получены две ЦМР с высоким разрешением, однако для моделирования схода лавины и геолого-геоморфологического анализа могла использоваться только ЦМР на кратер А (см. *рис. 2а*). Погрешность ЦМР для кратера Б является лимитирующим фактором в дальнейшем ее применении.

Используя снимки высокого разрешения таких съемочных систем, как HiRISE, HRSC, THEMIS и CTX возможно построить высокоточные модели рельефа. Хорошее покрытие снимками данных съемочных систем позволяет получать стереоизображения, перекрывающие более 50% поверхности Марса (Michael et al., 2016). Однако, как показали исследования, не все снимки пригодны для построения ЦМР. Поэтому, хоть снимки THEMIS, CTX и HRSC имеют хорошее покрытие, не все стереопары возможно трансформировать в ЦМР.

При построении ЦМР с использованием снимков съемочной системы CTX необходимо учитывать как особенности внешнего ориентирования съемочного аппарата (угол

съемки (ЕА), определенный угол засечки, точное позиционирование), так и физические условия на поверхности на момент съемки (сезон (SL), схожее освещение поверхности).

По результатам ряда тестов по моделированию процесса схода лавины экспериментальным образом были получены начальные параметры материнского ледяного массива с мощностью ~150 м (Krasilnikov et al., 2016). Данные параметры останца в начальный момент времени согласуются с палеоклиматическими условиями на Марсе и подтверждают предположение об образовании LMLR в результате схода серии лавин.

С.С. Красильников, Е.С. Брусникин и А.Е. Зубарев работали в МИИГАиК при финансовой поддержке РФФ (проект № 14-22-00197).

Литература

1. Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Бурба Г.А., Волков В.П., Иванов А.В., Кузьмин Р.О., Назаров М.А., Николаева О.В., Пронин А.А., Родэ О.Д., Яковлев О.И., Ярошевский А.А. Марс // Очерки сравнительной планетологии. М.: Наука, 1981. С. 82–92.
2. Adrov V.N., Chekurin A.D., Sechin A.Yu., Smirnov A.N., Adam-Guillaume J.-P., Quessete J.-P. Program PHOTOMOD: digital photogrammetry and stereoscopic image synthesis on a personal computer // Digital Photogrammetry and Remote Sensing: Proc. SPIE / ed. Fedosov E.A. 1995. Vol. 2646. pp. 89–96.
3. Bell J.F. III, Malin M.C., Caplinger M.A., Fahle J., Wolff M.J., Cantor B.A., James P.B., Ghaemi T., Posiolova L.V., Ravine M.A., Supulver K.D., Calvin W.M., Clancy R.T., Edgett K.S., Edwards L.J., Haberle R.M., Hale A., Lee S.W., Rice M.S., Thomas P.C., Williams R.M.E. Calibration and Performance of the Mars Reconnaissance Orbiter Context Camera (CTX) // Mars. 2013. Vol. 8. pp. 1–14.
4. Christen M., Kowalski J., Bartelt P. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain // Cold Regions Science and Technology. 2010. Vol. 63. Issue 1–2. pp. 1–14.
5. Garvin J.B., Head J.W., Marchant D.R., Kreslavsky M.A. High-latitude cold-based glacial deposits on Mars: Multiple superposed drop moraines in a crater interior at 70°N latitude // Meteorit. Planet. Sci. 2006. Vol. 41, pp. 1659–1674.
6. Krasilnikov S.S., Kuzmin R.O., Bühler Y., Zubarev A.E. Simulation of water ice glacial surges in north polar craters on Mars // 47th Lunar Planet. Sci. Conf. 2016. No. 1881.
7. Kreslavsky M.A., Head J.W. Carbon dioxide glaciers on Mars: Products of recent low obliquity epochs // Icarus. 2011. Vol. 216. pp. 111–115.
8. Malin M.C., Bell J.F. III, Cantor B.A., Caplinger M.A., Calvin W.M., Clancy R.T., Edgett K.S., Edwards L., Haberle R.M., James Ph.B., Lee S.W., Ravine M.A., Thomas P.C., Wolff M.J. Context Camera Investigation on board the Mars Reconnaissance Orbiter // J. Geophysical Research. 2007. Vol. 112. Issue E5. 25 p.
9. Michael G.G., Walter S.H.G., Kneissl T., Zuschneid W., Gross C., McGuire P.C., Dumke A., Schreiner B., van Gasselt S., Gwinner K., Jaumann R. Systematic processing of Mars Express HRSC panchromatic and colour image mosaics: Image equalisation using an external brightness reference // Planetary and Space Science. 2016. Vol. 121. pp. 18–26.
10. Zubarev A.E., Nadezhdina I.E., Kozlova N.A., Brusnikin E.S., Karachevtseva I.P. Special software for planetary image processing and research // ISPRS 2016. 2016. 8 p.

Construction of a digital terrain model of Mars based on Context Camera (CTX) images for further geological and geomorphological analysis

S.S. Krasilnikov^{1,2}, E.S. Brusnikin², A.E. Zubarev², Y. Bühler³, R.O. Kuzmin^{1,4}

¹*V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS
Moscow 119334, Russia*

E-mail: krasilnikovruss@gmail.com

²*Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow 105064, Russia*

³*WSL Institute for Snow and Avalanche Research, SLF, Davos Dorf 7260, Switzerland*

⁴*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

Studied area is located on high latitude of Mars and includes two craters (70.3°N, 266.45°E and 67.25°N, 249.45°E). On its inner craters slopes unique for Mars forms are located — lobate moraine-like ridges (LMLR). With the aim to study them digital terrain models (DTM) with high resolution were created. DTM was needed for modeling of avalanching on inner craters slopes, as well as for geological and geomorphological analysis of surface (Krasilnikov et al., 2016). For DTM construction photogrammetric processing of images from Context Camera was used, which is located on the Mars Reconnaissance Orbiter (Malin et al., 2007). Construction and processing of DTM were made in PHOTOMOD program (Adrov et al., 1995). Modeling of surge process was carried out with Rapid Mass Movement Simulation (RAMMS) software in RAMMS::AVALANCHE module (Christen, Kowalski, Bartelt, 2010). For this modeling gravity was corrected to $g = 3.71 \text{ m/s}^2$, which allowed for realistic simulations of the gravitational processes on Mars.

Keywords: Mars, MRO, CTX, DTM, RAMMS, LMLR, avalanche, ice

Accepted: 11.07.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-265-272

References

1. Florenskii K.P., Bazilevskii A.T., Burba G.A., Volkov V.P., Ivanov A.V., Kuzmin R.O., Nazarov M.A., Nikolaeva O.V., Pronin A.A., Rode O.D., Yakovlev O.I., Yaroshevskii A.A., Mars (Mars), In: *Ocherki sravnitel'noi planetologii* (Sketches of comparative planetology), Moscow: Nauka, 1981, pp. 82–92.
2. Adrov V.N., Chekurin A.D., Sechin A.Yu., Smirnov A.N., Adam-Guillaume J.-P., Quessette J.-P., Program PHOTOMOD: digital photogrammetry and stereoscopic image synthesis on a personal computer, *Digital Photogrammetry and Remote Sensing, Proc. SPIE*, 1995, Vol. 2646, pp. 89–96.
3. Bell J.F. III, Malin M.C., Caplinger M.A., Fahle J., Wolff M.J., Cantor B.A., James P.B., Ghaemi T., Posiolova L.V., Ravine M.A., Supulver K.D., Calvin W.M., Clancy R.T., Edgett K.S., Edwards L.J., Haberle R.M., Hale A., Lee S.W., Rice M.S., Thomas P.C., Williams R.M.E., Calibration and Performance of the Mars Reconnaissance Orbiter Context Camera (CTX), *Mars*, 2013, Vol. 8, pp. 1–14.
4. Christen M., Kowalski J., Bartelt P., RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain, *Cold Regions Science and Technology*, 2010. Vol. 63, Issue 1–2, p. 1–14.
5. Garvin J.B., Head J.W., Marchant D.R., Kreslavsky M.A., High-latitude cold-based glacial deposits on Mars: Multiple superposed drop moraines in a crater interior at 70°N latitude, *Meteorit. Planet. Sci.*, 2006. Vol. 41, pp. 1659–1674.
6. Krasilnikov S.S., Kuzmin R.O., Bühler Y., Zubarev A.E., Simulation of water ice glacial surges in north polar craters on Mars, *47th Lunar Planet. Sci. Conf.*, 2016, No. 1881.
7. Kreslavsky M.A., Head J.W., Carbon dioxide glaciers on Mars: Products of recent low obliquity epochs, *Icarus*, 2011, Vol. 216, pp. 111–115.
8. Malin M.C., Bell J.F. III, Cantor B.A., Caplinger M.A., Calvin W.M., Clancy R.T., Edgett K.S., Edwards L., Haberle R.M., James Ph.B., Lee S.W., Ravine M.A., Thomas P.C., Wolff M.J., Context Camera Investigation on board the Mars Reconnaissance Orbiter, *Journal of Geophysical Research*, 2007, Vol. 112, 25 p.
9. Michael G.G., Walter S.H.G., Kneissl T., Zuschneid W., Gross C., McGuire P.C., Dumke A., Schreiner B., van Gasselt S., Gwinner K., Jaumann R., Systematic processing of Mars Express HRSC panchromatic and colour image mosaics: Image equalisation using an external brightness reference, *Planetary and Space Science*, 2016, Vol. 121, pp. 18–26.
10. Zubarev A.E., Nadezhdina I.E., Kozlova N.A., Brusnikin E.S., Karachevtseva I.P., Special software for planetary image processing and research, *ISPRS 2016*, 2016, 8 p.