

КРАТКИЙ ОБЗОР ГИПОТЕЗЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТОЛУННОГО РОЯ В ПРОЦЕССЕ КО-АККРЕЦИИ С УЧЕТОМ УДАРНЫХ ВЫБРОСОВ ВЕЩЕСТВА ЗЕМЛИ

Г.В. Печерникова, В.Н. Сергеев

ИДГ РАН

Рассмотрены основные процессы формирования и эволюции околопланетного роя твердых тел и частиц в рамках ко-аккреционной статистической модели формирования системы Земля–Луна. Оценена скорость движения вещества роя в радиальном направлении (скорость сжатия роя) в результате поступления в рой вещества из зоны питания планеты. Обсуждается подпитка долунного роя веществом Земли, выброшенным при ударах крупных планетезималей, в процессе ее роста.

Введение

Как справедливо отмечено Н.Н. Горькавым: «Проблема возникновения Луны висит над головой мыслителей с незапамятных времен» [Горькавый, 2007]. Идея об образовании спутников в околопланетных роях твердых тел и частиц, захваченных гравитационным полем планеты при взаимных столкновениях, была высказана в качественной форме О.Ю. Шмидтом [Шмидт, 1957]. Количественной разработке она была подвергнута в применении к Луне [Рускол, 1960; 1963; 1975; Harris, Kaula, 1975], затем обобщена на спутники других планет. Краткий обзор основных направлений исследований (модели ко-аккреции Земли и Луны, модели мегаимпакта, образование системы Луна-Земля из общего газопылевого сгущения и др.) можно посмотреть в работах [Печерникова, 2013; 2015]. Следует отметить работу [Кусков и др., 2018], в которой приведены аргументы, полностью отвергающие возможность формирования Луны из вещества примитивной мантии, т.е. модель мегаимпакта.

Эволюционная модель доспутникового околопланетного роя рассмотрена в работе [Печерникова и др., 1984], где показано, что в модели роста доспутникового роя за счет аккреции вещества из зоны питания планеты невозможно объяснить происхождение массивной Луны. Такая модель применима для объяснения происхождения спутниковых систем с суммарной массой $\sim 10^{-4}$ – 10^{-5} от массы планеты m_p , подобных системам вокруг планет-гигантов. В той же работе было отмечено, что выброс вещества растущей планеты в рой при ударах планетезималей о планету может существенно увеличить массу околопланетного роя. В представленной работе исследуется формирование околоземного долунного роя с учетом ударных выбросов вещества с Земли в так называемой ко-аккреционной статистической модели – образование околопланетных доспутниковых роев рассматривается как процесс, сопровождающий рост планет [Печерникова, 2015; Pechernikova, 2016].

Об образовании Солнечной системы

Звезды образуются в результате гравитационной (Джинсовской) неустойчивости в холодных плотных молекулярных облаках. Рассмотрим выделенный

сферический объем в однородной среде. Сила гравитации, стремящаяся сжать объем, $F_g \sim M/R^2 \sim R$ зависит только от массы газа, заключенной внутри объема $M = (4\pi/3)\rho_0 R^3$. А противостоит гравитационному сжатию сила, вызванная градиентом давления, $F_p \sim P/R \sim 1/R$. Очевидно, начиная с некоторого радиуса R равновесие невозможно, и объем начнет сжиматься. Джинс [Jeans, 1902] впервые показал, что изначально однородная гравитирующая среда с плотностью ρ_0 неустойчива по отношению к малым синусоидальным возмущениям плотности с характерным масштабом, превышающим $\lambda_J = c_s(\pi/G\rho_0)^{1/2}$, где $c_s = (RT/\mu)^{1/2}$ – изотермическая скорость звука. По мере сжатия плотность возрастает, Джинсовская длина волны уменьшается и появляется возможность фрагментации среды на мелкомасштабные образования. Поскольку с ростом плотности критическая масса уменьшается, облако распадается на меньшие фрагменты. При этом часть вращательного момента всего облака переходит в орбитальный момент фрагментов. Последние могут некоторое время сжиматься дальше. Так будет продолжаться до тех пор, пока образуются конечные продукты фрагментации в зависимости от массы и момента системы – кратная система звезд, звезда плюс планеты или одиночная звезда, причем у всех объектов вектор основной составляющей осевого вращения (без учета случайной компоненты) и вектор орбитального обращения будут направлены в одну сторону, совпадающую с направлением вращения первичного облака (фрагмента). Это мы называем прямым направлением. В процессе эволюции протосолнечной туманности образуется Солнечная система – Солнце плюс планеты и менее массивные космические тела, обращающиеся вокруг Солнца в направлении, близком к направлению осевого вращения Солнца. Основные характеристики Солнечной системы – планеты движутся по прямым орбитам вокруг Солнца в направлении, близком к направлению осевого вращения Солнца, так же как направление орбитального движения регулярных спутников планет близко к направлению осевого вращения планет и их движения по орбитам.

Формирование околопланетного роя

В ходе формирования планет вокруг них возникали рои из твердых тел и частиц. В этих роях происходило образование спутников планет. К исследованию динамики таких роев можно подходить с тех же позиций, что и при исследовании допланетных околозвездных дисков.

Масса вещества и ее распределение в рое может меняться вследствие:

1. Притока вещества из зоны питания планеты;
2. Выметания частиц простреливающими рой крупными телами зоны;
3. Дрейфа вещества к планете из-за уменьшения размеров орбит частиц с увеличением массы планеты («инвариант Джинса»);
4. Дрейфа к планете из-за того, что момент количества движения захватываемого вещества меньше момента на круговой орбите на расстоянии захвата;
5. Выпадения вещества на планету;
6. Потери «быстрых» частиц со скоростями, превышающими скорость ускользания;
7. «Распухания» роя при росте относительных скоростей частиц;
8. Выброса вещества планеты в рой при ударах планетезималей о планету;
9. Захвата осколков крупных тел, разрушенных при пролете внутри предела Роша;
10. Дрейфа малых частиц в газе в случае его присутствия;

11. Дрейфа крупных тел вследствие приливного взаимодействия с планетой и т.д.

Эволюция околоземного долунного роя

В приближении плоского роя (модель относительно тонкого диска, вращающегося с кеплеровской скоростью вокруг его оси симметрии z , проходящей через планету), поверхностная плотность вещества диска $\sigma_2(R_2, t)$ связана с радиальной скоростью в нем уравнением непрерывности

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

где индексы 1 и 2 относятся к величинам, связанным с зоной питания планеты и околопланетным роём соответственно. Через R_2 обозначено расстояние в рое от оси симметрии z , v_{R_i} – 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, т.е. 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.

Из условия сохранения момента частицы, обращающейся на среднем расстоянии R_2 от планеты с массой $m_p(t)$, $R_2 m_p(t) = \text{const}$ при увеличении массы планеты имеем

$$m_p(t) \frac{dR_2}{dt} + R_2 \frac{dm_p}{dt} = 0. \quad (2)$$

Тогда скорость дрейфа вещества к планете из-за уменьшения размеров орбит частиц с увеличением массы планеты («инвариант Джинса»)

$$v_{R_i} = \left(\frac{dR_2}{dt} \right)_1 = -3 \frac{R_2}{r_p} \frac{dr_p}{dt}, \quad (3)$$

где r_p – текущий радиус планеты.

Прирост момента количества движения относительно планеты в единице объема роя с массой ρ_2 вследствие захвата вещества $\Delta \rho_2$ на расстоянии R_2 с учетом осреднения по элементам орбит и массам падающих тел, следуя работе [Витязев, 1981], для планет земной группы можно записать в виде

$$\Delta K_1 = \bar{\beta} \bar{R}_2 \bar{v}_1 \Delta \rho_2, \quad (4)$$

где $\bar{\beta} = \frac{8}{\pi} \sqrt{3R_2 (1 + 4v_e^2 / e^2 V_c^2)^{1/2} / eR_1}$ – доля орбит, близких к касательным,

$$\bar{v}_1 \cong eV_c / 2 \approx v_1 / \sqrt{3} \quad \bar{R}_2 = \frac{8}{49} R_2 \sqrt{1 + 4v_e^2 / e^2 V_c^2},$$

$$v_1 = \sqrt{Gm_p / \theta r_p}, \quad (5)$$

v_e – скорость ускользания на расстоянии R_2 от планеты, e – средний эксцентриситет орбит основной массы тел в зоне питания планеты, v_1 – их средняя относительная скорость (относительно V_c – кеплеровской круговой на расстоянии R_1), θ – безразмерный параметр ($\theta \approx 2$, параметр Сафронова), R_1 – расстояние планеты от Солнца. Подставляя выражение (4) в (3), получаем

$$\Delta K_1 = a_1 R_2^{3/2} \Delta \rho_2 = k_J \Delta \rho_2, \quad (6)$$

где k_J – удельный момент поступающего в рой вещества.

Удельный момент количества движения в рое на расстоянии R_2 есть

$$k = \sqrt{Gm_p R_2} = a_2 R_2^{1/2}. \quad (7)$$

Из условия сохранения момента с учетом (6), (7), после некоторых преобразований и предельного перехода находим скорость движения вещества роя в результате поступления в рой вещества из зоны питания планеты

$$v_{R_2} = \left(\frac{dR_2}{dt} \right)_2 = -2 \frac{R_2}{\sigma_2} \left[1 - \mathcal{G} \left(1 + 6\theta \frac{r_p}{R_2} \right)^{3/4} \frac{R_2}{r_p} \right] I_2(R_2, t), \quad (8)$$

где $v_{R_2} = \left(\frac{dR_2}{dt} \right)_2 = -2 \frac{R_2}{\sigma_2} \left[1 - \mathcal{G} \left(1 + 6\theta \frac{r_p}{R_2} \right)^{3/4} \frac{R_2}{r_p} \right] I_2(R_2, t)$, – поток вещества из

зоны планеты, застревающего в рое.

Решение уравнения (1) с учетом (3, 5, 8) показало, что в результате притока вещества из зоны питания планеты масса околоземного роя, обращающегося вокруг Земли по прямым орбитам, оказывается на 2–3 порядка меньше массы Луны.

Подпитка околоземного роя веществом ударных выбросов с Земли

Как отмечено в работе [Печерникова и др., 1984], выброс вещества растущей планеты в рой при ударах планетезималей о планету может существенно увеличить массу околопланетного роя. В работе Н.Н. Горькавого [Горькавый, 2007] рассмотрено взаимодействие частиц ударного выброса с Земли (эжекты) с частицами околоземного роя по определению прямого направления. Автором показано, что при столкновении частиц эжекты, движущихся по прямым орбитам, с частицами околоземного роя, они присоединяются к рою, тогда как при их движении по обратным орбитам в результате таких столкновений они выпадают на Землю, «унося с собой частицу диска, если её масса меньше или сравнима с частицей эжекты». Н.Н. Горькавый: «Столкновения земной эжекты с частицами прямого протоспутникового диска стабилизируют обломки на спутниковых орбитах. Мы показали высокую эффективность мульти-импактного механизма: земная эжекта, обладающая прямыми орбитами, легко присоединяется к прямому протоспутниковому диску, а обратная эжекта возвращается на Землю.»

Как отмечено выше, в результате гравитационного взаимодействия тела в допланетном диске приобретают относительные скорости (относительно

кеплеровской круговой V_c) $v_1 = \sqrt{Gm_p / \theta r_p}$.

Поскольку допланетные тела движутся не по круговым орбитам в одной плоскости, а по эллиптическим орбитам с ненулевыми наклонами, их столкновения с Землей происходят под разными углами и при разных ударных параметрах

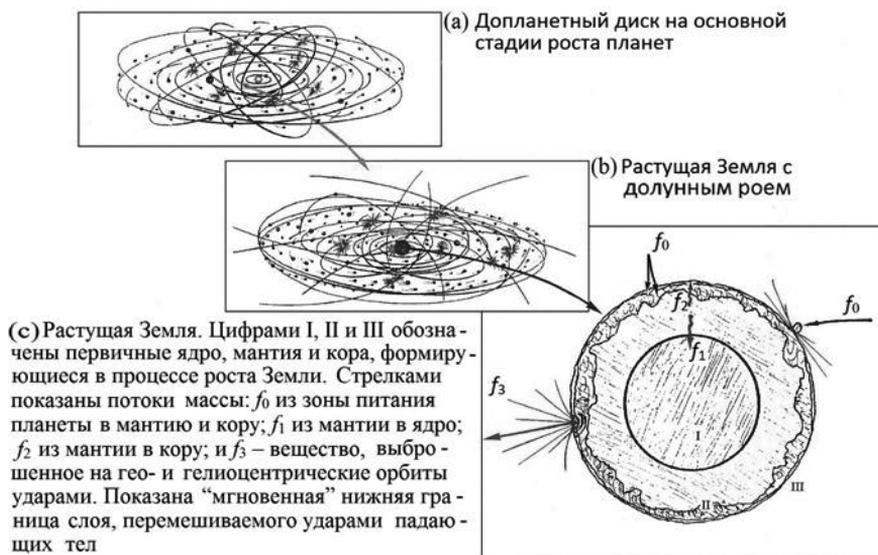


Рис. 1. Схема столкновений твердых тел в допланетном и долунном дисках и с растущей Землей

(рис. 1). Соответственно, судьба выброшенных при ударе частиц различна – они или сталкиваются с частицами роя, или, в зависимости от скорости, попадают на гелиоцентрические орбиты или на баллистические траектории и выпадают на Землю (рис. 3). Более того, даже если тела-ударники движутся «параллельным курсом», результат столкновения может меняться от лобового удара до почти касательного (рис. 2).

Даже если, как полагает Н.Н. Горькавый, прямая и обратная эжекты равновоятны, долунный роё будет пополняться веществом растущей Земли в результате ударных выбросов при неупругих столкновениях частиц роя и земных частиц в случае соответственно направленных скоростей.

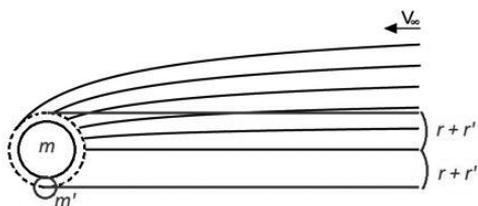


Рис. 2. Сечение столкновения гравитирующих тел m и m'

$$\pi(r+r')^2(1+v_e^2/v^2) = \pi(r+r')^2 \times [1 + 2G(m+m')/(r+r')V^2].$$

И наблюдения, и моделирование ударных выбросов (см. рис. 3) показывают, что направление ударного выброса (эжекты) совпадает с направлением движения тела-ударника.

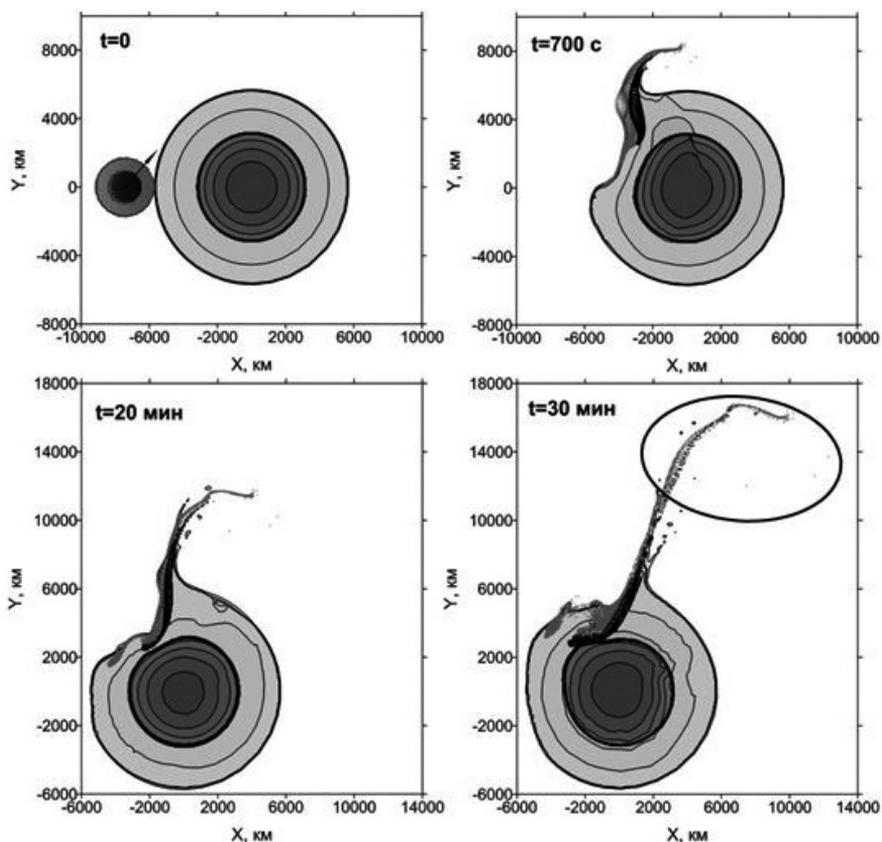


Рис. 3. Удар дифференцированного тела под углом 50° . Отношение диаметра тела к диаметру Земли $\delta = 0.3$. Внутри эллипса находятся осколки, которые в рассеянном виде переходят на гелиоцентрические орбиты [Светцов, 2013]

В книге [Витязев и др., 1990] в разработке осевого вращения Земли дается оценка вероятности прямого и обратного вращения Земли (с учетом наклона оси вращения планеты). Эти оценки относятся к вероятности прямого и обратного удара допланетных тел по растущей Земле, и, следовательно, прямого и обратного выброса эжекты.

Теория не позволяет точно определить направление и скорость вращения планеты. Она лишь дает соответствующую вероятность. Вектор наблюдаемого осевого вращения Земли \mathbf{K} , направленный под углом ε к оси z , перпендикулярной к плоскости орбиты, будем рассматривать как сумму регулярной составляющей \mathbf{K}_1 , направленной по оси z , и случайной составляющей \mathbf{K}_2 , направленной под углом γ к оси z (рис. 4).

Для оценки вероятности прямого вращения в простейшем случае предположим, что конец вектора \mathbf{K}_2 равномерно распределен по шару с радиусом, равным $K_{\text{ох}} = K_\sigma / 3^{1/2}$, и вероятность прямого вращения P_+ пропорциональна объему доли шара с положительной z -компонентой суммарного вектора $\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2$. При $\mathbf{K}_1 = 0$ имеем $P_+ = P_- = 1/2$. Если $\mathbf{K}_1 \neq 0$, начало отсчета нужно сдвинуть по оси z вниз на

величину K_1 , тогда высота верхней (положительной) части шара равна $K_{\text{сх}} + K_1$, а высота нижней соответственно $K_{\text{сх}} - K_1$. Обозначим отношение $K_{\text{сх}}/K_1 = \zeta$, тогда можно показать, что

$$P_+ = \frac{2\zeta^3 + 5\zeta^2 - 4\zeta + 1}{4\zeta^3} \quad (9)$$

Для Земли (с начальным периодом вращения 10^{h}) $K = 1.4 \times 10^{41}$ (г см²/с), угол между осью вращения и осью z $\varepsilon = 10^\circ$, $K_1 = 6.5 \times 10^{40}$ (г см²/с), $K_2 = 7.7 \times 10^{40}$ (г см²/с) и направлен под углом $\gamma = 18^\circ$ к оси z , $K_{\text{сх}} = 2.9 \times 10^{41}$, $P_+ = 0.85$.

Таким образом, в результате получаем, что около 85% планетезималей движутся по прямым орбитам, и соответственно выбросы вещества при их столкновениях с растущей Землей будут иметь прямое направление. Это означает, что при столкновении частиц выбросов с частицами роя они (частицы земного вещества) будут присоединяться к околопланетному рою, и масса роя будет расти. Более того, масса роя будет расти за счет присоединения тел и частиц зоны питания планеты, движущихся по прямым околосолнечным орбитам и проникающих в сферу образования околоземного роя.

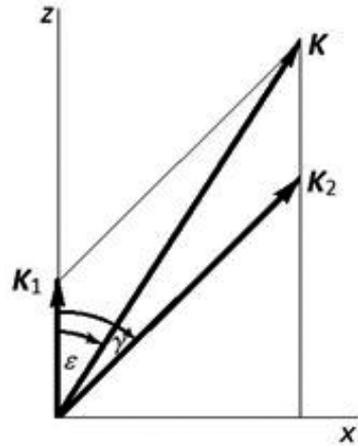


Рис. 4. Диаграмма составляющих момента осевого вращения K ; K_1 – регулярная составляющая, K_2 – случайная

Заключение

Зная поток вещества с растущей Земли сквозь околоземное пространство, частично заполненное долунным роем тел и частиц, необходимо 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.

Состав Луны, сформировавшейся из околоземного роя тел и частиц, имеет сходство и различия с составом Земли [Кусков и др., 2018], поскольку Земля и Луна имеют различающиеся источники пополнения веществом при их формировании. Земля растет за счет присоединения планетезималей из своей зоны питания, тогда как Луна образуется из околопланетного роя, который пополняется веществом зоны питания Земли при свободно-свободных и свободно-связанных столкновениях тел в околоземной зоне и частично переработанным веществом верхних оболочек Земли.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований (проект № 0146-2027-003).

Литература

Витязев А.В., Печерникова Г.В. Решение задачи о вращении планет в рамках статистической теории аккумуляции // *Астроном. журн.* 1981. Т. 58. Вып. 4. С. 869–878.

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. обс., 2007. Т. 103, №2, С. 143–155.

Кусков О.Л., Кронрод Е.В., Кронрод В.А. Геохимические ограничения на «холодные» и «горячие» модели внутреннего строения Луны: 1. Валовый состав // Астроном. вестник. 2018. Т. 52, № 6. С. 481–494.

Печерникова Г.В., Маева С.В., Витязев А.В. К динамике околопланетных роев // Письма в «Астроном. журн.» 1984. Т. 10. № 9. С. 703–709.

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. Масса вещества, выброшенного при макродарах с растущей планеты, и проблема образования Луны // Динамические процессы в геосферах: Сборник научных трудов ИДГ РАН, вып. 7. М.: ГЕОС, 2015. С. 200–207.

Рускол Е.Л. О происхождении Луны. I. Образование околоземного роя тел // Астроном. журн. 1960. Т. 37. Вып. 3. С. 690–702.

Рускол Е.Л. О происхождении Луны. II. Рост Луны в околоземном спутниковом рое тел // Астроном. журн. 1963. Т. 40. Вып. 2. С. 288–296.

Рускол Е.Л. Происхождение Луны. М.: Наука. – 188 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.

Шмидт О.Ю. Четыре лекции о теории происхождения Земли: изд. 3, доп. М.: Изд-во АН СССР. 1957. – 140 с.

Jeans J.H. The Stability of a Spherical Nebula // Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series A. 1902. Vol. 199. P. 1–53.

Harris A.W., Kaula W.M. A coaccretional model of satellite formation // Icarus, 1975. V. 24. P. 516–524.

Pechernikova G.V. Co-accretion statistical model of formation of the Earth-Moon system and the problem of the chemical composition of the presatellite swarm // Astronomical and Astrophysical Transactions. [http://www.aaptr.com/Astronomical and Astrophysical Transactions \(AApTr\)](http://www.aaptr.com/Astronomical and Astrophysical Transactions (AApTr)), 2016, Vol. 29, Issue 4, pp. 539-546, ISSN 1055-6796, Photocopying permitted by license only, c Cambridge Scientific Publishers.