

ЛУННЫЙ ЛЕД: МОЖНО ЛИ ОПРЕДЕЛИТЬ ЕГО ПРОИСХОЖДЕНИЕ ?

А.А.Бережной, Б.А. Клумов⁺

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
119890 Москва, Россия

⁺ Институт динамики геосфер 117979 Москва, Россия

Поступила в редакцию 24 июня 1998 г.

Рассматривается кометная гипотеза происхождения лунного льда, недавно обнаруженного в полярных областях Луны с борта космического аппарата Lunar Prospector. Показано, что удар кометы приводит к образованию временной атмосферы, летучая компонента которой практически полностью аккумулируется в холодных ловушках - постоянно затененных областях Луны. Конденсация летучих соединений приводит к образованию льда с определенным химическим и изотопным составом, который содержит важную информацию о составе кометы. Данная гипотеза может быть проверена в ходе ближайших миссий на Луну и, если она подтвердится, то будет достигнут определенный прогресс в понимании природы комет.

PACS: 96.20.-n, 96.35.-j

Возможность существования льда в полярных областях Луны была рассмотрена впервые в [1]. Экватор Луны наклонен к плоскости эклиптики примерно на 1.5° , поэтому в полярных областях на дне многочисленных кратеров существуют постоянно затененные районы лунной поверхности. Температура поверхности этих участков настолько низка, что они могут являться холодными ловушками для воды и для ряда других летучих соединений. На освещенных же участках солнечное излучение приводит к быстрой диссоциации молекул воды, продукты которой покидают планету, поэтому на поверхности Луны вода, если и существует, то только в холодных ловушках и в виде льда ¹⁾.

Исследование радиолокационных свойств лунной поверхности с борта космического аппарата Clementine обнаружило участки с аномальными радиолокационными свойствами в районе южного полюса Луны, что, по-видимому, косвенно свидетельствует о присутствии льда на Луне [3]. В январе 1998 г. был запущен космический аппарат Lunar Prospector, одной из главных задач которого было исследование полярных областей Луны методом нейтронной спектроскопии с целью подтверждения этих результатов.

В марте 1998 г. были объявлены первые результаты миссии Lunar Prospector [4]. Согласно предварительным данным, площадь S_c холодных ловушек, занятых льдом, составляет $\sim 1.5 \cdot 10^{14} - 7 \cdot 10^{14}$ см², объемная доля δ_{ice} водяного льда в поверхностном полуметровом (более глубокие слои недоступны для измерений указанным методом)

¹⁾ Возможность доставки воды в глубокие (~ 100 м) слои лунного грунта при падении кометы рассматривалась в [2]. Было показано, что наличие крупномасштабных трещин в грунте в месте удара может привести к их частичному заполнению кометным материалом. Однако, если место удара находится на освещаемом участке лунной поверхности, то температурный режим в грунте не позволяет сохранить летучие соединения.

слое грунта $\simeq 0.5-2\%$, а масса водяного льда в полярных областях Луны оценивается в пределах $10^{13} - 10^{15}$ г. Каково происхождение этого льда?

Содержание летучих соединений (таких как, например, H_2O , CO_2 , SO_2) в поверхностном слое грунта холодных ловушек контролируется следующими процессами: источниками летучих являются удары комет и астероидов, микрометеоритная бомбардировка и солнечный ветер, а их сток происходит под действием микрометеоритной бомбардировки и солнечного ветра [5]. Отметим, что сток летучих соединений происходит только из ловушек, источники же рассредоточены по всей поверхности Луны и их эффективность определяется вероятностью захвата летучих соединений холодными ловушками с рассматриваемого участка поверхности.

Рассмотрим подробнее столкновение кометы с Луной. Типичные для Луны параметры удара: размер кометы $d_i \sim 2$ км, ее скорость $v_i \simeq 15 - 50$ км/с (наиболее вероятные $v_i \sim 20 - 25$ км/с) и плотность $\rho_i \approx 1$ г/см³ (масса кометы $m_i \simeq 4 \cdot 10^{15}$ г, энергия удара $E_i \sim 4 \cdot 10^{27} - 4 \cdot 10^{28}$ эрг), плотность лунного грунта (реголита) $\rho_t \approx 1.8$ г/см³. При таком ударе происходит последовательно практически полное испарение вещества кометы; испарение, плавление и дробление реголита ударной волной взрыва; выброс перемешанного многофазного вещества кометы и лунного грунта, образование ударного кратера.

Массу m_{ej} выброшенного при ударе вещества можно оценить, используя соотношение [6],

$$m_{ej}/m_i \simeq 0.2 \left[\frac{v_i^2}{g} (\rho_t/m_i)^{1/3} \right]^{0.46} \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения (для Луны $g = 167$ см/с²), m_i – масса ударника. В нашем случае ($v_i \sim 20 - 25$ км/с) $m_{ej}/m_i \sim 10^2$, при этом масса жидкой фазы составляет $\sim 10 m_i$, а масса ударного пара $\sim (1 \div 3) \cdot m_i$ [7–9].

Часть вещества покидает Луну. Используя распределение выброшенного вещества по скоростям [6]:

$$m(> v_{esc})/m_i \simeq 0.1(\rho_i/\rho_t)^{0.2}(v/v_{esc})^{1.2}, \quad (2)$$

где $v_{esc} = 2.4$ км/с – вторая космическая скорость для Луны, $m(> v_{esc})$ – масса выброшенного вещества со скоростями больше v_{esc} , легко оценить, что при рассматриваемых параметрах удара $m(> v_{esc})/m_i \sim 1$, то есть масса вещества, которое покидает Луну, порядка массы ударника, то есть покидает планету главным образом горячий ударный пар. Как показывают численные расчеты, распределение скоростей по радиусу r в облаке ударного пара близко к линейному: $v(r) \sim v_{max}r/R_{max}$, где v_{max} – скорость разлета горячего облака, в нашем случае $v_{max} \sim v_i/2 - v_i/3$. Облако разлетается инерционно; его радиус растет со временем как $R_{max} \simeq v_{max}t$. Масса пара кометного происхождения, остающегося в поле тяготения Луны, то есть имеющего скорости меньше чем v_{esc} , порядка $m_i(v_{esc}/v_{max})^3 \sim (10^{-2} - 10^{-1})m_i$. Отметим, что v_{max} при увеличении скорости ударника перестает зависеть от v_i : $v_{max} \sim \sqrt{\eta m_i v_i^2 / m_v}$, где η – доля кинетической энергии ударника, которая конвертируется в ударный пар, m_v – масса ударного пара. Для больших v_i ($v_i^2 \gg e_v$, где e_v – теплота испарения грунта) $m_v \propto v_i^2$ и v_{max} перестает зависеть от v_i . Доля же летучих соединений в ударном паре падает с увеличением скорости ударника $\propto m_i/m_v \propto v_i^{-2}$. При этом мы предполагали, что вещества кометы и мишени в ударном паре хорошо перемешаны. Действительно, оценивая инкременты интерфейсных

неустойчивостей Рэлея – Тейлора и Кельвина – Гельмгольца, можно показать, что для типичных параметров столкновения указанные неустойчивости могут развиваться на характерных временах торможения ударника $\sim d_i/v_i$, что приводит к эффективному перемешиванию материала кометы и лунного грунта.

Таким образом, падение кометы приводит к образованию атмосферы у Луны, которая состоит из вещества кометы и лунного грунта, а их соотношение зависит от скорости удара: для ударов со скоростями $v_i \simeq 20 - 25$ км/с оно порядка единицы. Отметим, что процессы конденсации в разлетающемся ударном паре могут увеличить массу кометного вещества на планете, и за счет его быстрого испарения под действием солнечного излучения соответственно и массу атмосферы. Каков состав такой атмосферы?

По мере разлета горячего облака происходит закалка: химический состав ударного пара перестает меняться, соответствуя равновесному в момент заделки. Примем, что параметры заделки ударного пара такие же, как и для кометы Shoemaker-Levy 9 ($T \sim 1500$ К, $P \sim 0.01$ бар) [10]. Химический состав ударного пара определяется составом кометы и лунного грунта. Однако термодинамические расчеты показывают, что поскольку лунный грунт не содержит значительных количеств летучих соединений, то добавление лунного вещества к кометному практически не изменяет химический состав летучих соединений ударного пара. Это справедливо для отношения $m_i/m_v \geq 0.03$, которое выполняется для всего диапазона скоростей столкновений комет с Луной.

Будем считать элементный состав кометы идентичным составу кометы Галлея [11]. Тогда основными соединениями ударно-образованной атмосферы являются: H_2 ($\simeq 40\%$), CO ($\simeq 30\%$), H_2O ($\simeq 20\%$), CO_2 ($\simeq 5\%$), N_2 ($\simeq 3\%$), S_2 ($\simeq 3\%$) и малые составляющие – SO ($\simeq 0.3\%$), SO_2 ($\simeq 0.3\%$). Отметим, что серосодержащие соединения также войдут в состав ударно-образованной атмосферы, так как на стадии взрыва кометы реакция связывания серы в виде сульфида железа (что соответствует фиксации серы в твердую фазу) кинетически ингибирована.

Чтобы определить, какие соединения будут конденсироваться в холодных ловушках, оценим их температуру поверхности T_c и парциальное давление указанных соединений ударной атмосферы. Из уравнения баланса: $(T_c/T_{eq})^4 = a_M \cos(\theta + \alpha) d_c/D_c$, где $T_{eq} = 400$ К – температура поверхности на дневной стороне, $a_M \approx 0.1$ – альbedo лунной поверхности, d_c, D_c – глубина и диаметр ловушки, $d_c/D_c \simeq 0.2$, θ – широта ловушки, α – склонение Солнца. Это дает: $T_c \simeq 50 - 100$ К. В случае отсутствия нагрева ловушки рассеянным солнечным излучением T_c определяется внутренними источниками тепла и $\simeq 30$ К.

При ударе кометы с $d_i \simeq 2$ км масса ударно-образованной атмосферы $\sim 10^{14}$ г, давление у поверхности $p \simeq 10^{-8}$ бар, а концентрация нейтральных частиц $N_a \sim 10^{11} - 10^{12}$ см $^{-3}$. В этих условиях в холодных ловушках может происходить конденсация H_2O , CO_2 , S , SO_2 . Время жизни такой атмосферы τ_a определяется временем фотолиза τ_{ph} основных соединений в экзосфере, поскольку продукты фотолиза покидают планету: $\tau_a \sim \tau_{ph} N_a / N_{ex}$, где N_{ex} – концентрация нейтральных частиц в экзосфере: $N_{ex} \sim (\sigma H_a)^{-1}$, где $\sigma \simeq 10^{-15}$ см 2 – характерное сечение упругих столкновений для рассматриваемых соединений, H_a – шкала высот ударно-образованной атмосферы, $H_a \simeq 100$ км. В нашем случае $\tau_a \sim 10^{10}$ с.

Характерное время диффузионного стока конденсирующихся соединений атмосферы в холодные ловушки $\tau_d \sim (S_M/S_c)H < d_c > N_a\sigma/v$, где S_M, S_c – площадь поверхности Луны и холодных ловушек, соответственно, $< d_c >$ – характерная глубина кратера, v – тепловая скорость, а отношение $\tau_d/\tau_a \approx (S_M/S_c) < d_c > / \tau_{ph}v \leq 0.1$.

Следовательно, конденсирующиеся газы ударно-образованной атмосферы практически полностью попадут в холодные ловушки. Легко показать, что температура холодных ловушек практически не изменится в процессе конденсации рассматриваемых соединений.

Таким образом, удар кометы с $d_i \simeq 2$ км приводит за времена $t \sim t_d \simeq 10^9$ с к аккумуляции в холодных ловушках $\sim 10^{14}$ г H_2O с поверхностной плотностью $\delta_{ice}^{comet} \sim 0.3$ г/см², серы $S \sim 5 \cdot 10^{13}$ г, $CO_2 \sim 5 \cdot 10^{13}$ г, $SO_2 \leq 5 \cdot 10^{12}$ г (для $SO_2 \tau_d/\tau_a \geq 1$). Состав такого "кометного" льда определяется составом конденсирующихся соединений ударно-образованной атмосферы: относительные концентрации летучих соединений во временной атмосфере и в холодных ловушках практически совпадают.

Последующее перераспределение этого льда определяется темпом микрометеоритной обработки поверхности холодных ловушек. Известно, что кумулятивный поток $F(d)$ падающих на Луну частиц размером больше d подчиняется степенному закону: $F(> d) \propto d^{-\alpha}$, где $\alpha \simeq 3.5$ для частиц размером $d \sim 10^{-2} - 10^2$ см (см., например, [6]). Поскольку глубина микрократера $\simeq d$, а его площадь $S_c(d) \propto d^2$, то характерное время t_g переработки поверхности на глубине h следующим образом зависит от глубины: $t_g \propto F(> h)^{-1} S_c(h)^{-1} \propto h^{\alpha-2}$.

По данным Apollo [12], слой на глубине $d = 1$ см перемешивается за время $t_{1cm} \simeq \simeq 10^6$ лет. Слой же на глубине 1 м перемешивается за время $t_{1m} \simeq t_{1cm} \cdot 10^{2\alpha-4} \simeq 10^9$ лет. Таким образом, за время существования ловушек ($\simeq 2 - 3$ млрд. лет) их поверхность хорошо перемешана до глубины $h_m \simeq 1$ м, а объемное содержание льда в грунте в случае удара одной кометы $\simeq \delta_{ice}^{comet}/d_m \sim 0.3\%$, что хорошо согласуется с данными Lunar Prospector. Отметим, что содержание в грунте CO_2, SO_2 очень чувствительно к температуре грунта, поэтому за время существования ловушек возможно заметное снижение их концентраций.

Выше мы молчаливо предполагали, что микрометеоритная бомбардировка приводит только к перемешиванию грунта, однако на самом деле это не так. Безусловно, происходит определенная диссипация воды кометного происхождения посредством рассмотренных выше механизмов, но их эффективность снижена, поскольку скорость столкновения микрометеоритов с Луной ($v_i \sim 5 - 15$ км/с) существенно меньше, чем у комет, и продукты взрыва практически не покидают планету. При этом происходит и определенное разбавление "кометной" воды водой метеоритного происхождения.

Количество ударов крупных небесных тел, которое испытала Луна за время существования ловушек, можно оценить следующим образом. Анализируя кумулятивное распределение кратеров по возрасту (см., например, [6]), можно определить долю δ_y поверхности Луны, занятую кратерами, размером $D_c > 4$ км, которые моложе холодных ловушек: $\delta_y \simeq 10^{-4}$. Известно и распределение по массе крупных небесных тел размером $d \sim 0.1 - 10$ км), сталкивающихся с Луной: $N(> m) \propto m^{-0.55}$ [6].

Размер кратера d_c зависит от скорости ударника v_i и его размера d_i : $d_c \propto d_i^{0.8} v_i^{0.44}$. Для интересующих нас параметров удара ($d_i \sim 1 - 3$ км, $v_i \sim 20 - 50$ км/с) $d_c \simeq$

10 – 20 км. Число ударов крупных небесных тел за всю историю холодных ловушек с учетом зависимости $N(> m)$ порядка $\sim \delta_y S_M / 10\pi D_c^2 \sim 10$. Вопрос о том, какую долю среди небесных тел, сталкивающихся с Луной, составляют кометы, остается открытым. Отметим, что для объяснения количества льда, обнаруженного с борта Lunar Prospector, достаточно одного удара кометы с $d_i \simeq 2$ км.

Наблюдаемые Lunar Prospector количества воды в холодных ловушках могут быть объяснены также действием солнечного ветра и/или микрометеоритной бомбардировкой поверхности Луны. Однако в этих случаях состав льда будет иным.

Важной особенностью льда кометного происхождения является аномально высокое содержание дейтерия. Отношение D/H в кометах порядка $\sim 10^{-3}$ (в коме кометы Хейла – Боппа [13]). Термодинамические расчеты показывают, что при расширении ударного облака происходит обогащение воды дейтерием за счет изотопного обмена примерно в 2 – 2.5 раза.

Изотопный состав водорода, образованного при взаимодействии солнечного ветра с лунным грунтом, совпадает с изотопным составом солнечного ветра ($D/H \leq 1.5 \times 10^{-4}$), а D/H в воде метеоритного происхождения соответствует изотопному составу водорода в метеоритах ($D/H \sim (2 - 5) \cdot 10^{-4}$).

Отличить льды кометного происхождения можно и по анализу химического состава льда. При ударах метеоритов в экзосферу Луны попадают сера и серосодержащие соединения. Холодными ловушками захватывается только сера, серосодержащие соединения не улавливаются из-за малого времени фотолиза. Солнечный же ветер является малоэффективным источником серы.

Таким образом, падение кометы на Луну приводит к образованию в холодных ловушках льда с определенным химическим и изотопным составом: значительно более высоким отношением D/H, чем в случае других источников воды. Другое отличительное свойство "кометного льда" – возможное включение в его состав соединений SO_2 и CO_2 . Кометная гипотеза происхождения лунного льда может быть проверена в ходе ближайших миссий на Луну и, если она подтвердится, будет достигнут определенный прогресс в понимании состава и соответственно природы комет.

Авторы благодарят Б.И.Иванову за полезные дискуссии. Один из авторов (Б.А.А.) был частично поддержан ГНТП "Астрономия" (грант # 1.6.1.1).

-
1. K.Watson, B.C.Murray, and H.Brown, *J. Geophys. Res.*, **66**, 3033 (1961).
 2. T.I.Orlova and V.V.Svetsov, *Earth, Moon and Planets* **71**, 255 (1995).
 3. S.Nozette, C.L.Lichtenberg, P.Spudis et al., *Science* **275**, 1495 (1996).
 4. <http://lunar.arc.nasa.gov/science/results/lunarice>.
 5. J.R.Arnold, *J. Geophys. Res.*, **84**, 5659 (1979).
 6. *Hazards due to Comets and Asteroids*, Ed. Gehrels, (1994) Univ. of Arizona Press.
 7. K.R.Housen and R.M.Schmidt, *J. Spaceraft and Rockets* **32**, 162 (1995).
 8. J.D.O'Keefe and T.J.Ahrens, *J. Geophys. Res.* **87**, 6668 (1982).
 9. M.J.Cintala, *J. Geophys. Res.* **97**, 947 (1992).
 10. А.А.Бережной, В.А.Клумов, В.Е.Фортов, В.В.Шевченко, Письма в ЖЭТФ, **63**, 387 (1996).
 11. E.Anders, N.Grevesse, *Geochim. Cosmochim. Acta* **53**, 197 (1989).
 12. R.V.Morris, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 1978, p.1801.
 13. R.Meier et al., *Science* **279**, 1707 (1998).