

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЖЕЛЕЗИСТОГО ОЛИВИНА В ПРОТОВЕЩЕСТВЕ ГАЛИЛЕЕВЫХ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА

Дорофеева В.А.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва

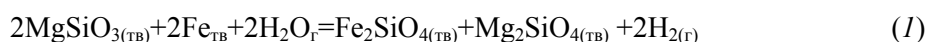
dorofeeva@geokhi.ru

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ проекта 01-05-64318)

Вестник Отделения наук о Земле РАН, № 1(20) 2002

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2002/informbul-1.htm#planet-2

Образование высокожелезистого оливина с содержанием фаялита свыше десяти мол.% в условиях околосолнечного допланетного диска рассматривалось нами в [1] и других работах. Было показано, что наиболее вероятно оно происходило на стадии аккреции родительских тел метеоритов ($\tau > 1$ млн. лет) по реакции:



в высокотемпературных условиях ($T > 1000 - 1200$ К), когда кинетические ограничения на ее протекание отсутствуют (рис. 1).

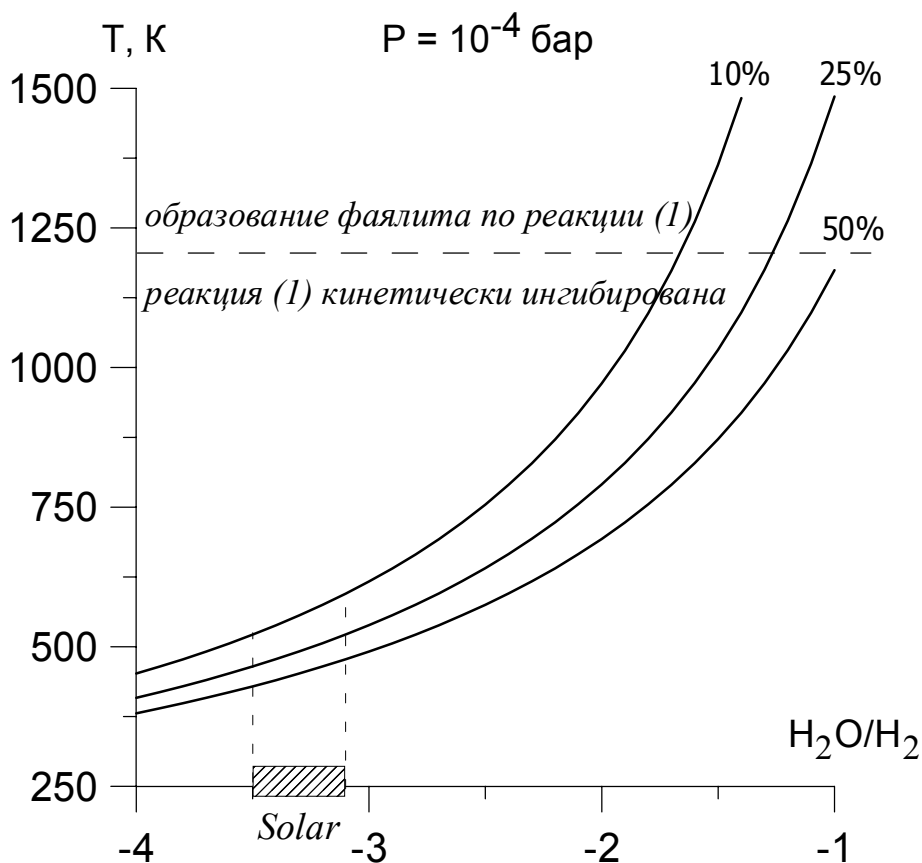


Рис.1. Содержание фаялита в оливине (мол. %) при различных температурах в зависимости от мольного отношения $(\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2)_{\text{г}}$. Рассчитано с помощью термодинамической константы равновесия (1), которую приближенно (идеальный раствор) можно выразить как:

$$\lg K_{(1)} \approx \lg \left[x_{\text{Fa}}^{\text{Ol}} (1 - x_{\text{Fa}}^{\text{Ol}}) \cdot p_{\text{H}_2}^2 / p_{\text{H}_2\text{O}}^2 \right]$$

Область $(\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2)_{\text{г}}$, обозначенная как "Solar" отвечает изменению этого соотношения в газе солнечного состава при $T \leq 700$ К в зависимости от полноты протекания реакции: $\text{CO} + 3\text{H}_2 = \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ и степени конверсии CO при синтезе органических соединений по механизму Фишера-Тропша: $n\text{CO} + (n+m)\text{H}_2 = \text{C}_n\text{H}_m + n\text{H}_2\text{O}$

Необходимое для этого повышение T до 1000 – 1200 К и $(\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2)_{(r)} \approx$ на 2 порядка относительно солнечного значения ($\approx 10^{-3.5} - 10^{-3.2}$) могли достигаться при соударении крупных ($R \sim 100$ км) и сравнимых по размеру тел с относительными скоростями ≥ 5 км/с [2], в состав которых входил водяной лед в соотношении $\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 1 - 2.5$ моль/моль. Однако из-за сравнительно невысоких хаотических скоростей тел в допланетном диске в зоне земных планет и пояса астероидов, а также распределения тел по размерам доля таких столкновений была, видимо, невелика, как и масса подвергнувшегося ударной переработке вещества. В то же время анализ физических и физико-химических условий в протоспутниковом диске Юпитера [3] показал, что они более благоприятны для образования в нем высокожелезистого оливина по рассмотренному ранее механизму.

Действительно, для протекания реакции (1) необходимо выполнение двух условий: 1 – высокоскоростные соударения тел Fe-силикатного состава, в результате чего происходит локальное повышение T до 1000 – 1200 К, и 2 – присутствие в этих телах льда воды в количествах, достаточных для обеспечения в образующемся облаке $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_{2(r)}$, в несколько раз превышающее солнечное отношение. Проведенный анализ показывает, что в юпитерианском диске оба этих условия выполняются.

1. Протоспутниковый диск Юпитера формировался на поздней стадии образования планеты, когда в ней заключалось уже более половины ее массы ($\tau > 10$ млн. лет). В этот период в допланетном околосолнечном диске на радиальных расстояниях ≥ 4 а.е. (орбита Юпитера) основная масса вещества ($\sim 80\%$) была заключена в крупных телах размером $\sim 100 - 1000$ км, радиальный дрейф которых в сторону Солнца уже не зависел от радиального дрейфа газа. Когда эти тела, попадали в гравитационную сферу формирующегося Юпитера, они пронизывали протоспутниковый диск. Их скорости относительно кеплеровских для дальних галилеевых спутников – Ганимеда и Каллисто – превышали величину 10 км/с, а для ближних – Ио и Европы – 20 км/с. Большинство этих тел захватывались Юпитером, но некоторые сталкивались с крупными телами, образовавшимися в юпитерианском диске. В результате происходило их дробление, частичное или полное испарение и последующая частичная пере конденсация. При указанных выше относительных скоростях соударяющихся тел, температуры в образующемся облаке испаренного вещества могли достигать значений ~ 1500 К и давления ~ 10 бар, что обеспечивало термодинамические условия для протекания гетерогенной реакции (1). Образовавшееся в результате вещество оставалось в диске, частично попадая на Юпитер, а частично захватываясь растущими зародышами его регулярных спутников. Сравнение характерных времен жизни тел размером $\sim 100 - 1000$ км ($\sim 10^5$ лет) с характерным временем аккумуляции галилеевых спутников ($\sim 10^6$ лет) показывает, что эти тела успевали пройти многократное разрушение в результате столкновений (за исключением зародышей спутников, которые формировались очень быстро – за время $\sim 10^5$ лет).

2. Содержание летучих в крупных планетезималах, образовавшихся в околосолнечном диске и вошедших в состав Юпитера на заключительном этапе его аккреции, можно оценить из данных по атмосфере Юпитера. Она, согласно последним данным, полученным в результате миссии Galileo [4], в 2.5 – 3.5 раза обогащена не только химически активными летучими (C, N, S), но и инертными газами (Kr и Xe) по сравнению с солнечными пропорциями. Установлено также, что содержание воды на уровне ~ 1 бар эквивалентно солнечному соотношению O/H. Это дает основания полагать, что в целом в атмосфере Юпитера $\text{O}/\text{H} = 3 - 10$ ($\text{O}/\text{H}_{\text{солн}}$) [5]. Такое одновременное обогащение атмосферы Юпитера и химически активными, и инертными газами вероятнее всего могло произойти за счет аккреции им на заключительной стадии образования крупных планетезималей, содержавших в больших количествах лед H_2O , который адсорбировал газы из газовой фазы допланетного диска: CO, CH_4 , H_2S , N_2 , NH_3 , Kr, Xe. Условия образования таких ледяных планетезималей в допланетном диске, в соответствии с моделью [6,7], показаны на рис.2.

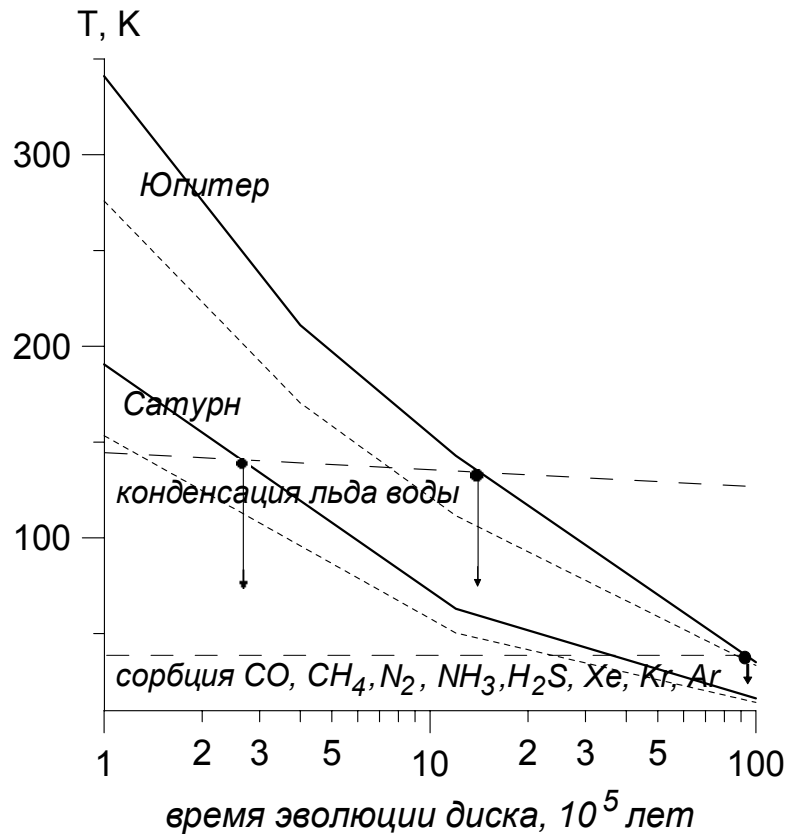


Рис.2. Изменение температур на радиальных расстояниях Юпитера (r_J) и Сатурна (r_S), модель [6,7]. Сплошная и штрих-пунктирная линии определяют интервал T , в котором на данном r заключено до 75% вещества диска. $T_{\text{конд}}$ льда H_2O достигаются на r_S через 0.3, а на r_J – 1 млн. лет, когда основная масса вещества заключена в телах размером ≥ 100 км, радиальный дрейф которых уже не зависит от скорости газа. Оставаясь в околосолнечном диске в течение ~ 10 млн. лет, они накапливают водяной лед, который, по мере дальнейшего охлаждения диска, сорбирует другие летучие. Таким образом, ко времени, когда эти тела попадут в гравитационную сферу Юпитера, соотношение в них лет/порода будет в несколько раз выше солнечного.

Таким образом, в протоспутниковом диске Юпитера существовали благоприятные физические и физико-химические условия для образования значительного количества Mg-силикатов с повышенным содержанием железа. Именно эти, обогащенные FeO силикаты, вероятно и составляют основную массу вещества галилеевых спутников, что согласуется с современными моделями внутреннего строения Ио и Европы [7].

Литература

1. Дорофеева В.А., Макалкин А.Б. и др. // Происхождение Солнечной системы (кинетические и термодинамические проблемы) // М.: Наука, 1993. С.45-73.
2. Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С. Планеты земной группы: происхождение и ранняя эволюция // М.: Наука, 1990. 296 с.
3. Макалкин А.Б., Дорофеева В.А. Рускол Е.Л. // Астрономический вестник. 1999. Т.33. №6. С.518-526.
4. Atreya S.K., Wong M.H., et al. // Planetary and Space Science. 1999. V.47. P.1243-1264.
5. Irwin P.G.J. // Surveys of Geophysics. 1999. V.20. P.505-535.
6. Макалкин А.Б., Дорофеева В.А. // Астрон.вестн. 1995. Т.29. №2. С.99-122.
7. Макалкин А.Б., Дорофеева В.А. // Астрон.вестн. 1996. Т.30. №6. С.496-513.
8. Kuskov O.L., Kronrod V.A. // Icarus. 2001. V.151. P.204-227.