

УДК 523.64

Активность комет на больших гелиоцентрических расстояниях

Л.М. Шульман

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, 03680, ул. Заболотного 27, Киев
shulman@mao.kiev.ua

Поступила в редакцию 30 ноября 2005 г.

Аннотация. Проанализированы возможные механизмы активности комет на далеких гелиоцентрических расстояниях, где инсоляцией можно пренебречь: кристаллизация аморфного льда, испарение массивных включений окислов углерода, рекомбинация гидратированных ионов $\text{H}_3\text{O}^+ \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$ и $\text{OH}^- \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$. Предложена качественная модель активного взрывообразного процесса на кометном ядре, поверхностный слой которого состоит из микрозлаинок аморфного льда, склеенных твердыми окислами углерода.

ACTIVITY OF COMETS AT LARGE HELIOCENTRIC DISTANCES, *by L.M. Shulman*. Possible mechanisms of the activity of comets at large heliocentric distances, where the insolation are negligible, are analyzed. Crystallization of amorphous water ice, vaporization of a bulk inclusion of carbon oxides, and recombination of the hydrated ions such as $\text{H}_3\text{O}^+ \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$ и $\text{OH}^- \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$ are considered. A qualitative model of an active, explosion-like process on a cometary nucleus is proposed for the nuclei with the surface layers which consist of micrograins of amorphous ice glued by solid carbon oxides.

Ключевые слова: кометы, активность далеких комет

1 Введение

Известны случаи, когда кометы были активными, т. е. имели атмосферы и даже демонстрировали вспышки блеска и связанные с ними выбросы вещества взрывного типа на гелиоцентрических расстояниях дальше 6 а. е. Комета Хейла-Боппа выбросила спиральную струю вещества на расстояние $r = 6.8$ а. е. Комета Стиффа имела хвост на расстоянии 7 а. е. Комета Хьюмассона имела плазменный хвост на расстоянии 10 а. е. На ядре кометы Боуелла произошел взрыв на расстоянии 10 а. е., а на ядре кометы Галлея – на расстоянии 14 а. е. Известно, что солнечной энергии едва хватает на испарение водяного льда до расстояний ~ 5 а. е. Активность далеких комет свидетельствует о том, что в кометных ядрах могут существовать свои собственные источники энергии. Поиску механизмов активности и возможных источников энергии и посвящена данная статья.

2 Кристаллизация аморфного льда

Паташник, Рупшрехт и Шюрман (1974) обратили внимание на то, что в кометных ядрах, которые образовались при низкотемпературной конденсации, может сохраняться аморфный водяной



Рис. 1. Пульверизация поверхностного слоя кометного ядра из-за кристаллизации аморфного льда



Рис. 2. Тепловой взрыв путем испарения массивного включения окислов углерода

лед. Плотность аморфного льда $\sim 2 \text{ г/см}^3$, т. е. вдвое больше, чем плотность кубического кристаллического льда $\sim 0.94 \text{ г/см}^3$. При нагреве до температуры $\sim 150 \text{ К}$ аморфный лед кристаллизуется. Кристаллизация проходит экзотермично и быстро. Температура повышается до 190 К , т. е. выделяется $\sim 0.02 \text{ эВ/молекула}$. Эта энергия слишком мала для испарения льда, но плотность после кристаллизации удваивается. Это означает механическое разрушение льда и выброс его (пульверизацию) в атмосферу в виде облака микрокристалликов льда, как это показано на рис. 1.

3 Испарение массивного включения CO/CO_2

Второй возможный механизм активности далеких комет не требует дополнительных источников энергии. Пусть в глыбе водяного льда, которой является кометное ядро, присутствует массивное вкрапление окислов углерода. Давление насыщенных паров этих веществ, особенно CO , значительно превышает давление насыщенных паров воды при равной температуре. Если водяной лед практически не сублимирует в зоне за Юпитером, то окислы углерода способны к сублимации на значительно больших гелиоцентрических расстояниях.

Представим себе участок поверхности ядра, где под пылевым слоем находится массивное включение окислов углерода. Мы опускаем здесь обсуждение возможных механизмов ректификации этих веществ. Картину иллюстрирует рис. 2. Когда фронт нагревания достигнет CO/CO_2 -зоны, начинается интенсивное испарение, и пылевой слой сбрасывается. Идея связать активность далеких комет с испарением окислов углерода возникла многократно и у многих исследователей, так что установить автора идеи не удалось.

4 Предлагаемый механизм

Предлагается механизм, в котором синтезированы обе предыдущие идеи на основе более реалистичного представления о структуре ядра кометы. Мы не требуем, чтобы CO/CO_2 льды входили в состав ядра в виде массивных включений. Конденсация кометных ядер в трансплутоновой зоне (пояс Койпера) должна была идти последовательно: сначала конденсируются тугоплавкие компоненты (силикаты, оливины и т. п.), образуя пылинки. Затем на минеральных пылинках конденсируется водяной пар, затем по мере понижения температуры все более летучие вещества, из которых наиболее обильным является CO .

Таким образом получается, что космогонически оправданная структура кометного ядра может выглядеть как конгломерат льдинок аморфного льда, промежутки между которыми заполнены

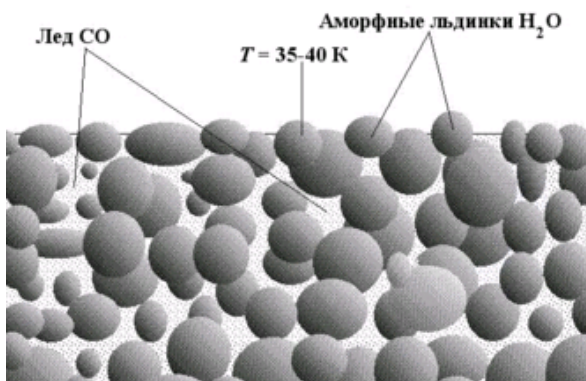


Рис. 3. Начальное состояние поверхности ядра

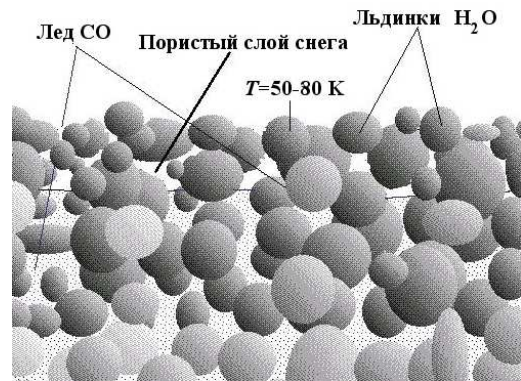


Рис. 4. Образование поверхностного пористого слоя из кристалликов аморфного льда. Начало перегрева поверхности

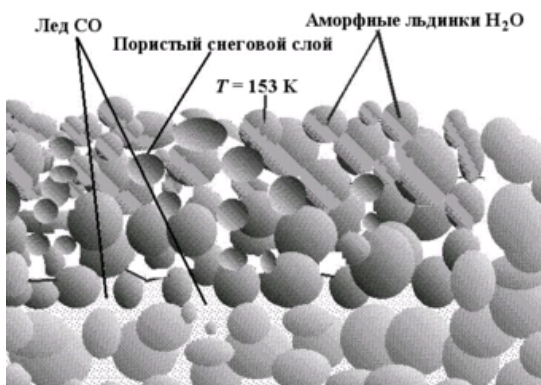


Рис. 5. Движение фронта кристаллизации аморфного льда вглубь ядра

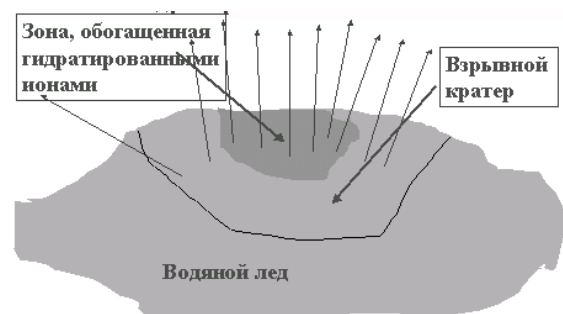


Рис. 6. Взрыв области на ядре, обогащенной гидратированными ионами

льдом CO/CO_2 (см. рис. 3). На больших гелиоцентрических расстояниях температура поверхности ядра устанавливается сублимационным равновесием CO на уровне 35-40 К.

Далее, по мере приближения к Солнцу, поверхностный слой ядра теряет CO и превращается в пористую среду из микрокристалликов аморфного водяного льда (рис. 4). Температура теперь устанавливается не сублимационным равновесием CO , а радиационным равновесием водяного льда. Этот процесс продолжается пока температура поверхности не достигнет уровня, когда начинается цепная реакция кристаллизации (рис. 5).

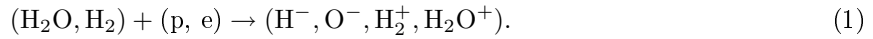
Кристаллизация приводит к пульверизации облака кристалликов льда. Фронт кристаллизации движется вглубь ядра, пока не достигнет слоя, где еще сохранился лед CO . Температура падает, и вместе с ней прекращается кристаллизация. Фронт кристаллизации движется не только вглубь, но и в горизонтальном направлении, т. е. область кристаллизации может мигрировать по поверхности ядра, чем, вероятно, объясняется длительность существования хвостов у далеких комет.

5 Гидратированные ионы – емкий аккумулятор химической энергии

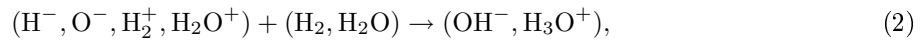
Кристаллизация аморфного льда происходит при температуре аморфного льда ~ 150 К. Это означает, что объяснить взрывы на ядрах комет на 10 и 14 а. е. кристаллизацией аморфного ядра

затруднительно. Однако (Шульман, 1987) существует иная возможность аккумуляции энергии в ядре кометы. В эпоху формирования Солнечной системы из вещества первичной туманности Солнце было звездой типа Т Тельца. При этом интенсивность молодого солнечного ветра была $\sim 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на расстоянии ~ 100 а. е., т. е. в поясе Койпера.

Основными молекулами в первичной туманности на этой стадии были молекулы водорода H_2 и воды H_2O . Эти молекулы путем перезарядки с протонами молодого солнечного ветра превращались в ионы по схеме:



Далее в процессах столкновений выживают самые устойчивые ионы:



которые последовательно гидратируются по схеме:



где $\Delta \mathcal{E}_n$ – энергетический эффект реакции. Присоединение молекул воды к молекулярному иону энергетически выгодно, т. е. потенциальная яма достаточно глубока, как это видно из табл. 1. Эти

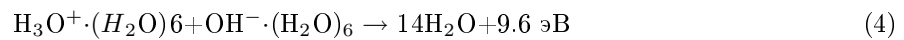
Таблица 1. Энергия гидратации

Ион	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5	n = 6	n = 7
$\text{H}_3\text{O}^+ \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$	1.56	0.97	0.74	0.67	0.67	0.61	0.45
$\text{OH}^- \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$	1.1	0.71	0.66	0.62	0.61	–	–

данные получены экспериментально (см. Стаханов (1979) и цитированную там литературу).

Известны результаты квантово-механических расчетов структуры гидратированных ионов воды. Они показаны на рис. 7 по данным Паса и др. (1970). Видно, что ионно-молекулярный кластер является устойчивым координационным химическим соединением. Г. Зацепина (1974) экспериментально доказала, что гидратированный ион сохраняется и движется как единое целое даже в твердой фазе. Для этого исследовалось поведение кластеров, в которых водород был заменен дейтерием. Из этого следует, что гидратированные ионы могут сохраняться в ядрах комет при низких температурах в течение космогонических промежутков времени.

Рекомбинация пары ионно-молекулярных кластеров противоположных знаков дает выход энергии больший, чем у всех известных экзотермических реакций горения топлива и взрыва различных взрывчатых веществ. Реакция



высвобождает энергию, достаточную для испарения ~ 20 молекул воды. Этот энергетический баланс образуется суммой энергии ионизации и энергией диссоциации, которые высвобождаются при рекомбинации, минус та энергия, которая необходима для разрушения кластера, т. е. та, которая выделилась при гидратации. Столь большой энергетический выход стал основанием для Стаханова, который в цитированной выше книге предложил этот источник энергии для объяснения явления шаровой молнии. Если Стаханов прав, то кометные ядра можно считать “замороженными шаровыми молниями”.

Возникают два вопроса. Почему кометные ядра до сих пор не взорвались все до единого? Почему у комет, которые приближаются к Солнцу ближе, чем на 5 а. е., никаких дополнительных источников энергии вроде бы не обнаруживается? На первый вопрос ответ такой. Чтобы кометное

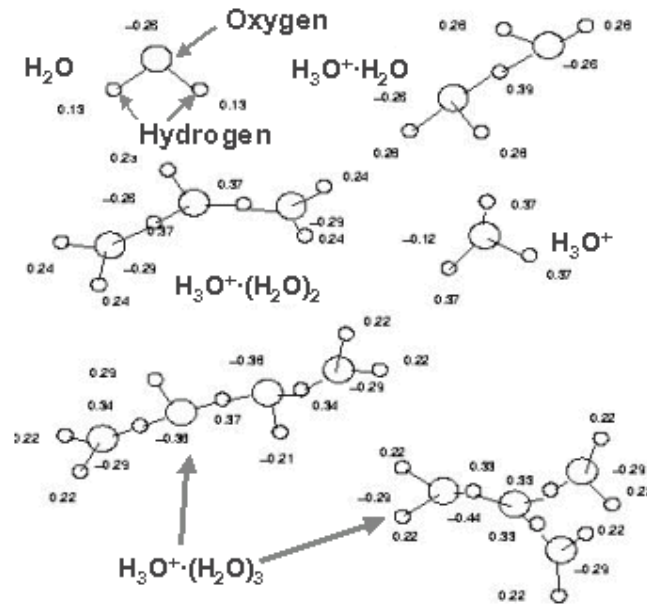


Рис. 7. Структура гидратированных ионов (ионно-молекулярных кластеров). Цифры возле атомов – распределение электрического заряда

ядро взорвалось все и сразу, необходимо, чтобы концентрация гидратированных ионов составляла 5 %. На самом деле, как показывают оценки, при росте ядер в молодом солнечном ветре она достигает только 0.3 %, но может быть локально больше, если во время роста ядра кометы произошла мощная вспышка на молодом Солнце. Тогда возможен локальный взрыв, как показано на рис. 6.

В ядрах комет, обращающихся вокруг Солнца в поясе Койпера, из-за низкой температуры происходит медленная миграция ионно-молекулярных кластеров. Гидратированные ионы противоположных знаков постепенно сближаются, образуя двухкластерные диполи. Но немедленной рекомбинации дипольного кластера в совокупность нейтральных молекул воды препятствует высокий (~ 0.5 эВ) и широкий потенциальный барьер. Из-за высоты барьера прямая рекомбинация без внешней активации при низких температурах практически маловероятна, а вероятность туннелирования заряда сквозь барьер также мала из-за ширины барьера. Можно представить себе эту ситуацию таким образом, что при сближении двух кластеров противоположных знаков должны пространственно совпасть наличие лишнего заряда на положительном ионе и отсутствие заряда (лишний электрон) на отрицательном ионе. Именно такое событие, как показывают цифры распределения среднего заряда на рис. 7, маловероятно. Можно представить еще проще: гидратированный ион, как ион, окруженный изолирующей оболочкой из 6-7 нейтральных молекул воды.

Разберем теперь второй вопрос. Почему мы не видим проявления дополнительных источников энергии у близких комет? Слой кометного ядра толщиной h сублимирует за время

$$t_s = \frac{h\rho}{mZ}, \tag{5}$$

где ρ – плотность ядра кометы, m – масса молекулы воды, Z – удельная газопродуктивность, т. е. поток сублимата с единицы поверхности за единицу времени. Прогрев ядра до глубины h оценивается по формуле

$$t_h = \frac{h^2}{\kappa}, \tag{6}$$

где κ – коэффициент температуропроводности, связанный с коэффициентом теплопроводности K и теплоемкостью единицы массы C соотношением

$$K = \kappa \rho C. \quad (7)$$

На глубине

$$h_{eff} = \frac{K}{mCZ} \quad (8)$$

время прогрева равно времени сублимации. При $h_{eff} \ll r_{nuc1}$ возможен квазистационарный режим, когда слой толщиной h_{eff} улетучивается за время

$$t_{eff} = \frac{K\rho}{m^2CZ^2}. \quad (9)$$

При этих условиях уравнение баланса энергии в подсолнечной точке поверхности ядра можно приближенно записать в виде

$$\frac{q(1-\alpha)}{r_{com}^2} = \epsilon\sigma T^4 + (L - \epsilon_2 x_2 \Delta x_2)Z, \quad (10)$$

где q – солнечная постоянная, α – альbedo, r_{com} – гелиоцентрическое расстояние кометы, ϵ – коэффициент излучения поверхности ядра, T – ее температура, ϵ_2 – энергетический эффект рекомбинации пары кластеров, x_2 – содержание дипольных кластеров (т. е. пар гидратированных ионов противоположных знаков), Δx_2 – изменение его при переходе через поверхностный слой в процессе сублимации ядра.

В процессе сублимации конкурируют испарение и рекомбинация. За счет сублимации вещество из глубинных слоев поднимается к поверхности, а затем переходит в атмосферу. При этом содержание дипольных кластеров, первоначально составлявшее x_2 , уменьшается на величину

$$\Delta x_2 = x_2 \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{\pi k T K \rho}{m C \tau_\infty} \exp \left[-2A + \frac{2B - E_2/k}{T} \right] \right] \right\}, \quad (11)$$

где τ_∞ и E_2 – параметры формулы, которая определяет зависимость времени жизни дипольного кластера в твердой фазе до рекомбинации: $\tau = \tau_\infty \exp \left(-\frac{E_2}{kT} \right)$. A и B – параметры формулы

$p = \exp \left(A - \frac{B}{T} \right)$ для давления насыщенного пара воды, которое определяет скорость сублимации.

С приближением к Солнцу растет температура, а следовательно $\Delta x_2 \rightarrow 0$. Это означает, что кластеры испаряются, не успев рекомбинировать и отдать свою избыточную энергию ядру. Они разрушаются уже в атмосфере, что мало влияет на наблюдаемые параметры кометы. Таким образом, данный источник энергии как бы самовыключается на близких к Солнцу расстояниях.

6 Выводы

Активность далеких комет доказывает существование внутренних источников энергии в ядрах комет. Такими источниками могут быть кристаллизация аморфного льда и рекомбинация гидратированных ионов противоположных знаков. Внешние случайные источники, например, столкновение с метеоритами, в принципе возможны, однако маловероятны, так как не наблюдается связи активных процессов в ядрах комет с прохождением их через пояс астероидов, где частота столкновений должна быть максимальной.

Благодарности. Данная работа поддержана грантом Государственного фонда фундаментальных исследований Министерства образования и науки Украины.

Литература

- Зацепина Г.Н. // Свойства и структура воды. Изд. МГУ. 1974. С. 168.
- Пас и др. (Paz M., Ehrenson S., Friedman L.) // Journal of Chemical Physics. 1970. V. 52. No. 6. P. 3362.
- Паташник, Рупрехт и Шюрман (Patashnik H., Rupprecht G., Schuerman D.W.) // Nature. 1974. V. 250. № 5464. P. 313.
- Стаханов И.П. // 1979. Физическая природа шаровой молнии. Москва. Атомиздат. С. 240.
- Шульман Л.М. // Ядра комет. 1987. Москва. Физматлит. С. 190 // Astroph. J. 2001. V. 554. P. 107L.