УДК 523.46

# Происхождение системы Сатурна по изотопным данным

**А.А. Бережной[1], В.А. Дорофеева[2]**
[1] Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга
[2]Институт геохимии и аналитической химии РАН им. В. И.Вернадского, Москва

**Аннотация.** Обобщены данные по $^{14}N/^{15}N$, $^{12}C/^{13}C$ и D/H для льдов молекулярных облаков и комет. Проведено их сопоставление с наблюдательными данными по изотопному составу летучих компонентов регулярных спутников Сатурна Титана и Энцелада с целью оценить значимость вклада неизмененного межзвездного вещества в состав вещества каменно-ледяных спутников внешних планет.

*Ключевые слова: изотопы, Сатурн, Титан, образование, кометы, молекулярные облака.*

**Ссылка:** Бережной, А.А., В.А. Дорофеева (2013). Происхождение системы Сатурна по изотопным данным.

Примитивное вещество солнечной небулы, сформированное в областях звездообразования в межзвездных молекулярных облаках (ММО), могло участвовать в образовании не только комет, но и в образовании спутниковых систем внешних планет, в том числе спутников Сатурна. В особенности это может относиться к спутникам, которые были сформированы на заключительной стадии существования протоспутникового диска Сатурна, когда в околосолнечной небуле температуры опустились до минимальных значений (τ ~ 5-7 млн. лет от начала образования и эволюции Солнечной системы). В данной работе делается попытка оценить значимость вклада неизмененного межзвездного вещества путем сопоставления экспериментальных данных по изотопному составу летучих компонентов ММО и комет и изотопного состава вещества регулярных спутников Сатурна, полученных миссией «Кассини-Гюйгенс» - Титана и Энцелада. Такое сопоставление изотопных составов важно для исследования происхождения летучих компонентов в составе вещества каменно-ледяных спутников внешних планет.

**Таблица 1.** Изотопный состав азота в межзвездных молекулярных облаках, кометах и спутниках Сатурна.

| **Молекула** | **$^{14}N/^{15}N$** | **Ошибка (3 σ)** | **Объект** | **Тип объекта** | **Ссылка** |
|---|---|---|---|---|---|
| **$NH_3$** | 334 | 50 | Barnard 1 | ММО | Lis et al., 2010 |
| **$NH_3$** | 334 | 173 | NGC 1333 | ММО | Lis et al., 2010 |
| **$N_2H^+$** | 446 | 71 | L 1544 | ММО | Bizzocchi et al., 2010 |
| **$NH_2D$** | 470 | + 170, -100 | Barnard 1b | ММО | Gerin et al., 2009 |
| **$NH_2D$** | 360 | + 260, - 110 | NGC 1333 | ММО | Gerin et al., 2009 |
| **$NH_2D$** | 850 | + 600, - 250 | L1689N | ММО | Gerin et al., 2009 |
| **HNC** | 120 - 400 | | 11 объектов | ММО | Adande, Ziurys, 2012 |
| **HNC** | 250 - 330 | | TMC-1 | ММО | Liszt, Ziurys, 2012 |
| **HCN** | 140 – 250 | | L 183 | Протозвезда | Hily-Blant et al., 2013 |
| **HCN** | 140 - 360 | | L 1544 | Протозвезда | Hily-Blant et al., 2013 |
| **CN** | 120 - 400 | | 11 объектов | ММО | Adande, Ziurys, 2012 |
| **HCN** | 323 | 46 | Хейла-Боппа | Комета | Jewitt et al., 1997 |
| **CN** | 141 | 29 | Десятки объектов | Кометы | Schulz et al., 2008 |
| **$N_2$** | 167.7 | 0.6 | Титан | Спутник | Niemann et al., 2010 |

Известно, что основным азотсодержащим соединением в межзвездной среде является $N_2$, но его изотопный состав в настоящее время невозможно определить. Содержание остальных азотсодержащих молекул, в том числе молекул $NH_3$, HNC, HCN и CN составляет менее 10 % от содержания $N_2$ (Nejad et al., 1990; Pagani et al., 2012), поэтому их вклад в валовый изотопный состав N в межзвездной среде мал. Однако аккумуляция азота в твердой фазе вещества допланетного диска, которое могло послужить источником летучих в том числе и ледяных спутников планет-гигантов, происходило вероятнее всего в форме $NH_3$. Температуры образования $NH_3 \times H_2O$ в условиях околосолнечной небулы ($P_{общ} \sim 10^{-6}$ - $10^{-8}$ бар) составляли ~ 70-90 K, в то время как $T_{конд}$ ($N_2$) < 30-40 K, и они вряд ли достигались даже на радиальных расстояниях Сатурна. Об этом же косвенно свидетельствует отсутствие в атмосфере Титана инертных газов тяжелее аргона, хотя их $T_{конд}$ выше $T_{конд}$ ($N_2$). Поэтому исследование изотопного состава азотсодержащих молекул в ММО важно для исследования происхождения N в веществе спутников Сатурна. Наблюдавшиеся азотсодержащие молекулы межзвездной среды обеднены тяжелым изотопом $^{15}N$. Отметим, что как следует из данных Таб. 1, изотопный состав N в молекуле HCN и CN в веществе ММО, протозвездах и кометах близко, что может свидетельствовать о генетической связи вещества ММО и кометного вещества. В то же время значение $^{14}N/^{15}N = 167.7$ для основного компонента атмосферы спутника Сатурна Титана $N_2$, вдвое ниже, чем $^{14}N/^{15}N$ для молекулы $NH_3$ в составе ММО. Таким образом, если образование $N_2$ было связано с аккрецированным $NH_3 \times H_2O$, то оно должно было происходить в атмосфере спутника, где в принципе была возможна изотопная дифференциация $^{14}N$ и $^{15}N$ с диссипацией легкого изотопа азота.

Изотопный состав C более однороден в различных объектах Солнечной системы, в том числе и в веществе комет (Таб. 2). Однако отсутствие изотопных данных по молекуле $CO_2$ в ММО не дает возможность однозначно определить источник C-содержащих летучих соединений в объектах внешней Солнечной системы, в том числе и Титана.

**Таблица 2**. Изотопный состав углерода в межзвездных молекулярных облаках, кометах и спутниках Сатурна.

| **Молекула** | **$^{12}C/^{13}C$** | **Ошибка (3 σ)** | **Объект** | **Тип объекта** | **Ссылка** |
|---|---|---|---|---|---|
| **$^{13}CCH$** | > 250 | | TMC-1 | ММО | Sakai et al., 2010 |
| **$^{13}CCH$** | > 135 | | L1527 | Протозвезды | Sakai et al., 2010 |
| **$C^{13}CH$** | > 170 | | TMC-1 | ММО | Sakai et al., 2010 |
| **$C^{13}CH$** | > 80 | | L1527 | Протозвезды | Sakai et al., 2010 |
| **CO** | 150 | 7 | IRS 63 | Протозвезда | Smith et al., 2010 |
| **CO** | 112 | 7 | IRS 43 | Протозвезда | Smith et al., 2010 |
| **CO** | 158 | 9 | IRS 51 | Протозвезда | Smith et al., 2010 |
| **CO** | 110 | 7 | RE 50, Orion | Протозвезда | Smith et al., 2010 |
| **CO** | 100 | 10 | VV CrA диск | Протозвезда | Smith et al., 2010 |
| **CO** | 65 -185 | | 12 объектов | Протозвезды | Smith et al., 2013 |
| **$CH^+$** | 74.4 | 7.6 | Несколько объектов | Диффузионные облака | Federman et al., 2009 |
| **$CH^+$** | 76.27 | 1.94 | | Межзвездная среда | Stahl et al., 2008 |
| **$^{13}CCS$** | 230 | 130 | TMC-1 | ММО | Sakai et al., 2007 |
| **CO, CN** | 20 - 76 | | Несколько объектов | Звезды AGB | Milam et al., 2006 |
| **CN** | 91 | 21 | Десятки объектов | Кометы | Schulz et al., 2008 |
| **HCN** | 111 | 12 | Хейла-Боппа | Комета | Jewitt et al., 1997 |
| **$CH_4$** | 91.1 | 1.4 | Титан | Спутник | Niemann et al., 2010 |

Значения D/H в различных летучих соединениях чрезвычайно информативны, поскольку позволяют проследить их генетическую связь с веществом ММО. Кроме того, значение D/H в молекуле воды может свидетельствовать, является ли она «первичной», или вода была испарена в условиях околосолнечного диска. Такую «первичную» воду мы наблюдаем, например, в веществе комет (табл. 3), где $D/H_{H2O}$>VSMOW. В то же время $D/H_{H2O}$, характерное для Земли (VSMOW) и вещества углистых хондритов является результатом реакции изотопного обмена с молекулярным водородом, являвшимся основным компонентом газовой фазы околосолнечного протопланетного диска, у которого D/H было существенно ниже, о чем свидетельствуют данные по $D/H_{H2}$ атмосфер Юпитера и Сатурна (табл. 3). Таким образом, вода, имеющая D/H близкое земному, прошла стадию испарения и последующей конденсации в условиях околосолнечного диска.

**Таблица 3.** Изотопный состав водорода в межзвездных молекулярных облаках, в протосолнечной небуле и объектах внешней части Солнечной системы.

| Объект | Молекула | D/H, $10^{-5}$ | Ошибка, $10^{-5}$ | Ссылка |
|---|---|---|---|---|
| Межзвездная среда | $H_2$ | 1.50 | ±0.1 | Linsky, 2003 |
| Протосолнечное облако | $H_2$ | 1.94 | ±0.5 | Lodders, 2003 |
| Протосолнечное облако | $H_2$ | 2.0 | ±0.1 | Geiss, Gloecker, 2003 |
| Юпитер | $H_2$ | 2.2 | +0.52, -0.7 | Niemann et al., 1998, Mahaffy et al., 1998 |
| Сатурн | $H_2$ | 2.3 | +0.75 -0.45 | Enrenaz et al., 1999 |
| Сатурн | $H_2$ | 1.7 | +0.75 -0.45 | Lellouch et al., 2001 |
| Комета 1P/Halley | $H_2O$ | 30.8 | + 3.8 − 5.3 | Balsiger et al., 1995 |
| Комета 1P/Halley | $H_2O$ | 30.6 | ± 3.4 | Eberhardt et al., 1995 |
| Комета C/1996 B2 Hyakutake | $H_2O$ | 29 | ± 10 | Bockelée-Morvan et al., 1998 |
| Комета C/1995 O1 Hale-Bopp | $H_2O$ | 33 | ± 8 | Meier et al., 1998a |
| Комета C/1995 O1 Hale-Bopp | HCN | 230 | ± 40 | Meier et al., 1998b |
| Комета C/2004 Q2 Machholz | $H_2O$ | < 23 |  | Crovisier et al., 2005 |
| Комета 153P/Ikeya-Zhang | $H_2O$ | < 28 | ± 3 | Biver et al., 2006 |
| Комета 81P/Wild 2 | Возвращенные образцы | 11.9±2; 18.3±1.8; 25.4±1.9; 29.6±5.5; 29.9±8.4; 37.3±13.1; 41.3±10.5; 45.1±16.5; 50.5±15.3; |  | McKeegan et al., 2006 |
| Комета C/2002 T7 (LINEAR) | OH | 25 | ± 7 | Hutsemékers et al., 2008 |
| Комета C/2001 Q4 (NEAT) | H | 46 | ± 14 | Weaver et al., 2008 |
| Комета 8P/Tuttle | $H_2O$ | 40 | ± 14 | Villanueva et al., 2009 |
| Комета 103P/Hartley 2 | $H_2O$ | 16.1 | ± 2.4 | Hartogh et al., 2011 |
| Комета C/2009 P1 (Garradd) | $H_2O$ | 20.6 | ± 2.2 | Bockelée-Morvan et al., 2012 |
| Хондрит CI, LEW87232 | Образцы | 14.1 |  | Robert, 2003 |
| Хондрит CI, Ivuna | Образцы | 18.5 |  | Robert, 2003 |
| Хондрит CI, Orgueil | Образцы | 17.4 |  | Robert, 2003 |
| Хондрит CI, Alais | Образцы | 16.1 |  | Robert, 2003 |
| Земной океан (VSMOW) | $H_2O$ | 15.576 | ± 0.01 | Lodders, Fegley, 1998 |
| Энцелад | $H_2O$ | 29 | +15, -7 | Waite et al., 2009 |
| Титан | $H_2$ | 13.5 | ±0.3 | Niemann, 2010 |
| Титан | $CH_4$ | 15.8 | ± 1.57 | Abbas et al., 2010 |
| VSMOW – венский стандарт значения океанической воды Земли | $H_2O$ | 15.576 | ±0.1 |  |

Сравнение данных, представленных в Таб. 3 показывают, что лед $H_2O$, вошедший в состав Энцелада, подобно льду комет, не прошел стадию испарения. Это дает основания предполагать, что Энцелад образовался на заключительной стадии эволюции протоспутникового диска Сатурна. Удивительная близость D/H молекулы $CH_4$ атмосферы Титана VSMOW может свидетельствовать об образовании метана в реакции серпентинизации в подледном океане спутника. И если это предположение верно, то образование льда $H_2O$, вошедшего в состав Титана, происходило в регионах, где он ранее был испарен.

*Данное исследование проведено при поддержке гранта РФФИ 11-05-01137-а и программы президиума РАН № 22.*

**Литература**

Abbas M.M., H. Kandadi, A. LeClair (2010). D/H ratio of Titan from observations of the Cassini/Composite Infrared Spectrometer. *Astrophys. Journal*, V. 708, p. 342-353

Adande G.R., L.M Ziurys (2012). Millimeter-wave observations of CN and HNC and their $^{15}N$ isotopologues: a new evaluation of the $^{14}N/^{15}N$ ratio across the Galaxy. *Astrophys. Journal*, V. 744, Is. 2, article id. 194, 15 p.

Balsiger H., K. Altwegg, J. Geiss (1995). D/H and O-18/O-16 ratio in the hydronium ion and in neutral water from in situ ion measurements in comet Halley. *J. Geophys. Res.*, V. 100, p. 5827-5834

Biver N., D. Bockelée-Morvan, J. Crovisier et al. (2006). Radio wavelength molecular observations of comets C/1999 T1 (McNaught-Hartley), C/2001 A2 (LINEAR), C/2000 WM1 (LINEAR) and 153P/Ikeya-Zhang. *Astr. Astrophys*., V. 449, p. 1255-1270

Bizzocchi L., P.Caselli, L.Dore (2010). Detection of $N^{15}NH^+$ in L1544. *Astr. Astrophys.*, V. 510, id.L5

Bockelée-Morvan D., D. Gautier, D.C.Lis et al. (1998). Deuterated water in comet C/1996 B2 (Hyakutake) and its implications for the origin of comets. *Icarus*, V. 133, p. 147-162

Bockelée-Morvan D., N. Biver, B. Swinyard et al. (2012). Herschel measurements of the D/H and $^{16}O/^{18}O$ ratios in water in the Oort-cloud comet C/2009 P1 (Garradd). *Eprint arXiv*:1207.7180

Crovisier J., N. Biver, D. Bockelée-Morvan et al. (2005). Chemical diversity of comets observed at radio wavelengths in 2003-2005. *American Astronomical Society, DPS meeting #37, #16.06; Bulletin of the American Astronomical Society*, V. 37, p. 646

Delsemme A.H. (1988). The chemistry of comets. *Royal Soc. Philos. Transact.*, Ser. A, V. 325, p. 509-523

Eberhardt P., M. Reber, D.Krankowsky, R.R.Hodges, (1995). The D/H and $^{18}O/^{16}O$ ratios in water from comet P/Halley. *Astr. Astrophys.*, V. 302, p. 301-316

Encrenaz T., P. Drossart, H. Feuchtgruber et al. (1999). The atmospheric composition and structure of Jupiter and Saturn from ISO observations: a preliminary review. *Planetary and Space Science*, V. 47, Is. 10-11, p. 1225-1242

Federman S.R., A.M. Ritchey, Y. Sheffer et al. (2009). Ground-based observations of interstellar CN and $CH^+$ in diffuse molecular clouds: $^{12}C/^{13}C$ ratios and CN excitation, AAS Meeting #214, #425.03. *Bulletin of the American Astronomical Society*, V. 41, p.694

Geiss J., G. Gloeckler (2003). Isotopic composition of H, He and Ne in the protosolar cloud. *Space Science Reviews*, V. 106, Is. 1, p. 3-18

Gerin M., N. Marcelino, N. Biver et al. (2009). Detection of $^{15}NH_2D$ in dense cores: a new tool for measuring the $^{14}N/^{15}N$ ratio in the cold ISM. *Astr. Astrophys.*, V. 498, Is. 2, p. L9-L12

Hartogh P., D.C. Lis, D. Bockelée-Morvan et al. (2011). Ocean-like water in the Jupiter-family comet 103P/Hartley 2. *Nature*, V. 478, p. 218-220

Hily-Blant P., L. Bonal, A. Faure. et al. (2013). The $^{15}N$-enrichment in dark clouds and Solar System objects. *Icarus*, V. 223, p. 582–590

Hutsemékers D., J.Manfroid, E.Jehin et al. (2008). The $^{16}OH/^{18}OH$ and OD/OH isotope ratios in comet C/2002 T7 (LINEAR). *Astr. Astrophys.*, V. 490, Is. 3, p. L31-L34

Jewitt D., H.E.Matthews, T.Owen et al. (1997). The $^{12}C/^{13}C$, $^{14}N/^{15}N$ and $^{32}S/^{34}S$ isotope ratios in comet Hale-Bopp (C/1995 O1). *Science*, V. 278, p. 90-93

Lellouch E., B. Bézard, T. Fouchet et al. (2001). The deuterium abundance in Jupiter and Saturn from ISO-SWS observations. *Astronomy and Astrophysics*, V. 370, p. 610-622

Lis D.C., A.Wootten, M.Gerin et al. (2010). Nitrogen isotopic fractionation in interstellar ammonia. *Astrophys. J. Lett.*, V. 710, Is. 1, p. L49-L52

Liszt H.S., L.M.Ziurys (2012). Carbon isotope fractionation and depletion in TMC1. *Astrophys. Journal*, V. 747, Is. 1, article id. 55, 9 pp.

Linsky L Jeffrey (2003). Atomic deuterium/hydrogen in the galaxy. *Space Science Reviews,* V. 106, Is. 1, p. 49-60

Lodders K. (2003). Solar system abundances and condensation temperatures of the elements. *The Astrophysical Journal*, V. 591, p. 1220-1247

Lodders K., B. Fegley (1998). The planetary scientist companion, Oxford University Press, 371 pp.,

Mahaffy P.R., T.M.Donahue, S.K. Atreya et al. (1998). Galileo probe measurements of D/H and $^3He/^4He$ in Jupiter's atmosphere. *Space Science Reviews*, V. 84, Is. 1/2, p. 251-263

McKeegan K.D., J. Aléon, J.Bradley et al. (2006). Isotopic compositions of cometary matter returned by Stardust. *Science,* V. 314, p. 1724-1728

Meier R., T.C. Owen, H.E.Matthews et al. (1998a). A determination of the HDO/$H_2O$ ratio in comet C/1995 O1 (Hale-Bopp). *Science,* V. 279, p. 842-844

Meier R., T.C. Owen, D.C. Jewitt et al. (1998b). Deuterium in comet C/1995 O1 (Hale-Bopp): detection of DCN. *Science*, V. 279, p. 1707-1710

Milam S.N., L.M.Ziurys, N.J.Woolf et al. (2006). Carbon isotope ratios in circumstellar envelopes: constraints for nucleosynthesis and galactic chemical evolution. *Astrochemistry. AIP Conference Proc*., V. 855, p. 165-169

Nejad L.A.M., D.A.Williams , S.B.Charnley (1990). Dynamical models of molecular clouds - nitrogen chemistry. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, V. 246, p. 183-190

Niemann H.B., S.K. Atreya, G.R. Carignan et al. (1998). The composition of the Jovian atmosphere as determined by the Galileo probe mass spectrometer. *Journal of Geophysical Research,* V. 103, Is. E10, p. 22831-22846.

Niemann H.B., S.K.Atreya, J.E Demick. et al. (2010). Composition of Titan's lower atmosphere and simple surface volatiles as measured by the Cassini-Huygens probe gas chromatograph mass spectrometer experiment. *JGR*, V. 115, Is. E12, CiteID E12006

Pagani L., A. Bourgoin, F. Lique (2012). A method to measure CO and $N_2$ depletion profiles inside prestellar cores. *Astronomy and Astrophysics*, V. 548, id.L4, 5 pp.

Robert F. (2003). The D/H Ratio in chondrites. *Space Sci. Rev.*, V. 106, p. 87-101

Sakai N., M. Ikeda, M. Morita et al. (2007). Production pathways of CCS and CCCS inferred from their $^{13}C$ isotopic species. *Astrophys. J.*, V. 663, Is. 2, p. 1174-1179

Sakai N., O. Saruwatari, T. Sakai et al. (2010). Abundance anomaly of the $^{13}C$ species of CCH. *Astr. Astrophys.*, V. 512, id.A31

Schulz R., E. Jehin, J. Manfroid et al. (2008). Isotopic abundance in the CN coma of comets: Ten years of measurements. *PSS*, V. 56, p. 1713-1718

Smith R.L., K.M. Pontoppidan, G.J. Herczeg et al. (2010). Observations of unusual carbon isotope fractionation in protostars using VLT/CRIRES. AAS Meeting #215, #369.06. *Bulletin of the American Astronomical Society,* V. 42, p. 560

Smith R.L., K.M. Pontoppidan, G.A. Blake et al. (2013). Observations of carbon and oxygen isotopic heterogeneity toward protostars ranging in morphology and parent cloud. *44th Lunar and Planetary Science Conference*, *March 18-22, 2013, The Woodlands, Texas, LPI Contribution* No. 1719, p. 2698

Stahl O., S. Casassus, T. Wilson (2008). Interstellar $^{12}C/^{13}C$ from $CH^+$ absorption lines: results from an extended survey. *Astr. Astrophys.*, V. 477, Is. 3, p. 865-875

Villanueva G.L., M.J. Mumma, B.P. Bonev et al. (2009). A sensitive search for deuterated water in comet 8P/Tuttle. *Astrophys. J.*, V. 690, p. L5-L9

Waite J.H., W.S. Lewis, B.A. Magee et al. (2009). Liquid water on Enceladus from observations of ammonia and $^{40}Ar$ in the plume. *Nature*, V. 460, p. 487-490

Weaver H.A., M.F. A'Hearn, C. Arpigny et al. (2008). Atomic deuterium emission and the D/H ratio in comets. Asteroids, Comets, Meteors. *LPI Contrib*., 1405, Paper 8216, Houston, TX: Lunar Planet. Inst.

## ORIGIN OF THE SYSTEM OF SATURN BASED ON ISOTOPE DATA

**A.A. Berezhnoy[1], V.A. Dorofeeva[2]**
[1]Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University

[2] V. I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow

**Abstract.** Data about $^{14}N/^{15}N$, $^{12}C/^{13}C$, and D/H values for ices of molecular clouds and comets are summarized. These values are compared with observational data about isotopic composition of volatile components of regular satellites of Saturn Titan and Enceladus with the aim to estimate influence of unchanged interstellar matter in the composition of the matter of rock-ice satellites of outer planets.

*Key words: isotopes, Saturn, Titan, formation, comets, molecular clouds.*

**Сведения об авторах**

Дорофеева Вера Алексеевна, дхн, внс, ГЕОХИ РАН, Москва, ул. Косыгина, д. 19, (8) 495-939-70-60, dorofeeva@geokhi.ru

Бережной Алексей Андреевич, кфмн, снс, ГАИШ МГУ, Москва, Университетский проспект, д. 13, (8) 495-939-10-29, ber@sai.msu.ru