

ПРИБРЕТЕНИЕ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА В СТАТИСТИЧЕСКОЙ КООККРЕЦИОННОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ – ЛУНА

Г.В. Печерникова

В статье дана краткая характеристика обобщенной коаккреционной модели формирования системы Земля – Луна в аспекте приобретения момента количества движения. Приведены аналитические оценки осевого вращения планет, приобретаемого в ходе их роста, в рамках стандартного сценария происхождения Солнечной системы и оценки, полученные при моделировании роста Земли в стохастической модели. Эти оценки не противоречат (и даже скорее подтверждают) возможность образования долунного роя с соответствующим орбитальным моментом.

Введение

Теории происхождения Луны можно подразделить на несколько направлений. Первые два – теории отрыва части вещества Земли [Darwin G., 1908; и др.] и теории захвата спутника [Urey, 1962; и др.] – не могли объяснить соотношение масс Луны и Земли и момент количества движения системы – и «сошли с дистанции». Третье направление – модели коаккреции предлагают формирование долунного околоземного роя в процессе аккумуляции Земли. Впервые такую теорию предложила Е.Л. Рускол [Рускол, 1960; и др.], а позднее – американские планетологи [Harris, Kaula, 1974; и др.]. Однако в рамках и этих моделей появляется дефицит массы и углового момента долунного роя, хотя коаккреционные модели хорошо описывают спутниковые системы планет-гигантов. Четвертое направление – это различные варианты модели мегаимпакта [Benz et al., 1986; и др.], в которых 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. Пятое направление представляет обобщенная модель коаккреции, учитывающая вклад ударов крупных тел – макроимпакты [Печерникова, 1989; Витязев и др., 1990; Витязев, Печерникова, 1996; Светцов, 2013]. И, наконец, шестое направление (по времени появления) представлено гипотезой Э.М. Галимова – формирование системы Земля – Луна из единого газопылевого сгущения [Галимов и др., 2005]. Вычисления проводились для облака частиц, имеющего массу системы Земля – Луна, и обладающего угловым моментом, характеризующим систему этих тел, то есть так же, как в моделях мегаимпакта, выходные характеристики системы задавались как входные параметры.

В данной статье исследуется обобщенная модель коаккреции в аспекте накопления системой Земля – Луна момента количества движения, тогда как аккумуляция массы вещества в околоземном доспутниковом рое рассматривается в работе [Светцов, 2013].

Осевое вращение планет

Решение задачи об осевом вращении планет, приобретенном в ходе их роста, рассматривается в рамках стандартного сценария происхождения Солнечной системы. Согласно Сафронову [Сафронов, 1969] осевой момент вращения планеты K , направленный под углом ε к оси z , перпендикулярной к плоскости орбиты, можно рассматривать как сумму регулярной составляющей K_1 , направленной по оси z , и случайной составляющей K_2 , направленной под углом γ к оси z .

Очевидно, что

$$K \sin \varepsilon = K_2 \sin \gamma, \quad K \cos \varepsilon = K_2 \cos \gamma + K_1. \quad (1)$$

Регулярная составляющая момента K_1 приносится, в основном, телами с почти касательных компланарных орбит [Витязев и др., 1990]. При выпадении на планету массы $\Delta m = \Sigma m_i$, где $m_0 \leq m_i < M_1 < m(t)$, средний прирост момента K_1 есть

$$\Delta K_1 = \bar{\beta} \bar{l} \bar{v}_\phi \Delta m, \quad (2)$$

здесь m_0 и M_1 – нижний и верхний пределы распределения допланетных тел по массам, $m(t)$ – масса растущей планеты, $\bar{\beta}$ – средняя доля тел, приходящих с почти касательных орбит, \bar{l} – среднее прицельное расстояние и \bar{v}_ϕ – трансверсальная компонента средней относительной скорости выпадающих на планету тел до их сближения с планетой.

В работе [Энеев, Козлов, 1981] при численном исследовании задачи трех тел получено, что при сближении двух гравитационно взаимодействующих тел их кинетический момент относительно общего центра масс, меняясь сначала значительно, начиная с некоторого расстояния \bar{R} (которое близко к радиусу их сферы Хилла) стабилизируется и остается практически постоянным до максимального сближения обоих тел. Это означает, что при оценке момента вращения, приносимого планете падающими на нее телами, без большой погрешности можно рассматривать сталкивающиеся тела как негравитирующие, но с эффективным гравитационным сечением столкновения.

После оценки предельных значений величин, входящих в (2), их осреднения с соответствующими функциями распределения, подстановки их в (2) и интегрирования полученного выражения по массе с учетом крупных тел была найдена зависимость регулярной составляющей

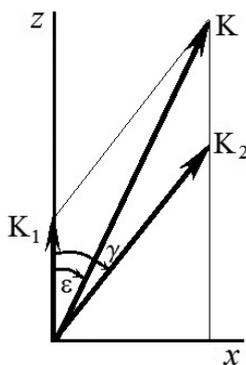


Рис. 1. Диаграмма составляющих момента осевого вращения K ; K_1 – регулярная составляющая, K_2 – случайная

момента осевого вращения от относительной массы растущей планеты $K_1(m(t)/m_p)$, где m_p – современная масса планеты. На рис. 2 приведен $K_1(m(t)/m_p)$ для зоны Земли ($R = 1$ а.е., $\bar{\rho} = 4,5$ г/см³, параметр Сафронова $\theta = 2$). К концу аккумуляции K_1 для Земли составляет $6,5 \cdot 10^{40}$ г см²/с, что соответствует периоду вращения 21,8 часа.

Случайная составляющая момента связана с дискретностью процесса роста планеты. При выпадении на планету тело массы m' приносит планете регулярную составляющую K_1 , направленную по оси z (рис. 1), и случайную составляющую K_2 , направление и величина которой по определению случайные величины.

В планетоцентрической системе координат (ось z перпендикулярна центральной плоскости допланетного роя) предположим изотропное распределение относительных

скоростей тел m' . Тело m' , движущееся до сближения с планетой с относительной скоростью V' , при выпадении на планету приносит ей момент

$$K'_2 = m'[r_c V'] = m' r_c \Delta V_n, \quad (3)$$

где r_c – радиус-вектор, направленный в точку удара, ΔV_n – составляющая относительной скорости, нормальная к линии удара, соединяющей центр планеты с точкой удара. Рассматривая выпадение тел m' на планету как случайный процесс, мы нашли дисперсию случайной величины K'_2 [Витязев и др., 1990]. Она равна среднему квадрату момента, принесенного планете телом m' , то есть приращению среднего квадрата случайной компоненты ΔK^2_2 осевого момента планеты при выпадении на нее тела m' . С учетом распределения допланетных тел по массам и скоростям, осреднив входящие величины с соответствующими функциями распределения, находим выражение для dK^2_2/dm , интегрируя которое находим K^2_2 . Зная K^2_2 , получаем величину стандартного отклонения $K_\sigma = \pm \sqrt{K^2_2}$, характеризующего точность определения момента осевого вращения планеты K . Для планеты, формирующейся в зоне Земли, величина $K_\sigma(m(t)/m_p)$ показана кривой 2 на рис. 2. На том же рисунке кривая 3 дает среднее значение $\bar{K} = K_1(m(t)/m_p) + K_\sigma(m(t)/m_p)$ и точками I, II, III показаны соответственно современный момент системы Земля – Луна $K_{\oplus\text{л}} = 3,45 \cdot 10^{41}$ г см²/с, момент Земли с периодом вращения $T = 10$ часов и современный момент Земли, заторможенной приливами.

Вопрос о критическом значении осевого момента, соответствующем кеплеровской круговой скорости на поверхности планеты $\omega_{cr} = \sqrt{Gm/r^3}$, рассмотрен в работе [Витязев, Печерникова, 1984]. Для однородного шара $K = 2\omega m r^2/5$. Подставляя сюда ω_{cr} , получаем

$$K_{cr1} = 0,315 G^{1/2} \delta^{-1/6} m^{5/3}. \quad (4)$$

При приближении момента растущей планеты к K_{cr1} ее рост должен замедлиться, так как аккумулироваться могут лишь тела с удельным моментом, меньшим критического, и тела, приносящие отрицательный момент. Вещество с избыточным моментом выбрасывается в околопланетный рой. Если же внутренние связи растущей планеты ослаблены (например, разрушением при ударах или вследствие раннего разогрева недр), то фигура растущей планеты принимает равновесную форму, согласно [Weidenschilling, 1981], при $K \leq K_{cr2} = 0,76 K_{cr1}$ сфероида Маклорена.

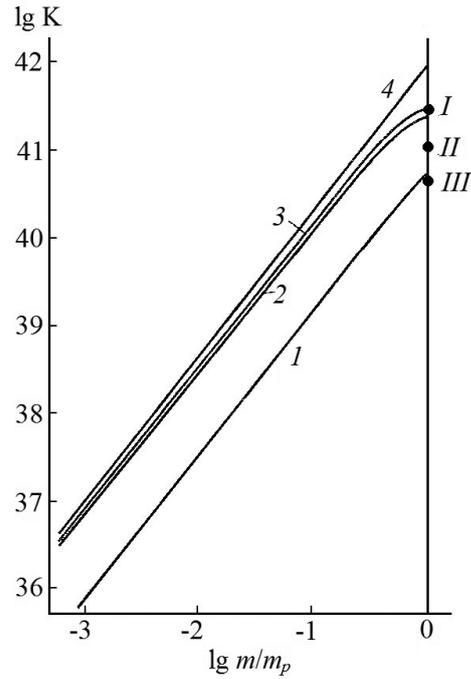


Рис. 2. Момент осевого вращения растущей Земли в зависимости от ее относительной массы: 1 – $K_1(m(t)/m_p)$; 2 – $K_\sigma(m(t)/m_p)$; 3 – $\bar{K} = K_1(m(t)/m_p) + K_\sigma(m(t)/m_p)$; 4 – K_{cr2} ; I, II, III – момент системы Земля – Луна, момент Земли с периодом вращения 10 часов и современный момент Земли, заторможенной приливами

На рис. 2 кривой 4 показан K_{cr2} . Для Земли к концу аккумуляции при $m(t) = m_p$ получены величины (в $\text{г см}^2/\text{с}$):

$$K_1(m_p) = 6,5 \cdot 10^{40}, K_0(m_p) = 2,9 \cdot 10^{41}, \tilde{K} = K_1(m_p) + K_0(m_p) = 3,55 \cdot 10^{41}.$$

Момент системы Земля – Луна

Не раз отмечалось подобие планетных и спутниковых систем. И так же как Солнце формировалось одновременно с допланетным диском, так и в коаккреционной модели рассматривается рост планеты с одновременным формированием околопланетного доспутникового роя. Более того, распределения массы и момента количества движения в Солнечной системе и в спутниковых системах, в том числе и в системе Земля – Луна подобны – основная масса системы сосредоточена в центральном теле, тогда как момент – в телах на орбитах.

Следует отметить, что приобретение осевого вращения растущей планетой (без роя) оценивалось в предположении полного объединения сталкивающихся тел, а современный момент системы Земля – Луна без каких-либо дополнительных предположений (см. Введение) попадает в полученный нами для Земли интервал \tilde{K} .

При расчетах макроимпактов малая доля вещества сталкивающихся тел выбрасывается на гео- и гелиоцентрические орбиты [Svetsov et al., 2012], унося с собой и часть момента, приносимого планете макроударами. При реаккумуляции планетой и допланетным роем это вещество возвращает момент системе.

Удары крупнейших тел и приращение момента растущей планеты рассматривались в дискретной стохастической модели роста Земли [Pechernikova et al., 2003]. В этой работе на каждом шаге по времени случайным образом выбиралось тело-ударник из десяти крупнейших после растущей планеты тел, точка удара на поверхности планеты и направление скорости удара. Одновременно вычислялись все необходимые согласно теории роста планеты непрерывные функции массы растущей планеты. Показано, что в процессе роста Земля испытала не единственный гигантский удар (мегаимпакт), а несколько таких столкновений с телами с массами $m' > 10^{26}$ г. На рис. 3 показаны 4 сценария роста массы планеты с выделенными ударами крупнейших тел и соответствующего увеличения модуля случайного момента K_2 осевого вращения в результате ударов крупнейших тел. Можно видеть, что с учетом регулярной составляющей момента K_1 суммарный момент близок к наблюдаемому моменту системы.

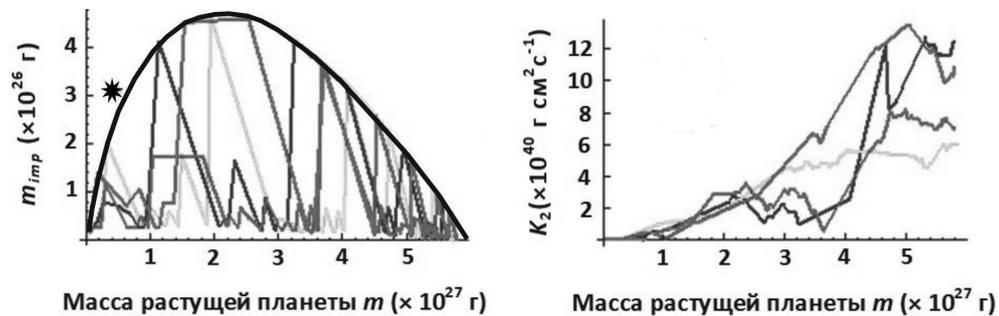


Рис. 3. Слева – массы ударников и выпадение крупных (от 5 до 7 с $m_i > 10^{26}$ г) тел на растущую Землю – четыре сценария; изменение верхнего предела распределения масс $M_1(m)$ показано кривой «*». Справа – увеличение модуля случайного момента K_2 как функция массы растущей планеты

Заключение

Формирование системы Земля – Луна путем твердотельной аккумуляции рассматривалось ранее в двух предельных моделях:

– модель I – коаккреционная модель: формирование долунного роа путем гравитационного захвата тел в сферу Хилла растущей планеты [Рускол, 1960; 1975] и

– модель II – модель мегаимпакта: формирование долунного роа в результате выброса вещества при косом ударе одного очень крупного тела [Benz et al., 1986].

Наша модель – промежуточная:

– модель III – коаккреционная модель плюс макроимпакты: формирование долунного роа путем гравитационного захвата тел из зоны питания планеты и захват вещества, выброшенного при ударах крупных тел, в процессе аккумуляции планеты [Печерникова, 1989; Витязев, Печерникова, 1996].

Приведенные выше «макро»-оценки накопления момента осевого вращения Земли не противоречат (и даже скорее подтверждают) возможность образования долунного роа с соответствующим орбитальным моментом. Необходимо дальнейшее исследование формирования и эволюции долунного околоземного роа с учетом реаккумуляции вещества, выброшенного при макроударах. Как и другие модели, наша модель формирования системы Земля – Луна имеет как свои трудности и проблемы, так и преимущества. Однако самое большое достоинство нашей статистической модели в том, что она не предполагает никакого маловероятного события для объяснения происхождения и эволюции системы Земля – Луна и никаких заранее принятых значений параметров.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН № 28.

Литература

Витязев А.В., Печерникова Г.В. О регулярной и случайной составляющих момента осевого вращения планет в процессе их формирования // О.Ю. Шмидт и советская геофизика 80-х годов. М.: Наука, 1984. С. 244–249.

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.

Галимов Э.М., Кривцов А.М., Забродин А.В., Легкоступов М.С., Энеев Т.М., Сидоров Ю.И. Динамическая модель образования системы Земля – Луна // Геохимия, 2005. № 11, С. 1139–1150.

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.

Рускол Е.Л. О происхождении Луны. I. Образование околоземного роа тел // Астрон. журн. 1960. Т. 37, вып. 3. С. 690–702.

Рускол Е.Л. Происхождение Луны. М.: Наука, 1975. 185 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 // Настоящий сборник, 2013.

Энеев Т.М., Козлов Н.Н. Модель аккумуляционного процесса формирования планетных систем // Астрон. вестник, 1981. Т. 15, № 2. С. 80–94; Т. 15, № 3. С. 131–141.

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.

Darwin G. Tidal friction and cosmogony // Science Paper. V. 2. London, Cambridge Univ. Press, 1908. P. 516.

Harris A.W., Kaula W.M. A coaccretional model of satellite formation // Colloq. IAU 28 «Planetary Satellites», Aug. 1974, Ithaca.

Pechernikova, G.V. Davidenko, I.W., Vityazev, A.V. Estimation of axial moment of the growing Earth // III Internat. Conf. on Large Meteorite Impacts. Nördlingen, 2003. Sess. 1. № 4015.

Svetsov V.V., Pechenikova G.V., Vityazev A.V. Possibility of Moon formation from debris escaped after impacts on the Earth / Formation and Evolution of Moons. 46th ISLAB Symposium, 25–28 June 2012, Noordwijk, The Netherlands. [<http://sci.esa.int/eslab46>].

Urey H.C. The origin of the Moon // The Moon / Eds. Z. Kopal, Z. Kadla. Acad. Press, 1962.

Weidenschilling S.J. How fast can an asteroid spin? // Icarus, 1981. V. 46, № 1. P. 124–126.