

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК НА ЛУНЕ

А.А. Бережной

Государственный Астрономический Институт им. Штернберга

Существование льда на Луне на дне полярных кратеро-холодных ловушек, никогда не освещаемых прямыми солнечными лучами, впервые была высказана в работе (Watson et al., 1961). Интерес к этой проблеме значительно усилился после сообщения (Feldman et al., 1998) об обнаружении избытка водородсодержащих соединений в полярных областях на Луне при проведении нейтронной спектроскопии с борта КА "Лунар Проспектор". Исследования лунного льда имеют значительный научный и практический интерес. В связи с планами создания лунной базы становится актуальной проблема поиска и добычи водорода на Луне, являющегося основным компонентом ракетного топлива, и воды, необходимой при жизнедеятельности космонавтов.

В работе (Vasavada et al., 1999) подробно исследуется стабильность летучих соединений в полярных регионах на Луне и Меркурии относительно сублимации на поверхности холодных ловушек. Однако летучие соединения могут существовать в ловушках и под поверхностью, так как в данном случае менее эффективны механизмы удаления летучих соединений: микрометеоритная бомбардировка, космические лучи, сублимация.

Рассмотрим вопрос о зависимости температуры реголита от глубины в холодных ловушках. Примем, что концентрация льда не зависит от глубины, а вкладом в теплопроводность реголита других возможных компонентов льда CO_2 и SO_2 можно пренебречь. Теплопроводность смеси льда с реголитом χ_{mix} рассчитывалась по следующей формуле, используемой при расчете теплопроводности мерзлых грунтов на Земле и на Марсе

$$\chi_{\text{mix}} = C_{\text{ice}}\chi_{\text{ice}} + (1 - C_{\text{ice}})\chi_{\text{reg}}$$

где χ_{ice} , χ_{reg} - теплопроводность льда и сухого реголита соответственно. Расчет температуры грунта будем вести в рамках следующих предположений: тепловой поток из недр Луны $k = 2.2 \cdot 10^{-3}$ Вт/м², теплопроводность реголита зависит от глубины также, как в местах посадки "Аполлона-15" и "Аполлона-17" (Лангсет, Кейм, 1972), а от температуры также, как по данным (Cremers, Hsia, 1974).

Предположение об одинаковой теплопроводности реголита в экваториальных и полярных областях предполагает сходный механизм их образования. Однако лунный реголит в экваториальных районах Луны формировался под действием микрометеоритной бомбардировки и значительных суточных колебаний температуры. В

холодных ловушках после падения кометы на Луну может образовываться значительный слой льда, защищающий силикатные породы поверхностного слоя от микрометеоритной бомбардировки, а суточные колебания температуры поверхностного слоя реголита в холодных ловушках крайне малы. Предположение об одинаковой концентрации льда на разных глубинах может быть ошибочным, так как летучие соединения на глубине до нескольких сантиметров эффективно разрушаются протонами солнечного ветра и энергичными частицами галактического фона.

В работе (Arnold, 1979) оценена температура поверхности холодных ловушек - 40-90 К. Поэтому расчеты зависимости средней температуры грунта в холодной ловушке от глубины в зависимости от концентрации кристаллического водяного льда C_{ice} при этих двух вариантах средней температуры на поверхности (см. рис. 1). Так как теплопроводность поверхностного слоя реголита в экваториальных районах в $4 \cdot 10^4$ раз меньше, чем теплопроводность кристаллического водяного льда, наличие даже 0.1 % льда в поверхностном слое грунта существенно уменьшит разницу между средними температурами на поверхности и на глубине 1-2 см.

Рассмотрим теперь интенсивность удаления подповерхностных льдов из холодных ловушек. Будем считать, что удаление летучих соединений происходит только из-за сублимации льдов, причем интенсивность сублимации оценим по данным работы (Fanale, Salvail, 1989). Оценки времени испарения льдов H_2O , SO_2 , CO_2 приведены на рис. 2. Подповерхностные льды, состоящие из этих соединений, на глубинах 1-2 м сохраняются в течение геологического времени при температуре грунта менее 145, 105 и 80 К соответственно.

Итак, если температура в холодных ловушках на глубине 1–2 см практически не отличается от температуры поверхности, то в состав полярных льдов входят H_2O , SO_2 , CO_2 . Если же в холодных ловушках образуется теплоизоляционный слой, как в экваториальных районах, то температура на глубине 1–2 м на 50–60 К выше, чем на поверхности, и включение в состав полярных отложений SO_2 и CO_2 вряд ли возможно. Результаты расчетов средней температуры грунта холодных ловушек можно проверить при проведении наблюдений теплового излучения грунта холодных ловушек в области длин волн 0.1 мм - 10 см. Если будет обнаружено, что средняя яркостная температура полярных лунных районов практически не увеличивается с длиной волны, то этот факт можно рассматривать как косвенное доказательство наличия водяного льда.

ЛИТЕРАТУРА

Лангсет М. С., Кейм С. Дж. Непосредственные измерения теплового потока на Луне// Космохимия Луны и планет, с. 200–209, М., Наука, 1972

Arnold J.R. Ice in the lunar polar regions, J. Geophys. Res., V. 84, No. B10, p. 5659-5668, 1979

Cremers C.J., Hsia A. Thermal conductivity of Apollo 16 lunar fines, Proc. Lunar Sci. Conf. 5th, V. 3, p. 2703-2708, 1974

Fanale F.P., Salvail J.R. Loss of water from Fobos, Geophys. Res. Lett., V. 16, No. 4, p. 287-290, 1989

Feldman W.C., Maurice S., Binder A.B. et al. Fluxes of Fast and Epithermal Neutrons from Lunar Prospector: Evidence for Water Ice at the Lunar Poles, Science, V. 281, No. 5382, p. 1496-1500, 1998

Vasavada A.R., Paige D.A., Wood S.E. Near-Surface Temperatures on Mercury and the Moon and the Stability of Polar Ice Deposits, Icarus, V. 141, p. 179-193, 1999

Watson K., Murray B.C., Brown H., The behavior of volatiles on the lunar surface, J. Geophys. Res., V. 66, No. 9, p. 3033-3045, 1961

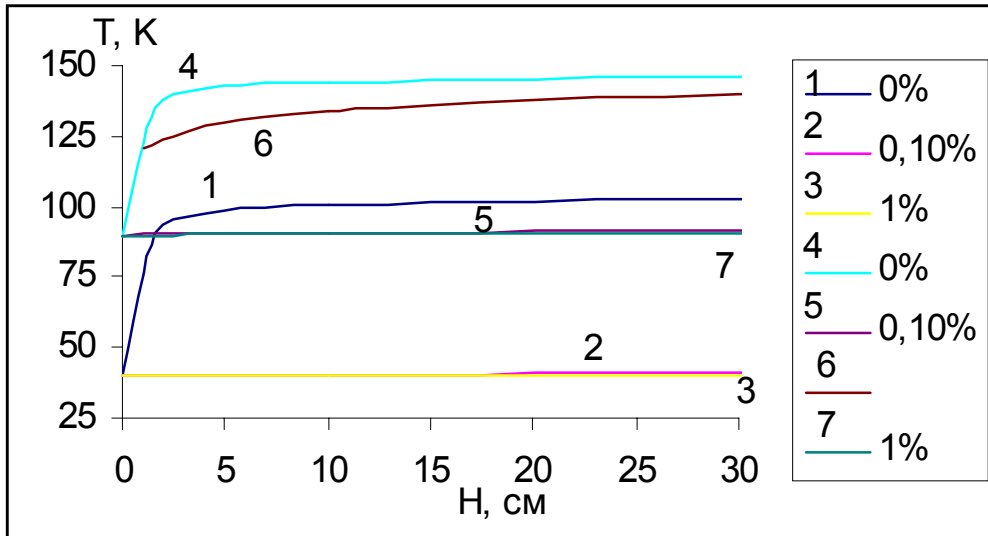


Рис. 1. Зависимость средней температуры грунта от глубины в холодных ловушках. Начальные данные: кривая 1 - средняя температура холодной ловушки $T_{co}=40$ К, мольная концентрация водяного льда $C_{H_2O}=0\%$; кр. 2 - 40 К, 0,1%; кр. 3 - 40 К, 1%; кр. 4-90 К, 0%, кр. 5-90 К, 0,1%; кр. 7-90 К, 1%. Кривая 6 - зависимость температуры грунта, необходимой для испарения льда с $C_{H_2O} = 1\%$ в течение 10^9 лет, от глубины залегания льда.

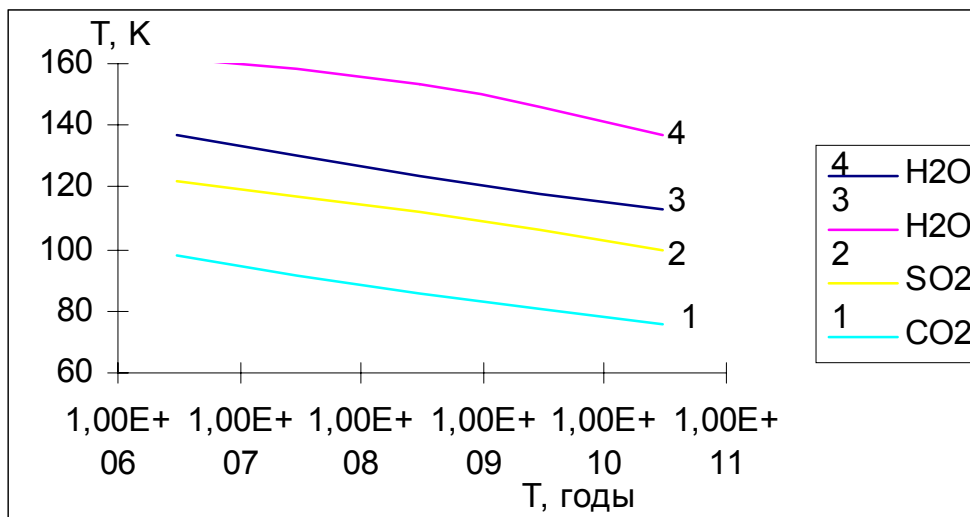


Рис 2. Взаимосвязь между временем испарения подповерхностного льда и температурой грунта. Кривая 1 - лед CO_2 , глубина залегания $H=1-2$ м; кривая 2- лед SO_2 , $H=1-2$ м; кривая 3 -лед H_2O , $H=0.01-0.02$ м; кривая 4 - лед H_2O , $H=1-2$ м. Во всех случаях массовая концентрация льда 1%.