Создание каталога молодых ударных кратеров Марса на основе ГИС-технологий для решения геологических задач

М.А. Креславский 1,2 , И.П. Карачевцева 1 , М.А. Баскакова 1 , А.А. Коханов 1 , Е.Н. Лазарев 1,3

¹Московский Государственный Университет геодезии и картографии Москва, Россия

E-mail: i_karachevtseva@mexlab.ru

²Университет Калифорнии — Санта Круз, Санта Круз, США

E-mail: mkreslav@.ucsc,edu

³Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Москва, Россия

В работе представлены результаты исследований, основанные на использовании каталога малых ударных кратеров на склонах больших вулканов Марса в провинции Фарсида. Статистический анализа популяции малых кратеров позволяет оценить время последней активности песков на больших вулканах, что дает возможность изучения изменений климатических условий Марса в ближайшем геологическом прошлом (до 1 млн. лет). Изучение популяций малых ударных кратеров осуществляется по космическим изображениям, полученным камерой High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) космического аппарата Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Каталог молодых малых кратеров (диаметром от 3 м), создаваемый с помощью ГИС-технологий, в настоящий момент содержит около 2000 объектов. Предварительный анализ популяции малых ударных кратеров, расположенных на гигантских марсианских вулканах, показывает, что в разных частях провинции Фарсида в районах эоловых отложений плотность кратеров отличается статистически значимо, причем на некоторых участках малые ударные кратеры практически отсутствуют. В недалеком геологическом прошлом ветровой транспорт песка прекратился в разных местах в различное время, тогда как в некоторых районах он активен в настоящее время. Время последней активности песков меняется от участка к участку в широких пределах.

Ключевые слова: Марс, Фарсида (Марс), HiRISE, MRO, ударный кратер, ГИС.

Введение

Поверхность Марса подвергается непрерывной бомбардировке метеоритами, которые формируют ударные кратеры. В среднем за миллион земных лет на 1 кв. км поверхности Марса образуется порядка 10 мелких ударных кратеров диаметром около 5 м и более (Daubar et al., 2011), крупные кратеры образуются значительно реже.

Космические изображения высокого разрешения HiRISE показывают, что почти вся поверхность вокруг четырех высочайших вулканов Марса (см. *табл. 1*), находящихся в провинции Фарсида, – г. Олимп, г. Арсия, г. Павлина и г. Аскрийская (*puc. 1*) – покрыта слоем ветровых отложений (Bridges et al., 2007), вероятно, мелким песком (*puc. 2*).

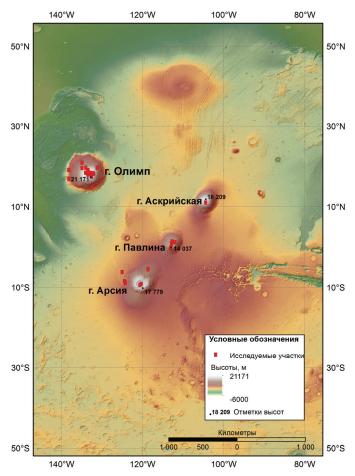


Рис. 1. Карта поверхности провинции Фарсида в окрестностях крупнейших вулканов Марса

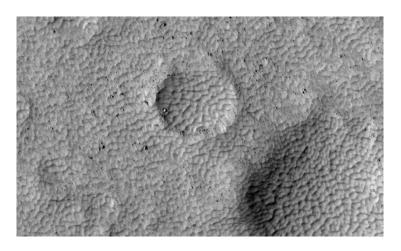


Рис. 2. Участок поверхности одного из вулканов, покрытой сыпучим материалом (вероятно, мелким песком, переработанным ветром). Ветровые отложения с характерной морфологией покрывают более старые крупные ударные кратеры

Таблица 1. Высоты больших вулканов Марса в провинции Фарсида

Название	Высота, м					
г. Арсия	17 779					
г. Аскрийская	18 209					
г. Олимп	21 171					
г. Павлина	14 037					

На некоторых участках в пределах вулканов и у их подножий ударные кратеры, образованные на поверхности ветровых отложений, практически отсутствуют, что говорит об активных изменениях данных форм рельефа, т.е. песок переносится ветром (сальтация) и полностью засыпает небольшие кратеры гораздо быстрее, чем они образуются. На других участках, например, на больших высотах, наблюдается некоторое количество небольших ударных кратеров, сформированных на поверхности ветровых отложений (Baskakova et al., 2013). Это свидетельствует о том, что здесь ветер не превосходит порог сальтации, перемещение песков в настоящее время не происходит, и кратеры остаются нетронутыми. В частности, на больших высотах низкое атмосферное давление и, следавательно, низкая плотность воздуха не благоприятствует сальтации. Однако, наблюдаемое при этом количество кратеров мало. Это означает, что в недавнем геологическом прошлом ветры были сильнее и/или атмосферное давление выше, и активный перенос песка уничтожил все предшествующие кратеры. Подсчет кратеров позволяет выяснить, когда это происходило, а детальное изучение кратеров может пролить свет на атмосферное давление в прошлом (Kreslavsky, 2012).

Небольшие метеороиды часто разламываются на части при прохождении через атмосферу, формируя кластеры (Ivanov et al., 2008), состоящие из нескольких близлежащих кратеров (рис. 3). Доля таких кластеров в популяции кратеров, а также размеры кластеров зависят от атмосферного давления. Таким образом, детальные исследования популяций мелких ударных кратеров Марса, расположенных на больших высотах, обеспечивают возможность определения времени изменения ветрового режима и получения ограничений на атмосферное давление в недавнем геологическом прошлом (от десятков тысяч до нескольких миллионов лет), что поможет пониманию процессов и изменений марсианского климата.

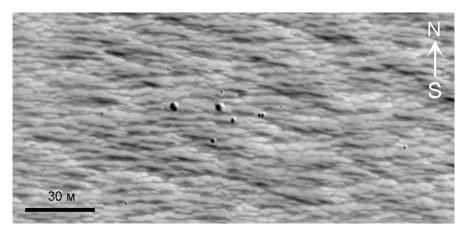


Рис. 3. Фрагмент изображения HiRISE PSP_005743_1915 (участок ветровых отложений на г. Аскрийская), на котором хорошо виден кластер из ~13–15 кратеров, 6 из которых размером более 3м включены в каталог. Кратеры образованы на поверхности эоловых отложений, после чего перемещение песка было незначительным

В настоящей работе представлены предварительные результаты систематической инвентаризации небольших ударных кратеров, наложенных на ветровые отложения в провинции Фарсида в районах крупных вулканов Марса.

1. Формирование каталога малых ударных кратеров

Для создания каталога малых ударных кратеров для отдельных участков в провинции Фарсида в районе гигантских марсианских вулканов использованы изображения поверхности Марса, полученные сканирующей камерой HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment, http://hirise.lpl.arizona.edu) (McEwen et al., 2007), установленной на КА МRO. Для анализа отобраны 35 изображений HiRISE с полным разрешением камеры и дискретизацией 25 см/пиксел. Снимки на участки со слабовыраженными или прерывистыми ветровыми отложениями не были включены.

При анализе изображений исключались геологически неоднородные области, крутые склоны и т.п.; только однородные участки типичных ветровых отложений использовались для составления каталога. Во многих случаях изображение целиком включалось в анализ, в нескольких случаях на одном изображении выделены 2-3 однородных участка (см. *табл.* 2).

Поиск кратеров и составление каталога производилось при помощи ПО ArcGIS. Малые кратеры, наложенные на ветровые отложения, идентифицировались путем последовательного визуального просмотра изображения. Найденные кратеры регистрировались с применением специализированного средства CraterTool (Kneissl et al., 2011). В процессе работы установлено, что кратеры диаметром от 3 м (и более) могут быть надежно идентифицированы почти на всех разновидностях ветровых отложений, а их размеры могут быть измерены с достаточной точностью. Всего было идентифицировано около двух тысяч кратеров.

В целях определения времени накопления кратеров на поверхности, все кратеры, образованные одним метеороидом, развалившимся в атмосфере, и образующим вследствие этого кластер, должны рассматриваться как совокупность, отражающая одно событие. Кластеры выделялись двумя способами: автоматизированным методом (Kreslavsky, 2008) и вручную в ГИС. Для анализа результатов решено отдать предпочтение ручному разделению на кластеры, поскольку это позволяет учесть морфологические особенности объектов, например, степень деградации кратеров, что делает деление на кластеры более надежным. Диаметр D_E эквивалентного кратера, следуя работе (Ivanov et al., 2008), вычисляется по следующей формуле:

$$D_E = \left(\sum_i D_i^3\right)^{1/3},$$

где D_i – диаметры всех кратеров, образующих кластер.

2. Предварительный анализ каталога малых кратеров

Для удобства анализа информация из созданного каталога представлена в обобщенном виде (см. *табл. 2*), в том числе, общее количество отдельных кратеров и эквивалентных кратеров диаметром более 5 м. Предел 5 м для оценки времени накопления кратеров выбран по двум причинам: во-первых, это дает возможность количественно сопоставить плотность кратеров с предыдущими результатами (Kreslavsky, 2008); во-вторых, предел должен быть заметно больше, чем самые маленькие идентифицируемые кратеры, иначе «упущенные» кратеры диаметром менее 3 м повлияют на точность определения размера эквивалентных кратеров, соответствующих кластерам.

Таблица 2. Сводное описание исследованных участков на основе каталога малых ударных кратеров

Номер n/n	ID	Lat	Long	S , км²	Н, м	K	M	Мс	N, км ⁻²	Mc/M
1.	PSP_002909_2000	19,7	226,1	64,6	15427	9	5	1	0,08	0,2
2.	PSP_004109_2010	21,0	225,1	43,9	9432	45	6	2	0,14	0,33
3.	PSP_005032_1985	18,2	226,5	57,7	18086	55	11	3	0,19	0,27
4.	PSP_005111_1985	18,3	228,0	93,5	19854	34	12	1	0,13	0,083
5.	PSP_005177_1985	18,2	227,6	26,2	20584	51	22	5	0,84	0,23
6.	PSP_006245_2000	19,7	228,9	35,8	12063	7	1	0	0,03	0
7.	PSP_007524_1985	18,3	226,7	77,4	17969	19	13	2	0,17	0,15
8.	PSP_008025_1990_1	18,4	226,6	28,7	17972	60	14	5	0,49	0,36
9.	PSP_008025_1990_2	18,7	226,6	49,5	18698	36	9	3	0,18	0,33
10.	PSP_008460_1980	17,6	227,4	37,8	21067	65	25	3	0,66	0,12
11.	PSP_008816_1985	18,5	226,0	42,8	20196	39	10	2	0,23	0,2
12.	ESP_012706_1995	19,2	221,9	18,0	7074	55	12	3	0,67	0,25
13.	ESP_016253_1985	18,5	226,4	14,4	18255	28	5	2	0,35	0,4
14.	ESP_016398_1985	18,4	227,8	9,2	20345	3	2	0	0,22	0
15.	ESP_017387_1995	19,2	226,6	29,2	18973	8	3	1	0,10	0,33
16.	ESP_017730_1970	17,0	221,9	23,1	6265	44	7	4	0,30	0,57
17.	ESP_017743_1985	18,5	227,1	5,7	18645	0	0	0	0,00	0
18.	ESP_017888_1950	14,9	227,6	54,5	6955	135	22	8	0,40	0,36
19.	ESP_018521_1980	18,0	226,5	9,6	17887	9	4	1	0,42	0,25
20.	ESP_023690_2000	19,6	225,1	46,8	14169	7	2	1	0,04	0,5
21.	PSP_004847_1745	-5,5	241,4	27,8	9946	63	42	11	1,51	0,26
22.	PSP_010780_1805	0,5	247,2	25,4	9221	30	8	1	0,31	0,12
23.	PSP_005124_1705	-9,2	239,7	46,0	16344	45	33	5	0,72	0,15
24.	PSP_005295_1815	1,4	247,3	29,1	12183	423	64	11	2,20	0,17
25.	ESP_011598_1740	-6,2	-125,2	52,6	4626	251	83	22	1,58	0,26
26.	ESP_016833_1715	-8,5	-124,6	84,4	5430	418	140	28	1,66	0,2
27.	ESP_026960_1710	-8,9	-124,4	35,5	5711	165	72	19	2,03	0,26
28.	PSP_004702_1705	-9,4	-120,8	99,3	16289	211	69	8	0,69	0,12

<i>Номер n/n</i>	ID	Lat	Long	S, км²	Н, м	K	M	Мс	N, км ⁻²	Mc/M
29.	PSP_005084_1810_1	1,3	-112,0	17,8	12571	70	24	2	1,34	0,08
30.	PSP_005084_1810_2	1,1	-112,0	93,4	12248	397	120	24	1,28	0,2
31.	PSP_008025_1990	18,5	-135,0	66,3	16554	24	5	0	0,08	0
32.	PSP_008460_1980	17,6	-132,6	53,6	21067	60	19	2	0,35	0,10
33.	PSP_009646_1795_1	-0,2	-113,1	23,6	13875	80	31	2	1,31	0,06
34.	PSP_009646_1795_2	-0,3	-113,1	31,1	13675	120	46	9	1,48	0,2
35.	PSP_009646_1795_3	-0,4	-113,1	31,3	13333	14	8	0	0,26	0
36.	ESP_014142_1915	11,2	-102,1	46,2	7460	106	37	5	0,80	0,14
37.	ESP_024836_1975	17,5	-100,8	44,2	2953	36	27	3	0,61	0,11
38.	PSP_005176_1915	11,4	-103,7	26,5	1762	6	5	1	0,19	0,2
39.	PSP_005743_1915	11,2	-104,4	92,7	14422	251	178	32	1,92	0,18

Условные обозначения к табл. 2:

Наименование использованного изображения или участка в пределах данного изображения;

Lat – Широта центра изображения или фрагмента, в десятичных градусах;

Long – Долгота центра изображения или фрагмента, в десятичных градусах;

S – Полезная площадь изображения или фрагмента, на которой идентифицированы кратеры, кв. км;

H, м – Средняя высота участка, в м;

К – Общее количество кратеров на участке;

М – Количество эквивалентных кратеров (одиночных кратеров и кластеров, условно объединенных в эквивалентный кратер) с диаметром 5 м и более;

Мс – Количество кластеров на участке;

N — Средняя плотность эквивалентных кратеров на кв. км.

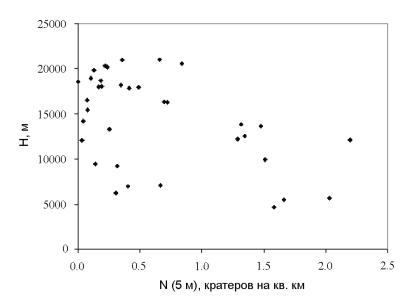


Рис. 4. Средняя плотность кратеров размером от 5 м (по горизонтальной оси) и средняя высота исследованных участков (по вертикальной оси)

Как показывают результаты статистического анализа (*табл. 2*), наблюдаемая плотность кратеров меняется от участка к участку в широких пределах от 0 (полное отсутствие кратеров на одном из выбранных изображений) до 2,2 км⁻². Выраженной корреляции между плотностью кратеров и высотой не обнаруживается (*puc. 4*). Самые высокие участки

планеты, например, вершина и кальдера вулкана Олимп (см. *табл. 1*) имеют плотность кратеров 0,3-0,8 км⁻², тогда как ниже по склону этой горы наблюдается снижение плотности, вплоть до полного отсутствия кратеров. Подобная же картина наблюдается и на г. Павлина, где на кальдере наблюдается умеренно высокая плотность кратеров, а темное кольцо, опоясывающее гору на средней высоте между вершиной и подножьем, – низкую.

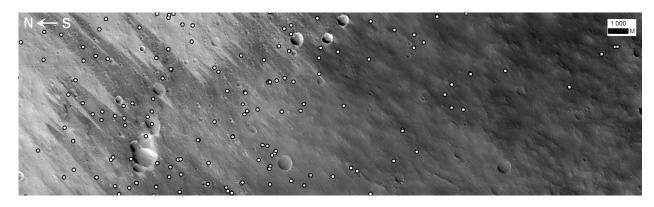


Рис. 5. Участок юго-западного склона горы Павлина (изображение HiRISE PSP_009646_1795). Положение малых ударных кратеров, образованных поверх ветровых отложений, показано белыми пунсонами (сами кратеры не отображаются из-за небольших размеров и масштаба отображения). Все кратеры, видимые на данном масштабе, покрыты сверху ветровыми отложениями и имеют большой размер и возраст. В крайней левой светлой части изображения песок не был активен последние 0,5 млн. лет; в правой части кратеров нет совсем — то есть здесь песок активен в настоящую эпоху. Темные ветровые полосы слева от центра изображения образованы за счет удаления мелкой светлой пыли с поверхности и указывают на эпизоды сальтации песка в течение последних нескольких марсианских лет (1–3 года)

На рис. 5 отображена ситуация на юго-западном склоне г. Павлина (местность повышается к северо-востоку, то есть к левому верхнему углу изображения). По-видимому, разница в видимой яркости между отдельными участками объясняется наличием или отсутствием тонкого слоя пыли на поверхности. При оседании мелких частиц пыли из атмосферы, что в данном районе происходит постоянно, поверхность становится более светлой. При нарушении тонкого пылевого слоя в результате сальтации песка на поверхности образуются хорошо видимые на изображениях темные ветровые полосы (рис. 5, левая часть изображения). В самой светлой части снимка отображена поверхность, покрытая тонким слоем пыли, не тронутой ветром, по крайней мере, несколько марсианских лет. На таких неактивных песках мы видим весьма плотную популяцию кратеров. Плотность кратеров в левой и цен-PSP 009646 1795 1 тральной изображения (см. табл. участки части PSP 009646 1795 2) примерно одинакова (1,3 и 1,5 км⁻², соответственно). Это означает, что, хотя в пределах центральной части участка происходили нарушения тонкого пылевого слоя (один или несколько раз в течение 1–2 марсианских лет перед съемкой), проявившиеся в виде четко видимых ветровых полос, все же порывы ветра не причинили существенного ущерба кратерам. В правой части изображения плотность кратеров гораздо меньше, а малые кратеры (менее 5 м) отсутствуют. Вероятно, сильный ветер здесь инициировал значительные перемещения песка, что привело к нарушению пылевого покрова, проявившиеся в снижении яркости этой части изображения. По-видимому, сильные ветры здесь дуют чаще, и маленькие кратеры засыпаются песком гораздо быстрее, чем успевают образоваться.

В то же время, увеличение плотности кратеров с высотой, наблюдаемое на г. Олимп и г. Павлина, не является универсальным (*puc. 4*). Так, наибольшие плотности кратеров (около 2 км⁻²) обнаружены на низких высотах, у подножия г. Арсия. Это говорит о том, что локальный ветровой режим влияет на наличие или отсутствие сальтации сильнее, чем зависимость порога сальтации от атмосферного давления.

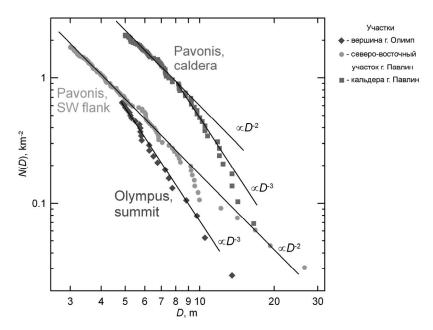


Рис. 6. Кумутятивные функции распределения кратеров для нескольких участков провинции Фарсида

На разных участках выявленные популяции кратеров имеют различное распределение по размерам (puc.~6). Например, для района на вершине крупнейшего марсианского вулкана Олимп кумулятивное распределение диаметров D крутое и близко к степенному закону с показателем -3, что близко к разпределению для вновь образующихся перичных кратеров (т. н. продуктивной функции) при малых диаметрах (Kreslavsky, 2008; Hartmann et al., 2010). Это означает, что активное движение песка прекратилось 50–100 тыс. лет назад и с тех пор идет накопление кратеров. В районе г. Павлина распределения близки к степенному закону с показателем -2, что указывает на то, что процессы образования кратеров и их разрушение находятся в равновесии, причем продолжительность жизни кратера пропорциональна его диаметру D. Разрушения в кальдере вулкана Олимп происходят в ~ 3.5 медленнее, чем на его юго-западном склоне, который имеет примерно ту же высоту.

Таким образом, анализ собранных данных показал, что на некоторых участках области Фарсида пески являются активными в настоящее время, в то время как на других ее территориях последние эпизоды активного переноса песка ветром происходили в близком геологическом прошлом. Абсолютная оценка возрастов затруднена тем, что темп образования малых кратеров известен с невысокой точностью, и, кроме того, может изменяться со временем, однако, порядок величины возраста может быть оценен по плотности кратеров достаточно надежно.

Заключение

Предварительный анализ, выполненный на основе созданного каталога популяции малых ударных кратеров, расположенных на гигантских марсианских вулканах, показывает, что в разных частях провинции Фарсида в районах эоловых отложений плотность кратеров отличается статистически значимо, причем на некоторых участках малые ударные кратеры практически отсутствуют. В недалеком геологическом прошлом ветровой транспорт песка прекратился в разных местах в различное время, тогда как в некоторых районах он активен в настоящее время. Время последней активности песков меняется от участка к участку в широких пределах.

Наибольшая плотность кратеров (~2 км⁻²) соответствует нескольким сотням тысяч лет. Интересно, что такой возраст поверхности встречается в нескольких районах на разных вулканах, в частности, на вершине г. Павлина и у подножья г. Арсия. Просмотр некоторого количества дополнительных снимков, не включенных в каталог, не показал наличия очевидно более плотных популяций кратеров, наложенных на пески. Вполне возможно, что этот наиболее древний возраст соответствует существенному изменению климата Марса. Этот возраст (сотни тысяч лет) согласуется с последней эпохой увеличения наклона оси вращения Марса. В отличие от Земли, наклон оси вращения Марса меняется в довольно широких пределах (Laskar et al., 2004); последний эпизод увеличения наклона произошел около 300 000 лет назад. Увеличенный наклон оси вращения тела вызывает контраст между марсианскими зимой и летом, а также между зимним и летним полушариями, что, в принципе, должно приводить к усилению ветров. Поэтому наше объяснение причин этих изменений климата представляется вполне логичным.

Интересно, что среди рассмотренных наиболее старых популяций существуют статистически значимые различия в доле кластеров на разных высотах. Доля кластеров у подножия г. Арсия почти вдвое выше, чем на вершине г. Павлина. Это может быть вызвано разницей высот и, следовательно, атмосферного давления: метеороиды, падающие у

подножия г. Арсия, преодолевают более толстый слой воздуха и, следовательно, имеют большую возможность разрушения еще в атмосфере, с образованием кластеров кратеров на поверхности.

Самые молодые популяции кратеров в местностях, где песок не активен в настоящее время, гораздо моложе: их возраст составляет около нескольких тысяч лет. Это меньше, чем время изменения орбиты и ориентации оси вращения Марса. Таким образом, изученные популяции говорят о периодах существенно более сильных ветров, вызванных внутренней нестабильностью климата планеты, а не изменениями орбиты и оси вращения.

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы (ФЦП) «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, грант Министерства образования и науки РФ по теме «Исследование и анализ популяций малых ударных кратеров на марсианских вулканах для изучения геологической истории и климата Марса», Договор № 14.В37.21.0914.

Литература

- 1. Baskakova M.A., Kreslavsky M.A., Karachevtseva I.P. Aeolian Bedforms in Tharsis, Mars: New Insight from Populations of Small Craters. // 44rd Lunar and Planetary Science Conference, abs. No. 1104, Texas, Woodlands, USA, March 18–22, 2013.
- 2. Bridges N.T., P.E. Geissler, A.S. McEwen, B.J. Thomson, F.C. Chuang, K.E. Herkenhoff, L.P. Keszthelyi, S. Martinez-Alonso, Windy Mars: A dynamic planet as seen by the HiRISE camera // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34. L23205.
- 3. Daubar I.J., A.S. McEwen, S. Byrne, C.M. Dundas, A.L. Keska, G.L. Amaya, M. Kennedy, M.S. Robinson. New Craters on Mars and the Moon, // 42nd Lunar and Planetary Science Conference. Abs. No. 2232. Texas, Woodlands, USA, March 7–11, 2011.
- 4. *Hartmann W.K.*, *C. Quantin, S.C. Werner, O. Popova*. Do young martian ray craters have ages consistent with the crater count system? // Icarus. 2010. Vol. 208. P. 621–635.
- 5. *Ivanov B.A., H.J. Melosh, A.S. McEwen, Hirise Team.* Small impact crater clusters in high resolution HiRISE images. // 39th Lunar and Planetary Science Conference. Abs. No. 1221. Texas, League City, USA, March 10–14, 2008.
- 6. *Kneissl T., van Gasselt S., Neukum G.* Map-projection-independent crater size-frequency determination in GIS environments new software tool for ArcGIS // Planetary and Space Science. 2011. Vol. 59. P. 1243–1254.
- 7. *Kreslavsky M.*, Geological Constraints on Martian Atmospheric Pressure in the Recent Past. // Mars Recent Climate Change Workshop, Moffett Field, California, May 15–17, 2012, available at: http://spacescience.arc.nasa.gov/mars-climate-workshop-2012/documents/extendedabstracts/Kreslavsky M ExAbst.pdf.
- 8. *Kreslavsky M.* Young populations of small craters on Mars: A case study. // EPSC Abstracts, Vol. 3. Abstract EPSC2008-A-00237, available at: http://cosis.net/abstracts/EPSC2008/00237/EPSC2008-A-00237.
- 9. Laskar J., Correia A.C.M., Gastineau M., Joutel F., Levrard B., Robutel P. Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars. // Icarus. 2004. Vol. 170, P. 343–364.
- 10. McEwen A.S., Eliason E.M., Bergstrom J.W., Bridges N.T., Hansen C.J., Delamere W.A., Grant J.A., Gulick V.C., Herkenhoff K.E., Keszthelyi L., Kirk R.L., Mellon M.T., Squyres S.W., Thomas N., Weitz C.M. Mars Reconnaissance Orbiter's High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) // Journal of Geophysical Research. 2007. Vol. 112. E05S02. doi:10.1029/2005JE002605.

Creation of a catalog of young impact craters on giant volcanoes of Mars for geologic studies

M.A. Kreslavskiy^{1,2}, I.P. Karachevtseva¹, M.A. Baskakova¹, A.A. Kokhanov¹, E.N. Lazarev³

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography
Moscow, Russia
E-mail: i_karachevtseva@mexlab.ru

²University of California - Santa Cruz, Santa Cruz, USA
E-mail: mkreslav@.ucsc.edu

³P.K. Sternberg Astronomical Institute
Moscow, Russia

The paper presents the results of studies based on a catalog of small impact craters on the slopes of large volcanoes in Tharsis Regio on Mars. Statistical analysis of the populations of small craters allows estimation of the time of the last active sand transport on the large volcanoes, which enables studies of martian climate changes in the recent geological past (up to 1 million years). The study of small impact craters populations is carried out with space images obtained by the camera High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) onboard Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) spacecraft. The catalogue of young small craters (diameter over 3 m) created with the GIS technology currently contains about 2,000 objects. Preliminary analysis of these populations of small impact craters on the giant volcanoes shows that there are statistically significant differences in the density of craters superposed over aeolian deposits between different parts of Tharsis Regio; in some parts of Tharsis small impact craters are virtually absent. In the recent geological past, wind transport of sand stopped in different places at different times, while in some areas it is currently active. The last time of active sand transport varies from site to site within a wide range.

Keywords: Mars, Tharsis Regio (Mars), HiRISE, MRO, impact crater, GIS.

References

- 1. Baskakova, M.A., M.A. Kreslavsky, and I.P. Karachevtseva, Aeolian Bedforms in Tharsis, Mars: New Insight from Populations of Small Craters. *44rd Lunar and Planetary Science Conference*, abs. No. 1104, Texas, Woodlands, USA, March 18–22, 2013.
- 2. Bridges N.T., P.E. Geissler, A.S. McEwen, B.J. Thomson, F.C. Chuang, K.E. Herkenhoff, L.P. Keszthelyi, and S. Martinez-Alonso, Windy Mars: A dynamic planet as seen by the HiRISE camera, *Geophysical Research Letters*, 2007, Vol. *34*, L23205.
- 3. Daubar, I.J., A.S. McEwen, S. Byrne, C.M. Dundas, A.L. Keska, G.L. Amaya, M. Kennedy, and M.S. Robinson, New Craters on Mars and the Moon, *42nd Lunar and Planetary Science Conference*, abs. No, 2232, Texas, Woodlands, USA, March 7–11, 2011.
- 4. Hartmann W.K.C., Quantin S., Werner C, and Popova O., Do young martian ray craters have ages consistent with the crater count system? *Icarus*, 2010, Vol. 208, pp. 621–635.
- 5. Ivanov, B.A., H.J. Melosh, A.S. McEwen, and Hirise Team, Small impact crater clusters in high resolution HiRISE images, *39th Lunar and Planetary Science Conference*, abs. No. 1221, Texas, League City, USA, March 10–14, 2008.
- 6. Kneissl T., van Gasselt S., Neukum G. Map-projection-independent crater size-frequency determination in GIS environments new software tool for ArcGIS. *Planetary and Space Science*, 2011, Vol. 5, pp.1243–1254.
- 7. Kreslavsky M., Geological constraints on Martian atmospheric pressure in the recent past. *Mars Recent Climate Change Workshop*, Moffett Field, California, May 15–17, 2012, available at: http://spacescience.arc.nasa.gov/mars-climate-workshop-2012/documents/extendedabstracts/Kreslavsky M ExAbst.pdf.
- 8. Kreslavsky M., Young populations of small craters on Mars: A case study, *European Planetary Science Congress*, EPSC Abstracts, Vol. 3. Abstract EPSC2008-A-00237, available at: http://cosis.net/abstracts/EPSC2008/00237/EPSC2008-A-00237.
- 9. Laskar, J., Correia A.C. M., Gastineau M., Joutel F., Levrard B., Robutel P., Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars, *Icarus*, 2004, Vol. 170, pp. 343–364.
- McEwen A.S., Eliason E.M., Bergstrom J.W., Bridges N.T., Hansen C.J., Delamere W.A., Grant J.A., Gulick V.C., Herkenhoff K.E., Keszthelyi L., Kirk R.L., Mellon M.T., Squyres S.W., Thomas N., Weitz C.M., Mars Reconnaissance Orbiter's High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE), *Journal of Geophysical Research*, 2007, Vol. 112, E05S02, doi:10.1029/2005JE002605.