

ПРОИСХОЖДЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА НА РЕГУЛЯРНЫХ СПУТНИКАХ САТУРНА – ТИТАНЕ И ЭНЦЕЛАДЕ

Дорофеева В.А. (ГЕОХИ РАН)

Dorofeeva@geokhi.ru; тел.: (495) 939-70-60

Ключевые слова: планеты-гиганты, регулярные спутники, атмосфера, Титан, Энцелад

Газообразный молекулярный азот экспериментально обнаружен на двух регулярных спутниках Сатурна – Титане и Энцеладе. На Титане N_2 является основным компонентом атмосферы (≈ 95 мол. %), а на Энцеладе он входит в состав его водных плюмов (≈ 4 мол. %) [1]. Наиболее вероятно, что аккумуляция азота на Титане и Энцеладе произошла в форме твердого клатрата аммония ($NH_4OH_{ТВ}$). Он образовался в протопланетном диске и не разрушился, в отличие от клатрата N_2 , попав в протоспутниковый диск Сатурна. Предположение основано на том, что в атмосфере Титана отсутствуют Кг и Хе [2], клатраты которых образуются при температурах выше T образования клатрата N_2 [3].

Как полагают в большинстве работ, образование в атмосфере Титана N_2 , как и изотопная дифференциация азота ($^{15}N/^{14}N$ в 2.5 раза выше, чем в атмосфере Юпитера), произошли при фотохимическом разложении NH_3 . Однако этому предположению противоречат, во-первых, отсутствие в водных плюмах Энцелада аммиака [1] и, во-вторых, результаты теоретических оценок [4], показавших, что при фотохимическом разложении аммиака изотопного фракционирования азота практически не происходит. Это заставляет более детально рассмотреть возможность термического превращения NH_3 в N_2 . В данной работе рассматривается образование молекулярного азота на Титане и Энцеладе в результате ударного нагрева протоспутникового вещества.

Хорошо известно, что ударные процессы имели место в дисках Юпитера и Сатурна - поверхности их регулярных спутников покрыты большим количеством кратеров, некоторые из которых имеют размеры, соизмеримые с размером самих тел. Но могли ли ударные процессы значимо влиять на их состав? Чтобы ответить на этот вопрос, сравним характер зависимости значений средних плотностей регулярных спутников (d) от радиального расстояния до центральной планеты (r) для систем Юпитера (рис. 1) и Сатурна (рис. 2).

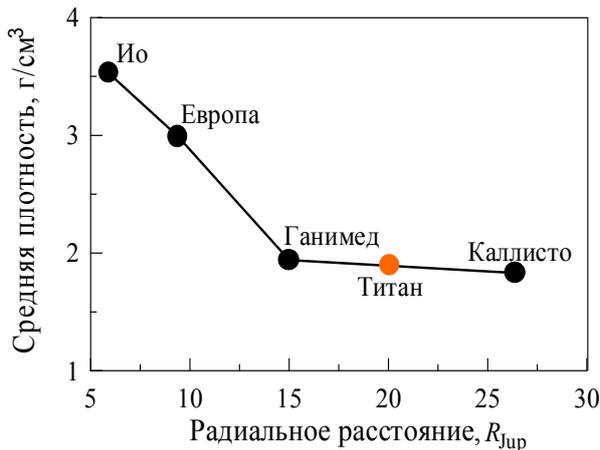


Рис.1. Значения средней плотности и радиального расстояния регулярных спутников Юпитера и Титана

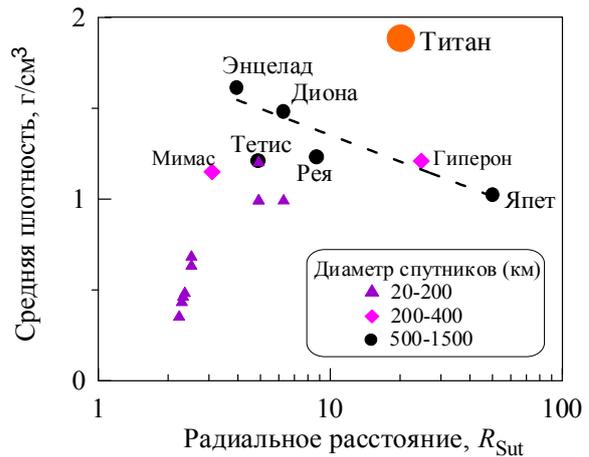


Рис.2. Значения средней плотности и радиального расстояния регулярных спутников Сатурна

Из рис. 1 видно, что по мере увеличения r значения d спутников Юпитера монотонно уменьшаются, что отражает возрастание в них доли льда и увеличения отношения x_{ice}/x_{rock} . Такой монотонный характер зависимости d от r означает, что соотношение в них ледяной и ка-

менной составляющих контролировался неким регулярным фактором – вероятнее всего температурным градиентом, существовавшим в протоспутниковом диске [5].

Зависимость d от r для регулярных спутников Сатурна (рис. 2) более сложная и указывает, что их состав определялся не только температурным градиентом в субдиске [6], но и иными факторами, и, прежде всего, влиянием ударных процессов. Действительно, если условно разбить все спутники на 3 группы в соответствии с их размером, то можно видеть, что самые малые из них (с $D = 50-200$ км) имеют две отличительные особенности: 1) все спутники сосредоточены вблизи Сатурна, на $r \leq 6,5R_{\text{Sat}}$; 2) их плотность ниже плотности льда воды. Последнее обусловлено чрезвычайно высокой пористостью этих мелких спутников, о чем свидетельствуют снимки, сделанные с КА «Кассини». Образование подобных тел могло происходить только вследствие ударных процессов, в результате которых протоспутниковые тела многократно разрушались, а затем вновь аккумуляировали. Ударное разрушение привело также к дифференциации минеральной и ледяной составляющих, при этом значительная часть пыли не вошла в состав протоспутниковых тел, а была поглощена Сатурном. Об этом свидетельствуют значения средней плотности всех других регулярных спутников Сатурна (за исключением крупнейшего из них – Титана) - значения $x_{\text{ice}}/x_{\text{rock}}$ в них выше, чем это следует из солнечной распространенности элементов [7]. Таким образом, можно заключить, что строение и состав малых спутников Сатурна, полностью определялся интенсивностью ударной переработки их протовещества. То же, но может быть в меньшей степени можно сказать и о спутниках размером от 200 до 400-т км (вторая группа) – Мимасе и Гипероне.

К 3-ей группе принадлежат 5 относительно крупных спутников, имеющих диаметр от 500 до полутора тысяч км: Энцелад, Тетис, Диона, Рея и Япет. 4 из них удовлетворительно ложатся на ту же зависимость d от r , что и спутники Юпитера, т.е. с увеличением радиального расстояния увеличивается относительная доля льда в них. Отклонение Тетиса от этой зависимости вероятно вызвано недостаточно точным определением его плотности, тем более, что по всем иным своим свойствам он близок Дионе и Рее. Но и эти, относительно крупные спутники, также характеризуются плотностью, ниже того значения, которое могло быть обусловлено химической дифференциацией в системе солнечного состава (наиболее близко к нему значение плотности Каллисто, имеющего $d = 1.83$). Из этого можно заключить, что и их состав во многом определялся импактными процессами.

И, наконец, Титан, а масса и объем которого в сотни раз больше любого из других регулярных спутников Сатурна. Его плотность существенно выше плотности Реи и Гиперона и не укладывается в описанную выше последовательность. Но на диаграмме d от r спутников Юпитера (радиусы Юпитера и Сатурна близки) она точно укладывается на соответствующую зависимость, где занимает позицию между Ганимедом и Каллисто (рис.1). Это говорит о том, что состав Титана (т.е., значение $x_{\text{ice}}/x_{\text{rock}}$), также как и состав регулярных спутников Юпитера определялся температурными условиями в протоспутниковом диске [6]. Причина этого в том, что зародыш Титана, как и зародыши галилеевых спутников, был много крупнее всех иных тел протоспутникового диска Сатурна, поэтому, попав в субдиск, он рос значительно быстрее остальных. Вскоре сила его гравитационного притяжения становится достаточной, чтобы скорость убегания превышала скорость разлеты и потому все или большая часть вещества, испаренного в результате ударов, оставалась на спутнике. Однако в результате того, что в облаке взрыва возникали достаточно высокие температуры и давления, компонентный состав вещества в нем мог существенно измениться. Чтобы охарактеризовать эти изменения, было проведено термодинамическое моделирование. Оценки максимальных значений $T = 800 - 2000$ К и $P = 10 - 30$ кбар в облаке взрыва были получены из результатов [8], с учетом того, что скорости тел, принадлежащих субдиску Сатурна, составляли 2 - 4 км/с. Минимальные значения расчетных температуры определялись тем обстоятельством, что при $T \leq 600$ К в системе начинают действовать кинетические ограничения. Определенные трудности существуют при выборе исходного валового состава системы, поскольку неизвестно соотношение между льдом воды и содержанием в нем клатрата аммония. Неизвестно также была ли двуокись углерода основным источником углерода на Титане (как это мы ранее предположили [9]), или, как было предложено в работе [10] им было органическое вещество типа СНОН. Поэтому валовый состав системы задавался в соответствии с составом плюмов Энцелада [1], при этом рассматривались несколько вариантов источника углерода:

1. Когда углерод аккрецировался Титаном только в форме льда CO_2 (Модель 3);

2. Когда углерод аккрецировался Титаном только в форме органических соединений типа CHON (Модель 2);

3. И промежуточный вариант, в соответствии с которыми источником углерода на Титане были на 50% CO₂ и 50% CHON (Модель 1).

Результаты представлены на рис.3.

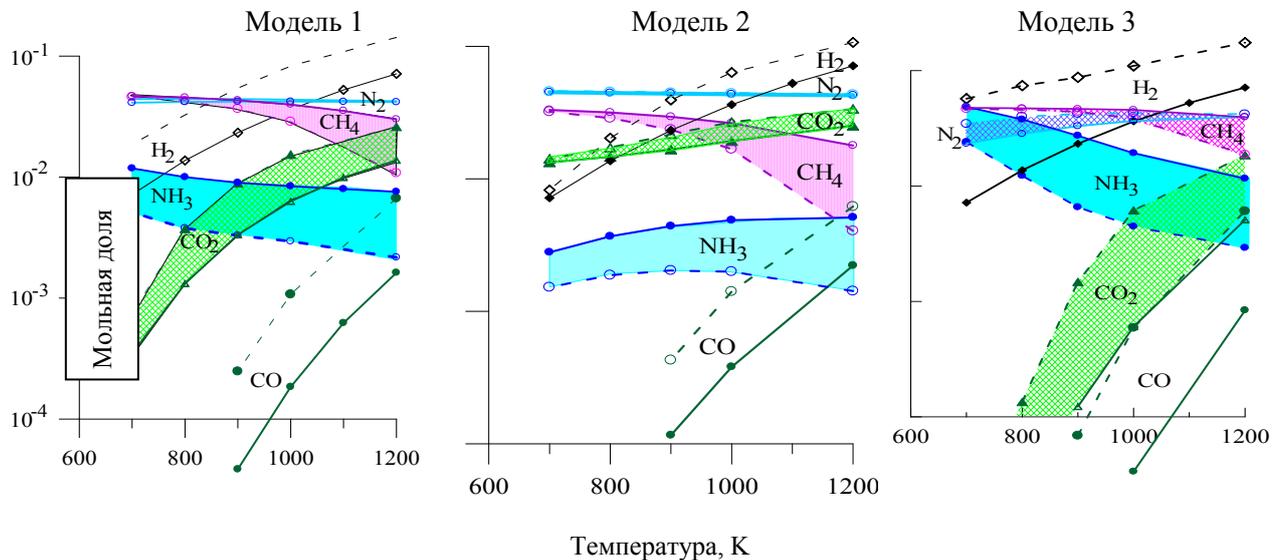


Рис.3. Изменение состава газовой фазы, образующейся при столкновении каменно-ледяных тел, в зависимости от температуры в интервале давлений 1 – 10 кбар (пунктирная и сплошная линии соответственно). Принятый состав ледяной компоненты: 1) соотношение H₂O:C:N отвечает составу водных пломов Энцелада; 2) азот находится в форме NH₃; 3) формы нахождения углерода варьировались: Модель 1 – 50% CO₂ + 50%CHON, Модель 2 – 100% CHON, Модель 3 – 100% CO₂

Приведенные выше данные, а также полученные результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

- Ударные процессы полностью контролировали состав малых спутников Сатурна, в значительной мере спутников с D=500-1500 км и состав газов на Титане.
- Условиям модели лучше всего удовлетворяет модель 3 – отвечающей условию, что весь углерод аккрецировался в форме CO₂.
- Возможен вклад CHON до ~ 30% (модель 1).
- Предположение о том, что аккреция углерода происходила в форме CHON, приводит к составу газа, в котором [NH₃] > [N₂] и существенному различию в содержании CO₂ и CH₄.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, Грант 08-05-01070

Литература

1. Waite J.H., Combi M.R., Ip W.-H. et al. Cassini ion and neutral mass spectrometer: Enceladus plume composition and structure // Science. 2006. V. 311. P. 1419-1422.
2. Niemann H.B., Atreya S.K., Bauer S.J. et al. The abundances of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe // Nature. 2005. V. 438. P. 779-784.
3. Lunine J.I., Stevenson D.J. Thermodynamics of clathrate hydrate at low and high pressures with application to the outer solar system // Astrophys. J. 1985. Suppl. Ser. V. 58. P. 493-531.
4. Berezhnoy A.A. Nitrogen on early Titan // 40th Lunar and Planetary Science Conference. 2009. 1077.pdf.
5. Макалкин А.Б., Дорофеева В.А., Рускол Е.Л. Моделирование аккреционного протоспутникового диска Юпитера: оценка основных параметров // Астроном. Вестн. 1999. Т. 33. № 6. С.518-526.
6. Макалкин А.Б., Дорофеева В.А. Модели протоспутникового диска Сатурна: условия образования Титана // Астроном. Вестн. 2006. Т. 40. № 6. С.483-498.
7. Lodders K. Solar system abundances and condensation temperatures of the elements // Astrophys. J. 2003. V. 591. P.1220-1247.

8. *Ahrens T.J., Okeefe J. D.* Shock vaporization and the accretion of the icy satellites of Jupiter and Saturn. In: *Ices in the solar system* // Dordrecht. D. Reidel Publishing Co. 1985. P.631-654.
 9. *Дорофеева В.А.* Вероятные источники метана на спутниках Сатурна-Титане и Энцеладе.
URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2007/informbul-1_2007/planet-3.pdf
 10. *Zolotov M.Y., Owen T., Atreya S. et al.* An Endogenic Origin of Titan's Methane // Am. Geophys. Union. Fall Meeting 2005. Abstract P43B-04.
-

Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(27) 2009

Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2009 года (ЕСЭМПГ-2009)

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2009/informbul-1_2009/planet-11.pdf

Опубликовано 1 сентября 2009 г.

© *Вестник Отделения наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2009*

При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала, ссылка на «Вестник Отделения наук о Земле РАН» обязательна