

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЬДА В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МАРСИАНСКОГО РЕГОЛИТА НА ЭКВАТОРЕ МАРСА ПОД ВЛИЯНИЕМ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НАКЛОНЕНИЯ ОСИ ВРАЩЕНИЯ ПЛАНЕТЫ

Кузьмин Р.О., Забалужева Е.В.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва
rok@geokhi.ru

Вестник Отделения наук о Земле РАН, № 1(20) 2002

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2002/informbul-1.htm#planet-5

Введение

Мерзлота на Марсе имеет глобальное распространение, а ее мощность может составлять от 1-2 км на экваторе и до 6 км в полярных областях [1,2]. Это один из крупнейших на планете резервуаров льда воды, солевых растворов и газгидратов [2,3]. При современных климатических условиях Марса лед в поверхностном слое реголита может стабильно существовать в обоих полушариях планеты лишь только на широтах более 40° [2,4]. Внутри широтного пояса $\pm 40^\circ$ лед полностью сублимирует из реголита до глубины около 100 м из-за существующего дефицита содержания водяного пара в атмосфере. Дефицит вызван тем, что среднегодовые температуры поверхности в этом широтном поясе (220K) существенно превышают температуру вымораживания водяного пара (196K), содержащегося в атмосфере. Глубже 100 м (примерно до 400 м) находится переходный слой, где лед все еще устойчив и его содержание может возрастать с глубиной от нескольких процентов порового пространства до полного заполнения пор [5].

Под действием приливного влияния на Марс Солнца и других планет, его орбитальные параметры (эксцентриситет орбиты, долгота положения перигелия и наклонение оси вращения планеты) испытывают значительные осцилляции во времени, что приводит к квазипериодическим колебаниям марсианского климата [6,7,8]. При этом колебания наклонения оси вращения планеты оказывают наиболее сильное воздействие на климат Марса [6,7]. Эти колебания наклонения (от 13° до 40°), происходят с периодичностью 1.2×10^5 лет на фоне более длительной гармоник в 2.5×10^6 лет (рис.1). При высоких значениях этого параметра происходит повышение среднегодовых температур поверхности на высоких широтах и понижение их на низких. При этом содержание водяного пара в атмосфере Марса увеличивается в сотни раз, а температура вымораживания водяного пара возрастает на величину в несколько десятков градусов [8]. Поскольку в этот период времени среднегодовые температуры поверхности на низких широтах (200-205K) заметно ниже температуры вымерзания водяного пара (около 230K), происходит направленная диффузия водяного пара из атмосферы в поверхностный слой реголита, что может приводить к заполнению порового пространства льдом [8]. При минимальных значениях наклонения оси вращения марса (менее 25°) проявляется обратная тенденция - происходит иссушение поверхностного слоя реголита по причине сублимации льда.

Численное моделирование

С целью понимания динамики и масштаба перераспределения льда в верхних горизонтах марсианской мерзлоты в экваториальной зоне планеты как функции квазипериодических колебаний климата, нами проведено численное моделирование процесса диффузионного переноса влаги в системе атмосфера-реголит (с нижней границей на глубине 400 м) за период времени в 5 млн. лет. Решалась одномерная задача тепломассопереноса с переменными коэффициентами диффузии и теплопроводности и соответствующими граничными и начальными условиями. Рассматривалась диффузия водяного пара через пористую неизотермическую среду с квазипериодическими условиями температуры на верхней границе (атмосфера-реголит) и геотермальным потоком на нижней подвижной границе. Верхняя граница отнесена к глубине 5м (где влиянием суточных и сезонных колебаний температур и содержания атмосферного пара можно пренебречь), а нижняя к глубине 400м. Диффузия водяного пара в реголите (с учетом фазовых состояний воды: пар, адсорбированная влага и лед) приводит к перераспределению первоначально залегающего льда и отступлению нижней

границы, где отток водяного пара компенсируется сублимацией льда из ниже лежащего горизонта, поры которого полностью заполнены льдом. Решение системы уравнений теплопроводности и диффузии выполнено методом конечных разностей по неявной схеме. При расчете баланса фаз использовались кривая адсорбции (функция упругости водяного пара и температуры) и фазовая кривая пар/лед (функция температуры).

Обсуждение результатов

Согласно полученным результатам численного моделирования, процесс перераспределения льда в верхнем горизонте реголита, вызванного колебаниями значений наклона оси вращения планеты за одну гармонику (125 тыс. лет), наиболее заметен в слое мощностью около 30 м (см рис. 2). При этом, направленная диффузия водяного пара из атмосферы внутрь реголита, приводящая к частичному заполнению пор льдом, возникала в период времени, когда Марс имеет высокие значения наклона (более 30°). Как видно на рис.2, в такой период времени наибольшее содержание льда в реголите (20-40% от объема пор) может быть приурочено к поверхностному слою мощностью до 10 м. Продолжительность этого периода составляет примерно 65 тыс. лет. В период низких значений наклона оси вращения Марса (менее 25°), когда процесс диффузионного переноса водяного пара направлен из реголита в атмосферу, верхние горизонты реголита сильно иссушались благодаря сублимации порового льда. Длительность такого периода составляет примерно 55 тыс. лет.

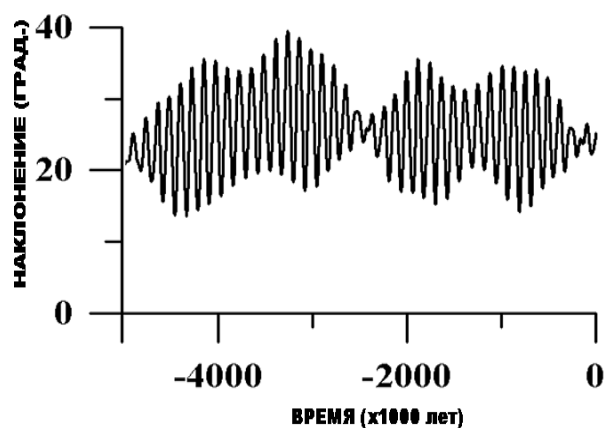


Рис.1. Квазипериодические колебания наклона оси вращения Марса за последний период времени в 5 млн. лет (по [8])

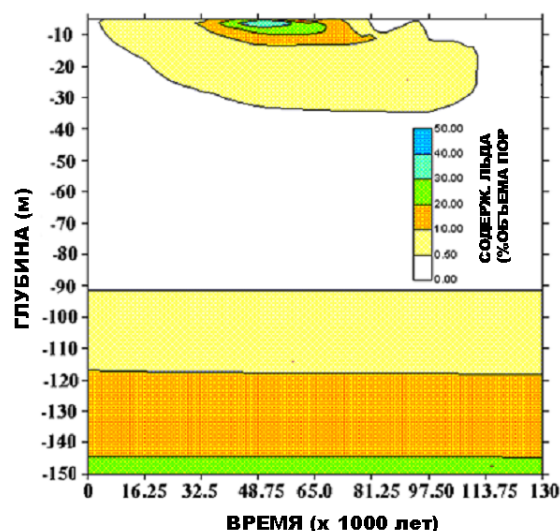


Рис.2. Динамика содержания льда в марсианском реголите за одну гармонику колебаний наклона оси вращения планеты (период в 125 тыс. лет).

Периодическое обогащение поверхностного слоя реголита льдом могло приводить к сокращению температурного градиента по разрезу реголита и, тем самым, способствовать усилению устойчивости льда в более глубоких горизонтах реголита. Эпизодическое появление льда в поверхностном слое реголита могло заметно менять интенсивность процессов химического и физического выветривания поверхностного материала, а так же могло приводить к затуханию активности эоловых процессов на планете. В такие периоды процессы эолового переноса материала и дефляции на поверхности Марса должны были существенно ослабевать поскольку, эоловые отложения, сформированные ранее, подвергались цементации льдом и теряли способность к перемещению под воздействием ветра. Кроме того, повышенное содержание водяного пара в атмосфере, возникающее при высоких значениях наклона, могло конденсироваться на пылевых частицах в атмосфере и осаждаться на поверхность в форме снежно-пылевых отложений, перекрывающих ранее сформированные формы рельефа. То есть, в такие периоды времени на экваторе Марса, по-видимому, возникала благоприятная ситуация для формирования покровных отложений из тонкозернистого материала, наподобие земных лессов.

Литература

1. *Fanale, F.P.* Martian Volatiles: Their Degassing History and Geochemical Fate // *Icarus*. 1976. V.28. №.1. P.157-174.
2. *Кузьмин Р.О.* Криолитосфера Марса. М.: Наука, 1983. 144 с.
3. *Кузьмин Р.О., Забалуева, Е.В.* О солевых растворах в криолитосфере Марса // *Астрономический Вестник*. 1998. Т. 32. №3. С.213-225.
4. *Fanale, F.P. et al.* Global distribution and migration of subsurface ice on Mars // *Icarus*. 1986. V. 67. № 1. P.1-18.
5. *Zolotov, M.Yu., Zabalueva, E.V., Kuzmin, R.O.* Stability of hydrated salts and goethite within the desiccated upper layer of the Martian regolith // *Abstracts of XXVIII LPSC*. 1997. P.1633-1634.
6. *Ward, W.R.* Climatic variations on Mars, 1. Astronomical theory of insolation // *J. Geophys. Res.*, 1979. V.79. P.3375-3386.
7. *Toon, O.B. et al.* The astronomical theory of climate change on Mars // *Icarus*. 1980. V.44. P.552-607.
8. *Mellon, M.T., Jakovsky, B.M., Postawko, S.E.* The persistence of equatorial ground ice on Mars // *J. Geophys. Res.* 1997. V.102. P.19,357-19,369.