

## Происхождение вещества колец Сатурна

А. В. Русол<sup>1</sup>, В. А. Дорофеева<sup>1</sup>, Е. Л. Рускол<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт геохимии и аналитической химии РАН им. В. И. Вернадского, Москва

<sup>2</sup>Институт физики земли им. О. Ю. Шмидта, Москва

[fermata@inbox.ru](mailto:fermata@inbox.ru)

*Ключевые слова:* ледяные кольца Сатурна, приливное разрушение тел.

**Ссылка:** Русол, А. В., В. А. Дорофеева, Е. Л. Рускол (2011), Происхождение вещества колец Сатурна, *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ6085, doi:10.2205/2011NZ000215.

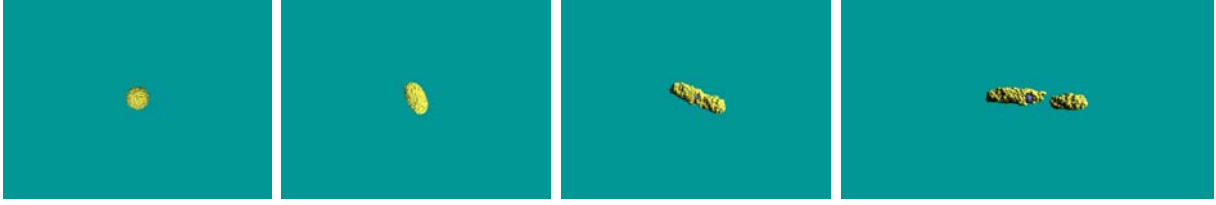
Газовая планета-гигант Сатурн имеет мощную систему колец. Крупнейшие из них кольца А и В массой  $(0.5-0.7) \times 10^{22}$  и  $(4-7) \times 10^{22}$  г соответственно [Robbins et al., 2010] состоят, как показали исследования КА «Cassini», из множества частиц почти чистого (95–98%) кристаллического водяного льда размером от 10 см до 10 м. [Nicholson, et al., 2008]. Проблема происхождения вещества колец давно разрабатывается в научной литературе, но, в общем, все предложенные модели основаны на идее разрушения некоего первичного тела - кометы или спутника, первоначально находившегося внутри, так называемого, предела Роша Сатурна, либо в результате ударов, либо под действием приливных сил планеты. Так, в моделях [Pollack, et al., 1973; Pollack, 1975; Harris, 1984] предполагается, что ледяные кольца Сатурна образовались в результате разрушения спутника, первоначально находившегося внутри предела Роша Сатурна, проходящей кометой. В моделях [Dones, 1991; Dones, et al., 2007] в качестве источника вещества колец рассматривается массивная комета, двигавшаяся вблизи Сатурна по эксцентрической орбите, которая была разрушена в результате ее приливного взаимодействия с Сатурном. Последняя по времени модель предполагает приливное разрушение дифференцированного спутника с массой Титана, мигрировавшего внутрь предела Роша в результате воздействия волн плотности в газопылевом субдиске Сатурна [Canup, 2010].

Анализ этих моделей с позиций современных знаний показывает, что модели с участием комет неактуальны, поскольку, во-первых, масса комет слишком мала, чтобы обеспечить необходимую массу колец, а, во-вторых, кометы – представляют собой рыхлую (плотностью  $\sim 0.2-0.5 \text{ г/см}^3$ ) смесь аморфного льда, силикатной пыли и твердых органических соединений. В то же время кольца состоят из почти чистого кристаллического льда. Поэтому более обоснованной, с нашей точки зрения, выглядит гипотеза, связанная с разрушением каменно-ледяного дифференцированного тела, в котором лед воды прошел стадию плавления и последующей кристаллизации. Учитывая потерю вещества в процессе эволюции, масса льда этого тела должна, по крайней мере, на порядок превышать современную массу колец. Однако предположение, что таким первичным телом мог быть крупный дифференцированный спутник по массе близкий Титану [Canup, 2010], не кажется нам обоснованным. Во-первых, в этом случае масса ледяной оболочки такого спутника на целых три порядка превосходит современную массу колец Сатурна. Во-вторых, эта модель предполагает, что образование и дифференциация Титана и других соизмеримых с ним регулярных спутников Сатурна произошла менее чем за 5 млн. лет с начала образования Солнечной системы, что противоречит современным представлениям о времени образования газовых планет-гигантов и их спутниковых систем [Дорофеева, Рускол, 2010].

Поэтому в предлагаемой модели мы рассматриваем в качестве источника вещества ледяных колец Сатурна мантию дифференцированного каменно-ледяного тела радиусом  $\sim 600$  км с массой  $10^{23}$ -  $10^{24}$  г (оценка сверху), попавшее в зону действия приливных сил Сатурна уже после диссипации газа из его субдиска. Источником такого тела мог быть транснептуновый регион, где и сейчас в поясе Койпера находится множество тел подобного и в несколько раз большего размера. Возможность ранней дифференциации каменно-ледяных тел с аналогичным радиусом и с содержанием силикатной компоненты  $\sim 30\%$  рассматривалась в [Busarev, et al., 2003]. О том, что тела, в том числе и весьма крупные, попадали в различные регионы вблизи Сатурна уже после образования его регулярных спутников, свидетельствуют многочисленные кратеры, обнаруженные на поверхности всех спутников – от Мимаса ( $r \sim 3R_{\text{Sat}}$ ) до Япета ( $r \sim 59R_{\text{Sat}}$ ), а также обнаружение регулярных спутников,

## РУСОЛ И ДР.: КОЛЬЦА САТУРНА

представляющих собой обломки более крупных тел – Телесто ( $r \sim 3R_{\text{Sat}}$ ), Елена ( $r \sim 6R_{\text{Sat}}$ ) и др. В качестве наиболее вероятного механизма разрушения такого тела мы принимаем механизм приливного разрушения, который заключается в следующем. Попадая внутрь предела Роша, который в зависимости от состава тел для Сатурна составляет 1.5–2 радиуса планеты ( $R_{\text{Sat}}$ ), внешняя оболочка дифференцированного тела подвергается деформации, приводящей к ее разрушению, как это показано на рис. 1.



**Рис. 1.** Некоторые стадии приливного разрушения тела в пределе Роша

Численное моделирование предлагаемого механизма образования вещества ледяных колец Сатурна проводилось с помощью модели проницаемых частиц [Маров, Русол, 2011].

При проведении численного моделирования процессов приливного разрушения предлагается построение аппроксимирующих зависимостей для коэффициента восстановления, которые позволяют учесть достаточное число физико-механических эффектов в зоне контакта. За основу модели столкновений принята модель Ньютона [Лановко, 1976], согласно которой при столкновении двух сферических частиц массами  $m_a$  и  $m_b$  со скоростями  $v_{a0}$  и  $v_{b0}$  их скорости после столкновения могут быть определены по соотношениям:

$$v_{a1} = \frac{(m_a - k \cdot m_b) \cdot v_{a0} + m_b \cdot (1 + k) \cdot v_{b0}}{(m_a + m_b)},$$

$$v_{b1} = \frac{(m_b - k \cdot m_a) \cdot v_{b0} + m_a \cdot (1 + k) \cdot v_{a0}}{(m_a + m_b)}.$$
(1)

Коэффициент восстановления  $k$ , в отличие от классической модели Ньютона, зависит от расстояния между центрами частиц, от скорости их относительного движения и физической природы частиц:

$$k(r_{ij}, v_{ij}) = \begin{cases} \left( K_v(v_{ij}) \cdot \frac{2}{\rho_{\max}} \cdot \frac{\rho_i \cdot \rho_j}{\rho_i + \rho_j} \right)^{n_1}, & 0.95 \cdot r_{\text{col}} < r_{ij} \leq r_{\text{col}} \\ \left( K_v(v_{ij}) \cdot \frac{2}{\rho_{\max}} \cdot \frac{\rho_i \cdot \rho_j}{\rho_i + \rho_j} \right)^{n_2}, & 0.75 \cdot r_{\text{col}} < r_{ij} \leq 0.95 \cdot r_{\text{col}} \\ \left( K_v(v_{ij}) \cdot \frac{2}{\rho_{\max}} \cdot \frac{\rho_i \cdot \rho_j}{\rho_i + \rho_j} \right)^{n_3}, & 0.5 \cdot r_{\text{col}} < r_{ij} \leq 0.75 \cdot r_{\text{col}} \\ \left( K_v(v_{ij}) \cdot \frac{2}{\rho_{\max}} \cdot \frac{\rho_i \cdot \rho_j}{\rho_i + \rho_j} \right)^{n_4}, & 0.25 \cdot r_{\text{col}} < r_{ij} \leq 0.5 \cdot r_{\text{col}} \\ \left( K_v(v_{ij}) \cdot \frac{2}{\rho_{\max}} \cdot \frac{\rho_i \cdot \rho_j}{\rho_i + \rho_j} \right)^{n_5}, & r_{ij} \leq 0.25 \cdot r_{\text{col}} \end{cases}$$
(2)

где  $\rho_i$ ,  $\rho_j$ ,  $\rho_{\max}$  – плотности соударяющихся частиц и максимальная плотность допускаемая моделью;  $r_{ij}$  – расстояние между центрами частиц;  $r_{\text{col}}$  – расстояние равное сумме радиусов частиц;  $K_v$  – параметр, зависящий от скорости. При проведении моделирования приливного разрушения для набора параметров  $n_i$  в соотношениях (2) приняты следующие значения  $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ .

Взаимодействие частиц описывается системой  $N$  уравнений

$$m_i \cdot a_i = \sum_{j \neq i=1}^N G \cdot m_i \cdot m_j \cdot \frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^3},$$
(3)

## РУСОЛ И ДР.: КОЛЬЦА САТУРНА

где  $N$  – число частиц, моделирующих сталкивающиеся тела;  $m_i, m_j$  – масса  $i$ -й и  $j$ -й частиц, соответственно;  $a_i$  – ускорение  $i$ -й частицы;  $r_i, r_j$  – радиус-вектор  $i$ -й и  $j$ -й частиц соответственно;  $G$  – гравитационная постоянная.

При построении начальной конфигурации модельных частиц задаются диапазоны их диаметров и плотностей, из которых случайным выбором по заданному распределению придаются значения диаметра и плотности каждой конкретной частице.

Интегрирование уравнений движения проводилось с использованием алгоритма Верле [Кунин, 1992]. Для уменьшения погрешности алгоритма Верле нами использована одна из его модификаций – схема с перешагиванием (leapfrog).

При проведении численного моделирования рассматривались следующие случаи входа в предел Роша: скорость входа меньше круговой для точки входа (рис. 2); скорость входа близка к круговой (рис. 3); скорость входа больше круговой, но меньше параболической (рис. 4); скорость входа близка к параболической (рис. 5).

На приведенных ниже рисунках размер частиц, формирующих моделируемое тело увеличен при визуализации, т.к. при реальных размерах в текущем масштабе тело было бы не видно. Окружности на рисунках показывают предел Роша Сатурна, вычисленные по Рошу и Джефрису.

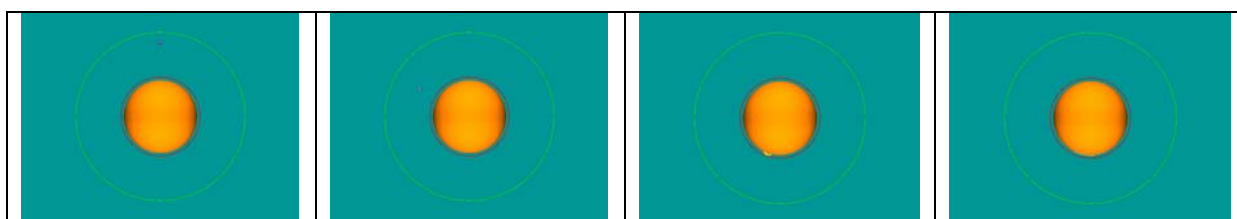


Рис. 2.

Как видно из рис. 2, при скорости входа в предел Роша меньше, чем круговая скорость для орбиты, содержащей точку входа, фрагменты разрушившегося тела выпадают на планету.

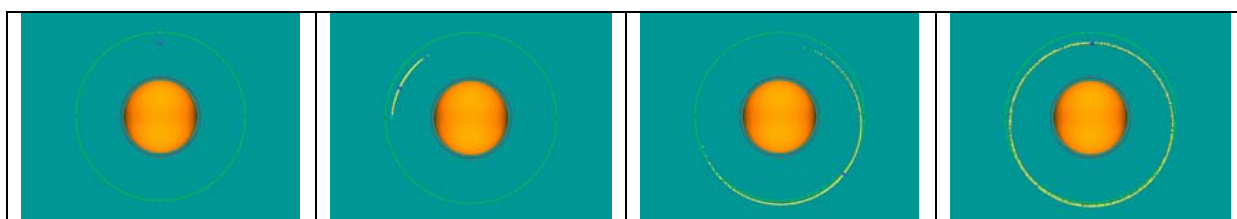


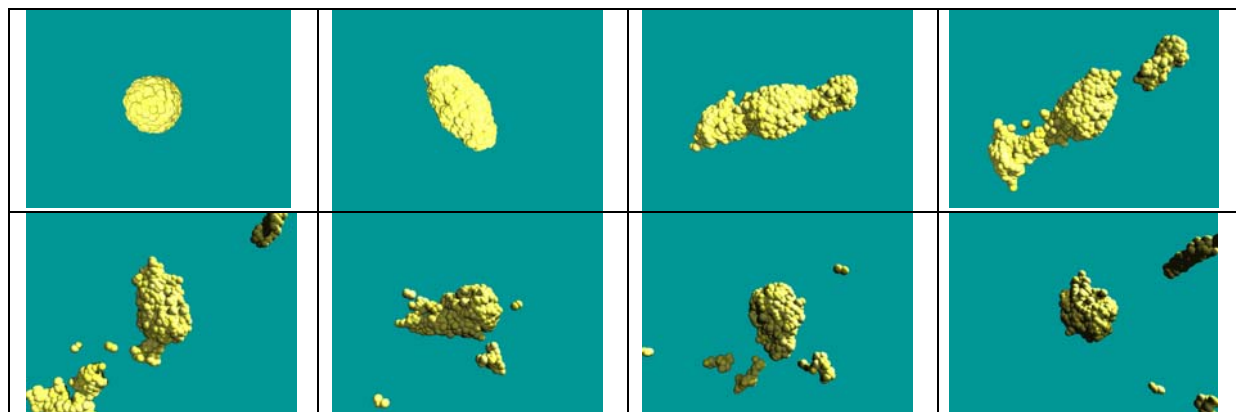
Рис. 3.

При скорости близкой к круговой фрагменты разрушившегося тела в процессе приливной эволюции распределяются по практически круговой орбите.



Рис. 4.

Если скорость входа в предел Роша больше круговой и меньше параболической, то фрагменты разрушившегося тела распределяются по эллиптической орбите, параметры которой зависят от итоговой скорости.



**Рис. 5.**

При пролете предела Роша на параболической скорости тело быстро покидает окрестности планеты. Однако начавшееся приливное разрушение продолжается и на удаленных участках орбиты. Пример такого разрушения показан на рис. 5.

По результатам проведенных модельных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Источником вещества ледяных колец Сатурна могло быть дифференцированное каменно-ледяное тело диаметром  $\sim 600$  км с массой  $10^{23}$ – $10^{24}$  г, попавшее в зону действия приливных сил Сатурна в период после диссипации газа из его субдиска.

2. Показано, что осколки разрушившегося тела переходят на эллиптические орбиты вокруг Сатурна только в случае, когда скорость их пролета предела Роша порядка круговой и меньше параболической скорости.

3. Существование слоя жидкой воды внутри дифференцированного каменно-ледяного тела, хотя и способствует его приливному разрушению, не является обязательным условием.

4. Судьба каменного ядра пока не вполне ясна. Но не исключено, что его осколки превратились в, так называемые, спутники-пастухи, орбиты которых находятся в пределах расположения колец.

*Работа частично поддержана Грантами РФФИ 08-02-00275-а и 11-05-01137.*

### **Литература**

Busarev, V. V., V. A. Dorofeeva, A. B. Makalkin (2003), Hydrated Silicates on Edgeworth-Kuiper Objects - Probable Ways of Formation, *Earth, Moon, and Planets*, v. 92, Iss. 1, pp. 345-375.

Dones, L. (1991). A recent cometary origin for Saturn's rings? *Icarus* V. 92, p. 194–203.

Dones, L., C. B. Agnor, E. Asphaug (2007), Formation of Saturn's rings by tidal disruption of a Centaur, *Bull. Am. Astron. Soc.*, v. 39, #7.07.

Harris, A. (1984), The origin and evolution of planetary rings, *Planetary Rings*, Greenberg, R., Brahic, A. (Eds.), Univ. Arizona Press, Tucson, pp. 641–659.

Nicholson, P. D., M. M. Hedman, et al. (2008), A close look at Saturn's rings with Cassini VIMS, *Icarus*, v. 193, pp. 182–212

Pollack, J. B. (1975), The rings of Saturn, *Space Sci. Rev.*, v. 18, pp. 3–93.

Pollack, J. B., A. Summers, B. Baldwin (1973), Estimates of the sizes of the particles in the rings of Saturn and their cosmogonic implications, *Icarus*, v. 20, pp. 263–278.

Robbins, S. J., G. R. Stewart, et al. (2010), Estimating the masses of Saturn's A and B rings from high-optical depth N-body simulations and stellar occultations, *Icarus*, V. 206, Iss. 2, p. 431-445.

Дорофеева, В. А., Е. Л. Рускол Е. Л. (2010), О тепловой истории спутников Сатурна: Титана и Энцелада, *Астрономический вестник*, т. 44, № 3, сс. 212–221.

Кунин, С. (1992), *Вычислительная физика*, М.: Мир, 518 с.

Маров, М. Я., А. В. Русол (2011), Модель ударного взаимодействия тел в газопылевом протопланетном диске, *ДАН*, (в печати)

Пановко, Я. Г. (1976), *Основы прикладной теории колебаний и удара*, Л.: Машиностроение, 320 с.