

## **О ЗОНЕ ПИТАНИЯ РАСТУЩЕЙ ПЛАНЕТЫ И ПРОБЛЕМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ЛУНЫ**

***Г.В. Печерникова***

В статье рассматривается проблема однородности состава вещества, из которого формируются планетезимали, объединяющиеся в планету. Расширяется понятие зоны питания растущей планеты – учитываются ненулевой эксцентриситет орбиты планеты и влияние крупных тел на скорость ее роста. Рассматриваются различные механизмы перемешивания вещества в зоне питания планеты и их роль в формировании системы Земля–Луна.

### **Введение**

Теории происхождения Луны можно подразделить на несколько направлений (краткий обзор см. в [Печерникова, 2013]). Здесь мы отметим три. Первое направление – модели ко-аккреции – формирование долунного околоземного роя в процессе роста Земли. Впервые такую теорию предложила Е.Л. Рускол [Рускол, 1960, 1975], а позднее – и американские планетологи [Harris, Kaula, 1974]. Однако из этих моделей следует дефицит массы и углового момента долунного роя, хотя ко-аккреционные модели хорошо описывают спутниковые системы планет-гигантов. Второе направление, возникшее как альтернатива первому для объяснения большого отношения масс Луны и Земли (1/81) и большого углового момента системы Земля–Луна, – это различные варианты модели мегаимпакта (столкновения прото-Земли на поздней стадии её роста с другой планетой, часто называемой Тейя), впер-

вые предложенные в [Hartmann, Davis, 1975; Cameron, Ward, 1976]. В модели мегаимпакта при почти касательном ударе Тейи образуется массивный протолунный диск с большим угловым моментом, из которого впоследствии формируется Луна. В этих моделях 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 большие трудности геохимического характера.

Недавно в Phil. Trans. R. Soc. A опубликованы результаты обсуждения проблемы происхождения Луны [Discussion Meeting, 2014] со вступительной статьей [Stevenson, Halliday, 2014], где отмечено, что в науке о Луне в настоящее время есть два ключевых источника информации для выяснения происхождения Луны: первый – это новое моделирование динамических процессов, которое базируется не только на основе более мощных вычислительных кодов, но и на сложных исследованиях неопределенности, окружающей некоторые фундаментальные параметры аккреции. Второй источник – измерение изотопного состава отдельных элементов в лунных и земных образцах с беспрецедентной точностью.

В обсуждении современного состояния теории происхождения системы Земля–Луна приняли участие более тридцати авторов 18-ти работ. Около трети работ содержат все более сложные сценарии мегаимпакта вплоть до «неканонических» в попытках объяснить современные характеристики системы Земля–Луна. Большая часть работ посвящена проблеме различий химического состава вещества Луны и Земли при почти полном совпадении изотопных систем. Как пишет Джей Меллош, «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». В нескольких работах обсуждается проблема подобия обилия тугоплавких и дефицита летучих на Луне по сравнению с Землей, которая также приводит к сильным ограничениям на процессы формирования Луны.

Из выше сказанного следует, что формирование системы Земля–Луна путем твердотельной аккумуляции рассматривалось ранее в двух предельных моделях:

*модель I* – ко-аккреционная: формирование долунного роя путем гравитационного захвата тел и частиц в сферу Хилла растущей планеты;

*модель II* – модель мегаимпакта: формирование долунного роя в результате выброса вещества при косом ударе **одного** очень крупного тела.

Наша модель – промежуточная:

*модель III* – ко-аккреционная модель плюс макроимпакты: формирование околоземного «затравочного» 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 рассмотрена модель расширяющихся и перекрывающихся зон питания зародышей планет с учетом влияния крупных тел для оценки степени однородности состава планетезималей, из вещества которых формируется система Земля–Луна (в рамках ко-аккреционной модели).

## Зона питания планеты

Нами [Печерникова, Витязев, 1979] разработана самосогласованная модель расширяющихся и перекрывающихся зон питания и рассмотрен рост крупнейших тел. Под зоной питания зародыша планеты подразумевается кольцевая область с полушириной  $\Delta R$  по обе стороны его орбиты с радиусом  $R$ . Полуширину зоны питания  $\Delta R(t)$  растущей планеты определим из условия, что все тела с орбитами, большие полуоси которых заключены в интервале  $R \pm \Delta R(t)$ , имеют возможность столкнуться с зародышем планеты массы  $m(t)$ . Рассмотрим это условие подробнее. Назовем орбиты планетезималей внутренними, если они «дотягиваются» или пересекают орбиту зародыша со стороны своего афелия (самой удаленной от Солнца точки орбиты), то есть

$$a(1 + \bar{e}) \geq R, \quad (1)$$

где  $a$  – большая полуось орбиты,  $\bar{e}$  – средний эксцентриситет орбит основной массы тел на расстоянии  $R$  от Солнца,  $a(1 + \bar{e})$  – соответствующее расстояние до афелия. Отсюда находим минимальное значение  $a_{\min} = R/(1 + \bar{e}) \approx R(1 - \bar{e})$ . Соответственно, внешними орбитами назовем орбиты планетезималей, касающиеся или пересекающие орбиту зародыша со стороны своего перигелия

$$a(1 - \bar{e}) \leq R, \quad (2)$$

откуда  $a_{\max} = R/(1 - \bar{e}) \approx R(1 + \bar{e})$ .

Итак, для больших полуосей орбит планетезималей, на которых возможны их столкновения с зародышем планеты, мы получаем из (1) и (2) условие с точностью до  $e(t)$  и с учетом эксцентриситета орбиты самого зародыша  $e(t)$  при  $e(t) \lesssim \bar{e}(t)$

$$R - R[e(t) + \bar{e}(t)] \leq a \leq R + R[e(t) + \bar{e}(t)], \quad (3)$$

то есть полуширину зоны питания можно записать в виде:

$$\Delta R(t) = [e(t) + \bar{e}(t)] R. \quad (4)$$

Средний эксцентриситет орбит  $\bar{e}(t)$  определяется через среднюю относительную скорость планетезималей в зоне питания растущей планеты  $\bar{v}(t)$  [Сафронов, 1969]

$$\bar{e}(t) \approx \bar{v}(t)/V_K, \quad \bar{v}^2(t) = Gm(t)/\theta r(t), \quad (5)$$

где  $\theta$  – параметр Сафронова,  $V_K = (GM_\odot/R)^{1/2}$  – кеплеровская круговая скорость на расстоянии  $R$  от Солнца,  $M_\odot$  – масса Солнца. Из (4) и (5) видно, что, так как  $\bar{v}(t) \propto r(t)$ , то  $\bar{e}(t) \propto r(t)$  и  $\Delta R(t) \propto r(t)$ . Следовательно, ширина кольцевой зоны питания  $2\Delta R(t)$  и масса находящегося в ней вещества  $Q(t)$  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  $\sigma_0$  как

$$\sigma_d(t) = \sigma_0 \left[ 1 - \frac{m(t)}{Q(t)} \right]. \quad (6)$$

Рост планеты прекращается, когда отношение  $m(t)/Q(t)$  достигает единицы, то есть  $m(t) \rightarrow m_{\max}$ , где  $m_{\max}$  определяется параметрами допланетного диска [Витязев и др., 1990; Vityazev, Pechernikova, 1991]. Обозначив  $m(t)/m_{\max} = z^3$  и учитывая, что  $m(t)/Q(t) = (m(t)/m_{\max})^{2/3} = z^2$  [Витязев и др., 1990], получаем фактор вычерпывания допланетного вещества в виде  $(1 - z^2)$ , то есть

$$\sigma_d(t) = \sigma_0(1 - z^2) \quad (7)$$

Ранее в работах по теории аккумуляции планет принималось, что уже на весьма ранней стадии произошел значительный отрыв по массе зародышей планет от остальных тел в зоне питания будущей планеты. Нами [Печерникова, Витязев, 1979] получено изменение со временем величины верхнего предела  $M_1(t)$  степенного распределения допланетных тел по массам в процессе роста планеты в виде

$$M_1(t) \approx (1 - z^2)m(t). \quad (8)$$

Можно видеть, что на ранних стадиях роста планет, когда  $z \ll 1$ , крупнейшие тела зоны питания сравнимы по массе с растущей планетой. Лишь когда  $m(t)$  начинает составлять заметную долю от  $Q(t)$  и становится существенным уменьшение поверхностной плотности вещества из-за вычерпывания (7), растущая планета начинает опережать по массе остальные тела в своей зоне.

### Крупные тела и их роль в формировании Земли

Напомним, что рост допланетных тел происходит вследствие их объединений при малых скоростях столкновений. Скорость увеличения массы планеты  $m(t)$  в области планет земной группы определяется в основном частотой её столкновений с телами роя  $m'$  в зоне питания планеты. Распределение по массам  $m'$  и относительным скоростям  $v'$  в рое допланетных тел является важнейшей характеристикой, определяющей динамику формирования планетной системы [Сафронов, 1969; Витязев и др., 1990]. Распределение по массам допланетных тел обычно принимают в виде простой степенной зависимости

$$n(m', t)dm' = n_0(t)(m')^{-q}dm', \quad (1 < q < 2), \quad (9)$$

где  $n_0(t)$  – коэффициент нормировки

$$n_0(t) = (2 - q)M_1^{q-2}\rho_d. \quad (10)$$

Здесь нижний предел распределения  $m_0 \ll M_1$ ,  $q < 2$  означает, что основная масса системы заключена в крупных телах,  $\rho_d$  – плотность конденсированного вещества в зоне питания.

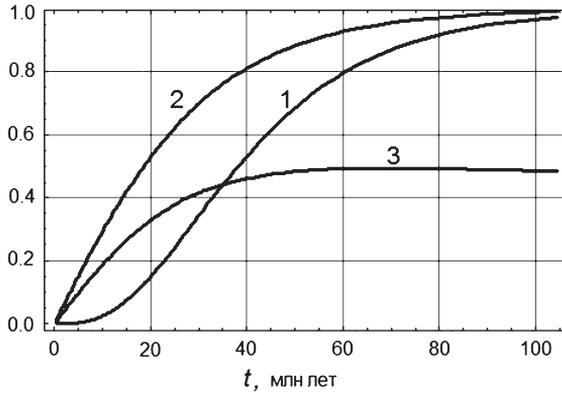
Ранее была предложена стохастическая модель роста Земли [Pechernikova et al., 2003]. Исследования четырех вариантов расчетов в рамках этой модели показали, что немногим более 50% прироста массы на стадии роста Земли от половины её массы до современной приносится крупнейшими (из первого десятка после растущей планеты) телами. Позднее уже аналитически было показано [Печерникова и др., 2014], что при росте Земли от 0.5 до 0.99 её современной массы более 50% вещества ей приносят крупнейшие (из первой десятки) тела – отсюда столь велика роль крупных тел в формировании Земли.

Учет влияния крупных тел на формирование планет позволил получить решения 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 позволил получить короткую шкалу роста Земли на ранней стадии и снять противоречия с показаниями Hf–W-геохронометра [Печерникова, 2005].

Время роста Земли до относительного радиуса  $z$  с учетом влияния крупных тел согласно работе [Печерникова, 2005]

$$t = \frac{b\delta r_{\max}}{\sigma_0} \left( \ln \frac{1+z}{1-z} - 0.43z - 0.04z^3 \right), \text{ лет}, \quad (11)$$

где  $b = 0.07$  (слабо зависит от значений  $\theta$  и  $q$ ). Рост относительной массы Земли, вычисленный по (11) при средней за время роста плотности Земли  $\delta = 4.5 \text{ г/см}^3$  и  $\sigma_0 = 10 \text{ г/см}^2$ , показан кривой 1 на рис. 1.



**Рис. 1.** Рост относительной массы Земли – кривая 1, рост относительного радиуса Земли – кривая 2, рост ширины зоны питания растущей планеты – кривая 3

Используя полученные в [Витязев и др., 1990] решения, запишем для растущей планеты, движущейся по эллипсу, её среднеквадратичную относительно круговой скорость как

$$v^2(m) = \frac{\overline{m'} v'^2}{m}, \quad (12)$$

$$\overline{m'} = \frac{(2-q)M_1}{3-q}, \quad (13)$$

– равномерное распределение энергии случайного движения между растущей планетой  $m(t)$  и телами средней по распределению (9) массы  $m'$  (с весовой функцией  $m' n(m') dm'$ ), а  $v'^2$  – средняя относительная скорость планетезималей в зоне питания растущей планеты (5).

Подставляя в (12) формулы (8) и (13), при  $q = 11/6$  получаем квадрат средней относительно круговой скорости зародыша планеты

$$v^2(m) = \frac{(1-z^2)v'^2}{7}. \quad (14)$$

Переходим от относительных скоростей к эксцентриситетам и, с учетом того, что для любого тела, движущегося по эллипсу, среднее значение  $e^2$  равно

$$e^2 = \frac{5}{3} \frac{\overline{v^2}}{V_K^2}, \quad (15)$$

из (14) и (15) находим

$$\overline{e'} + e = \overline{e'} + \overline{e'} \sqrt{\frac{1-z^2}{7}} = \overline{e'} \left( 1 + \sqrt{\frac{1-z^2}{7}} \right). \quad (16)$$

Выразив  $\overline{e'}$  через переменную  $z$  (см. (7)) получаем ширину зоны питания (4) как

$$2\Delta R = 2 \sqrt{\frac{5}{3} \frac{m_{\max}}{\theta r_{\max}} \frac{R}{M_{\odot}}} \left( 1 + \sqrt{\frac{1-z^2}{7}} \right) Rz. \quad (17)$$

На рис. 1 показаны рост со временем относительной массы Земли  $m(t)/m_{\max} = z^3(t)$ , относительного радиуса Земли  $r(t)/r_{\max} = z(t)$ , вычисленные по (11), и рост ши-

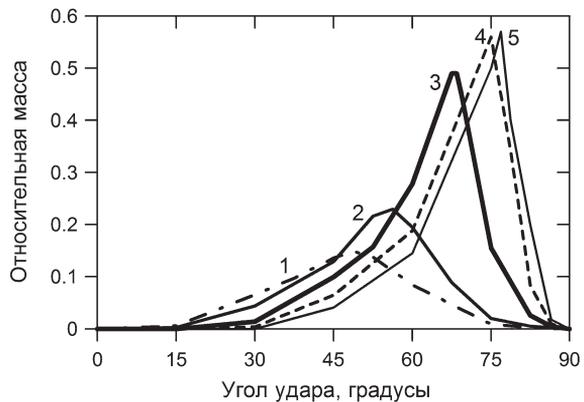
рины зоны питания  $2\Delta R(t)$  в долях а.е., вычисленный по (17), где принималось  $z = z(t) = r(t)/r_{\max}$  по (11), то есть в рамках модели роста Земли с учетом влияния крупных тел [Печерникова, 2005].

Расчеты показали (см. рис. 1), что в первые примерно 40 млн лет происходит ускоренный рост Земли вплоть до массы  $m(t) \approx 0.5$  от современной. К этому моменту относительный радиус  $z \approx 0.8$ , соответственно верхний предел распределения допланетных тел по массам  $M_1(t) \approx (1 - z^2)m(t)$  составляет  $0.36 m(t)$  или  $0.18$  от массы современной Земли. Математическое ожидание массы наибольшего после растущей планеты тела порядка  $0.2 m(t)$  или  $0.1$  от современной Земли, то есть массы Марса. Приведенные в [Печерникова, 2013] «макро»-оценки накопления момента осевого вращения Земли не противоречат (и даже скорее подтверждают) возможность образования долунного роя с соответствующим орбитальным моментом.

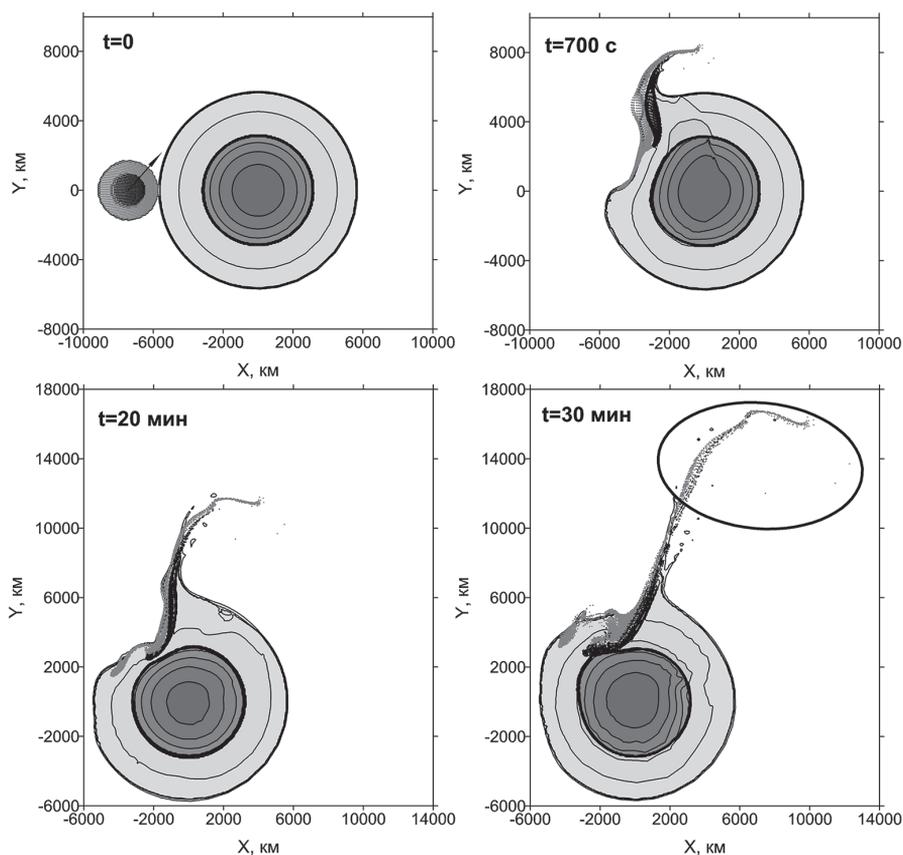
Ко-аккреционная статистическая модель формирования системы Земля–Луна определяется двумя составляющими: 1 – образование околоземного роя в результате гравитационного захвата тел и частиц из зоны питания планеты в соответствии с ко-аккреционной моделью, 2 – подпитка околоземного роя веществом, выброшенным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

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 ( $\sim 0.3$  по массе). Относительные скорости тел до сближения с Землей составляли около  $5$  км/с. Это приводит к скорости удара очень близкой к скорости убегания планеты. Результаты вычислений для различных углов удара и отношений диаметра ударника к диаметру Земли  $\delta$  от  $0.025$  до  $0.3$  показаны на рис. 2.

**Рис. 2.** Отношение массы частиц, выбрасываемых после ударов на гелиоцентрические орбиты, к массе ударяющего тела  $\mu$  в зависимости от угла удара для нескольких относительных диаметров тел. 1 – отношение диаметра тела к диаметру Земли  $\delta$  равно  $0.3$ , 2 –  $\delta = 0.2$ , 3 –  $\delta = 0.1$ , 4 –  $\delta = 0.05$ , 5 –  $\delta = 0.025$ . Масса Земли составляла  $0.7$  от современной [Светцов и др., 2012].



На рис. 3 в качестве примера расчета показан удар тела под углом  $50^\circ$ , когда относительная масса частиц, выбрасываемых на гелиоцентрические орбиты, достигает наибольшей величины  $15\%$ . На Земле образуется большой кратер, а вещество ядра планетезимали достигает ядра Земли. Оценки показали, что размеры выбра-



**Рис. 3.** Удар дифференцированного тела под углом  $50^\circ$ . Отношение диаметра тела к диаметру Земли  $\delta = 0.3$ . Внутри эллипса находятся осколки, которые в рассеянном виде переходят на гелиоцентрические орбиты [Светцов, 2013]

сываемых на гелиоцентрические орбиты частиц лежат в интервале от 10 см до 10 м. Через 200–400 лет траектории большинства этих частиц пересекаются со сферой Хилла Земли. Таким образом, выбрасываемые частицы вполне могут взаимодействовать с протолунным роем частиц, движущихся в сфере Хилла, или вновь аккумулироваться Землей, если до этого не выпали на более крупные планетезимали [Светцов и др., 2012].

### Обсуждение результатов

Зона питания растущей Земли довольно узкая – всего около половины астрономической единицы, в ней нет резких температурных границ, что предполагает относительно однородный состав твердого вещества. Кроме того:

1. Быстрый рост ширины зоны питания приводит к хорошему перемешиванию планетезималей внутри зоны.
2. Рост планеты в основном за счет крупных тел, в которых вещество тоже хорошо перемешано и при наборе массы на эллиптических орбитах в разных частях

зоны питания планеты, и при ударном перемешивании при столкновениях с меньшими телами [Витязев, Печерникова, 1996], приводит к гомогенизации её состава.

3. При разрушении допланетных тел в результате высокоскоростных столкновений [Витязев и др., 1990] происходит разброс осколков, а затем их реаккумуляция другими телами – дополнительное перемешивание.

4. Как показано в работе [Kleine et al., 2009], сильное фракционирование литофильного Hf от сидерофильного W во время формирования ядра делает Hf-W систему идеальным хронометром для этого масштабного события дифференциации. Однако для больших планет, таких, как планеты земной группы, рассчитанные Hf-W возраста особенно чувствительны к макроимпактам. Вольфрам-модельные возраста для образования ядра Земли сильно размазаны. В то же время расчетные возраста формирования ядра Марса лежат в диапазоне от 0 до 20 млн лет после формирования CAI. Можно предположить, что Марс, масса которого составляет около 0.1 от массы Земли, не дорос до разрушительных макроимпактов. Это, в свою очередь, допускает такую же раннюю дифференциацию и формирование ядер и мантий у растущей Земли и крупнейших планетезималей с соответственно близкими составами.

*Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН № 28.*

## Литература

*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 коаккреционной 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., Витязев А.В.* Массы крупнейших тел и дисперсия скоростей при аккумуляции планет // Письма в «Астроном. журн.» 1979. Т. 5. № 1. С. 54–59.

*Печерникова Г.В., Светцов В.В., Сергеев В.Н.* Формирование Земли и планет земной группы и их ранняя эволюция // Тезисы отчетной конференции по Программе 28 Президиума РАН «Проблемы происхождения жизни и становления биосферы», 9–10 апреля, Москва, 2014. С. 27–28.

*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.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.

*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.

*Cameron A.G.W., Ward W.R.* The origin of the Moon. // Lunar and Planetary Science Conference VII. 1976. P. 120–122.

Discussion Meeting Issue ‘Origin of the Moon: challenges and prospects’ organised and edited by David J. Stevenson and Alex N. Halliday // [rsta.royalsocietypublishing.org/content/372/2024/](http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/372/2024/) September 13, 2014.

*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.

*Kleine T., Touboul M., Bourdon B., Nimmo F., Mezger K., Palme H., Jacobsen S.B., Qing-Zhu Yin, Halliday A.N.* Hf–W chronology of the accretion and early evolution of asteroids and terrestrial planets // *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73 (2009) 5150–5188.

*Pechernikova, G.V. Davidenko, I.W., Vityazev, A.V.* Estimation of axial moment of the growing Earth // III Internat. Conf. on Large Meteorite Impacts. Nordlingen, 2003. Sess. 1. 4015.

*Stevenson D. J. and Halliday A. N.* The origin of the Moon // *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2014 372, 20140289, published 11 August 2014.

*Vityazev A.V., Pechernikova G.V.* Late stages of accumulation and early evolution of the planets // *Planetary Sciences* / Eds. T.M. Donahue, K.K. Trivers, D.M. Abramson – Wash. (D.C.): Nat. Acad. Press. 1991. P. 143–162.