

МАССА ВЕЩЕСТВА, ВЫБРОШЕННОГО ПРИ МАКРОУДАРАХ С РАСТУЩЕЙ ПЛАНЕТЫ, И ПРОБЛЕМА ОБРАЗОВАНИЯ ЛУНЫ

Г.В. Печерникова

В статье рассматривается проблема подпитки околоземного долунного роя веществом, выброшенным при столкновениях допланетных тел с растущей планетой в процессе ее аккумуляции. Оценен поток эжекты с растущей Земли на гелиоцентрические орбиты в зависимости от времени и массы планеты в рамках ко-аккреционной модели формирования системы Земля–Луна.

Введение

Проблема происхождения Луны многие годы занимает умы ученых. Краткий обзор основных направлений исследований можно посмотреть в работе [Печерникова, 2013]. Напомним, что формирование системы Земля–Луна путем твердотельной аккумуляции рассматривалось ранее в двух предельных моделях.

Модель I – ко-аккреционная модель: формирование долунного роя в процессе аккумуляции Земли путем гравитационного захвата тел и частиц из зоны питания в сферу Хилла растущей планеты [Рускол, 1960, 1975; Harris, Kaula, 1974]. В рамках этих моделей оказывается дефицит массы и углового момента долунного роя, хотя ко-аккреционные модели хорошо описывают спутниковые системы планет-гигантов.

Модель II – модель мегаимпакта: формирование долунного роя в результате выброса вещества при косом ударе одного очень крупного тела [Hartmann, Davis, 1975; Cameron, Ward, 1976; Benz et al., 1986; и др.]. В различных вариантах этой модели подбираются соотношение масс тела-ударника и растущей Земли, состав ударника, скорость удара и ударный параметр так, чтобы в итоге получилась система Земля–Луна с заданным соотношением масс и моментом количества движения. С соответствующим подбором входных параметров можно объяснить почти всё. Остаются вопрос о вероятности такого «специально подобранного» удара и некоторые тонкости геохимического характера. Как пишет Джей Мелош [Melosh, 2014] «последние сравнения изотопного состава Земли и Луны показывают, что, в отличие от почти всех других тел, известных в Солнечной системе, изотопные отношения нашего спутника являются почти идентичными земным почти для каждой изотопной системы...» И эту ситуацию трудно объяснить на основе современных импактных моделей происхождения Луны.

Наша модель – промежуточная: модель III – ко-аккреционная модель плюс макроимпакты: формирование околоземного маломассивного роя путем гравитационного захвата тел из зоны питания планеты и захват им вещества, выброшенного при ударах многих крупных тел, в процессе роста планеты [Печерникова, 1989; Витязев, Печерникова, 1996].

В настоящей работе рассмотрен третий источник пополнения долунного роя веществом в дополнение к захвату тел при свободно-свободных и свободно-связанных

столкновениях в сфере Хилла растущей планеты – получена оценка потока вещества, выброшенного при столкновениях планеты с допланетными телами в процессе её роста. Ранее энергетические оценки показали [Витязев, Печерникова, 1985], что масса вещества m_e , выброшенного при ударе из сферы влияния планеты, может составлять до $\sim 10^{-1}$ от массы тела-ударника. Численное моделирование макроимпактов [Светцов и др., 2012] подтвердило эти оценки. В работе [Светцов, 2013] по результатам численного моделирования была получена аналитическая оценка: всего за время роста Земли, начиная с половины ее массы, на гелиоцентрические орбиты выбрасывается около 4% современной массы Земли, что более чем в три раза превышает массу Луны. Подпитка околоземного роя веществом, выброшенным на баллистические и гелиоцентрические орбиты, может существенно увеличить массу формирующегося долунного роя.

Ко-аккреционная статистическая модель

Не однажды было отмечено подобие планетной и спутниковых систем. И так же как Солнце формировалось одновременно с протопланетным диском, в ко-аккреционной модели рост планеты рассматривается с одновременным образованием околопланетного протоспутникового роя. Более того, распределение массы и углового момента в Солнечной и спутниковых системах, включая систему Земля–Луна, подобны: основная масса системы сконцентрирована в центральном теле, тогда как угловой момент – в телах на орбитах.

Формирование околопланетных протоспутниковых роев рассматривается как процесс, сопровождающий рост самих планет [Safronov et al., 1986; Витязев и др., 1990; Витязев, Печерникова, 1996]. Ранние попытки решить проблему образования долунного роя в рамках ко-аккреционной гипотезы не были успешными. Как показано в [Печерникова и др., 1984; Витязев и др., 1990; Витязев, Печерникова, 1996], масса долунного роя в ко-аккреционной модели [Рускол, 1975] не превышает 10^{-4} – 10^{-5} от массы планеты. Неудача модели Рускол (1975) и понимание важной роли крупных тел в аккумуляции планеты привлекли внимание к гипотезе мегаимпакта [Safronov et al., 1986; Origin of the Moon, 1986]. Слабый момент этого подхода заключается в том, что вклад всех, кроме одного наибольшего тела в спектре масс допланетных тел, предполагается пренебрежимо малым.

В работах [Печерникова и др., 1984; Витязев и др., 1990; Витязев, Печерникова, 1996] мы разработали статистическую модель формирования долунного роя в контексте стандартного сценария формирования Солнечной системы [Витязев и др., 1990]. Эта модель основана на теории аккумуляции массы $m(t)$ и углового момента $K(t)$ растущей планетой с учетом эволюции спектра масс допланетных тел $n(m, t)$. Учет влияния крупных тел на формирование планет позволил получить решение ряда задач классической планетной космогонии, таких как эволюция эксцентриситетов и наклонов орбит растущих планет, формирование их осевого вращения, ранний ударный нагрев и т.д. [Витязев и др., 1990], а также время роста Земли [Печерникова, 2005]. Используя полученные в [Печерникова, 2005] решения, оценим потоки массы на Землю и в ударных выбросах из сферы её влияния в процессе её роста.

Включение в рассмотрение ударов крупных тел (в соответствии с функцией распределения допланетных тел по массам), ответственных за выброс небольшой доли (до 10^{-1} от массы падающих тел) вещества с растущей планеты на баллистические и

гелиоцентрические орбиты позволяет наметить пути решения проблем ранних подходов и продвинуться в понимании космохимического аспекта задачи.

Расширение теории аккумуляции массы и углового момента на случай планеты с роем [Печерникова и др., 1984] делает возможным построение теории эволюции околопланетного диска. В приближении плоского роя (модель относительно тонкого диска, вращающегося с кеплеровской скоростью вокруг его оси симметрии z , проходящей через планету), поверхностная плотность $\sigma_2(R_2, t)$ диска связана с радиальной скоростью в нем уравнением непрерывности

$$\frac{\partial \sigma_2}{\partial t} + \frac{1}{R_2} \frac{\partial}{\partial R_2} \left(\sigma_2 R_2 \sum_i v_{Ri} \right) = \sum_j I_j (\sigma_1, \sigma_2, R_2, t),$$

где индексы 1 и 2 относятся к величинам, связанным с зоной питания планеты и околопланетным роем, соответственно R_2 представляет собой расстояние в рое от оси симметрии, v_{Ri} – радиальная скорость перемещения вещества, вызываемого i -м фактором, и I_j – поток вещества, присоединяющегося к рою (на единичную площадку, перпендикулярную оси z), создаваемый фактором j . Второе слагаемое описывает процессы, доминирующие в перераспределении вещества в рое, то есть радиальную диффузию и радиальный дрейф из-за дефицита углового момента захваченного вещества и роста самой планеты, в результате чего вещество из внутренней области роя выпадает на планету. Рой оказывается сильно уплощенным вблизи планеты и почти сферичен на его периферии. Основными источниками вещества в рой в модели I [Рускол, 1975] рассматривались гравитационный захват в сферу Хилла растущей планеты при столкновениях частиц, не связанных с планетой («свободно-свободные» столкновения), и при столкновениях частиц зоны питания планеты с частицами роя («свободно-связанные» столкновения). Как уже отмечалось, эта модель позволяет описать формирование спутниковых систем с суммарной массой $\sim 10^{-4} - 10^{-5}$ от массы планеты. Этот маломассивный рой будем считать «затравочным» (по терминологии Н.Н. Горькавого [Горькавый, 2007]).

Наша ко-аккреционная статистическая модель формирования Луны (модель III) определяется двумя составляющими: 1 – образование околоземного роя в результате гравитационного захвата тел и частиц из зоны питания планеты в соответствии с ко-аккреционной моделью I, 2 – подпитка околоземного роя веществом, выброшенным при макроударах на баллистические и гелиоцентрические орбиты при столкновениях частиц роя с частицами выбросов. Эффективность такого захвата показана в работе [Горькавый, 2007].

Оценка потока вещества с растущей Земли на гелиоцентрические орбиты при макроударах

Для оценки потока вещества в ударных выбросах с растущей планеты необходимо знать:

Поток вещества на планету $dm(t)/dt$ в зависимости от её массы $m(t)$, поверхностной плотности твердого вещества в зоне питания $\sigma_d(t)$, распределения допланетных тел по массам $n(m', t)$ и скоростям $v'(m', t)$ и других величин;

Массу ударного выброса в зависимости от массы растущей планеты $m(t)$, массы тела-ударника m' и от других величин.

Скорость увеличения массы планеты $m(t)$ в области планет земной группы определяется в основном частотой её столкновений с телами допланетного роя в зоне питания планеты. Частоту столкновений тела массы m с телами в интервале масс от m' до $m' + dm'$, имеющими до сближения относительную скорость $V(m, m')$, запишем в виде [Печерникова, 2005]

$$A = \pi (r + r')^2 \left[1 + \frac{2G(m + m')}{V^2(r + r')} \right] V(m, m') n(m') dm',$$

$$V(m, m') = \sqrt{v^2(m) + v'^2(m')}.$$

Здесь первые три сомножителя определяют обычное сечение столкновения в задаче двух тел, а $n(m') dm'$ – численная плотность тел с массами в интервале $(m', m' + dm')$.

Распределение по массам допланетных тел принято в виде простой степенной зависимости

$$n(m', t) dm' = n_0(t) (m')^{-q} dm', \quad (1 < q < 2), \quad (3)$$

где $n_0(t)$ – коэффициент нормировки, $q < 2$ означает, что основная масса системы заключена в крупных телах. Для нахождения $n_0(t)$ нормируем $n(m', t)$ на плотность конденсированного вещества в зоне питания ρ_d

$$n_0(t) = (2 - q) M_1^{q-2} \rho_d, \quad (4)$$

где M_1 – верхний предел распределения.

Нами [Печерникова, Витязев, 1979] в рамках модели растущих и объединяющихся зон питания получено изменение массы наибольшего после растущей планеты тела m_1 (или согласно [Safronov, Zvjagina, 1969] практически совпадающей с m_1 величины верхнего предела распределения M_1) в процессе роста планеты в виде

$$M_1(t) \approx (1 - z^2) m(t), \quad (5)$$

где $z = (m(t)/m_{\max})^{1/3} = r(t)/r_{\max}$, $m_{\max}$ и $r_{\max}$ – масса и радиус, до которых может вырасти планета в данной зоне питания (в предположении постоянной средней плотности).

В работе [Печерникова, Витязев, 1979] также было показано, что ширина кольцевой зоны питания $2 \Delta R$ и масса находящегося в ней вещества Q увеличиваются пропорционально $r(t)$, в то время как $m(t) \propto r^3(t)$. На ранней стадии роста $m(t)/Q(t) \ll 1$, но со временем все большая часть вещества сосредотачивается в $m(t)$, отношение $m(t)/Q(t)$ растет, и поверхностная плотность твердого вещества в зоне питания планеты уменьшается от своего начального значения σ_0 как

$$\sigma_d(t) = \sigma_0 [1 - m(t)/Q(t)]. \quad (6)$$

Из соотношения (2) в предположении равномерного распределения энергии случайного движения между растущей планетой $m(t)$ и допланетными телами [Витязев и др., 1990] получены соответствующие выражения A_1 для крупных планетезималей m' в интервале масс от m' до M_1 и A_2 для остальных планетезималей с массами $m' < m'$ при $q = 11/6$, где m' – средняя по распределению масса [Печерникова, 2005].

Скорость роста Земли получаем интегрированием $(A_1 \times m' + A_2 \times m')$ по массам в соответствующих пределах:

$$\frac{dm}{dt} = n_0(t) \left(\int \frac{M_1}{m'} A_1 m' dm' + \int \frac{\bar{m}'}{m'} A_2 m' dm' \right). \quad (7)$$

Из (7) с учетом (3–6), переходя к переменным z и $\mu = m'/m(t)$ и принимая во внимание, что согласно [Сафронов, 1954] $\rho \bar{v} = 4\sigma_d/P$, P – кеплеровский период обращения, получаем поток вещества на растущую планету

$$\begin{aligned} \frac{dm(t)}{dt} = & \frac{56\pi\sigma_0}{3\sqrt{7}} \frac{r_{\max}^2}{P} (1-z^2)^{1/3} z^2 \int_{\frac{1-z^2}{7}}^{1-z^2} \sqrt{1+\mu} (1+\mu^{1/3}) \mu^{-1/3} d\mu + \\ & + \frac{2\pi\sigma_0}{3} \frac{r_{\max}^2}{P} \sqrt{\frac{8-z^2}{7}} (1-z^2)^{5/6} z^2 \int_{\mu_0}^{\frac{1-z^2}{7}} \left(1 + 2\mu^{1/3} + \mu^{2/3} + \frac{28(1+\mu)(1+\mu^{1/3})}{8-z^2} \right) d\mu. \end{aligned} \quad (8)$$

На рис. 1 показан поток вещества на растущую планету $dm(t)/dt$ в г/год, вычисленный по (8) в зависимости от ее относительного радиуса $r(t)/r_{\oplus} = z$ в пределах $0,79 \leq z \leq 0,99$, что соответствует росту ее массы от 0,5 до 0,97 её современной массы $m_{\oplus}$ ($r_{\oplus}$ – радиус Земли, вычисленный при средней за время роста Земли плотности $\delta = 4,5$ г/см³).

В работах [Светцов и др., 2012; Светцов, 2013] по численному моделированию ударов под разными углами по растущей Земле предполагалось, что растущая Земля имеет те же строение и отношение массы ядра к полной массе, что и современная планета. Основная часть вычислений была проведена для Земли массой 0,7 от ее современной массы. Ударяющие тела также считались дифференцированными с соотношением железного ядра и каменной оболочки, аналогичным Земле (~0,3 по массе). Относительные скорости тел до сближения с Землей составляли около 5 км/с. Это приводит к скорости удара очень близкой к скорости убегания с планеты. В расчетах предполагались отношения диаметров ударника и Земли Δ от 0,025 до 0,3.

На рис. 2 представлены осредненные по углам величины массы частиц, уходящих со скоростью выше второй космической [Светцов и др., 2012]. Как видно, эта относительная масса m/m' (m' – масса тела-ударника) существенно превышает относительную массу Луны (более чем в 10 раз при $\Delta = 0,1$). Небольшая часть вещества ударника, в среднем около 0,5%, остается на геоцентрических орбитах. Это немного, но существенно больше, чем дает модель ко-аккреции для деспутникового роя.

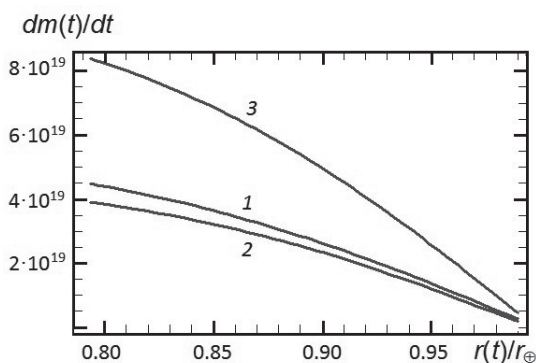
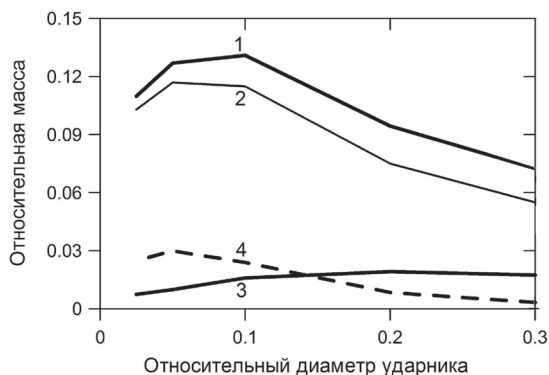


Рис. 1. Поток твердого вещества в г/год на растущую Землю в зависимости от её относительного размера: 1 – прирост массы за счет крупных тел, 2 – прирост массы за счет остальных тел, 3 – суммарный поток

Рис. 2. Отношение массы частиц, выбрасываемых после ударов на гелиоцентрические орбиты, к массе ударяющего тела m_e/m' в зависимости от угла удара для нескольких относительных диаметров тел. 1 – отношение диаметра тела к диаметру Земли δ равно 0,3, 2 – $\delta = 0,2$, 3 – $\delta = 0,1$, 4 – $\delta = 0,05$, 5 – $\delta = 0,025$. [Светцов и др., 2012]. Масса Земли составляла 0,7 от современной [Светцов и др., 2012]

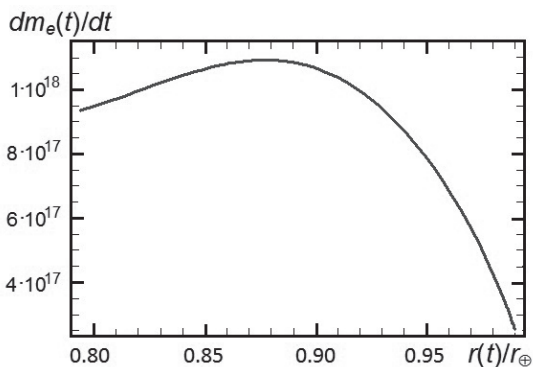


По данным, приведенным на рис. 2, найдем зависимость массы ударного выброса от относительной массы ударника $\mu = m'/m(t)$. Для этого сначала численно найдем функцию, аппроксимирующую кривую 1 на рис. 2 (зависимость от относительного размера ударника), затем преобразуем ее в зависимость относительной массы выброса m_e/m' от относительной массы ударника. Полученная таким образом функция $f_e(\mu)$ определяет долю выбрасываемого вещества при падении тела m' в зависимости от его массы и массы растущей планеты. Умножив подинтегральные выражения в (8) на $f_e(\mu)$ и проинтегрировав полученные интегралы, найдем поток выброшенного с растущей планеты вещества (эжекты) при макроударах dm_e/dt (рис. 3).

Теперь, зная поток вещества с растущей Земли сквозь околоземное пространство, частично заполненное долунным роем тел и частиц, нужно оценить вероятность столкновений частиц роя с частицами выброшенного вещества на прямых и обратных орбитах, угловой момент, приносимый выброшенным веществом в долунный рой, и другие параметры в зависимости от массы растущей планеты, поверхностной плотности вещества в зоне питания планеты, распределения поверхностной плотности вещества роя, чтобы исследовать эволюцию околоземного роя в процессе роста планеты.

На рис. 4 показано увеличение относительной доли выбрасываемого вещества от падающего в процессе аккумуляции планеты. Это связано с тем, что к концу аккумуляции уменьшается верхний предел распределения допланетных тел по массам (см. формулу (5)), соответственно, уменьшается их эффективный размер. На рис. 2 показана область относительных размеров тел-ударников, при которых выброс наиболее эффективен.

Рис. 3. Осредненная по углам относительная масса частиц, выбрасываемых на гелиоцентрические орбиты, в зависимости от относительного диаметра ударяющего тела δ . 1 – полная масса, 2 – масса частиц, состоящих из вещества ударника, 3 – масса частиц мишени, 4 – масса частиц из ядра ударника [Светцов и др., 2012]



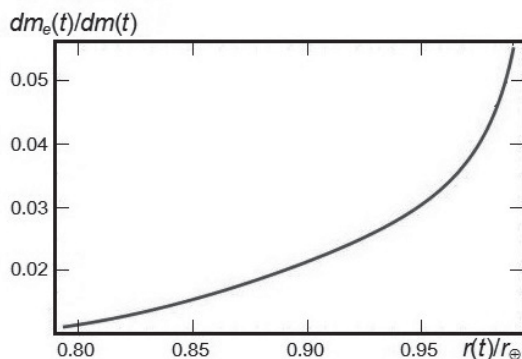


Рис. 4. Поток вещества ударных выбросов с растущей планеты в г/год в зависимости от относительного радиуса планеты

Заключение

Впервые получена оценка потока вещества с растущей Земли на баллистические и гелиоцентрические орбиты при макроударах. Учет этого важного источника подпитки веществом долунного роя поможет решить проблемы массы и состава в исследовании формирования Луны. Следует отметить четыре момента. Во-первых, частицы, выброшенные из сферы Хилла, в среднем (по углам удара) через 200 лет возвращаются и могут быть поглощены растущей Землей или роем при свободно-свободных и свободно-связанных столкновениях [Svetsov et al., 2012]. Во-вторых, частицы из ударных выбросов при своем движении от Земли могут столкнуться с частицами роя и быть захваченными в рой с большой вероятностью [Горькавый, 2007]. Третье – проблема углового момента: полученные в [Печерникова, 2013] «макро»-оценки накопления момента осевого вращения Земли не противоречат (и даже скорее подтверждают) возможность образования долунного роя с соответствующим орбитальным моментом. Четвертое – в работе [Печерникова, 2014] рассмотрены различные механизмы перемешивания вещества в зоне питания планеты, приводящие к его гомогенизации и близости по составу растущей Земли и падающих на неё тел (ударников).

Автор благодарен Б.А. Иванову за полезное обсуждение статьи.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН № 28.

Литература

- Витязев А.В., Печерникова Г.В. К синтезу космохимического и динамического подходов в планетной космогонии // Метеоритика. 1985. Вып. 44. С. 3–20.
- Витязев А.В., Печерникова Г.В. Ранняя дифференциация Земли и проблема лунного состава // Физика Земли. 1996. № 6. С. 3–16.
- Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С. Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 1990. 296 с.
- Горькавый Н.Н. Образование Луны и двойных астероидов // Изв. Крымской Астрофиз. Obs. 2007. 103, № 2. С. 143–155.
- Печерникова Г.В. К формированию и эволюции околопланетных роев // Планетная космогония и науки о Земле / Под ред. В.А. Магницкого. М.: Наука, 1989. С. 106–139.

- Печерникова Г.В.* Время роста Земли // ДАН. 2005. Т. 401. № 3. С. 391–394.
- Печерникова Г.В.* Приобретение момента импульса в статистической ко-аккреционной модели формирования системы Земля-Луна // Динамические процессы в геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН, Выпуск 4. М.: ГЕОС, 2013. С. 61–66.
- Печерникова Г.В.* О зоне питания растущей планеты и проблеме образования Луны // Динамические процессы в геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН, вып. 6. М.: ГЕОС, 2014. С. 154–162.
- Печерникова Г.В., Витязев А.В.* Массы крупнейших тел и дисперсия скоростей при аккумуляции планет // Письма в «Астрон. журн.». 1979. Т. 5. С. 54–59.
- Печерникова Г.В., Маева С.В., Витязев А.В.* К динамике околопланетных роев // Письма в «Астроном. журн.» 1984. Т. 10. № 9. С. 703–709.
- Рускол Е.Л.* О происхождении Луны. I. Образование околоземного роя тел // Астрономический журнал. 1960. Т. 37. С. 690–702.
- Рускол Е.Л.* Происхождение Луны. М.: Наука, 1975. 188 с.
- Сафронов В.С.* О росте планет в протопланетном облаке // Астроном. журн. 1954. Т. 31. С. 499–510.
- Светцов В.В.* В развитие статистической модели образования Луны. II // Динамические процессы в геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН, Выпуск 4. М.: ГЕОС, 2013. С. 66–73.
- Светцов В.В., Печерникова Г.В., Витязев А.В.* В развитие статистической модели образования Луны // Динамические процессы в геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН, Выпуск 3. М.: ГЕОС, 2012. С. 23–30.
- Benz W., Slattery W.L., Cameron A.G.W.* The origin of the Moon and the single-impact hypothesis // Icarus. 1986. V. 66, № 3. P. 515–535.
- Cameron A.G.W., Ward W.R.* The origin of the Moon // Lunar and Planetary Science Conference VII. 1976. P. 120–122.
- Harris A.W., Kaula W.M.* A coaccretional model of satellite formation // Colloq. IAU 28 «Planetary Satellites», Aug. 1974, Ithaca.
- Hartmann W.K., Davis D.R.* Satellite-sized planetesimals and lunar origin // Icarus 24, 1975. 504–515.
- Melosh H.J.* New approaches to the Moon's isotopic crisis // Phil. Trans. R. Soc. A 2014 372 20130168; DOI:10.1098/rsta.2013.0168. Published 11 August 2014.
- Origin of the Moon / eds. *W.K. Hartmann, R.J. Phillips, G.J. Taylor*. Houston: Lunar and Planetary Inst. 1986.
- Safronov V.S., et al.*, Protosatellite swarms // Satellites / Eds. J.A. Burns, M.S. Matthews. Tucson: The University of Arizona Press, 1986. P. 89–116.
- Safronov V.S., Zvjagina E.V.* Relative sizes of largest bodies during the accumulation of planets // Icarus. 1969. V. 10. P. 109–118.
- Svetsov V.V., Pechernikova G.V., Vityazev A.V.* Possibility of Moon formation from debris from impacts on the Earth // ESLAB Symposium on Formation and Evolution of Moons, Noordwijk, The Netherlands, 2012. <http://sci.esa.int/eslab46>.