

Условия образования кометных льдов

В. А. Дорофеева, М. В. Мироненко

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

dorofeeva@geokhi.ru

Был оценен компонентный состав газовой фазы околосолнечного газопылевого протопланетного диска и реконструированы условия образования кометных льдов. Основой термодинамического моделирования послужили данные о составе летучих кометы Хартли 2 (103P/HARTLEY 2), изотопный состав водорода молекулы H_2O которой позволяет предположить их конденсационное происхождение. В результате проведенных расчетов оказалось, что наилучшим образом полученному экспериментальному составу кометы Хартли 2 отвечает состав газовой фазы небулы, в которой молярные соотношения основных углерод- и азот-содержащих соединений следующие: $\text{CO}_2 : \text{CO} : \text{CH}_4 = 1 : 8 : 1$ и $\text{NH}_3 : \text{N}_2 = 1 : 50$.

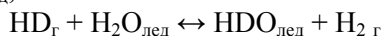
Ключевые слова: Солнечная система, эволюция, кометные льды

Ссылка: Дорофеева, В. А., М. В. Мироненко (2012), Условия образования кометных льдов. *Вестник ОНЗ РАН*, 4, NZ9001, doi:10.2205/2012NZ_ASEMPG

Кометы – единственные космические тела в Солнечной системе, оставшиеся в неизменном виде от стадии, определившей состав не только планет-гигантов, но и тел, из которых сформировались земные планеты.

Условия образования кометных льдов характеризуют количественный и качественный состав летучих, присутствующих в них, а также изотопное отношение водорода (D/H) прежде всего в молекуле воды. В межзвездной среде, в молекулярных облаках, а именно из фрагмента одного из них, образовалась наша Солнечная система, вода находится в твердом состоянии в форме аморфного льда. Такой лед обладает способностью при сверхнизких температурах $T < 30\text{--}40\text{ K}$ силами Ван-дер-Ваальса удерживать (сорбировать) на своей поверхности другие газы. Этот процесс был подробно изучен в работах Оуэна и Бар-Нана (*Owen, Bar-Nan*) в начале 90-х годов. Если же лед в условиях газопылевого околосолнечного диска нагревался, плавился или испарялся, а затем вновь конденсировался в результате последующего охлаждения, то образовывался кристаллический лед, который уже при $T = 80\text{--}70\text{ K}$ и $P \leq 10^{-7}$ бар мог образовывать с иными газами, присутствовавшими в газовой фазе диска, такими как NH_3 , N_2 , CH_4 , CO , CO_2 , а также с инертными газами (Ar, Kr, Xe) твердые соединения - клатратные гидраты. Таким образом, сорбция газов аморфным льдом и образование клатратных гидратов – два основных механизма аккумуляции летучих соединений в твердых телах в условиях газопылевого околосолнечного протопланетного диска (небулы), которые обеспечили возможность вхождения летучих компонентов не только в состав кометных тел, ледяных спутников планет-гигантов, некоторых типов астероидов, а также и планет земной группы.

Чтобы определить, какой механизм аккумуляции летучих в небуле реализовывался и какой механизм был преобладающим, нужно рассмотреть эволюцию состояния льда воды в ней. Это возможно сделать, если проследить эволюцию значения изотопного отношения водорода в молекуле H_2O . Значение D/H в молекуле воды межзвездных молекулярных облаков при очень низких температурах ($\sim 20\text{ K}$) предположительно могли достигать значений $\sim 9 \times 10^{-4}$ [Brown, Millar, 1989], в то же время в газообразной молекуле водорода D/H значительно ниже и составляет всего $(1.52 \pm 0.08) \times 10^{-5}$ [Linsky, 2003]. В условиях значительно более плотной среды околосолнечного диска, где даже в области $r \sim 10$ а.е. температуры на ранних этапах эволюции могли достигать 80–100 K, а давление водорода было $\sim 10^{-7}\text{--}10^{-8}$ бар [Дорофеева, Макалкин, 2004] вероятно происходили реакции изотопного обмена между $\text{H}_2\text{O}_{\text{лед}}$ и $\text{HD}_\text{г}$, что вызывало некоторое уменьшение D/H_{H₂O-лед}, согласно известной схеме:

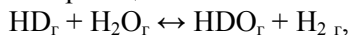


ДОРОФЕЕВА И ДР.: УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КОМЕТНЫХ ЛЬДОВ

Действительно, для шести комет, принадлежащих облаку Оорта (Hyakutake, Tuttle, Halley, Hale-Bopp, C/202 T7 (LINEAR), Ikeya-Zang и C/2007 N3 (Lulin)), для которых к настоящему времени значение D/H в молекулах льда H_2O было экспериментально установлено, оказалось, что оно составляет от 2.5×10^{-4} до 4.1×10^{-4} . Отметим, что это в 1.6–2.6 раза превышает стандартное значение D/H, принятое для земного океана (Вена, 1968, VSMOW = 1.56×10^{-4}) и значений D/H в гидроксильной группе OH⁻, характерных для углистых хондритов (Robert, 2006). Согласно современным представлениям [Morbiddelli, 2012], образование кометных тел облака Оорта происходило на ранней стадии эволюции газопылевого околосолнечного диска в регионе, располагавшемся в непосредственной близости к зоне питания планет-гигантов и таким образом часть этих каменно-ледяных тел могли участвовать в образовании их ледяных спутников. Это предположение можно подтвердить экспериментальным фактом – значение D/H в молекулах воды водных плюмов регулярного спутника Сатурна Энцелада оказалось равным $2.9 \pm 0.15 \times 10^{-4}$ [Waite et al., 2009], т.е. полностью соответствует кометным значениям. Таким образом, можно предположить, что основным механизмом аккумуляции летучих ледяными телами в зоне питания Урана и Нептуна, а возможно и Сатурна тоже, была их сорбция аморфным льдом, никогда не испарявшемся в указанном регионе. К сожалению, подтвердить это положение иными аргументами пока нет возможности, поскольку компонентный состав летучих комет полностью изучить еще не удалось, а химический состав водных плюмов Энцелада, полученный миссией «Cassini» вероятнее всего является результатом некоторой термической эволюции, протекавшей внутри каменно-ледяного спутника. Кроме того, неизвестен компонентный состав газовой фазы небулы, из которого могли путем конденсации образоваться кометные льды, поскольку в нем отсутствовало химическое равновесие.

Однако открытие 2011 г., а именно, полученный в ходе космического эксперимента ЕРОХИ химический и изотопный состав кометы Хартли 2 (103P/HARTLEY 2), принадлежащей семейству Юпитера, существенно расширяет возможности изучения условий образования кометных льдов и аккумуляции ими летучих в небуле. Состав кометы Хартли 2 относительно H_2O (мол.%) оказался следующим: CO_2 10–20%, CO 0.15–0.45%, NH_3 0.5–0.65%, HCN 0.1–0.3% (Meech et al., 2011). Чуть позже эти данные были дополнены результатами, полученными с помощью эксперимента «Гершель» и наземных наблюдений, которые показали, что содержание HCN, CH_3OH , H_2S и CS по отношению к содержанию H_2O (мол.%) составляет 0.09%, 1.8%, 0.4% и 0.08% соответственно [Biver et al., 2012]. Но самым сенсационным открытием явилось то, что в отличие от других известных комет значение D/H в молекуле $H_2O_{\text{лед}}$ кометы Хартли 2 оказалось очень близко VSMOW и составляет $\approx (1.61 \pm 0.24) \times 10^{-4}$ [Hartogh et al., 2012]. Возможно, что тел, подобных кометы Хартли 2 в регионе с $r > 3$ а.е. находится не одно. Например, в 2006 г. на периферии главного пояса астероидов были обнаружены 5 тел, вращающихся по круговым орбитам, но периодически проявляющие кометную активность.

Полученные данные по изотопному составу льда воды для кометы Хартли 2 свидетельствует, что он был испарен в условиях небулы, при $T \sim 100$ К изотопный состав водорода в нем был изменен, согласно реакции:



которая в газовой фазе проходит более эффективно, нежели в гетерогенной системе лед– H_2 г. В процессе последующего охлаждения H_2O_g сконденсировался, образуя твердые клатратные гидраты различных газов. Если сделанные предположения справедливы, то это дает нам возможность, используя экспериментальные данные по составу кометы Хартли 2 и аппарат равновесной термодинамики, восстановить состав газовой фазы небулы в регионе, где образовался лед этой кометы. Изменение PT условий в небуле на радиальных расстояниях от Солнца 4–10 а.е. по модели [Дорофеева, Макалкин, 2004] представлены на рис. 1. Условия образования клатратных гидратов из газа солнечного состава при этих P - T условиях из газа солнечного состава показаны на рис. 2.

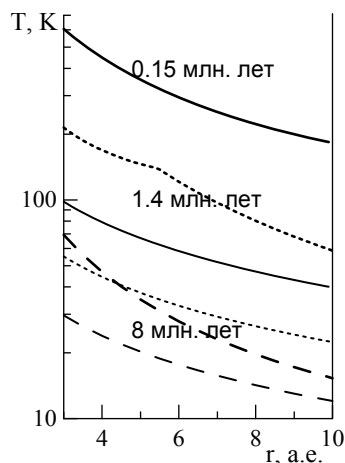


Рис. 1. Изменение термодинамических условий в околосолнечном газопылевом протопланетном диске на радиальных расстояниях, соответствующих зонам питания Юпитера и Сатурна. Более жирные линии отвечают $P = 10^{-6}$ бар, более тонкие – $P = 10^{-9}$ бар.

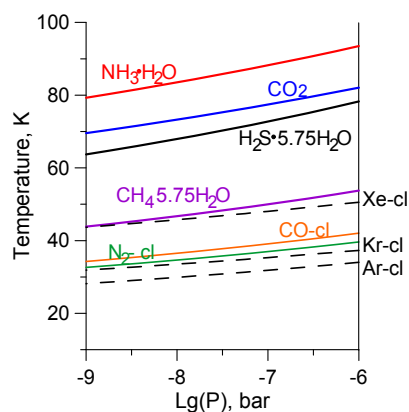


Рис. 2. Условия образования клатратных гидратов (cl) при охлаждении газа солнечного состава по [Lunine, Stevenson, 1985]

Валовый состав небулы задавался в соответствии с солнечными обилиями по [Lodders, 2010], компонентный состав газовой фазы варьировался с учетом его неопределенности. Необходимая термодинамическая информация в виде температурных зависимостей констант равновесия соответствующих гетерогенных реакций была получена путем обобщения экспериментальных данных по условиям образования клатратов и льдов газов, характерных для условий околосолнечной небулы, полученных в работах [Lunine, Stevenson, 1985; Fray et al., 2010]. Расчеты проводились по программе CHEMREQ, в основу которой положен метод минимизации функции свободной энергии Гиббса системы на множестве ограничений в виде системы линейных уравнений баланса масс. Результаты некоторых расчетов представлены на рис. 3.

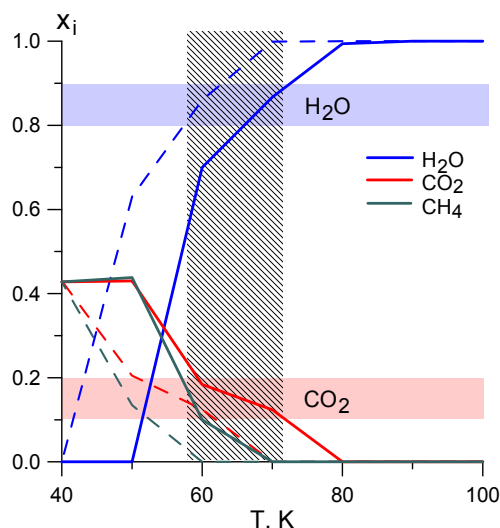
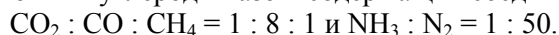


Рис. 3. Изменение состава конденсированной фазы при охлаждении газовой фазы заданного компонентного состава. Сплошные линии соответствуют $P = 10^{-6}$ бар, пунктир $P = 10^{-9}$ бар. Области, обозначенные как H_2O (голубым) и CO_2 (розовым) соответствуют мольному соотношению этих фаз в комете Хартли 2. Пунктиром выделена температурная область, в которой, в соответствии с заданным интервалом изменения давления, клатратные гидраты CO_2 и CH_4 термодинамически устойчивы.

ДОРОФЕЕВА И ДР.: УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КОМЕТНЫХ ЛЬДОВ

В результате проведенных расчетов оказалось, что наилучшим образом полученному экспериментальному составу кометы Хартли 2 отвечает состав газовой фазы небулы, в которой молярные соотношения основных углерод- и азот- содержащих соединений следующие:



Выводы

В Солнечной небуле существовали регионы, где изначально аморфный лед воды был испарен, и в результате изотопного обмена с H_2 его D/H существенно понизилось.

При последующем охлаждении небулы H_2O конденсировался в виде кристаллической модификации с возможностью образования клатратов различных газов при PT условиях, отвечающих $r = 4\text{--}10$ а.е.

На орбитах вблизи Юпитера могли образовываться каменно-ледяные тела (кометы) с высоким содержанием летучих, которые могут рассматриваться как источник воды и других летучих компонентов, в том числе и азота, на планетах земной группы.

Вероятно, что основной механизм аккумуляции летучих в кометах, образовавшихся в транснептуновой зоне и в поясе Койпера ($r > 15\text{--}20$ а.е.) была сорбция их аморфным льдом.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 11-05-01137 и 11-05-00780.

Литература

Дорофеева, В. А., А. Б. Макалкин (2004). *Эволюция ранней солнечной системы. Космохимические и физические аспекты*, М.: Едиториал УРСС, 288 с.

Biver, N., J. Crovisier, D. Bockelée-Morvan, et al. (2012). Ammonia and other parent molecules in comet 10P/Tempel 2 from Herschel/HIFI and ground-based radio observations, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 539, id.A68.

Brown, P. D., T. J. Millar (1989). Models of the gas-grain interaction-deuterium chemistry, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 237, 661–671.

Fray N., U. Marboeuf, O. Brissaud, B. Schmitt (2010). Equilibrium Data of Methane, Carbon Dioxide, and Xenon Clathrate Hydrates below the Freezing Point of Water. Applications to Astrophysical Environments, *J. Chem. Eng. Data*, v.55. 5101–5108.

Linsky, J. L. (2003). Atomic Deuterium/Hydrogen in the Galaxy. *Space Science Reviews*, v. 106, Issue 1, p. 49–60.

Lodders, K. (2010). Solar System Abundances of the Elements. *Astrophysics and Space Science Proceedings*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 379–417.

Lunine, J. I., D. J. Stevenson (1985). Thermodynamics of clathrate hydrate at low and high pressures with application to the outer solar system, *Astrophys. J. Suppl.*, 58, 493–531.

Meech, K. J., M. F. A'Hearn, J. A. Adams, et al. (2011). EPOXI: Comet 103P/Hartley 2 Observations from a Worldwide Campaign. *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 734, iss. 1, article id. L1.

Mironenko, M. V., T. Yu. Melikhova, M. Yu. Zolotov, and N. N. Akinfiev (2008). “GEOSHEQ_M—A Complex for Thermodynamic and Kinetic Modeling of Geochemical Processes in the Water–Rock–Gas System. Version 2008,” *Vestn. ONZ RAN*. URL: http://www.scs-is.ru/Russian/cp1251/H_dgggms/1_2008/Informbul_1_2008/Mineral-22.

Morbidelli, A. (2012). Dynamical evolution of planetary systems. in: “*Planets, Stars and Stellar Systems*”, Oswald, T. D., McLean, I. S.; Bond, H. E.; French, L.; Kalas, P.; Barstow, M.; Gilmore, G. F.; Keel, W. (Eds.), v. 3, 4760 p.

Robert, F. (2006). Solar System Deuterium/Hydrogen Ratio, in: *Meteorites and the Early Solar System II* (Space Science Series) Dante S. L., Harry Y. McSween Jr. (Eds.), Univ. Arizona Press, p. 341–351.

Waite, J. H., J. H. Westlake, B. A. Magee, D. T. Young (2009). Titan and Enceladus Composition measured with Cassini INMS and CAPS: Implications for the formation and evolution of the Saturn system, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2009*, abs. #P43F-02.