

ПОЗДНЯЯ МЕТЕОРИТНАЯ БОМБАРДИРОВКА И ДЕФИЦИТ СЛЕДОВ УДАРНОГО ПАРА НА ЛУНЕ

В.В. Светцов

Происхождение тел, вызвавших позднюю тяжелую бомбардировку Луны, находится под вопросом. Различные исследования образцов лунного грунта, древних земных пород и динамические модели отдавали приоритет как каменным телам, так и кометам. Обнаруженный недавно дефицит конденсата испаренного вещества в лунных образцах может накладывать определенные ограничения на природу ударников. Оценки массы конденсата, основанные на численном моделировании ударов космических тел по Луне, показали, что дефицит конденсата согласуется с предположением о том, что в потоке тел, создавших позднюю бомбардировку, преобладали кометы.

Введение

Поздняя тяжелая бомбардировка (Late Heavy Bombardment, LHB) происходила около 3,8–4,0 млрд лет назад, когда Луна, Земля и, вероятно, другие планеты подвергались ударам космических тел с большей интенсивностью, чем до и после этого времени [Tera et al., 1974; Ryder, 1990; Kröner, Cohen, 2002]. Это событие датируется по образцам лунного грунта, и большинство лунных бассейнов с установленным возрастом являются ударными кратерами, образованными в этот период. По размеру и возрасту кратеров было оценено, что общая масса столкнувшихся с Луной тел составляла $6 \cdot 10^{21}$ г [Hartmann et al., 2000]. LHB – очень важный этап в развитии Земли, так как многочисленные удары крупных космических тел могли преобразовать поверхность Земли, почти полностью покрыв ее кратерами, испарить океан, оказать существенное влияние на состав ранней атмосферы и развитие жизни, которая могла существовать или зародиться в то время. Но причина LHB и природа вызвавших ее тел точно не установлены. Существуют аргументы и в пользу того, что это был не отдельный пик интенсивности бомбардировки, а «хвост» аккреции, то есть что лунные бассейны были созданы ударами тех еще оставшихся тел (планетезималей), которые образовали Землю в более ранний период [Baldwin, 1974; Hartmann, 1975; 2003].

Распределения по размерам астероидов Главного пояса и древних лунных кратеров считались аналогичными, это давало основание предполагать, что источником LHB являются астероиды [Strom et al., 2005]. Но недавно было показано, что морфологически более молодые кратеры образовались в конце LHB, и их распределение по размерам отличается от распределения астероидов Главного пояса; следовательно, ударники LHB не могли быть астероидами, выброшенными из Главного пояса гравитационными механизмами [Čuk et al., 2010].

Исследования лунных образцов не дают однозначных результатов о природе ударников. Анализ сидерофильных элементов в брекчиях ударного расплава, связанных с Морем Ясности (миссия Аполлон-17), дал основание предположить удары EH-хондрита и обыкновенного хондрита [Norman et al., 2002]. В то же время метод, основанный на корреляции элементов платиновой группы, показывает, что

образцы миссии Аполлон-17 содержат вещество LL-хондрита [Tagle, 2005]. Другие анализы ударного расплава (по содержанию Au, Ge и Ir) указывают на то, что, по крайней мере, один из ударников был дифференцированным железным ядром и, кроме того, имеются следы энстатитовых хондритов [Kring, Cohen, 2002]. И еще одни исследования образцов, полученных в миссиях Аполлон-17 и 14, и лунного метеорита показали, что метеоритная компонента имеет сходство с хондритами, но отличается по химическому составу от их известных типов, возможно, представляя собой вещество, которое не попадает в настоящее время на Землю [Puchtel et al., 2008]. Эта необычность и указание на присутствие в бомбардировке тел, не характерных для Главного пояса, позволило предположить существование вымершего пояса астероидов E-типа на расстояниях 1,6–2,1 а.е. [Bottke et al., 2010].

Геологические находки на Земле, которые помогли бы определить происхождение бомбардирующих тел, довольно скудны. В метаосадочных породах возрастом 3,7–3,8 млн лет формации Исуа (Гренландия) были найдены изотопные аномалии вольфрама, которые интерпретировались как следы метеоритного удара [Schoenberg et al., 2002]. Но обогащение различных образцов тех же пород иридием и сравнение их с лунным грунтом, значительно меньше обогащенным иридием, привело к выводу, что поздняя тяжелая бомбардировка была вызвана в основном ударами комет, а не астероидов [Gråe Jørgensen et al., 2009]. Этот вывод основывался на оценках потерь вещества в космическое пространство за счет высокоскоростных выбросов из кратера после ударов – из-за более высоких скоростей ударов комет и их меньшей плотности кометное вещество должно почти полностью теряться после ударов по Луне, а на Земле должно оставаться около 50% массы комет благодаря большой скорости убегания. В то же время при ударах астероидов, имеющих меньшую скорость, количество астероидного вещества, оставшегося на Луне и Земле, должно быть по порядку величины одинаково. По мнению авторов за период поздней тяжелой бомбардировки на Землю было доставлено $5 \cdot 10^{23}$ г воды, что эквивалентно океану глубиной около 1 км. Добавим, что изотопный состав водорода в недавно найденной воде в лунных вулканических стеклах и апатите показывает, что она может иметь кометное происхождение [Greenwood et al., 2011].

Сравнение содержания благородных газов в атмосфере, кометах и углистых хондритах привело к оценке, что до 6% атмосферного азота было доставлено кометами [Marty, Meibom, 2007]. А данные по изотопам азота $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ показали, что от 15 до 65% атмосферного азота может иметь кометное происхождение [Hutsemekers et al., 2009]. Но оценка привноса кометного вещества в атмосферу не решает вопроса о соотношении комет и астероидов во время LHB, так как добавка кометного вещества могла происходить к уже созданной в поздний период аккреции Земли плотной атмосфере [Светцов, 2010].

Динамические модели LHB, основанные на предположении о быстрой миграции планет-гигантов, показывают, что на Луну упали кометы общей массой $9 \cdot 10^{21}$ г [Gomes et al., 2005]. Масса выпавших на Луну астероидов первоначально оценивалась величиной $(3\text{--}8) \cdot 10^{21}$ г, но эта оценка очень чувствительна к параметрам модели, в частности, зависит от начального распределения масс в Главном поясе, который был взят на порядок более массивным, чем современный. Скорости ударов комет по Луне лежали в интервале 10–36 км/с со средним значением 21 км/с, а средняя скорость ударов астероидов – 25 км/с. В более поздних работах, основанных на динамических моделях, вклад астероидов был уменьшен [Minton, Malhotra, 2009], в работе [Morbidelli et al., 2010] до $6 \cdot 10^{20}$ г (и средняя скорость ударов астероидов уменьшена до 20 км/с), то есть роль комет в LHB по этим моделям оказалась доминирующей.

Но имеется еще одна особенность состава лунных образцов, которая может наложить ограничения на свойства тел, участвовавших в ЛНВ, а именно явный дефицит сконденсировавшегося пара, хотя количество испарившегося вещества при крупных ударах с высокими скоростями по общим представлениям должен быть значительным [Warren., 2008]. Этот вопрос рассматривается в данной работе.

Постановка задачи

Значительная часть поверхности Луны состоит из брекчий ударного расплава, происхождение которого в результате высокоскоростных ударов космических тел не вызывает сомнений [Dalrymple, Ryder, 1993; Warren et al., 2005]. Исследования образца лунного грунта, доставленного в миссии Аполлон 14, показали, что реголитная брекчия наряду с веществом, обогащенным алюминием и бедным силикатами (HASP – high-alumina, silica-poor), которое является остатком испарившегося материала, содержит также силикатный конденсат (GASP – gas-associated spheroidal precipitates) [Warren., 2008]. Силикатный конденсат существует в двух формах: микросфероиды размером менее 5 мкм и структурированные кластеры до 200 мкм в поперечнике. В нем наблюдается дефицит тех же тугоплавких элементов, которые содержатся в избытке в обогащенном алюминием веществе. Частицы конденсата состоят в основном из $\text{SiO}_2 + \text{MgO} + \text{FeO}$, что несовместимо как с вулканическим происхождением, так и с расплавом в результате удара. Исследованный конденсат легко определить и обнаружить по его характерным особенностям, но большинство образцов лунного реголита содержат лишь незначительные ($<0,001$) концентрации этого вещества [Warren et al., 2008]. Брекчии, содержащие ударный расплав, – весьма распространенный компонент верхних слоев лунной коры и реголита, а при ударах о лунную поверхность со скоростями порядка или выше современной средней скорости ударов, наряду с расплавом должно образовываться значительное количество испаренного и затем сконденсировавшегося вещества. Редкость обнаружения конденсата не нашла объяснения. Очевидно, что мало пара образуется при низких скоростях ударов, но есть и другие возможности: неэффективность испарения, неэффективность конденсации, убегание пара (преодоление притяжения Луны), поглощение конденсата расплавом, разрушение или захоронение конденсата под покровом выбросов [Warren et al., 2008].

При ударе космического тела вещество сжимается в ударной волне, а затем разгружается до более низкого давления. В зависимости от давления при прохождении фронта ударной волны вещество при разлете может попасть как в область двухфазности (жидкость-пар), так и пройти через стадию чисто газообразного состояния, то есть быть полностью испаренным [Зельдович, Райзер, 1966]. Давление в ударной волне, необходимое для полного испарения при разгрузке, P_c было определено для ряда веществ [Мелош, 1966]. Для гранита $P_c = 520$ ГПа, а для габброидного анортозита 590 ГПа. Для полного испарения дунита необходимо давление более 2000 ГПа [Pierazzo et al., 1997]. Максимальные давления, которые могут быть достигнуты при ударе тела с заданной скоростью, можно определить путем решения одномерной задачи столкновения пластины с мишенью. Результаты численного решения с использованием уравнения состояния ANEOS для дунита и гранита [Thompson, Lauson, 1972] и уравнения состояния воды, рассчитанного И.Б. Косаревым, показаны на рисунке (была выбрана вода, так как по оценке [Festou et al., 1993] «стандартная» комета имеет 80% льда, 10% вещества углистых хондритов и 10% других видов пыли).

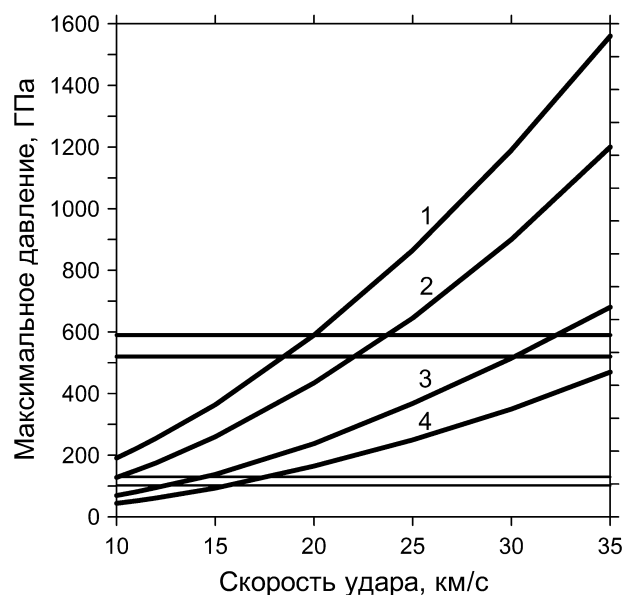


Рисунок. Максимальное давление за фронтом ударной волны при ударе тела с заданной скоростью о мишень для разных веществ ударника и мишени: 1 – дунит-дунит, 2 – гранит-гранит, 3 – удар ледяного тела с плотностью 1 г/см^3 по гранитной мишени, 4 – ледяной ударник с плотностью $0,6 \text{ г/см}^3$ по гранитной мишени.

Горизонтальные тонкие линии – давления начала испарения гранита (130 ГПа) и габброидного анортосита (100 ГПа), толстые – давления полного испарения тех же веществ (520 и 590 ГПа соответственно).

Плотность ядер комет лежит в диапазоне $0,5\text{--}1,2 \text{ г/см}^3$ с наиболее вероятным значением $0,6 \text{ г/см}^3$ [Weissman et al., 2005]. При ударе тел с такой плотностью давления необходимые для полного испарения вещества мишени не достигаются и при 40 км/с. Пар вообще не образуется при ударах комет со скоростями, не превышающими 20 км/с. Таким образом, дефицит конденсата согласуется с тем, что Луну бомбардировали в основном кометы. Очень мало пара образуется и при ударах каменных тел со скоростями менее $\sim 12 \text{ км/с}$; это могло бы служить аргументом также в пользу того, что ЛНВ было хвостом аккреции, так как максимальная скорость столкновений в зоне питания Земли порядка второй космической скорости Земли [Витязев и др., 1990]. Но целесообразно оценить количество испаренного вещества и его конечное местонахождение и в случае ударов каменных тел с достаточно высокими скоростями.

Метод математического моделирования

Численное моделирование ударов каменных тел по плоской каменной мишени, не имеющей атмосферы, под некоторым углом к поверхности, проводилось путем решения гидродинамических уравнений методом COBA [Shuvalov, 1999]. Прочность мишени не учитывалась, так как вещество подвергается давлениям, которые значительно выше прочности горных пород. Предполагалось, что ударник и мишень состоят из гранита плотностью $2,63 \text{ г/см}^3$. Уравнение состояния были теми же, как и при решении одномерной задачи.

Разностная сетка состояла из $250 \times 150 \times 200$ ячеек в направлениях осей y (проекция траектории ударяющего тела на поверхность мишени), x (ось перпендикулярная y в плоскости поверхности мишени) и z (вертикальная ось) соответственно. Предполагалась, что течение симметрично относительно плоскости yz , что позволяло моделировать только полупространство $x > 0$. Размеры ячеек составляли $1/30$ диаметра ударника вокруг точки удара и увеличивались к границам расчетной области, расположенных на расстояниях около 100 диаметров ударника от места удара.

Для определения движения испаренного и расплавленного вещества вводилось около 600 000 пассивных (движущихся со скоростью среды) маркерных частиц, которые первоначально были распределены в ударнике и мишени. Каждая частица имеет массу, соответствующую занимаемому ей объему до удара. Это позволяет вычислять массу вещества, испытавшего определенное давление.

Результаты расчетов

Моделирование ударов под углом 45° (это наиболее вероятный угол) было проведено в интервале скоростей от 10 до 35 км/с. Предполагалось, что диаметр ударника 10 км. (По оценкам [Warren et al., 2008] родительский кратер HASP и GASP имел размеры 10–100 км.) Вещество, сжатое до давления испарения, частично остается в кратере, образуя слой на его внутренней поверхности, частично выбрасывается из кратера и, двигаясь по траекториям близким к баллистическим, достигает поверхности на некотором удалении от него. Оставшаяся в кратере двухфазная смесь вряд ли может породить частицы типа HASP и GASP, так как в образцах не наблюдается их смеси и GASP, весьма вероятно, сконденсировались отдельно от расплавленной фазы. После обрушения стенок переходного кратера через несколько минут после удара расплав и пар в значительной степени перемешиваются с брекчиями. Если нет разделения фаз, то пар при охлаждении будет оседать на поверхность имеющихся капель расплавленного вещества и поглощаться ими. Это наиболее вероятно, так как рост молекулярных комплексов малых размеров при конденсации энергетически невыгоден из-за возрастания поверхностной энергии [Зельдович, Райзер, 1966].

Выбросы из кратера падают на некотором расстоянии от кратера (за исключением той части, которая преодолевает притяжение Луны). Жидкая фаза сразу падает на поверхность Луны, а пар тормозится у поверхности и остается над ней до тех пор, пока не сконденсируется. Это весьма вероятный механизм разделения фаз. Концентрация пара должна быть достаточно высока, то есть первоначально вещество должно испытать давление больше того, что необходимо для начала испарения при разгрузке. Это давление неизвестно, недостаточно известны и свойства мишени. В качестве первого приближения оно было выбрано равным $P_v = (P_i + P_c)/2$, где P_i – давление начала испарения; для гранита $P_v = 325$ ГПа.

Результаты вычислений массы вещества, которое, испытав давление P_v , приземляется вне кратера, приведены в Таблице. Видно, что эти массы существенно меньше той части массы, которая остается внутри кратера ($M_v - M_{vesc} - M_{vlan}$). Используя современное распределение ударников по скоростям (со средней скоростью ударов 17,5 км/с) [Иванов, 2005], можно найти средние величины массы приземлившейся двухфазной фракции и полной массы расплавленного вещества мишени и найти их отношение M_{vlan}/M_m . Оно оказалось равным менее 0,01. Если в период LHB скорости ударов были выше [Morbidelli et al., 2010], то это отношение также было бы больше.

Таблица

V , км/с	M_m	M_v	M_{vesc}	M_{vlan}	m_m	m_v	m_{vesc}	m_{vlan}
20	9,0	0,058	0,001	0,015	0,99	0,068	0,03	0,024
25	12,9	1,3	0,13	0,22	1,0	0,61	0,27	0,21
30	15,5	3,1	0,28	0,39	1,0	0,87	0,39	0,26
35	17,5	4,8	0,48	0,55	1,0	0,95	0,48	0,22

Относительные массы мишени (M) и ударника (m), которые испытали давление: больше давления начала плавления в 80 ГПа (M_m, m_m), больше P_v (M_v, m_v), больше P_v и преодолели притяжение Луны (M_{vesc}, m_{vesc}), больше P_v и приземлились вне кратера (M_{vlan}, m_{vlan}). Эти массы измеряются в долях массы ударяющего тела.

Обсуждение и выводы

Сделанная оценка массы вещества, которое может выпасть в виде конденсата, по отношению к полной массе расплава на порядок превышает оценку массы конденсата, полученную в результате геохимических исследований [Warren, 2008]. Если предположить, что большинство брекчий, доставленных миссиями Аполлон со старых материков, были образованы в период LHB, а каменные тела составляли лишь около 10% ударников (и кометы производили незначительное количества пара, но достаточно много расплавленного вещества), то рассогласование в порядке величины устраняется. Мы можем таким образом объяснить дефицит сконденсировавшегося ударного пара.

Тем не менее, мы не можем утверждать, что приведенная оценка доказывает небольшую долю каменных тел в потоке LHB, так как недостаточно надежны данные о свойствах веществ ударника и мишени, а также предположение о величине давления, необходимого для испарения. Кроме того, необходимо оценить ударную переработку поверхности Луны, потери ее поверхностного слоя и иметь оценки скорости и эффективности конденсации. В рамках используемой модели результаты могут быть уточнены путем моделирования ударов тел различных размеров под разными углами.

Автор благодарен И.Б. Косареву за предоставление уравнения состояния воды.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 10-05-00484-а.

Литература

- Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С. Планеты земной группы: происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 1990. 296 с.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.
- Иванов Б.А. Распределение ударных кратеров и астероидов по размерам // Катастрофические воздействия космических тел. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. С. 62–77.
- Мелош Г. Образование ударных кратеров: геологический процесс. М.: Мир. 1994. 336 с.
- Светцов В.В. Модель эволюции ранней атмосферы Земли, регулируемой ударами космических тел // Динамические процессы в геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2010. С. 33–46.

- Baldwin R.B.* Was there a «Terminal Lunar Cataclysm» 3.9–4.0·10⁹ years ago? // *Icarus*. 1974. V. 23. P. 157–166.
- Bottke W., Levison H.F., Nesvorný D., Dones L.* Can planetesimals left over from terrestrial planet formation produce the lunar Late Heavy Bombardment? // *Icarus* 2007. V. 190. P. 203–223.
- Bottke W.F., Vokrouhlický D., Nesvorný D., Minton D., Morbidelli A., Brasser R.* The E-belt: A possible missing link in the Late Heavy Bombardment // *LPSC 41*. 2010. Abstract # 1269.
- Čuk M., Gladman B.J., Stewart S.T.* Constraints on the source of lunar cataclysm impactors // *Icarus*. 2010. V. 207. P. 590–594.
- Dalrymple G.B., Ryder G.* Ar-40/Ar-39 age spectra of Apollo 15 impact melt rocks by laser step-heating and their bearing on the history of lunar basin formation // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. No. E 7. P. 13085–13095.
- Festou M.C., Rickman H., West R.M.* Comets. I – Concepts and observations // *Astron. Astrophys. Rev.* 1993. V. 4. No. 4. P. 363–447.
- Gomes R., Levison H.F., Tsiganis K., Morbidelli A.* Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets // *Nature*. 2005. V. 435. No. 7041. P. 466–469.
- Græe Jørgensen U., Appel P.W.U., Hatsukawa Y., Frei R., Oshima M., Toh Y., Kimura A.* The Earth-Moon system during the late heavy bombardment period – Geochemical support for impacts dominated by comets // *Icarus*. 2009. V. 204. P. 368–380.
- Greenwood J., Itoh S., Sakamoto N., Warren P., Taylor L., Yurimoto H.* Hydrogen isotope ratios in lunar rocks indicate delivery of cometary water to the Moon // *Nature Geoscience*. 2011. V. 4. No. 2. P. 79–82.
- Hartmann W.K.* Lunar «cataclysm»: A misconception? // *Icarus*. 1975. V. 24. P. 181–187.
- Hartmann W.K.* Megaregolith evolution and cratering cataclysm models – Lunar cataclysm as a misconception (28 years later) // *Meteoritics & Planetary Science*. 2003. V. 38. No. 4. P. 579–593.
- Hartmann W.K., Ryder G., Dones L., Grinspoon D.* The time-dependent intense bombardment of the primordial Earth/Moon system // *Origin of the Earth and Moon*. Tucson: Univ. Arizona Press, 2000. P. 493–451.
- Hutsemekers D., Manfroid J., Jehin E., Arpigny C.* New constraints on the delivery of cometary water and nitrogen to Earth from the ¹⁵N/¹⁴N isotopic ratio // *Icarus*. 2009. V. 204. P. 346–348.
- Kring D.A., Cohen B.A.* Cataclysmic bombardment throughout the inner solar system 3.9–4.0 Ga // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. No. E 2. P. 4-1–4-5.
- Marty B., Meibom A.* Noble gas signature of the late heavy bombardment in the Earth's atmosphere // *Earth*. 2007. V. 2. No. 2. P. 43–49.
- Minton D.A., Malhotra R.* A record of planet migration in the main asteroid belt // *Nature*. 2009. V. 457. No. 7233. P. 1109–1111.
- Morbidelli A., Brasser R., Gomes R., Levison H.F., Tsiganis K.* Evidence from the asteroid belt for a violent past evolution of Jupiter's orbit // *Astronomical Journal*. 2010. V. 140. No. 5. P. 1391–1401.
- Norman M.D., Bennett V. C., Ryder G.* Targeting the impactors: siderophile element signatures of lunar impact melts from Serenitatis // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 202. No. 2. P. 217–228.
- Pierazzo E., Vickery A. M., Melosh H. J.* A reevaluation of impact melt production // *Icarus*. 1997. V. 127. P. 408–423.
- Puchtel I.S., Walker R.J., James O.B., Kring D.A.* Osmium isotope and highly siderophile element systematics of lunar impact melt rocks: Implications for the late accretion history of the Moon and Earth // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2008. V. 72. P. 3022–3042.
- Ryder G.* Lunar samples, lunar accretion, and the early bombardment history of the Moon // *EOS Trans. Am. Geophys. Un.* 1990. V. 71. P. 313–323.

- Schoenberg R., Kamber B.S., Kollerson K.D., Moorbath S.* Tungsten isotope evidence from ~3.8-Gyr metamorphosed sediments for early meteorite bombardment of the earth // *Nature*. 2002. V. 418. No. 6896. P. 403–405.
- Shuvalov V.V.* Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to the thermal layer effect // *Shock Waves*. 1999. V. 9. No. 6. P. 381–390.
- Strom R.G., Malhotra R., Ito T., Yoshida F., Kring D.* The origin of planetary impactors in the inner Solar System // *Science*. 2005. V. 309. P. 1847–1850.
- Tagle R.* LL-ordinary chondrite impact on the Moon: Results from the 3,9 Ga impact melt at the landing site of Apollo 17 // *LPSC 36*. 2005. Abstract # 2008.
- Tera F., Papanastassiou D.A., Wasserburg G.J.* Isotopic evidence for a terminal lunar cataclysm // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1974. V. 22. P. 1–21.
- Thompson S.L., Lauson H.S.* Improvements in the Chart D radiation-hydrodynamic CODE III: Revised analytic equations of state. Report SC-RR-71 0714. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 1972. 119 p.
- Warren P.H.* Lunar rock-rain: Diverse silicate impact-vapor condensates in an Apollo-14 regolith breccia // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2008. V. 72. P. 3562–3585.
- Warren P., Ulf-Møller F., Kallemeyn G.W.* «New» lunar meteorites: Impact melt and regolith breccias and large-scale heterogeneities of the upper lunar crust // *Meteoritics & Planetary Science*. 2005. V. 40. No. 7. P. 989–1014.
- Warren P.H., Young E.D., Newman W.I.* The lunar impact vapor paradox // *NLSI Lunar Science Conference*. 2008. Abstract # 2123.
- Weissman P.R., Asphaug E., Lowry S.C.* Structure and density of cometary nuclei // *Comets II*. Tucson: Univ. Arizona Press, 2005. P. 337–357.