

УДК УДК 523.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ В КОМЕТАХ

Шоёкубов Ш. Ш., Худжаназаров Х. Ф.

RATE OF FORMATION ION CLUSTERS IN COMETARY

Shoyoqubov Sh. Sh., Khujanazarov H. F.

Institute of Astrophysics, Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, 734042,
Republic of Tajikistan
e-mail: shoayub@shohruxh.com

Abstract. This paper discusses mass spectral analysis of the rate of formation of positive and negative cluster ions on the surface of the laboratory modeled comet nucleus under the influence of corpuscular particles of solar wind. The method of proportionality of emission coefficients is used in calculations. From the experimental data obtained to determine the rate of formation of cluster ions, it follows that on the surface layer of ice cometary nuclei under the action of corpuscular solar fluxes and cosmic rays, ion-molecular clusters of opposite signs of a charge of the kind $H^+(H_2O)$ and $OH^-(H_2O)$. The rate of formation of negative clusters has a quantitative advantage over positive ones.

Keywords: comets, ion clusters, ion-molecular clusters, proportionality of emission coefficients, spray ice, mass spectral method, solar wind.

Согласно Шульману [1], если допустить наличие в ядрах комет ионно-молекулярных кластеров противоположных зарядов, то, исходя из единых позиций, можно объяснить загадочное явления как вспышки комет на больших гелиоцентрических расстояниях. По гипотезе Л.М. Шульмана кластеры существовали в достаточном количестве в протокометном облаке и явились центрами конденсации паров воды в будущие ядра комет или же они образовались на поверхности ядра вследствие поверхностной ионизации и фотоэффекта [1]. Наличие кластерных частиц разного размера были обнаружены масс-спектрометром COSIMA на борту ROSETTA при исследовании кометы 67P/Чурюмов–Герасименко [2].

В лаборатории экспериментальной астрофизики (ЛЭА) Института астрофизики АН РТ была разработана методика лабораторного моделирования образования ионов и ионно-молекулярных кластеров на поверхности ледяного ядра кометы под действием ионов солнечного ветра и космических лучей [3]. Методом лабораторного моделирования исследовались распыление льдов и скорость образования ионов и ионно-молекулярных кластеров на поверхности ледяного ядра кометы под

действием ионов солнечного ветра и космических лучей.

Подробная технология и методика проведения эксперимента и метод вычисления скорости образования отдельных вторичных ионов в масс-спектре описана в работе [4].

В вакууме $1,3 \times 10^{-4}$ Па на поверхность охлаждаемой жидким азотом ($T = 80$ К) металлической подложки, после тщательного обезгаживания путем термической обработки направлялись пары воды. Пленка льда, образовавшаяся на поверхности подложки в результате конденсации паров (модель ледяного ядра), бомбардировалась положительными ионами щелочного металла калий. Плотностью первичного потока была выбрана $3 \times 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ (модель воздействия солнечного ветра на поверхность ядра кометы на расстоянии 1 а.е.). Ионная составляющая продуктов распыления льда вытягивалась с поверхности мишени электрическим полем и после дополнительного ускорения фокусировалась по массам. Для устранения влияния остаточных газов на масс-спектр исследуемой модели кометного ядра пленка исследуемого льда на поверхности очищенной подложки наносилась с большой скоростью так, чтобы

Шоёкубов Шоайуб Шосиддиқович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник отдела физики комет и астероидов Института астрофизики Академии наук Республики Таджикистан; e-mail: shoayub@shohruxh.com.

Худжаназаров Хабибджон Файзалиевич, старший лаборанта отдела межпланетных тел Института астрофизики Академии наук Республики Таджикистан; e-mail: habibjon_2012@mail.ru.

конкурентная абсорбция остаточных газов в объеме льда была пренебрежимо малой. Толщина бомбардируемого льда была порядка нескольких тысяч молекулярных слоев, что исключало влияние подложки на эмиссию ионов.

На рис. 1 приведен масс-спектр положительных ионов, обусловленных распылением льда H_2O при бомбардировке ионами ^{39}K с энергией 1,5 КэВ. Из рис. 1 видно, что при ионной бомбардировке поверхности льда, наряду с ионами, представляющими собой продукты распада первоначально взятой «материнской» молекулы H_2O (например, ионы H^+ , H_2^+ , O^+ , OH^+), наблюдаются также пики более сложных молекулярных ионов O_2^+ и кластерные положительные ионы $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$, содержащие до $n = 5$ молекул воды, образованных от двух и более «материнских» молекул. Эти ионы образуются в результате ионно-молекулярных реакций между продуктами разрушения материнских молекул за счет энергии бомбардирующих ионов.

На рис. 2 показан идентифицированный отрицательных масс-спектр ионно-молекулярных кластеров, наблюдаемых при бомбардировке ионами $^{39}\text{K}^+$ с энергией 1,5 КэВ, поверхности модели ядра кометы, состоящей из чистого льда H_2O .

В работе Добровольского и Хашимова [5] было показано, что при поверхностном слое ядра комет и вблизи ледяных зерен и пылевых частиц ее атмосферы должно находиться заметное количество отрицательных ионов, которые надо учитывать при рассмотрении кометной плазмы и ионно-молекулярных реакций, имеющих место в кометах. Там же были указаны возможные каналы образования отрицательно-ионное распыление ядра кометы и ледяных зерен в голове кометы.

Как видно, при ионной бомбардировке с поверхности льда H_2O наряду с положительными ионами эмитируют ионно-молекулярные кластеры отрицательных знаков заряда. Нами идентифицированы кластеры типа $\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})_n$, содержащие до $n = 5$ молекул воды. Более высокого порядка n кластеров в составе обоих спектров распыленных ионов, из-за низкого порога чувствительности аппаратуры, обнаружить и идентифицировать не удалось. Аналогичный спектр кластерных ионов наблюдается при бомбардировке льда H_2O ионами $^{23}\text{Na}^+$, $^{85}\text{Rb}^+$, $^{133}\text{Cs}^+$ причем с ростом массы бомбардирующих ионов и плотности потока, интенсивность пи-

ков кластерных ионов обоих знаков заряда в спектре растет.

Методом пропорциональности коэффициентов эмиссии вторичных ионов в диапазоне энергии корпускулярных частиц солнечного ветра [3] вычислены скорости образования вторичных ионов обоих знаков заряда при бомбардировке чистого льда H_2O положительными ионами ^{39}K энергией 1,5 КэВ.

В табл. 1 и 2 показаны численные данные положительных и отрицательных кластерных ионов полученные при бомбардировке пленки чистого льда H_2O положительными ионами ^{39}K энергией 1,5 КэВ.

В первом столбе указано массовое число ионов m ; во втором и третьем столбцах указаны названия и процентный состав ионов в спектре; в четвертом столбе указана скорость формирования отдельных ионов в виде потока N с поверхности пленки льда.

Суммарная скорость положительных кластерных ионов в потоке составляет $7,54 \times 10^{10}$ ион $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, а для отрицательных кластерных ионов $8,94 \times 10^{10}$ ион $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Исследование зависимости спектра кластеров от температуры льда показывает, что в интервале температур 112–130 К спектр заметно не изменяется, а при температурах выше 140 К наблюдается уменьшение интенсивности всех пиков кластерных ионов обоих знаков.

Такой ход температурной зависимости эмиссии молекулярных кластеров показывает, что они возникают на поверхностном слое льда и эмитируются в виде сформировавшихся ионно-молекулярных кластеров, а не формируются в газовой фазе атмосферы модели ядра в результате взаимодействия вторичных ионов с сублимировавшимися молекулами воды. При повышении температуры льда от 112 до 130 К скорость сублимации и плотность сублимировавшихся молекул в газовой фазе в приповерхностном слое растет на порядок величины. Если бы кластеры возникали в газовой фазе, их интенсивность должна была бы расти с температурой пропорционально плотности паров воды. Уменьшение интенсивности регистрируемых кластерных ионов при больших температурах объясняется их рассеянием на пути от поверхности льда до коллектора приемника. Рассеяние происходит в результате ухудшения вакуума в приповерхностном слое.

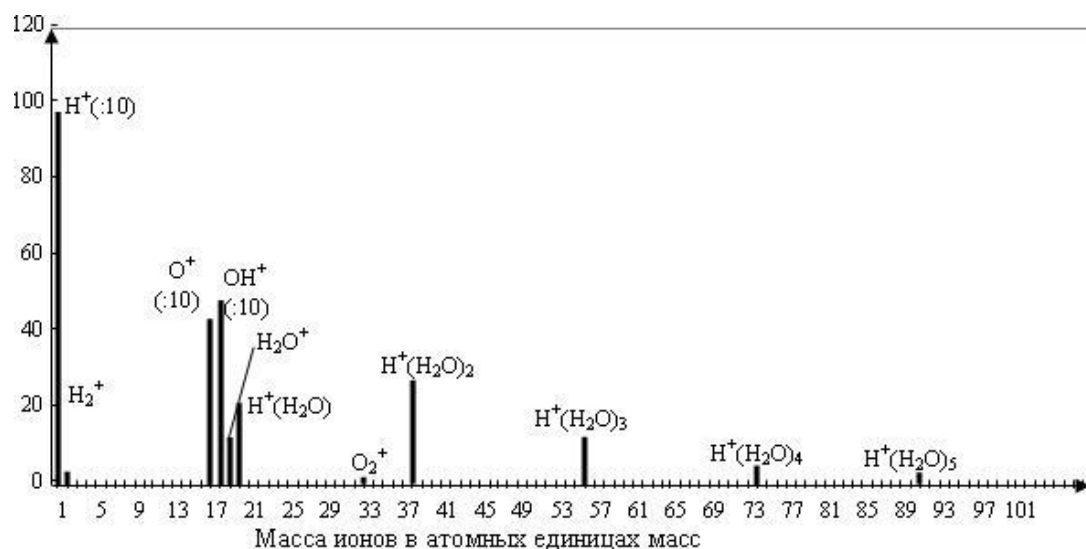


Рис. 1. Масс-спектр положительных кластерных ионов, наблюдаемых при бомбардировке чистого льда H_2O ионами K^+ энергией 1,5 КэВ

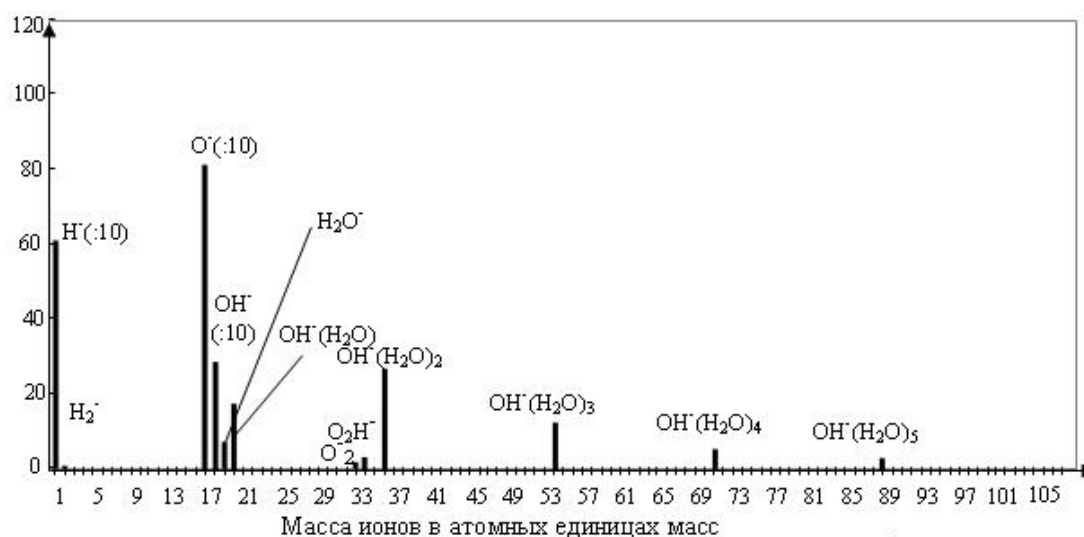


Рис. 2. Масс-спектр отрицательных кластерных ионов, наблюдаемых при бомбардировке чистого льда H_2O ионами K^+ энергией 1,5 КэВ

Таблица 1. Скорость образования положительных ионов с поверхности чистого льда H_2O при бомбардировки ионами $^{39}\text{K}^+$, энергией 1,5 КэВ

Масса ионов, m (а.е.м.)	Ионы	Содерж. (%)	Скорость ионов, N (ион $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$)	Масса ионов, m (а.е.м.)	Ионы	Содерж. (%)	Скорость ионов, N (ион $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$)
1	H^+	48,03	$3,63 \times 10^{10}$	32	O_2^+	0,08	$6,04 \times 10^7$
2	H_2^+	0,17	$1,28 \times 10^8$	37	$\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_2$	0,93	$7,03 \times 10^8$
16	O^+	21,34	$1,61 \times 10^{10}$	55	$\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_3$	0,62	$4,68 \times 10^8$
17	OH^+	26,68	$2,01 \times 10^{10}$	73	$\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_4$	0,26	$1,96 \times 10^8$
18	H_2O^+	0,62	$4,68 \times 10^8$	91	$\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_5$	0,15	$1,13 \times 10^{10}$
19	$\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})$	1,06	$8,01 \times 10^8$				

Таблица 2. Скорость образования отрицательных ионов с поверхности чистого льда H_2O при бомбардировки ионами $^{39}\text{K}^+$ энергией 1,5 КэВ

Масса ионов, m (а.е.м)	Ионы	Содерж. (%)	Скорость ионов, N (ион $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$)	Масса ионов, m (а.е.м)	Ионы	Содерж. (%)	Скорость ионов, N (ион $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$)
1	H^-	33.6	3.01×10^{10}	33	O_2H^-	0.02	1.79×10^7
2	H_2^-	0.05	4.48×10^7	35	$\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})$	1.01	9.04×10^8
16	O^-	45.8	4.10×10^{10}	53	$\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})_2$	0.81	7.25×10^8
17	OH^-	16.3	1.46×10^{10}	71	$\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})_3$	0.61	5.46×10^8
18	H_2O^-	0.4	3.58×10^8	89	$\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})_4$	0.2	1.79×10^8
19	$\text{H}(\text{HO})^-$	1.01	9.04×10^8	107	$\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})_5$	0.07	6.27×10^7
32	O_2^-	0.01	8.96×10^6				

Выводы

Из полученных экспериментальных данных по определению скорости образования кластерных ионов следует, что на поверхностном слое ледяных кометных ядер под действием корпускулярных потоков Солнца и космических лучей могут образоваться ионно-молекулярные кластеры противоположных знаков заряда типа $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})$ и $\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})$. Скорость формирования отрицательных кластеров имеют количественное преимущество над положительными.

Литература

1. Шульман Л.М. Ионно-молекулярные кластеры в ядрах комет. Киев: Институт теоретической физики АН УССР, 1982. Препринт ИТФ 81-141Р.
2. Langevin Y., Hilchenbach M., Ligier N., Merouane S. et al. Typology of dust particles collected by the COSIMA mass spectrometer in the inner coma of 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Icarus*. June 2016. Vol. 271. P. 76–97.
3. Hashimov N.M., Shoyoqubov Sh.Sh. Laboratory modeling of ion-molecular cluster production in cometary nuclei. In: Proc. 20th ESLAB Symposium Exploration of Halley's comet (B'Batric E.J., Roffe R., Reimhard etc.) The Netherlands 1986, ESA SP-250, Vol. III. P. 189–190.

4. Shoyoqubov Sh., Shoyoqubov, Sh., Ibrohimov A.A. Dynamics and rate of complex ions formation in comets // *Advances in Space Research*. 2015. Vol. 56. P. 2449–2454.
5. Dobrovolsky O.V., Hashimov N.M., Ibadinov Kh.I., Tarakanov V.L. *Cometary exploration*. Budapest, Hungary, 1982. P. 235–242.

References

1. Shulman L.M. *Ion-molecular clusters in cometary nuclei*. Kiev, Institute of Theoretical Physics of the Ukrainian Academy of Sciences, 1982. Preprint ITF 81-141R. (In Russian)
2. Langevin Y., Hilchenbach M., Ligier N., Merouane S. et al. Typology of dust particles collected by the COSIMA mass spectrometer in the inner coma of 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Icarus*, June 2016, vol. 271, pp. 76–97.
3. Hashimov N.M., Shoyoqubov Sh.Sh. Laboratory modeling of ion-molecular cluster production in cometary nuclei. In: B'Batric E.J., Roffe R., Reimhard etc. (eds.) *Proc. 20th ESLAB Symposium Exploration of Halley's comet. The Netherlands 1986, ESA SP - 250*, vol. 3, pp. 189–190.
4. Shoyoqubov Sh., Shoyoqubov, Sh., Ibrohimov A.A., Dynamics and rate of complex ions formation in comets. *Advances in Space Research*, 2015, vol. 56, pp. 2449–2454.
5. Dobrovolsky O.V., Hashimov N.M., Ibadinov Kh.I., Tarakanov V.L. *Cometary exploration*. Budapest, Hungary, 1982, pp. 235–242.