

**D/H в атмосферах Титана и Энцелада. Космохимические следствия для образования спутников**

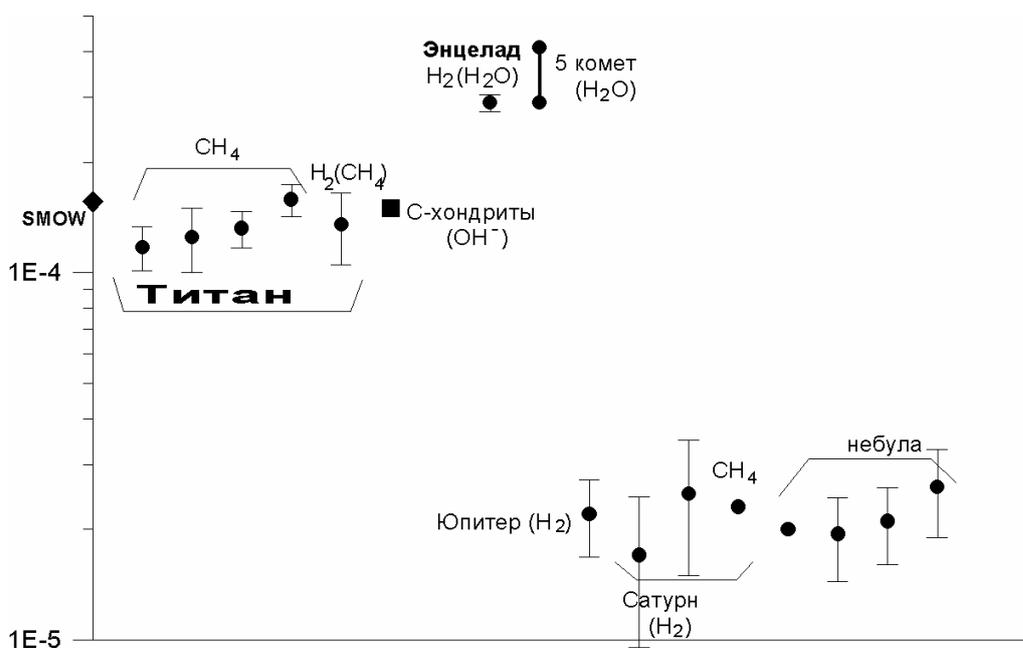
В. А. Дорофеева

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва  
dorofeeva@geokhi.ru

**Ссылка:** Дорофеева, В. А. (2011), D/H в атмосферах Титана и Энцелада. Космохимические следствия для образования спутников, *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ6025, doi:10.2205/2011NZ000155.

*Ключевые слова:* Титан, Энцелад, атмосфера

В период 2005-2010 гг. с помощью КА «Cassini-Huygens» проводилось подробное изучение спутниковой системы Сатурна. Наряду с другими результатами, впервые были получены количественные данные о компонентном, фазовом и изотопном составе атмосферы Титана и открытых КА «Cassini» водных плюмов Энцелада. В частности, было установлено, что атмосфера Титана содержит только два макрокомпонента: молекулярный азот с содержанием  $N_2 \geq 95$  мол.% ( $^{15}N/^{14}N = 5.99 \times 10^{-3}$ ) [Owen, Niemann, 2009] и метан, содержание которого возрастает от 1% на высоте  $\sim 50$  км до 5% у поверхности спутника [Niemann, 2005]. Неожиданным оказалось значение D/H, определенное в молекуле метана, которое на уровне атмосферы составляет  $1.58 \times 10^{-4}$  [Abbas et al., 2010]. Оно поразительным образом совпадает со стандартным значением D/H для океанической воды на Земле =  $1.56 \times 10^{-4}$  (VSMOW-Vienna Standard Mean Ocean Water) и со значением D/H в гидроксильной группе OH<sup>-</sup> углистых хондритов, для которых среднестатистическое значение D/H колеблется от  $1.3 \times 10^{-4}$  до  $1.7 \times 10^{-4}$  [Robert, 2006]. В то же время для водных плюмов Энцелада значение D/H в молекуле H<sub>2</sub>, образованной в результате диссоциации молекул воды, оказалось =  $2.9^{+1.5}_{-0.7} \times 10^{-4}$  [Waite et al., 2009], что близко к значению D/H, известному сейчас для ледяной компоненты пяти комет: от  $(2.9 \pm 1) \times 10^{-4}$  до  $(4.7 \pm 1.1) \times 10^{-4}$  [Villanueva et al., 2009] (рис. 1).



**Рис. 1.** Значения D/H в некоторых объектах Солнечной системы.

## ДОРОФЕЕВА: D/H В АТМОСФЕРАХ ТИТАНА И ЭНЦЕЛАДА

До получения этих данных предполагалось, что источником летучих на всех регулярных спутниках Юпитера и Сатурна, в том числе на Титане и Энцеладе, были ледяные планетезимали, образовавшиеся в околосолнечном газопылевом протопланетном диске (в солнечной небуле) в зонах питания этих планет. В состав планетезималей, помимо каменной составляющей (rock), льдов  $H_2O$  и  $CO_2$ , могли входить и другие газы в форме их твердых клатратов, которые могли образоваться при охлаждении соответствующих регионов небулы до температур ниже  $T \sim 80$  К. О валовом элементном и частично об изотопном составе газовой фазы небулы в тот период можно судить по современному составу атмосфер Юпитера и Сатурна, но в каких соотношениях основные летучие элементы – С, N, O – входили в различные соединения, т.е. соотношения  $NH_3:N_2$ ,  $CH_4:CO:CO_2$ , а также какая доля С, входила в состав твердого органического вещества, неизвестно. Это не позволяет однозначно судить о составе клатратов в ледяных планетезималиях. Часть наиболее летучих клатратов затем была потеряна в протоспутниковом диске Сатурна, но экспериментальных данных, свидетельствующих о термодинамических условиях в нем, нет. Все эти обстоятельства чрезвычайно усложняют решение задачи происхождения регулярных спутников этой газовой планеты-гиганта. Получение информации по изотопному составу водорода в атмосферах Титана и Энцелада приблизили нас желаемой цели.

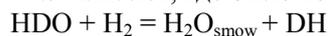
Характерной особенностью состава атмосферы Титана является отсутствие в ней тяжелых инертных газов – Хе и Kr, клатраты которых образуются в условиях протопланетного диска при  $T \leq 60$ К. Это накладывает ограничения на происхождение в атмосфере Титана молекулярного азота. Поскольку температуры образования клатрата  $N_2$  чрезвычайно низки ( $T \leq 40$ К) и скорее всего не достигались в зоне формирования ледяных планетезималей, образовавших Титан, вероятным источником  $N_2$  в его атмосфере мог быть лишь клатрат аммиака –  $NH_3 \cdot H_2O$ , образующийся в условиях небулы при  $T$  (90-80К).

Относительно происхождения  $CH_4$  - второго по обилию компонента атмосферы Титана существуют две основные версии.

(1) В теплых недрах спутника растворенная в воде  $CO_2$  – одна из возможных форм аккреции углерода Титаном - взаимодействует с  $H_2$ , выделяющимся в результате реакции серпентинизации силикатных пород с водой.

(2) Условия в солнечной небуле и протоспутниковом диске Сатурна были таковы, что Титан смог аккрецировать не только  $CO_2$ , но и  $CH_4$ , который затем попал в атмосферу.

Полученное совпадение значения D/H в молекуле  $CH_4$  атмосферы Титана с земным стандартом для океанической воды вряд ли случайно и вероятнее всего свидетельствует, что вода с D/H, характерным для внутренней части Солнечной системы, участвовала в образовании метана на Титане (версия 1) и, таким образом его наиболее вероятным источником была  $CO_2$ . Из этого вытекает второе важнейшее космохимическое следствие: в протопланетном околосолнечном диске лед воды был испарен не только до радиальных расстояний современного пояса астероидов ( $r$  (4 а.е.), а вплоть до  $r \sim 10$  а.е., а возможно и на несколько больших радиальных расстояниях. В газовой фазе молекулы  $H_2O$ , первоначально имевшие D/H близкое к кометному, за счет реакции изотопного обмена с молекулами  $H_2$ , об изотопном составе которого можно судить по атмосфере Юпитера (см. рис. 1), приобретали D/H, характерное для внутренних регионов. Этот вывод подтверждается результатами моделирования внутренней структуры протопланетного диска как на стадии его роста, так и на стадии его вязкой эволюции и диссипации (Дорофеева, Макалкин, 2004). Согласно этим результатам, даже на радиальных расстояниях Сатурна  $H_2O$  находилась в газовой фазе  $\sim 1.5$  млн. лет, где была возможна реакция изотопного обмена



Можно также предположить, что лед  $H_2O$ , входящий в состав галилеевых спутников Юпитера, также имеет D/H близкое к земному. Это предположение можно будет экспериментально проверить, когда будет осуществлен (предположительно в 2020 году) совместный проект американского и европейского космических агентств - EJSM (Europa Jupiter System Mission), в рамках которого планируется изучить ледяную корку, покрывающую поверхность Европы, исследовать свойства недавно обнаруженного подледного океана.

## ДОРОФЕЕВА: D/H В АТМОСФЕРАХ ТИТАНА И ЭНЦЕЛАДА

Данные по D/H в молекуле  $H_2$  водных плюмов Энцелада указывают, что в отличие от льдов, аккрецированных Титаном, лед  $H_2O$ , вошедший в состав этого спутника не был испарен. Отсюда следует, что и аккумуляция каменно-ледяных тел, и образование из них Энцелада вероятнее всего происходило не в субдиске Сатурна, а в околосолнечном протопланетном диске на радиальных расстояниях от Солнца, превышающих 10-15 а.е. При этом, поскольку температуры в этих регионах были значительно ниже, помимо льдов  $H_2O$  и  $CO_2$  Энцелад мог аккрецировать и иные, более летучие газы в форме кристаллогидратов. Правда остается неясным, является ли отсутствие в составе его водных плюмов Kг и Хе артефактом, или оно имеет какое-то иное объяснение.

Таким образом, данные КА «Cassini-Huygens» об изотопном составе водорода в молекуле  $CH_4$  атмосферы Титана и в молекуле  $H_2$  в водных плюмах Энцелада при сопоставлении с аналогичной информацией по другим объектам Солнечной системы – CI хондритами, земным стандартом SMOW, кометами, атмосферами планет-гигантов показывает, что и для  $CH_4$  Титана, и для  $H_2$  в плюмах Энцелада вероятным источником водорода являются молекулы  $H_2O$ , аккрецированные в виде льда каменно-ледяными телами, образовавшими спутники. Однако полученные результаты в сочетании с современными данными о характерных временах эволюции газопылевых дисков вокруг звезд солнечного типа, временах образования и дифференциации планетезималей во внешней части околосолнечного диска, а также с модельными представлениями о термических и динамических условиях в диске Сатурна позволяют предположить, что лед  $H_2O$  Энцелада, в отличие от льда Титана образовался и был на  $r > 10$  а.е., где он никогда не испарялся и поэтому был аккрецирован в аморфной форме.

*Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ 11-05-01137*

### **Литература**

- Дорофеева В.А., Макалкин А.Б. (2004), Эволюция ранней солнечной системы. Космохимические и физические аспекты, М.: *Едиториал УРСС*, 288 с.
- Abbas, M. M. et al. (2010), D/H ratio of Titan from observatio of the Cassini Composite infrared spectrometer, *The Astrophysical J.*, V. 708, p. 342–353.
- Niemann, H. B. et al. (2005), The abundances of constituents of Titan’s atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe, *Nature*, V. 438, p. 779-784.
- Owen, T., H. B. Niemann (2009), The origin of Titan's atmosphere: some recent advances, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, V. 367, iss. 1889, pp. 607-615.
- Robert, F. Solar System Deuterium/Hydrogen Ratio (2006), *Meteorites and the Early Solar System II*, D. S. Lauretta and H. Y. McSween Jr. (eds.), University of Arizona Press, Tucson, 943 pp., p. 341-351
- Villanueva, G. L., M. J. Mumma, B. P. Bonev, M. A. Di Santi, E. L. Gibb, H. Bohnhardt, M. Lippi (2009) A sensitive search for deuterated water in comet 8P/Tuttle, *ApJ*, p. 690, L5
- Waite, J. H. et al. (2009), Liquid water on Enceladus from observations of ammonia and  $^{40}Ar$  in the plume, *Nature*, V. 460, № 7254, p. 487–490.