Изучение климатических условий на поверхности Марса в процессе формирования склоновых полос

Е.С. Брусникин, К.Э. Кабальеро Энрике, Н.А. Козлова

Московский государственный университет геодезии и картографии Москва, 105064, Россия E-mail: brusnikin@yahoo.com

Склоновые полосы на Марсе — уникальные объекты, наблюдаемые только на этой планете, активное формирование полос происходит и в наше время. Для объяснения такого марсианского феномена склоновых полос было предложено два противоположных механизма их формирования: «сухой» (Sullivan et al., 2001) и «влажный» (Kreslavsky, Head, 2009). Ни один из механизмов пока ещё не объясняет все наблюдаемые особенности склоновых полос. В исследовании использовались многократно пересекающиеся изображения поверхности Марса, полученные с помощью сканерных съёмочных систем THEMIS и СТХ. В области перекрытия изображений оператором фиксировались полосы и их направление (азимут), сформировавшиеся в период между моментами съёмки двух изображений, что позволило определить временной интервал и сезон формирования склоновых полос. Использование данных из Климатической базы данных Европейского космического агентства по Марсу позволило определить погодные условия в атмосфере Марса во время формирования склоновых полос в течение солов. В статье проведён анализ погодных условий и их возможного влияния на процесс формирования склоновых полос в течение нескольких марсианских лет. Оценена возможность воздействия жидких потоков на процесс формирования полос.

Ключевые слова: Марс, склоновые полосы, Климатическая база данных Марса, климат на Марсе

Одобрена к печати: 21.06.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-263-275

Введение

Склоновые полосы на Mapce (Ferguson, Lucchitta, 1984; Morris, 1982) являются уникальными объектами, наблюдаемыми только на этой планете, активное формирование полос происходит и в наше время. Тёмные полосы формируются в экваториальных районах Марса в областях с низкой тепловой инерцией и высоким альбедо (Sullivan et al., 2001). Полосы вытянуты вдоль направления склона и повторяют его микрорельеф, у них чёткие края и нет каких-либо видимых скоплений материала на концах. В некоторых случаях полосы могут разделяться на несколько потоков для обхода препятствий (камней, кратеров и др.) и вновь соединяться, также они могут кластеризоваться, создавая эффект течения жидкого потока по склону (*puc. 1*, см. с. 264).

Полосы появляются на склонах, наблюдаются в течение десятилетий и постепенно исчезают. Существующие исследования (Baratoux et al., 2006; Chuang et al., 2007, 2010; Mushkin et al., 2010; Phillips et al., 2007; Schorghofer, King, 2011; Schorghofer et al., 2007) описывают особенности полос, однако причины их формирования остаются пока открытыми для изучения.

Для объяснения уникального марсианского феномена склоновых полос было предложено два противоположных механизма их формирования: «сухой» (Sullivan et al., 2001) и «влажный» (Kreslavsky, Head, 2009). «Сухой» механизм рассматривает полосы как последствия схода пылевых лавин. Тёмный окрас полос может быть последствием оголения более тёмного подповерхностного слоя. Кроме склоновых полос примерами выброса или оголения тёмного материала на поверхности Марса могут быть такие объекты, как dust devils tracks (следы «пылевых дьяволов») (Thomas, Gierasch, 1985), recurrent slope lineae (повторяющиеся линии наклона) (McEwen et al., 2011) или появление сезонных гейзеров в южном полушарии Марса (Kieffer, Gemini, 2000). Проблема «сухого» механизма состоит в том, что полосы

могут распространяться на большие расстояния (более 1000 м) (Brusnikin et al., 2016) по склонам с углом меньше угла внутреннего трения материала реголита, который может составлять от 15° у эоловых наносов до 41° у комковатого каменистого типа грунта Mapca (Demidov et al., 2015).



Рис. 1. Фрагмент изображения ESP_022405_1910 съёмочной системы High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) (McEwen et al., 2007). Пример светлых и тёмных склоновых полос (Brusnikin et al., 2016)

«Влажный» механизм объясняет формирование полос образованием небольшого количества высококонцентрированных солевых растворов в подповерхностном слое грунта Марса и его движением вниз по склону. Исследование данных дистанционного зондирования (ДДЗ) Марса в спектральных диапазонах не показало явных признаков различия состава полос и поверхности склона, на котором они сформированы. Ни один из механизмов пока ещё не объясняет все наблюдаемые особенности склоновых полос.

Измерения новых склоновых полос

Мы выполнили анализ областей наиболее активного формирования склоновых полос (Sullivan et al., 2001) и выбрали регионы с высокой плотностью ДДЗ и минимальными временными интервалами между съёмками поверхности Марса. Для идентификации новых склоновых полос и определения сезона их формирования (долгота солнца, *Ls*) мы использовали изображения камеры Thermal Emission Imaging System (THEMIS) (Christensen et al., 2004) орбитального аппарата Mars Odyssey и Context Camera (CTX) (Malin et al., 2007) спутника Mars Reconnaissance Orbiter (McEwen et al., 2007) с разрешением от 3 до 20 м/пиксель, что позволило идентифицировать новые склоновые полосы длиной от 10 м. Для исследования новых склоновых полос были выбраны 20 регионов (*табл. 1, рис. 2,* см. с. 265), всего мы отобрали 341 изображение CTX и THEMIS в диапазоне от 6° ю. ш. до 36° с. ш.

Nº	Широта, град	Долгота, град	Высота, м	Количество изображений	Первое изображение	Последнее изображение	Количество новых полос
1	0	-165	-4000	46	09.22.2005	15.11.2018	52
2	22	-137	450	27	04.08.2004	20.08.2018	27
3	-5	-150	-1500	12	13.10.2002	03.04.2018	167
4	9	40	750	12	19.03.2009	28.01.2018	34
5	11	26	-350	14	13.04.2003	05.12.2016	38
6	9	40	-450	18	01.02.2006	25.06.2017	31
7	-3	-121	5200	14	17.02.2003	05.07.2018	39
8	18	-117	2200	13	12.05.2002	10.06.2018	38
9	10	31	-320	17	01.06.2003	06.04.2018	36
10	20	28	-1200	10	24.05.2003	23.05.2014	31
11	27	-168	-3800	10	05.04.2003	21.06.2016	133
12	14	-132	3500	19	22.08.2004	29.10.2017	34
13	14	-160	-3500	10	15.04.2003	05.05.2014	32
14	15	-179	-4400	12	18.12.2003	14.10.2017	28
15	9	169	-4200	17	21.05.2007	30.09.2017	42
16	-6	176	-1700	16	24.11.2002	23.12.2017	33
17	27	-147	-2900	16	30.03.2007	09.08.2017	88
18	15	42	-150	15	16.11.2007	07.03.2018	43
19	0	29	800	13	10.11.2006	07.11.2017	53
20	36	-130	1800	30	28.11.2006	27.05.2018	33

Таблица 1. Регионы, в которых проводились измерения склоновых полос с использованием перекрывающихся изображений СТХ и THEMIS





Исследование многократно пересекающихся изображений позволило создать каталог новых склоновых полос, сформировавшихся за время между двумя изображениями, и проследить процесс появления полос в течение 9 марсианских лет (марсианский год — м. г.) (20 земных лет) в 20 регионах Марса. Мы измеряли координаты начала и конца склоновых полос, их направление (азимут) и временной интервал, в течение которого произошло формирование полосы (*puc. 3*, см. с. 266). На основе наблюдений была сформирована итоговая таблица (*maбл. 2*).



Рис. 3. Примеры новых склоновых полос в регионе 1 (кратер Nicholson). Мозаика изображений СТХ и THEMIS; чёрными точками обозначены новые склоновые полосы (*слева*). Увеличенные фрагменты областей до и после формирования склоновой полосы (белая стрелка) (*справа*)

Таблица 2. Таблица идентификации новых склоновых полос в 20 регионах исследования в периоды между 26 м.г. (*Ls* = 0° (18.04.2002)) и 33 м.г. (*Ls* = 270° (28.08.2018)). Серые ячейки соответствуют формированию склоновых полос в соответствующие периоды

Дата	Номер исследуемого региона из табл. 1															Марсианский					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	год/Ls
18.04.2002																					26/0°
23.06.2002																					
28.08.2002																					
03.11.2002																					26/90°
03.01.2003																					
05.03.2003																					
05.05.2003																					26/180°
23.06.2003																					
11.08.2003																					
29.09.2003																					26/270°
20.11.2003																					
12.01.2004																					

Продолжение табл. 2

Дата	Номер исследуемого региона из табл. 1														Марсианский						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	год/Ls
05.03.2004																					27/0°
10.05.2004																					
15.07.2004																					
20.09.2004																					27/90°
20.11.2004																					
20.01.2005																					
22.03.2005																					27/180°
10.05.2005																					
28.06.2005																					
16.08.2005																					27/270°
07.10.2005																					
29.11.2005																					
21.01.2006																					28/0°
28.03.2006																					
02.06.2006																					
08.08.2006																					28/90°
08.10.2006																					
08.12.2006																					
07.02.2007																					28/180°
28.03.2007																					
16.05.2007																					
04.07.2007																					28/270°
25.08.2007																					
17.10.2007																					
09.12.2007																					29/0°
13.02.2008																					
19.04.2008																					
25.06.2008																					29/90°
25.08.2008																					
25.10.2008																					
25.12.2008																					29/180°
12.02.2009																					
02.04.2009																					
21.05.2009																					29/270°
12.07.2009																					
03.09.2009																					
26.10.2009																					30/0°
31.12.2009																					
07.03.2010																					
13.05.2010																					30/90°
13.07.2010																					
12.09.2010																					

Дата Марсианский Номер исследуемого региона из табл. 1 год/Ls 7 12 13 14 15 19 20 1 2 3 4 5 6 8 9 10 11 16 17 18 12.11.2010 30/180° 31.12.2010 18.02.2011 08.04.2011 30/270° 30.05.2011 22.07.2011 13.09.2011 31/0° 18.11.2011 23.01.2012 30.03.2012 31/90° 30.05.2012 30.07.2012 29.09.2012 31/180° 17.11.2012 05.01.2013 23.02.2013 31/270 16.04.2013 08.06.2013 31.07.2013 32/0° 05.10.2013 10.12.2013 15.02.2014 32/90° 17.04.2014 17.06.2014 17.08.2014 32/180° 05.10.2014 23.11.2014 11.01.2015 32/270° 04.03.2015 26.04.2015 18.06.2015 33/0° 23.08.2015 28.10.2015 03.01.2016 $33/90^{\circ}$ 04.03.2016 04.05.2016 04.07.2016 33/180° 22.08.2016 10.10.2016 28.11.2016 33/270° 19.01.2017 13.03.2017

Продолжение табл. 2

Окончание табл. 2

Дата		Номер исследуемого региона из табл. 1 Ма															Марсианский				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	год/Ls
05.05.2017																					34/ 0°
10.07.2017																					
14.09.2017																					
20.11.2017																					34/90°
20.01.2018																					
22.03.2018																					
22.05.2018																					37/180
10.07.2018																					
28.08.2018																					

Результаты измерений новых склоновых полос

На перекрывающихся изображениях нам удалось найти более 1000 новых склоновых полос в 20 регионах Марса длиной от 10 до 2000 м. На *рис. 4* показана диаграмма распределения новых склоновых полос в зависимости от направления склонов, на которых они сформировались. Большее количество полос формируется на склонах с направлением уклона $100-120^{\circ}$ и 200– 300° , что согласуется с результатами исследований (Heyer et al., 2019).





Рис. 4. Соотношение количества склоновых полос в зависимости от ориентации склонов, на которых они сформировались

Рис. 5. Фрагменты изображений СТХ P21_009371_1802_ XN_00N164W и P22_009516_1801_XN_00N164W. Пример новой склоновой полосы (белая стрелка), сформировавшейся в период 26.07.2008–06.08.2008 (103,6 < *Ls* < 108,6°)) в кратере Nicholson

Измерения показывают, что формирование склоновых полос происходит в течение всего года на Марсе, при этом оно наиболее активно при $100 < Ls < 200^{\circ}$, что относится к весеннему, летнему и осеннему сезонам в северном полушарии Марса, когда температура на поверхности планеты в экваториальных районах может достигать 290 К. Наиболее активное формирование полос происходило в период 29–31 м.гг. (февраль 2008 г. – июль 2013 г.). Наибольшее количество полос нам удалось идентифицировать в регионе Padus Vallis -5° ю.ш., 150° з.д. – 94 шт. за 2 м.г.

Наиболее быстро сформировавшуюся полосу мы смогли идентифицировать по двум изображениям, полученным съёмочной системой СТХ в кратере Nicholson (*puc. 5*). Полоса длиной 325 м образовалась на внутренней стенке кратера с северо-восточным уклоном. Найденная полоса сформировалась за 11 дней и 4 ч между изображениями.

Исследование климатических условий в местах формирования склоновых полос

Модель атмосферы Mapca Mars Climate Database v.5.3 (MCD) (Forget et al., 1999; Millour et al., 2015) представляет собой значения метеорологических переменных, рассчитываемых на основе Глобальной климатической модели (*анел*. Global climate model — GCM) циркуляции атмосферы Mapca с пространственным разрешением ~5×3° (Millour et al., 2015). Из-за низкого разрешения GCM (*анел*. General Circulation Model —модель глобальной циркуляции) в MCD для вычисления поправок на рельеф учитываются данные о высоте местности альтиметра Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) (32 пиксель/град).

На *рис. 6* (см. с. 271) представлены диаграммы определяемых характеристик атмосферы Марса в регионах исследования 1 (А), 3 (Б), 4 (В), 7 (Г), 19 (Д) и 20 (Е).

Значения параметров атмосферы и погодные условия на поверхности Марса меняются в течение года и солов. Формирование полос происходит в периоды как увеличения, так и уменьшения средних годовых температурных значений, однако большое количество полос сформировалось в интервале $100 < Ls < 200^{\circ}$ (весна – лето – осень в северном полушарии). В дневное время в экваториальных регионах Марса температура поверхности может подниматься до 300 К и в ночное время опускаться до 150 К, достигая разницы в 150 К. Разница давления в течение сола может достигать 50 Па. Последствиями таких погодных изменений становится образование ветра и вихрей в утренние и вечерние часы.

На диаграммах A и Б (регионы 1 и 3, см. *рис. 6*) в течение всего периода наблюдений расчётное атмосферное давление на поверхности Марса выше 611 Па, а максимальная температура в течение суток может подниматься до 290 К. Условия могут быть достаточны для существования жидких водяных рассолов как результата таяния водяного льда в подповерхностном слое Марса (выше тройной точки воды (температуры T = 0,01 °C = 273,15 К и давления P = 611,657 Па)) (Baratoux et al., 2006; Chuang et al., 2010). В регионах В, Г, Д, Е атмосферное давление находится в диапазоне 340–570 Па, при таких условиях водяной лёд сублимируется в водяной пар, минуя жидкую фазу. Однако формирование полос во всех регионах происходит, прежде всего, в периоды максимальных значений атмосферного давления или в периоды его резких сезонных изменений.

Мы выбрали 7 примеров наиболее коротких временных интервалов, за которые произошло формирование склоновых полос в регионах Марса, и определили погодные условия в атмосфере с помощью MCD (*puc*. 7, см. с. 272).

В регионах 1, 2, 4 возможно существование воды как жидкости на поверхности, однако в течение небольшой части солнечного дня, если в подповерхностном слое имеется достаточное количество водяного льда, вниз по склону вполне могут распространяться высококонцентрированные водные рассолы. Однако временные интервалы появления склоновых полос никак не соотносятся с сезонным увеличением или уменьшением средних температур в течение марсианского года. Тогда логичнее было предположить, что таяние водяного льда должно происходить в периоды смены холодного сезона на тёплый или в дни максимальной годовой температуры на поверхности Марса.

В регионах 7, 8, 12 даже существование водяного льда в сантиметровом подповерхностном слое может быть нестабильно. Такие условия делают возможным существование жидкостей на основе воды лишь в глубоком, подповерхностном слое. Так как вода присутствует в атмосфере в виде водяного пара, при наличии солей в подповерхностном слое молекулы воды могут аккумулироваться на поверхности солевых кристаллов, формируя залежи водяного льда. Однако недостаточное атмосферное давление делает существование воды в виде жидкости маловероятным.

В регионах 2 и 5 в середине солнечного дня условия на поверхности близки к тройной точке воды, однако большую часть сола вода может стабильно присутствовать в подповерхностном слое в виде водяного льда. Настолько разные погодные условия для существования воды в любом её состоянии ставят под сомнение действительное влияние водяных растворов на процесс формирования склоновых полос.



Рис. 6. Диаграммы атмосферного давления (серые бары) и температуры на поверхности Марса в регионах 1–4, 7, 19, 20 (см. *табл. 2*): верхние границы свечей — средняя температура между 11:00 и 18:00 местного времени; нижние границы свечей — средняя температура за марсианский сол; верхние тени свечей — максимальные возможные значения температуры; нижние тени свечей — минимальная возможная температура поверхности; шаг — 20° *Ls* 28–32 м. гг. Серые клетки — индикатор формирования склоновых полос в интервал времени



Рис. 7. График атмосферного давления P (Па) и температуры T (К) в течение 7 временных интервалов: 1 — 26.07.2008—06.08.2008 (103,6 < Ls < 108,6°); 2 — 26.10.2011—29.11.2011 (20,4 < Ls < 36,1°); 4 — 10.02.2015—15.03.2015 (288,3 < Ls < 308,1°); 5 — 09.07.2009—25.07.2009 (299,8 < Ls < 309,3°); 7 — 26.04.2008—29.07.2009 (103,6 < Ls < 108,6°); 8 — 29.05.2018—10.06.2018 (183,5 < Ls < 190,4°); 12 — 18.04.2016—12.08.2016 (138,9 < Ls < 202,2°) в регионах Марса (см. *табл. 2*). Точка 1 — тройная точка воды; синяя линия — линия сублимации и десублимации; зелёная — линяя таяния и замерзания; красная линия — испарения и конденсации

В каждом из рассматриваемых примеров погода в течение сола пересекает линии сублимации, десублимации, таяния и замерзания водяного льда, что может играть определённую роль в движениях подповерхностного слоя при переходе воды из одного агрегатного состояния в другое.

Результаты

Формирование склоновых полос на Марсе происходит в течение всего марсианского года. Наиболее активное формирование полос происходило при $100 < Ls < 200^{\circ}$.

Наиболее быстро сформировавшуюся полосу мы смогли обнаружить на двух изображениях CTX (P21_009371_1802_XN_00N164W и P22_009516_1801_XN_00N164W): полоса длиной 325 м сформировалась в период 26.07.2008-06.08.2008 (103,6 < Ls < 108,6°). Скорость распространения склоновой полосы за такой короткий период говорит о высокой динамике процесса формирования полос.

Формирование склоновых полос коррелирует с максимальными годовыми значениями атмосферного давления и наиболее резкой его сменой в межсезонье, а также соответствует весеннему, летнему и осеннему сезонам в северном полушарии Марса.

Наше исследование формирования склоновых полос и годовых климатических параметров атмосферы Марса показало, что в большинстве выбранных регионов исследования значения параметров атмосферы недостаточны для стабильного существования водных рассолов на поверхности. Однако там, где это возможно, движение небольшого количества жидкости может спровоцировать сход лавины сухого материала по склону, придав ему начальный импульс.

Склоновые полосы могут быть вызваны разницей атмосферного давления до 200 Па в течение смены сезонов в северном полушарии Марса. Сезонные перепады давления могут создавать движения подповерхностного слоя грунта и провоцировать движение неустойчивых частей склона около источника тёмного материала, находящегося близко к поверхности, и оголять подповерхностный слой грунта. В таком случае «течение» сухого материала по склону можно описать в рамках «сухого» механизма формирования полос и взаимодействия сухих гранулированных потоков грунта и пыли на поверхности Mapca.

Проведённые нами исследования не позволяют однозначно определить, какой процесс или событие могло стать причиной появления склоновых полос во всех регионах наблюдения. Можно предположить, что формирование полос в некоторых регионах может происходить как результат таяния водяного льда в подповерхностном слое грунта, а в некоторых случаях склоновые полосы могут быть последствиями каких-либо других событий, как, например, смена атмосферного давления в межсезонье или активность ветра на поверхности Марса в течение солов. Такие события могут вызвать движение на поверхности склона и провоцировать движение сухого потока от источника вниз по склону. Вероятно, описать причины формирования и все особенности склоновых полос можно взаимодействием определённых типов сухих гранулированных смесей (например, базальтовых пород как источника тёмного материала) и верхнего сверхлёгкого мелкофракционного слоя пыли на поверхности склонов. Более подробное изучение физических характеристик доступных примеров грунта Марса для *in situ* исследований позволит описать такие особенности полос, как преодоление небольших препятствий, кластеризация потоков, движение по пологим склонам и существование в течение десятилетий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-35-00210 «Изучение влияния климатических условий на процесс формирования склоновых полос на Марсе».

Литература

- 1. Baratoux D., Mangold N., Forget F., Cord A., Pinet P., Daydou Y., Jehl A., Masson P., Neukum G., The HRSC CO-Investigator Team. The role of the wind-transported dust in slope streaks activity: evidence from the HRSC data // Icarus. 2006. V. 183. No. 1. P. 30–45. DOI: 10.1016/j.icarus.2006.01.023.
- 2. Brusnikin E., Kreslavsky M., Zubarev A., Patratiy V., Krasilnikov S., Head J., Karachevtseva I. Topographic measurements of slope streaks on mars // Icarus. 2016. V. 278. P. 52–61. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.06.005.
- Christensen P. R., Jakosky B. M., Kieffer H. H., Malin M. C., McSween H. Y., Nealson K., Mehall G. L., Silverman S. H., Ferry S., Caplinger M., Ravine M. The Thermal Emission Imaging System (THEMIS) for the Mars 2001 Odyssey Mission // Space Science Reviews. 2004. V. 110(1). P. 85–130. DOI: 10.1023/B:SP AC.0000021008.16305.94.
- 4. *Chuang F. C., Beyer R.A., McEwen A. S., Thomson B.J.* HiRISE observations of slope streaks on Mars // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. DOI: 10.1029/2007GL031111.
- 5. *Chuang F. C., Beyer R. A., Bridges N. T.* Modification of Martian slope streaks by eolian processes // Icarus. 2010. V. 205. P. 154–164. DOI: 10.1016/j.icarus.2009.07.035.
- Demidov N. E., Bazilevskii A. T., Kuzmin R. O. Martian soils: Varieties, structure, composition, physical properties, drillability, and risks for landers // Solar System Research. 2015. V. 49. P. 209–225. DOI: 10.1134/S0038094615040024.
- 7. *Ferguson H. M., Lucchitta B. K.* Dark streaks on talus slopes // Washington Dept. of Planetary Geological Programs. 1984. P. 188–190.
- Forget F., Hourdin F., Fournier R., Hourdin C., Talagrand O., Collins M., Lewis S. R., Read P. L., Huot J. P. Improved general circulation models of the Martian atmosphere from the surface to above 80 km // J. Geophysical Research. 1999. V. 104. P. 24155–24175. DOI: 10.1029/1999JE001025.
- 9. *Heyer T., Kreslavsky M., Hiesingera H., Reissa D., Bernhardtc H., Jaumann R.* Seasonal formation rates of Martian slope streaks // Icarus. 2019. V. 323. P. 76–86. DOI: 10.1016/j.icarus.2019.01.010.
- Kieffer H. H., Gemini N. Annual punctuated CO₂ slab-ice and jets on Mars // 2nd Intern. Conf. Mars Polar Science and Exploration. 21–25 Aug. 2000. V. 1057. URL: https://www.lpi.usra.edu/meetings/polar2000/ pdf/4095.pdf.
- 11. *Kreslavsky M., Head J.* Slope streaks on Mars: A new "wet" mechanism // Icarus. 2009. V. 201. P. 517–527. DOI: 10.1016/j.icarus.2009.01.026.
- Malin M. C., Bell J. F., Cantor B. A., Caplinger M. A., Calvin W. M., Clancy R. T., Edgett K. S., Edwards L., Haberle R. M., James P. 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 Planets. 2007. V. 112. DOI: 10.1029/2006JE002808.

- McEwen A. S., Eliason E. M., Bergstrom J. W., 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) // J. Geophysical Research: Planets. 2007. V. 112. P. 1–40. DOI: 10.1029/2005JE002605.
- McEwen A. S., Ojha L., Dundas C. M., Mattson S. S., Byrne S., Wray J. J., Cull S. C., Murchie S. L., Thomas N., Gulick V. C. Seasonal Flows on Warm Martian Slopes // Science. 2011. V. 333. P. 740–743. DOI: 10.1126/ science.1204816.
- 15. Millour E., Forget F., Spiga A., Navarro T., Madeleine J.-B., Montabone L., Lefèvre F., Chaufray J.-Y., Lopez-Valverde M.A., González-Galindo F., Lewis S. R., Read P.L., Desjean M.-C., Huot J.-P. The Mars Climate Database (MCD version 5.2) // European Planetary Science Congress. 2015. V. 10. P. 1184–1185.
- Morris E. C. Aureole deposits of the Martian volcano Olympus Mons // J. Geophysical Research. 1982. V. 87. P. 1164–1178. DOI: 10.1029/JB087iB02p01164.
- Mushkin A., Gillespie A. R., Montgomery D. R., Schreiber B. C., Arvidson R. E. Spectral constraints on the composition of low-albedo slope streaks in the Olympus Mons Aureole // Geophysical Research Letters. 2010. V. 37. P. 1–5. DOI: 10.1029/2010GL044535.
- 18. *Phillips C., Burr D., Beyer R.* Mass movement within a slope streak on Mars // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. DOI: 10.1029/2007GL031577.
- 19. Schorghofer N., King C. M. Sporadic formation of slope streaks on Mars // Icarus. 2011. V. 216. P. 159–168. DOI: 10.1016/j.icarus.2011.08.028.
- 20. Schorghofer N., Aharonson O., Gerstell M. F., Tatsumi L. Three decades of slope streak activity on Mars // Icarus. 2007. V. 191. P. 132–140. DOI: 10.1016/j.icarus.2007.04.026.
- 21. Sullivan R., Thomas P., Veverka J., Malin M., Edgett K. S. Mass movement slope streaks imaged by the Mars Orbiter Camera // J. Geophysical Research. 2001. V. 106. P. 23607–23634. DOI: 10.1029/2000JE001296.
- 22. *Thomas P., Gierasch P.J.* Dust devils on Mars // Science. 1985. V. 230. P. 175–177. DOI: 10.1126/ science.230.4722.175.

Study of climate conditions on Martian surface during the formation of slope streaks

E. S. Brusnikin, K. E. Caballero Enrique, N. A. Kozlova

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow 105064, Russia E-mail: brusnikin@yahoo.com

Slope streaks on Mars are enigmatic and unique kind of features observed only on this planet and their formation on the Martian surface is still active. To explain this Martian phenomenon two opposite mechanisms of slope streaks formation have been proposed: "dry" (Sullivan et al., 2001) and "wet" (Kreslavsky, Head, 2009). But none of the mechanisms has yet explained all the observed characteristics of the slope streaks. In work describes the results of investigations the process of formations of slope streaks on Mars for a few Martian years. We used intersecting images from the THEMIS and CTX scanning imaging systems. In area of overlapping images we determined the time intervals when new slope streaks appear on the surface of Mars. Using information about the time intervals of slope streaks formations, we determined the conditions of Mars atmosphere when slope streaks formation was more activity using the Mars Climate Database.

Keywords: Mars, slope streaks, Mars Climate Database, climate of Mars

Accepted: 21.06.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-263-275

References

1. Baratoux D., Mangold N., Forget F., Cord A., Pinet P., Daydou Y., Jehl A., Masson P., Neukum G., The HRSC CO-Investigator Team, The role of the wind-transported dust in slope streaks activity: evidence from the HRSC data, *Icarus*, 2006, Vol. 183, No. 1, pp. 30–45, DOI: 10.1016/j.icarus.2006.01.023.

- 2. Brusnikin E., Kreslavsky M., Zubarev A., Patratiy V., Krasilnikov S., Head J., Karachevtseva I., Topographic measurements of slope streaks on mars, *Icarus*, 2016, Vol. 278, pp. 52–61, DOI: 10.1016/j. icarus.2016.06.005.
- Christensen P. R., Jakosky B. M., Kieffer H. H., Malin M. C., McSween H. Y., Nealson K., Mehall G. L., Silverman S. H., Ferry S., Caplinger M., Ravine M., The Thermal Emission Imaging System (THEMIS) for the Mars 2001 Odyssey Mission, *Space Science Reviews*, 2004, Vol. 110(1), pp. 85–130, DOI: 10.1023/B: SPAC.0000021008.16305.94.
- 4. Chuang F.C., Beyer R.A., McEwen A.S., Thomson B.J., HiRISE observations of slope streaks on Mars, *Geophysical Research Letters*, 2007, Vol. 34, DOI: 10.1029/2007GL031111.
- 5. Chuang F.C., Beyer R.A., Bridges N.T., Modification of Martian slope streaks by eolian processes, *Icarus*, 2010, Vol. 205, pp. 154–164, DOI: 10.1016/j.icarus.2009.07.035.
- Demidov N. E., Bazilevskii A. T., Kuzmin R. O., Martian soils: Varieties, structure, composition, physical properties, drillability, and risks for landers, *Solar System Research*, 2015, Vol. 49, pp. 209–225, DOI: 10.1134/S0038094615040024.
- 7. Ferguson H. M., Lucchitta B. K., Dark streaks on talus slopes, *Washington Dept. of Planetary Geol. Programs*, 1984, pp. 188–190.
- Forget F., Hourdin F., Fournier R., Hourdin C., Talagrand O., Collins M., Lewis S. R., Read P. L., Huot J. P., Improved general circulation models of the Martian atmosphere from the surface to above 80 km, *J. Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, pp. 24155–24175, DOI: 10.1029/1999JE001025.
- 9. Heyer T., Kreslavsky M., Hiesingera H., Reissa D., Bernhardtc H., Jaumann R., Seasonal formation rates of Martian slope streaks, *Icarus*, 2019, Vol. 323, pp. 76–86, DOI: 10.1016/j.icarus.2019.01.010.
- Kieffer H. H., Gemini N., Annual punctuated CO₂ slab-ice and jets on Mars, 2nd Intern. Conf. Mars Polar Science and Exploration, 21–25 Aug. 2000, Vol. 1057, available at: https://www.lpi.usra.edu/meetings/polar2000/pdf/4095.pdf.
- 11. Kreslavsky M., Head J., Slope streaks on Mars: A new "wet" mechanism, *Icarus*, 2009, Vol. 201, pp. 517–527, DOI: 10.1016/j.icarus.2009.01.026.
- Malin M. C., Bell J. F., Cantor B.A., Caplinger M.A., Calvin W. M., Clancy R. T., Edgett K. S., Edwards L., Haberle R. M., James P. 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 Planets*, 2007, Vol. 112, DOI: 10.1029/2006JE002808.
- McEwen A. S., Eliason E. M., Bergstrom J. W., 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), *J. Geophysical Research: Planets*, 2007, Vol. 112, pp. 1–40, DOI: 10.1029/2005JE002605.
- McEwen A. S., Ojha L., Dundas C. M., Mattson S. S., Byrne S., Wray J. J., Cull S. C., Murchie S. L., Thomas N., Gulick V. C., Seasonal Flows on Warm Martian Slopes, *Science*, 2011, Vol. 333, pp. 740–743, DOI: 10.1126/science.1204816.
- Millour E., Forget F., Spiga A., Navarro T., Madeleine J.-B., Montabone L., Lefèvre F., Chaufray J.-Y., Lopez-Valverde M.A., González-Galindo F., Lewis S. R., Read P. L., Desjean M.-C., Huot J.-P., The Mars Climate Database (MCD version 5.2), *European Planetary Science Congress*, 2015, Vol. 10, pp. 1184–1185.
- 16. Morris E. C., Aureole deposits of the Martian volcano Olympus Mons, *J. Geophysical Research*, 1982, Vol. 87, pp. 1164–1178, DOI: 10.1029/JB087iB02p01164.
- 17. Mushkin A., Gillespie A. R., Montgomery D. R., Schreiber B. C., Arvidson R. E., Spectral constraints on the composition of low-albedo slope streaks in the Olympus Mons Aureole, *Geophysical Research Letters*, 2010, Vol. 37, pp. 1–5, DOI: 10.1029/2010GL044535.
- 18. Phillips C., Burr D., Beyer R., Mass movement within a slope streak on Mars, *Geophysical Research Letters*, 2007, Vol. 34, DOI: 10.1029/2007GL031577.
- 19. Schorghofer N., Aharonson O., Gerstell M. F., Tatsumi L., Three decades of slope streak activity on Mars, *Icarus*, 2007, Vol. 191, pp. 132–140, DOI: 10.1016/j.icarus.2007.04.026.
- Schorghofer N., King C. M., Sporadic formation of slope streaks on Mars, *Icarus*, 2011, Vol. 216, pp. 159– 168, DOI: 10.1016/j.icarus.2011.08.028.
- Sullivan R., Thomas P., Veverka J., Malin M., Edgett K.S., Mass movement slope streaks imaged by the Mars Orbiter Camera, *J. Geophysical Research*, 2001, Vol. 106, pp. 23607–23634, DOI: 10.1029/2000JE001296.
- 22. Thomas P., Gierasch P.J., Dust devils on Mars, *Science*, 1985, Vol. 230, pp. 175–177, DOI: 10.1126/ science.230.4722.175.