

Морены ледокаменных лавин на Марсе как признаки климатических изменений в последние ~0.37 – 1.3 млн. лет

н.с. Красильников Сергей Сергеевич

Лаборатория сравнительной планетологии

Введение. Отсутствие больших спутников и особенности геологической эволюции планеты Марс обуславливают значительную вариацию наклона оси вращения планеты за исторически небольшой промежуток времени. Увеличение наклона оси вращения планеты сопровождается значительными климатическими и атмосферными изменениями. Автором рассматривается эволюция северной полярной шапки Марса за последние 5 млн. лет при наклоне оси от 15° до 35° [1]. Предполагается, что в данный период происходило смещение границ полярной шапки на более низкие широты [2], признаком чего могут являться обнаруженные мореноподобные гряды.

На высоких широтах северного полушария Марса располагаются два кратера (70.3° с.ш. 266.45° в.д. (А) (рис. 1) и 67.25° с.ш. 249.45° в.д. (Б)) с диаметром ~ 30 км, с наличием на их внутренних склонах уникальных лопастевидных конечных мореноподобных гряд. На поверхности равнин, в районе 74° с.ш. 95° в.д. (В), располагается ледяной массив, в ~ 20 км к северо-западу от которого, также можно встретить мореноподобные гряды. Сходство валов на равнине и в кратерах может свидетельствовать об их едином генезисе.

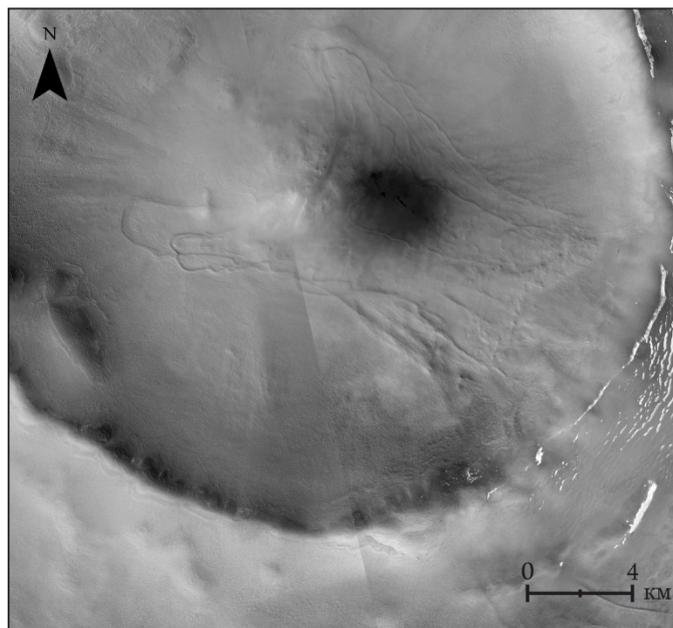


Рис. 1. Кратер А (70.3° с.ш. 266.45° в.д.) с лопастевидными мореноподобными грядами (LMLR).

Дальнепробежные ледокаменные лавины в условиях Марса. В существующих работах происхождение мореноподобных гряд связывается с вязкопластическим течением льда [3] или твердой фазы CO_2 [4] на наклонной поверхности. В исследовании было выдвинуто предположение, что их формирование связано с чрезмерным накоплением льда на наклонной поверхности и сходом дальнепробежной ледокаменной лавины или быстрого сёрджа. Основной гипотезой является образование гряд в результате схода лавины [5]. Наиболее близкие земные аналоги рассматриваемых лавин наблюдались в Кармадонском ущелье в 2002 году (Казбек, Кавказ) [6], а также в западном Тибете в 2016 году [7].

В работе был сформулирован ряд ограничений, ставящих под сомнение существующие гипотезы образования гряд [3, 4]: морфология и морфометрия боковых и конечных гряд, процессы конденсации льда и CO_2 в условиях Марса, близость ледяного тела в районе равнин 74° с.ш. 95° в.д. к рассматриваемым формам и т.д.

Для кратера А была создана цифровая модель рельефа с разрешением 10 м/пикс на основе данных съемочной системы Context Camera (CTX) при помощи метода фотограмметрии. Для подтверждения лавинного генезиса гряд было проведено моделирование схода лавины. Моделирование проводилось с использованием двух взаимодополняющих подходов: метода случайной кинетической энергии (RKE, в программе RAMMS::Avalanche) [8] и графо-аналитического метода [9]. Исходные климатические параметры для моделирования были рассчитаны по имеющейся Mars Climate Database v5.2. Стандартные параметры в программе RAMMS были изменены с

учетом физических условий на Марсе. Снежная лавина была приближена к типу снежно-ледовой лавины с высоким содержанием пылевого силикатного материала (~30%).

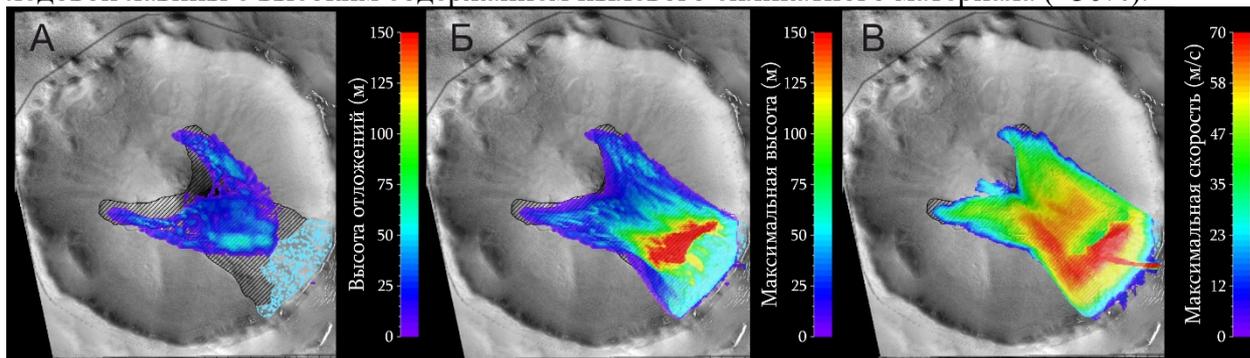


Рис. 2. Результаты моделирования методом RKE при помощи программного пакета RAMMS::Avalanche на внутреннем склоне кратера А (70.3° с.ш. 266.45° в.д.).

Модель RKE [8] позволила провести эксперимент по спуску лавины в трехмерном пространстве с учетом случайного движения и взаимодействия между частицами. Моделирование включало постепенное увеличение мощности спускаемого ледяного тела (рис. 2) до момента, когда границы распространения сошедшей лавины не совпали с границами LMLR. Графо-аналитический метод [9] включает в себя аналитический и графический подходы. Движение лавины рассматривается как движение твердого тела по наклонной поверхности с некоторым постоянным уклоном под действием силы тяжести и силы трения. Склон разделяется на прямолинейные отрезки, аппроксимирующие участки склона со сравнительно одинаковым уклоном. Сравнение результатов графо-аналитического метода и метода RKE показало незначительную разницу в скорости, не превышающую в среднем 5 – 10 м/с, тем самым обозначив взаимодополняемость двух подходов.

Результаты исследования. Присутствие форм, связанных с чрезмерным накоплением льда на широтах 67° – 70° с.ш., говорит о значительном смещении границ северной полярной шапки с ~80° с.ш. на более низкие широты. Исследованные мореноподобные гряды являются важным доказательством более холодного климата в прошлом. Формирование обособленных ледяных массивов на исследуемых широтах могло происходить в период распространения северной полярной шапки на более низкие широты ~0.37 – 1.3 млн. лет. назад [2]. В данный период локальные метеорологические условия позволили накопить массивы льда с мощностью ~200 м (борт кратера А) и ~150 м (картер В), и ~600 м на равнине. Превышение пороговой нагрузки на нижележащие слои льда привело к сдвиговой деформации нижнего слоя и сходу дальнепробежной лавины, в результате чего произошло формирование лопастевидных мореноподобных гряд [5].

Список литературы.

- [1] Laskar, J., Correia, A.C.M., Gastineau, M., et al. 2004. Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars. *Icar.*, v. 170, p. 343–364. [2] Красильников, С.С., Кузьмин, Р.О., Евдокимова, Н.А. 2018. Слоистые ледяные останцы в высоких северных широтах Марса. *Астр. вестник*, v. 52, с. 32–42. [3] Garvin, J.B., Head, J.W., Marchant, D.R., et al. 2006. High-latitude cold-based glacial deposits on Mars : Multiple superposed drop moraines in a crater interior at 70° N latitude. *Met. & Plan. Sci.*, v. 41, p. 1659–1674. [4] Kreslavsky, M.A., Head, J.W. 2011. Carbon dioxide glaciers on Mars : Products of recent low obliquity epochs (?). *Icar.*, v. 216, p. 111–115. [5] Krasilnikov, S.S., Kuzmin, R.O., Bühler, Y., et al. 2020. Formation of long-distance water ice avalanches on Mars. *PSS*, v. 186, p. 104917. [6] Evans, S.G., Tutubalina, O. V., Drobyshev, V.N., et al. 2009. Catastrophic detachment and high-velocity long-runout flow of Kolka Glacier, Caucasus Mountains, Russia in 2002. *Geomorph.*, v. 105, p. 314–321. [7] Kääh, A., Leinss, S., Gilbert, A., et al. 2018. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability. *Nat. Geos.*, v. 11, p. 114–120. [8] Christen, M., Kowalski, J., Bartelt, P. 2010. RAMMS : Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Reg. Sci. and Tech.*, v. 63, p. 1–14. [9] Козик, С.М. 1962. Расчет движения снежных лавин. *Лен., Гидромет.*, 74 р.