

УДК 523.64

## НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА КОМЕТЫ ХЕЙЛА–БОППА (ПО НАБЛЮДЕНИЯМ 1995–98 гг.)\*\*

© 2020 г. Л. В. Ксанфомалити\*, \*\*

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

\*e-mail: leksanf@gmail.com

Поступила в редакцию 27.09.2018 г.

После доработки 24.04.2019 г.

Принята к публикации 31.10.2019 г.

“Большая комета 1997 г.” была крупным событием в кометной физике. Ей посвящено большое число интересных научных работ. К сожалению, в отечественной научной литературе статей по исследованиям кометы Хейла–Боппа совсем не много. Предлагаемая статья приурочена к 20-летию завершения основных наблюдений кометы и напоминает читателю о некоторых ее необычных и даже уникальных свойствах, не претендуя, однако, на исчерпывающий обзор опубликованных материалов. Сделана попытка оценить массу ядра кометы Хейла–Боппа и предполагается, что она может быть близка к исходной массе кометы Галлея, которую последняя имела в начале своей эволюции. На основе опубликованных изображений рассчитана примерная скорость истечения газо-пылевых выбросов и разброс найденных скоростей. Рассмотрена возможная связь массы суммарных потерь с динамикой ядра.

**Ключевые слова:** комета Хейла–Боппа, масса, свойства выбросов, пылевая производительность, центробежные силы

**DOI:** 10.31857/S0320930X2002005X

### ВВЕДЕНИЕ

Прошло более 20 лет после прохождения перигелия “Большой кометы 1997 г.” – кометой Хейла–Боппа (C/1995 O1). Комета отличалась многими необычными свойствами, присущими “молодым” кометам и активно исследовалась астрономическими средствами. Она была открыта 23 июля 1995 г. и в период 1995–1999 гг. была одной из самых наблюдавшихся комет XX в. Напомним некоторые события, связанные с кометой Хейла–Боппа, обнаруженные в сезон перигелия 1997 г.

#### 1997 г. ПЕРИГЕЛИЙ КОМЕТЫ C/1995 O1

Долгопериодическую комету C/1995 O1 открыли американские астрономы-любители А. Хейл и Т. Бопп 23 июля 1995 г. Орбита кометы представляет собой чрезвычайно вытянутый эллипс. Основные орбитальные характеристики кометы Хейла–Боппа:

|                        |           |
|------------------------|-----------|
| Большая полуось орбиты | 387 а. е. |
| Эксцентриситет орбиты  | 0.995064  |

|  |                |
|--|----------------|
| Период обращения                       | 2534 года      |
| Перигелийное расстояние (в 1997 г.)    | 0.914140 а. е. |
| Расстояние в афелии                    | 369 а. е.      |
| Плоскость орбиты нормальна к эклиптике | (89° .4).      |

Комета была открыта на большом расстоянии, 7.2 а. е., но уже тогда была необычно яркой для такого удаления (10 зв. вел.). Более того, вскоре она была обнаружена на снимках, сделанных известным австралийским астрономом Робертом Х. Макнотом (*Robert H. McNaught*) за два года до ее официального открытия, когда комета находилась на гелиоцентрическом расстоянии 13 а. е., но уже тогда имела яркость 18 зв. вел. Поэтому предсказывалось, что в приближении к перигелию она будет очень яркой. В марте 1996 года комета прошла на расстоянии 0.77 а. е. от Юпитера. В результате орбита кометы изменилась, афелий сократился с 600 до 369 а. е. Эволюцию орбиты C/1995 O1 рассматривали Bailey и др. (1996).

В перигелии комета приблизилась к Солнцу на расстояние меньше 1 а. е. Она действительно была одной из ярчайших за несколько последних десятилетий. На снимке (рис. 1) видны кома и два хвоста: широкий изогнутый газопылевой и прямой плазменный.

\*\*Статья отредактирована д.х.н. В.А.Дорофеевой после кончины Л.В.Ксанфомалити, за что редколлегия выражает ей благодарность.



**Рис. 1.** “Большая комета 1997 г.” Вид кометы Хейла–Боппа за 16 дней до прохождения перигелия. Источник: сайт ГАИШ МГУ [http://www.sai.msu.su/ng/solar/comets/main\\_hb.html](http://www.sai.msu.su/ng/solar/comets/main_hb.html).

В наблюдениях 1995 г. было установлено, что ядро кометы создает радиальные мало-искривленные выбросы (струи), что сначала было интерпретировано, как следствие крайне медленного вращения ядра (Гнедин, 1999). Однако в дальнейшем появилась классическая параболическая структура комы с типичными признаками вращения и искривленными пылевыми и газопылевыми потоками. В предварительных сообщениях 1995–96 гг. период вращения ядра оценивался примерно в 12 ч. Последующие измерения давали несколько меньший период. В мае 1996 г. комету Хейла–Боппа уже можно было видеть невооруженным глазом. Из-за близости к Солнцу на небосводе, в декабре 1996 г. астрономические наблюдения пришлось на короткое время прекратить. Наблюдения возобновились в январе 1997 г., когда кому и протяженный хвост можно было видеть невооруженным глазом даже в условиях ночного освещения больших городов. В феврале 1997 г. комета достигла 2-й звездной величины, несмотря на то, что находилась почти на противоположной стороне земной орбиты. 23 марта 1997 г. она прошла на минимальном расстоянии от Земли, 1.315 а. е.

Перигелий комета проходила 1 апреля 1997 г. В это время она обладала средней величиной  $-0.7^m$ , а ее хвост простирался на угол 15–20 градусов. Невооруженным глазом комета была видна рекордно долго, более 18 месяцев, вплоть до декабря 1997 г.

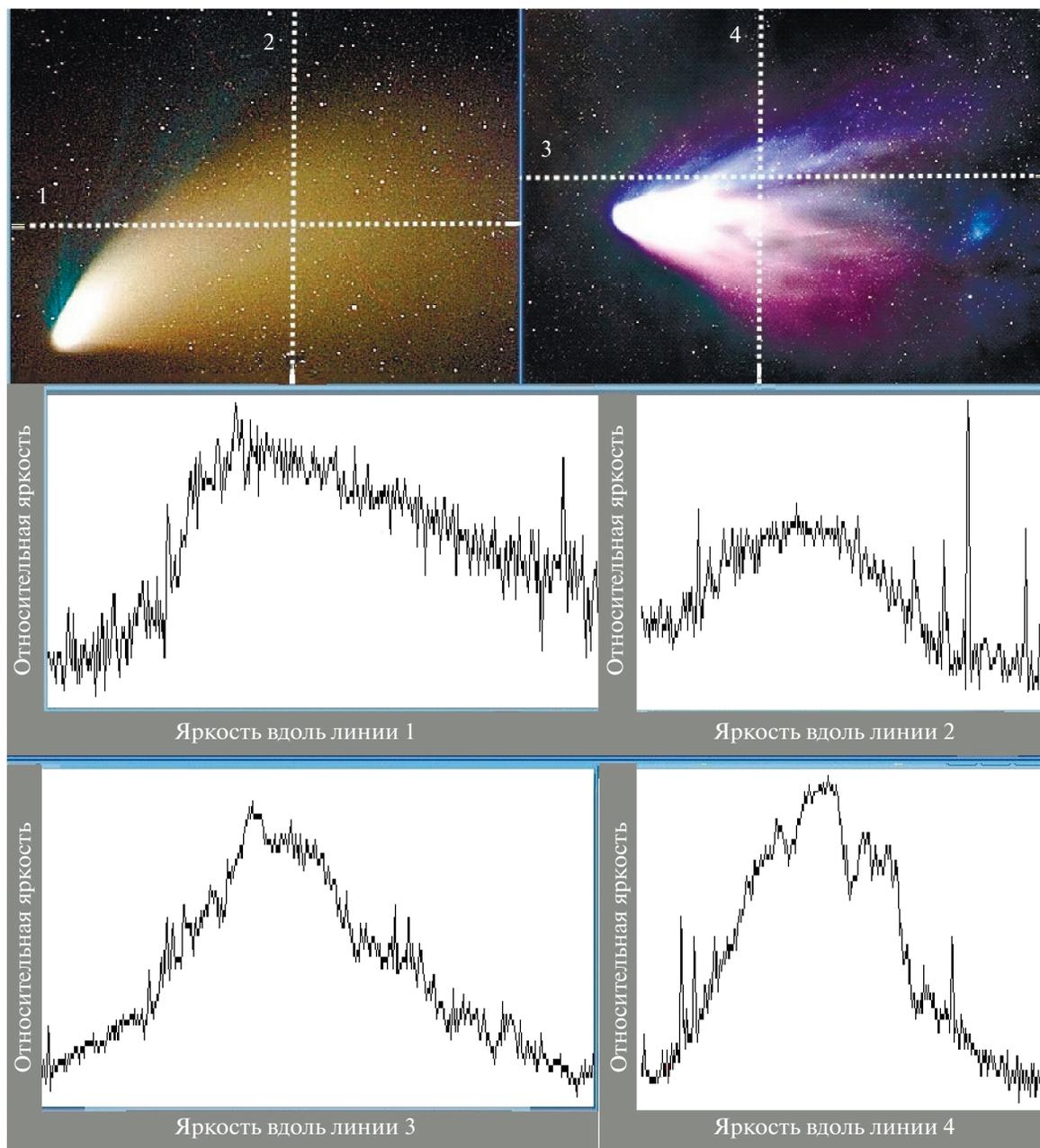
Вид кометы C/1995 O1 и структура хвоста быстро изменялись с приближением и уходом от Солнца (рис. 2, сверху). Если в феврале–марте

1997 г. удавалось проследить развитие различных спиральных структур и рукавов в коме, то через 30 дней после прохождения перигелия газопылевой хвост кометы значительно расширился и уплотнился, его детали стали невидны, а плазменный (ионный) хвост почти исчез (рис. 2), но вскоре он возник снова.

Начальная структура кометы восстанавливалась медленно. Только через 3 месяца плазменный хвост стал хорошо виден, причем, по сравнению с рис. 1, вид кометы стал менее “правильным” (рис. 2, справа). Усиливающиеся неоднородности в структуре хвоста иллюстрируют сечения вдоль линий 1–4. Огибающие 1–2 имеют плавный ход, а после прохождения перигелия их регулярность нарушается (огибающие 3–4).

Наряду с обычными хвостами, у кометы C/1995 O1 был обнаружен слабый, разреженный натриевый хвост (Cremonese и др., 1997). Полосы натрия в излучении комет известны, но натриевый хвост, содержащий нейтральные атомы натрия, был обнаружен впервые. Натриевый хвост был раздвоенный: один частично совпадал с пылевым, а второй, более тонкий и прямой, был расположен в нескольких градусах к востоку от линии комета–Солнце. Изображение натриевого хвоста было получено с помощью светофильтров на спектральные полосы натрия. Его происхождение остается пока неясным.

В редких случаях у комет появляется аномальный хвост (или “антихвост”) — узкий “меч”, временное образование, направленное к Солнцу и достигающее в длину нескольких сотен тысяч километров. До C/1995 O1 такой “меч” наблюдался



**Рис. 2.** Изменяющийся вид кометы Хейла–Боппа: 30 апреля (вверху слева), через 30 дней после перигелия, и 6 июля 1997 г. (вверху справа), через 3 месяца после прохождения перигелия. Верхняя часть рисунка с сайта ГАИШ МГУ [http://www.sai.msu.su/ng/solar/comets/main\\_hb.html](http://www.sai.msu.su/ng/solar/comets/main_hb.html) и сайта APOD, 06.07.1997 (рисунки переработаны автором).

у двух десятков комет, среди них наиболее известной была комета Аренда-Ролана C/1956 R1 (рис. 3, кадр 1). Аномальный хвост кометы C/1995 O1 (рис. 3, кадры 2 и 3) наблюдался в Европейской южной обсерватории (ESO) и тоже был короткоживущим. Он появился 5 января 1998 г. (через 9 мес. после прохождения перигелия) и по протяженности превышал полмиллиона километров.

Головная часть с “антихвостом” показана на кадре 3 рис. 3 (негатив ESO в обработке автора).

Здесь хорошо видна структура головной части и устремленный к Солнцу “меч”.

Изучая особенности структуры кометы C/1995 O1, Sekanina (1997; 1998) выдвинул гипотезу о спутнике ядра кометы C/1995 O1. По его теоретическим оценкам был сделан вывод, что, диаметр ядра кометы может составлять 70 км, а диаметр спутника, отстоящего от ядра на 180 км, должен быть 30 км, при периоде обращения 3 сут. В работе Sekanina (1998) приводится снимок различных спиральных структур в коме (обсуждаются



**Рис. 3.** Аномальный кометный хвост: 1 – комета Аренда-Ролана (1957); 2 и 3 – комета Хейла–Боппа (1998). Исходные снимки: 1 – Ksanfomality, 2018, <https://oxfordre.com/planetaryscience/view/10.1093/acrefore/9780190647926.001.0001/acrefore-9780190647926-e-21>; 2 – из лекции John Mason канала BBC, The Sky at Night, Moore P. (2017). Comet Hale Bopp, the Great Comet of 1997. (14 Aug 2017). <https://www.youtube.com/watch?v=HtZN9QMUNqU> (Your Tube). HST institute; 3 – негатив ESO, <https://www.eso.org/public/images/eso9806a> в переработке автора.

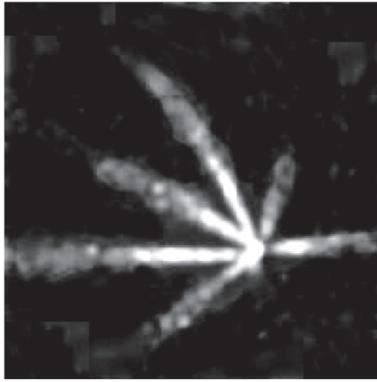
ниже), которые Sekanina считает галосами, причем часть совмещенных спиралей направлена, по-видимому, противоположно друг другу. Вероятно, подобный эффект действительно могли бы создать джеты от двух близко расположенных тел, направленные в противоположные стороны.



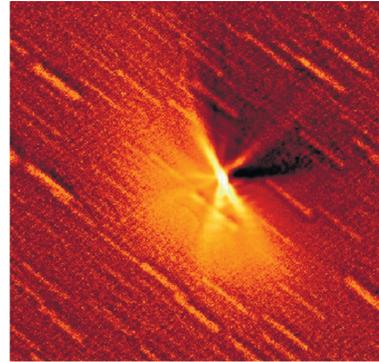
**Рис. 4.** Вид кометы C/1995 O1 27 марта 1997 г. позволял предположить, что ее ядро, возможно, кратное. Снимок из лекции John Mason канала BBC, The Sky at Night, Moore P. (2017). Comet Hale Bopp, the Great Comet of 1997. (14 Aug 2017). <https://www.youtube.com/watch?v=HtZN9QMUNqU> (Your Tube). HST institute.

Гипотеза о ядре и спутнике, которая непосредственно на наблюдения кометы не опиралась, широкой поддержки не нашла. Но в работе Sekanina и Kracht (2017), также приуроченной к 20-летию прохождения кометой ее перигелия в 1997 г., утверждается, что наблюдения, подобные рис. 4, указывают на многочисленные отдельные фрагменты, из которых состоит ядро (до 29 тел, разнесенных на расстояния менее 1200 км).

Наряду с наземными наблюдениями, комета C/1995 O1 исследовалась в течение периода ее появления с помощью двух космических обсерваторий NASA – Космического телескопа Хаббла и аппарата IUE (“Международный Ультрафиолетовый Исследователь”). Научные итоги исследований кометы Хейла–Боппа были подведены в специальном выпуске *Earth, Moon and Planets*, 2002 г., Т. 89, № 1–4, с общим названием “Cometary Science after Hale-Bopp”. В сборнике были рассмотрены свойства ядра кометы и его вращение, процессы в его недрах, состав, химические и фотохимические процессы в коме, сублимация материалов ядра и возможное разрушение последнего. Одна из статей была посвящена именно необычности кометы C/1995 O1 и называлась



**Рис. 5.** Радиально направленные выбросы, наблюдавшиеся 2 ноября 1997 г. Рисунок автора по материалам наблюдений ESO <https://www.eso.org/public/imagenes/eso9643d>.



**Рис. 6.** Два интенсивных выброса, появившихся на лобовой части комы 13 февраля 1997 г. (до прохождения перигелия) и несколько более слабых деталей (APOD, 13 февраля 1997; Sekanina, 1997; 1998).

“Что делает Большие кометы разнородными?” (Combi, 2002).

Комета С/1995 О1 предоставила возможность наблюдать последовательную эволюцию ее характеристик в ходе приближения к относительно низкому перигелию и последующему удалению, вплоть до 25.7 а. е. в 2008 г. (Szabó и др., 2008), когда у кометы все еще сохранялся хвост, что необычно для таких расстояний. Но на расстоянии 30.7 а. е. в 2011 г. (Szabó и др., 2011), ни кома, ни хвост не различались и яркость кометы не превышали 2.5”. Предполагается, что именно значительный разогрев поверхности тела в перигелии (0.914 а. е.) стал причиной долго сохраняющейся активности ядра кометы.

### ПЫЛЕВЫЕ ОБОЛОЧКИ, РУКАВА И ГАЛОСЫ КОМЕТЫ С/1995 О1

В настоящей работе рассматриваются свойства структурированных выбросов кометы Хейла–Боппа С/1995 О1. Ее необычно высокая активность была обнаружена уже в ранних наблюдениях, рассмотренных в (McCarthy и др., 2007) и проявлялась в пылевых выбросах, многие из которых создавали лучевые структуры (рис. 5, 6), оболочки и другие сложные формы. По сравнению с другими кометами, они изменялись необычно быстро.

На рис. 5 показана структура из нескольких прямых лучей, которые наблюдались 2 ноября 1997 г. в ESO. Форма лучей подчеркнута обработкой изображений. Структура выбросов, именуемые джетами (jets) указывает, что газовыделение происходит не со всей поверхности ядра, а лишь из нескольких (до 7) депрессий (pits, holes), неравномерно распределенных по его поверхности, причем общая площадь депрессий составляет лишь ~10% от общей площади ядра (Szabó и др., 2008). Такая же структура газовыделения впервые

наблюдалась у кометы Галлея (Mendis, 1988; Ксанфомалити, 2017), а позднее и у всех других комет вне зависимости от их динамических типов (A’Hearn и др., 1995; Meech, 2017 и др.).

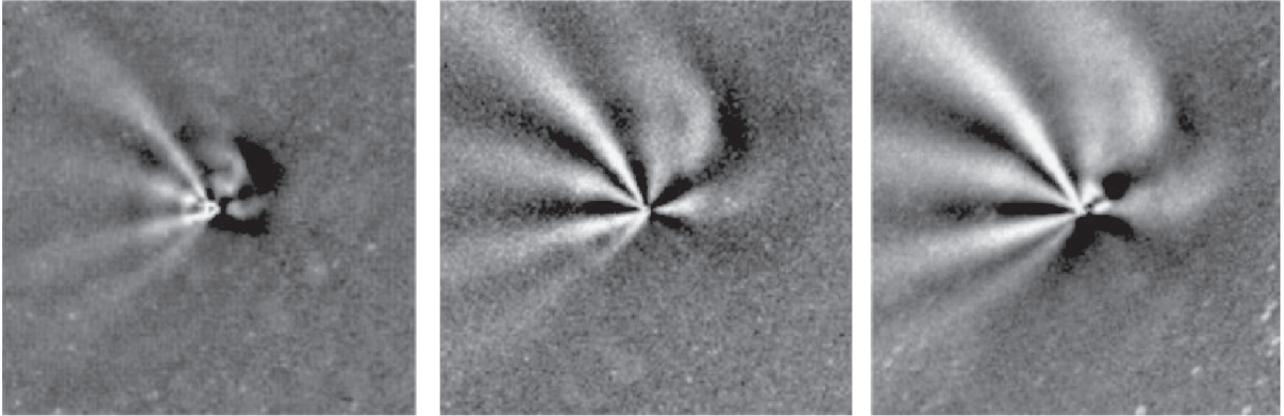
Прямые радиальные выбросы из ядра возникли в разных частях орбиты кометы; высокая активность кометы затрудняла их наблюдение. На снимке рис. 6 показаны две такие интенсивные, противоположно направленные струи на лобовой части ядра кометы Хейла–Боппа, а также другие, менее интенсивные выбросы. Правая, более темная часть рисунка, представляет контур передней части комы. Параболическая форма рукавов, образующих оболочки, определяется траекторией частиц под действием сил солнечной гравитации  $f_s$  и лучевого давления  $f_r$ . Структуры на рис. 5 и 6 представляют собой начальную часть траекторий пылевых выбросов. Развитие выбросов на более значительных расстояниях можно видеть на рис. 7, где прослеживается параболическая форма шести струй, которые придавали комете необычный вид.

Положение частицы в струе, в прямоугольных  $x$ – $y$  координатах (ось  $x$  направлена к Солнцу, начало координат – ядро кометы) описывается выражением для параболы:

$$x + y \operatorname{ctg} \varphi = g_s y^2 \mu / (2v_0^2 \sin^2 \varphi),$$

где  $\varphi$  – угол, определяющий направление частицы, выброшенной со скоростью  $v_0$ , к оси  $x$ ,  $g_s$  – ускорение под действием сил солнечной гравитации. Фактор  $\mu$  – отношение сил гравитации и лучевого давления, обычно представляемый как  $f_r/f_s = 1 + \mu$ .

Изображения, подобные рис. 5–7, содержат информацию о свойствах кометных выбросов, их скорости, направлении и положении источников на поверхности ядра. В этом отношении особенно интересны снимки в работе Sekanina (1998), которая основана на наблюдениях J.A. DeYoung. Sekanina (1998) рассматривал свойства выбросов,



**Рис. 7.** Развитие радиальных выбросов в период 13, 19 и 22 сентября 1996 г. (HST McCarthy и др., 2007). Снимок дополнительно обработан для повышения контрастности. Разрешение на снимках достигает  $0.2''$  и определяется дифракционным пределом телескопа HST.

или как он их называет галосов (джетов), учитывая положение оси вращения ядра, наклон экватора ядра к плоскости орбиты кометы ( $75^\circ$ ) и положение кометы относительно земного наблюдателя. В работе указано направление северного полюса вращения кометы: прямое восхождение  $257^\circ$ , склонение  $-61^\circ$ . В апреле 1997 г. северный полюс ядра был обращен к Земле (Licandro и др., 1998). Положение полюса подтверждали Jorda и др. (1998). Sekanina (1998) моделировал образование спиральных галосов, сопоставляя их с обработанными изображениями, показанными на рис. 8. В обработку вошли 89 снимков, которые, согласно Sekanina (1998), были получены и обработаны J.A. DeYoung в Военно-морской обсерватории США.

Спиральные галосы на рис. 8 представляют естественную документальную запись процессов, происходивших 23 февраля и 25 марта 1997 г., где временную шкалу представляет период рукавов галосов. Расстояния известны, сторона изображений по  $4''$ . В нижней части рис. 8 показаны положения максимумов и минимумов фотометри-

ческих сечений 1–4. Если учесть геометрию, приведенную в статье, и скорректировать искажения вдоль фотометрических сечений 1–4, можно получить скорости истечений отдельных источников и сравнить их с данными, которые известны, например, для комет 1P/Halley и 29P/Schwassmann-Wachmann.

В табл. 1 приведены скорости  $V_i$  истечений пылевых потоков, которые рассчитывались по данным рис. 8, для максимумов кривых в левой и правой частях снимков, вдоль линий 1–4.

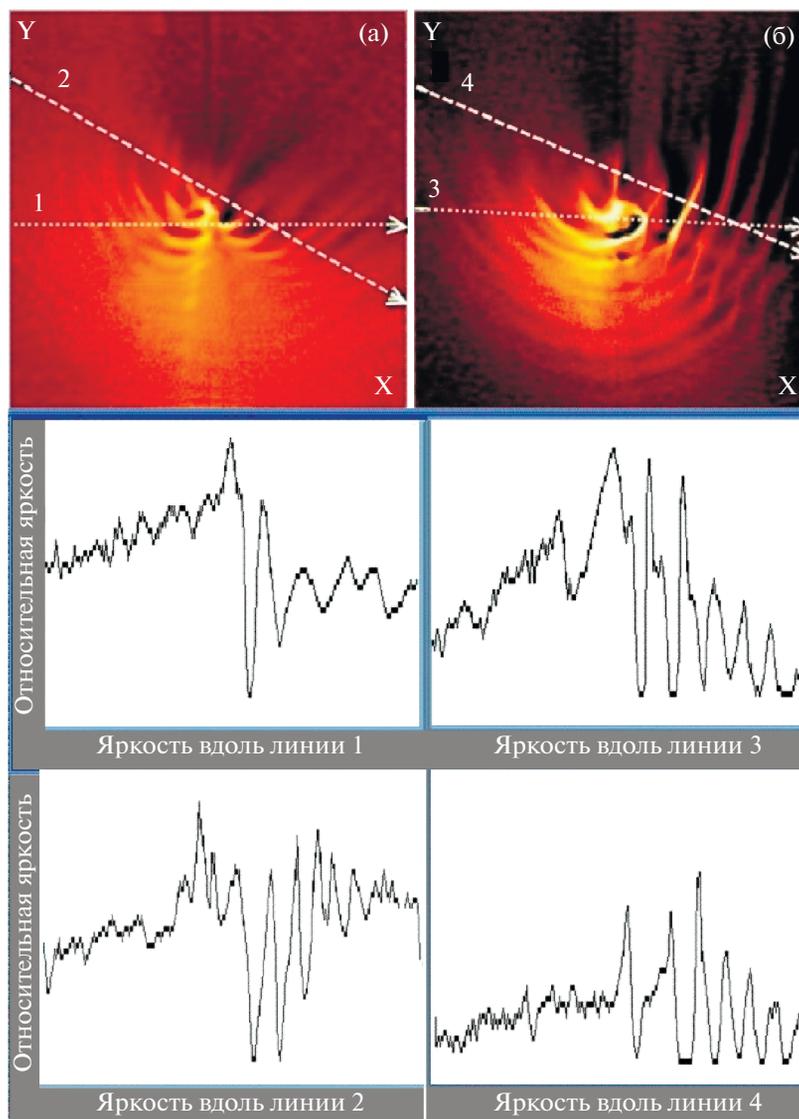
$$V_i = \left[ (x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 \right]^{1/2} / T,$$

где  $x$  и  $y$  – координаты на рисунке, а  $T$  – период вращения ядра, 11.33 ч.

Общее среднее: 330 м/с, что можно сравнить с работой Miles и др. (2016), где авторы указывают скорость истечений пылевых потоков кометы 29 P Швассмана-Вахмана (29P/Schwassmann-Wachmann) как  $257 \pm 13$  м/с, считая, что пылевые частицы увлекаются сублимацией льдов CO и N<sub>2</sub> при температуре  $24 \pm 6$  К. Для кометы 1P/Halley,

**Таблица 1.** Скорости  $V_i$  истечений пылевых потоков

| Вдоль линии 1, м/с |         | Вдоль линии 2, м/с |         | Вдоль линии 3, м/с |         | Вдоль линии 4, м/с |         |
|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|
| 1                  | 252     | 1                  | 216     | 1                  | 187     | 1                  | 708     |
|                    | 214     |                    | 362     |                    | 389     |                    | 410     |
| 2                  | 234     | 2                  | 504     | 2                  | 187     | 2                  | 497     |
|                    | 245     |                    | 313     |                    | 404     |                    | 404     |
| 3                  | 150     | 3                  | 635     | 3                  | 155     | 3                  | 342     |
|                    | 275     |                    | 250     |                    | 332     |                    | 289     |
| 4                  | 216     | 4                  | 519     | 4                  | 365     | 4                  | 452     |
|                    | 180     |                    | 287     |                    | 404     |                    | 389     |
| 5                  | 249     | 5                  |         | 5                  | 420     | 5                  |         |
|                    | 214     |                    | 137     |                    | 317     |                    | 275     |
| 6                  |         | 6                  |         | 6                  |         | 6                  |         |
|                    | 204     |                    | 262     |                    |         |                    | 4159    |
| 7                  |         | 7                  |         | 7                  |         | 7                  |         |
|                    |         |                    | 225     |                    |         |                    |         |
| 8                  |         | 8                  |         | 8                  |         | 8                  |         |
|                    |         |                    | 275     |                    |         |                    |         |
| Ср. 222            | Ср. 218 | Ср. 468            | Ср. 264 | Ср. 267            | Ср. 369 | Ср. 500            | Ср. 334 |



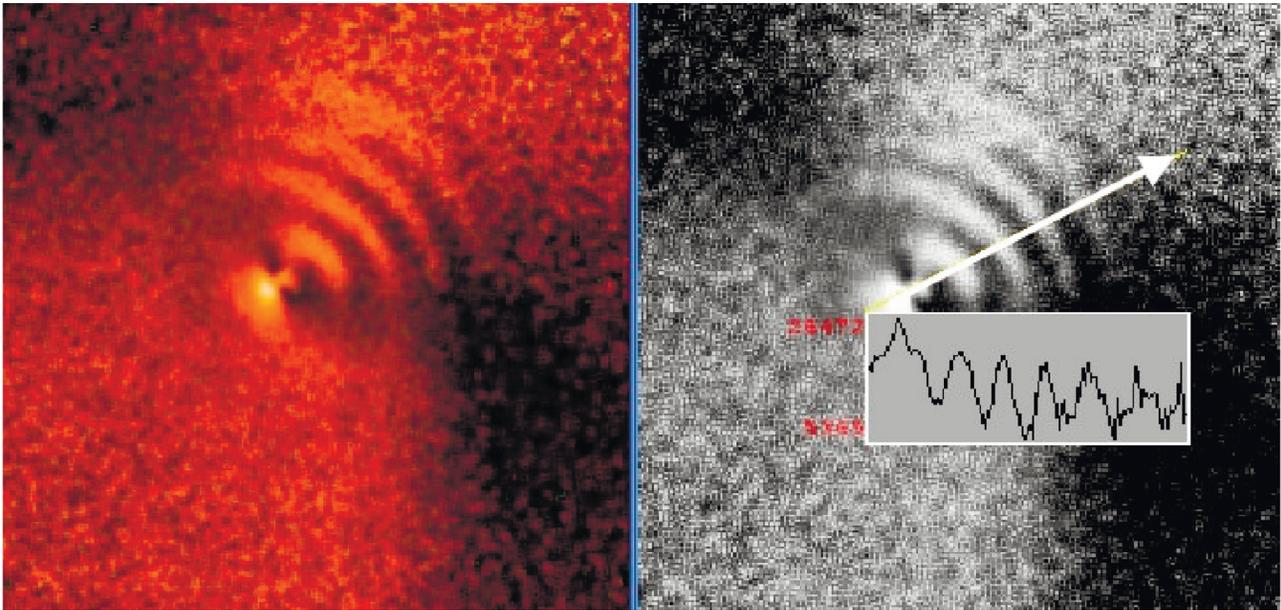
**Рис. 8.** Спиральные галосы. Благодаря вращению ядра, устойчивые локальные источники газо-пылевой среды создают спиральные рукава в голове кометы. Периодичность структуры была обнаружена в наблюдениях J.A. DeYoung, 23 февраля (а) и 25 марта (б) 1997 г. (источник верхней части рисунка: Sekanina и др., 1997; 1998). Снимки дополнительно обработаны нанесением графики. Распределение деталей в галосах иллюстрируют сечения вдоль линий 1–4.

по результатам эксперимента ДУСМА, Simpson и др. (1989; 1990) оценивали скорость истечения пылевых частиц, увлекаемых газом  $V_g$ , в пределах 300–400 м/с. Таким образом, скорости истечения у кометы Хейла–Боппа оказываются примерно такими же, как в случае комет Галлея и Швассмана-Вахмана. Разброс значений вполне понятен и определяется как нестабильностью источников, так и неоднородностью среды комы.

Измерения в поляризованном свете позволяют выделить участки повышенной и пониженной концентрации ориентированных (несферических) частиц. В числе других наблюдательных экспериментов, комета С/1995 О1 исследовалась поляриметрическим методом (Jones, Gehrz, 2000;

Ganesh и др., 1998). На рис. 9 показан фрагмент снимка, сделанного в поляризованном свете 25 апреля 1997 г. (McDavid, 1997), где видна дуговая структура потоков в лобовой части головы кометы. В течение апреля положение оси вращения и угол, под которым была видна комета (от  $45^\circ$  до  $31^\circ$ ), изменялись незначительно (положение оси вращения в течение 1997 г. изменялось от  $237^\circ$  до  $213^\circ$ ). Такие условия получения изображения, с учетом угла наблюдения, также позволяют определить примерную скорость истечения выбросов.

На рис. 9 в лобовой части комы можно насчитать 6 витков спирали, образованной выбрасываемой газопылевой струей при вращении ядра



**Рис. 9.** Изображение лобовой части комы в поляризованном свете. Отделяющиеся от ядра струи образуют, благодаря вращению ядра, многовитковую спираль с шагом около 13700 км. Врезка показывает градации яркости вдоль белой линии. Переработанный снимок APOD (April 25, 1997, D. McDavid).

(врезка на рис. 8). Из-за диффузии материала следующие рукава спирали не различаются.

На врезке (рис. 9) интервал пиков  $\Delta l$  составляет примерно 13700 км (на 10% больше диаметра Земли), с возможной ошибкой не менее 10%. На такое расстояние газо-пылевая струя распространялась за 1 период вращения ядра,  $T = 11.33$  ч. Соответствующая скорость истечения пылевых частиц, увлекаемых газом

$$v_g = \Delta l / T = 329 \pm 50 \text{ м/с,}$$

что близко совпадает с приведенными выше результатами для рис. 8 и близко к результатам работ (Simpson и др., 1989; 1990) и (Miles и др., 2016).

### ПЫЛЕВАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ C/1995 O1

Огромное количество пыли относится к необычным свойствам ядра C/1995 O1. В наблюдениях 1995–97 гг. было установлено (Churyumov и др., 1995; Weaver и др., 1997; Jewitt и Matthews, 1999; Fernandez, 2002), что ядро кометы создает выбросы (или струи, рис. 5–7), радиальные по форме. В ряде случаев удалось проследить их связь с вращением ядра. В 1996 г. в коме наблюдались более сложные образования, как выброс ярких искриленных струй. Последовательное развитие радиальных выбросов уже приводилось на рис. 7, где приведены результаты наблюдений HST за 13, 19 и 22 сентября 1996 г. Масштаб рисунков одинаков. Развивающиеся пылевые и га-

зовые струй состояли, главным образом, из ледяной пыли.

В промежуточных итогах (Weaver и др., 1997) сообщалось, что различные источники выбрасываемых ядром ледяной пыли, по-видимому, изолированы друг от друга. Развитие радиальных выбросов изучали также McCarthy и др. (2007). В течение всего периода мониторинга сообщалось о коротких, но весьма интенсивных всплесках активности ядра. В наблюдениях HST были обнаружены другие необычные явления, в частности, удалось зарегистрировать внезапную вспышку, когда за время, немногим более часа, количество пыли, выброшенной из ядра, увеличилось, как минимум, восьмикратно. Авторы (Weaver и др., 1997) отмечают интенсивность извержений на поверхности ядра кометы, с нерегулярными струями и комментируют: “Поверхность ядра Хейла–Боппа является невероятно динамичным местом, когда “вентиляционные отверстия” включаются и выключаются, когда новые пятна ледяного материала поверхности впервые обнажаются к солнечному свету. Хейл–Бопп, вероятно, предоставляет самый показательный портрет работы кометного ядра с момента запуска космических аппаратов к комете Галлея в 1986 г.”

Пылевые выбросы кометы Хейла–Боппа, по данным (Weaver и др., 1997), достигали  $2 \times 10^6$  кг/с в перигелии, причем пылевая составляющая не менее чем в 5 раз превосходила газовую. Такие же соотношения (не менее 5 : 1) указывает Fernandez (2002). Следует напомнить, что у кометы Галлея от-

ношение пыль/газ составляло примерно 1 : 7–1 : 8 в 1986 г. и от 2 : 1 до 4 : 1 у кометы Чурюмова–Герасименко в 2014–2016 гг. В качестве индикатора крайне высокой запыленности кометы C/1995 O1, Гнедин (1999) приводил отношение потока молекул циана CN к другим газовым и пылевым составляющим. Если для “средней” кометы такое отношение он указывает как 92, то у кометы Хейла–Боппа оно лежит около 0.65. Эти оценки интересно сравнить с данными о других кометах. Пылевые выбросы составляли:  $1.20 \times 10^4$  кг/с у кометы 1P/Halley и  $5 \times 10^3$  кг/с у 67P/CG, а в перигелии пылевые выбросы 1P/Halley доходили до  $2.9 \times 10^4$  кг/с. Если опираться на приведенные данные, то в перигелии интенсивность пылевых выбросов у Хейла–Боппа превосходит таковую у комет Галлея примерно в 70 раз, хотя в перигелии комета Галлея подходит к Солнцу на треть ближе, чем комета Хейла–Боппа. Поскольку соотношение эффективных диаметров Хейла–Боппа и Галлея = 3, а площадей поверхности ядер комет 9. Таким образом, удельная производительность Хейла–Боппа выше, чем у Галлея почти в 8 раз, что может указывать на относительно “молодость” поверхности кометы Хейла–Боппа.

#### РАЗМЕРЫ, ОБЪЕМ И МАССА ЯДРА КОМЕТЫ C/1995 O1

Из-за высокой плотности комы, размеры и масса ядра C/1995 O1 оцениваются по-разному. По наблюдениям HST, размер ядра, вероятно, превышает 40 км. Но в различных работах приводились оценки условного диаметра от 30 до 130 км. Гнедин (1999) указывал радиус условно сферического тела 45 км (диаметр 90 км). По наиболее поздним наблюдениям (Szabó и др., 2011) радиус ядра, имеющего альбедо 4%, должен составлять 60–65 км. Чтобы получить меньший радиус, 35 км (как в более ранних оценках), следует считать, указывают авторы, что комета полностью перешла в “спящее” состояние и что альбедо ядра составляет 13%. Fernandez (2002) оценивал эффективный сферический радиус ядра  $30 \pm 10$  км. В (McCarthy и др., 2007) размер эффективного сферического диаметра ядра кометы Hale-Bopp по результатам наблюдений в постперигельный период оценивался уже величиной  $40 \pm 10$  км в предположении, что его геометрическое альбедо составляет 4%. Джон Мэйсон (John Mason) в своем интервью BBC 2017 г. приводит близкие этому значению размеры ядра  $40 \times 30$  км (вероятно,  $40 \times 30 \times 30$  км) (Moore, 2017).

Хотя оценки размеров ядра кометы Hale-Bopp имеют большую неопределенность, очевидно, что она на сегодняшний день является одной из самых крупных из известных нам комет. Лишь только короткопериодическая комета 29P/Schwassmann-Wachmann, согласно недавним исследованиям, име-

ет близкий ей радиус:  $R_{29P} = 30.2 (+3.7, -2.9)$  км (Schambeau и др., 2015).

Если принять последнюю оценку диаметра, объем ядра кометы C/1995 O1 составит

$$V = (4\pi/3)(abc) = 1.9 \times 10^{13} \text{ м}^3,$$

где  $a, b, c$  – полуоси эллипсоида. При типичной пористости тела ядра кометы 0.6, оценки плотности, например, комет 67P и 1P, были близки к  $500 \text{ кг/м}^3$ . При такой плотности масса ядра C/1995 O1 должна составлять  $0.925 \times 10^{16} \approx 10^{16}$  кг, что в 43 раз превышает оценку массу кометы Галлея (1P/Halley,  $M_{\text{Hal}} = 2.2 \times 10^{14}$  кг) и в 500 раз превышает массу кометы 67P.

#### ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ КОМЕТЫ C/1995 O1

Благодаря спектрам высокого разрешения, полученным на больших телескопах, был подробно исследован химический состав выбрасываемого материала ядра кометы. Он включал большое число молекул, которые ранее в других кометах не наблюдались, но которые входят в состав больших молекулярных облаков Галактики. Были получены значения производительности ядра C/1995 O1 в обнаруженных компонентах, выраженная в потоке  $Q$  числа молекул/с на гелиоцентрическом расстоянии  $R$  (Гнедин, 1999).

Как видно из табл. 2, такие газы, как  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{CO}$  наблюдались, когда комета находилась достаточно далеко (на 4-х а. е.) от Солнца (Crovisier и др., 1997 и др.), многие газы комы также наблюдались на больших гелиоцентрических расстояниях в постперигельный период (Biver и др., 1997; 2002).

Большой цикл наблюдений был проведен в период с марта по май 1997 г., когда комета находилась на гелиоцентрическом расстоянии 0.91–1.4 а. е. (ранний постперигельный период), было проведено изучение состава комы кометы Хейла–Боппа с помощью трех наземных радиотелескопов: Caltech Submillimeter Observatory (CSO) on Mauna Kea (Hawaii), the Institut de radioastronomie millimétrique (IRAM) 30-m telescope on Pico Veleta (Spain) and the IRAM interferometer on Plateau de Bure (France). В общей сложности было идентифицировано 22 молекул, радикалов и ионов, результаты опубликованы в (Biver и др., 1999; Lis и др., 1999; Bockelée-Morvan и др., 1999; 2000). Часть из найденных молекул и ранее определялись в кометных комах ( $\text{CO}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CS}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{HNC}$ ,  $\text{OCS}$ ,  $\text{HNCO}$ ), но некоторые молекулы ( $\text{SO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HC}_3\text{N}$ ,  $\text{NH}_2\text{CHO}$ ,  $\text{HCOOH}$ ,  $\text{HCOOCH}_3$ ) а также ион ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) были определены впервые. Особо следует отметить обнаружение такой важной для космобиологии молекулы, как формамид ( $\text{NH}_2\text{CHO}$ ). В этот период скорость дега-

**Таблица 2.** Производительность ядра C/1995 O1

| Молекула                         | $Q$ , молекул/с        | $R$ , а. е. |
|----------------------------------|------------------------|-------------|
| H <sub>2</sub> O                 | $5 \times 10^{30}$     | 1.050–0.914 |
| OH                               | $5 \times 10^{30}$     | 1.01        |
| CN                               | $1.5 \times 10^{28}$   | 1.01        |
| C <sub>2</sub>                   | $2 \times 10^{28}$     | 1.01        |
| CO                               | $3 \times 10^{29}$     | 1.04        |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>    | $7 \times 10^{27}$     | ~1.0        |
| OCS                              | $1.5 \times 10^{28}$   | ~1.0        |
| HCNC <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | $7 \times 10^{27}$     | ~1.0        |
| CH <sub>3</sub> OH               | $1.1 \times 10^{28}$   | 3.6         |
| H <sub>2</sub> S                 | $8 \times 10^{27}$     | 3.6         |
| CS                               | $3 \times 10^{26}$     | 3.6         |
| H <sub>2</sub> CO                | $1.5 \times 10^{26}$   | 3.6         |
| CH <sub>3</sub> CN               | $1.1 \times 10^{26}$   | 3.6         |
| SO <sub>2</sub>                  | $6 \times 10^{27}$     | 0.95        |
| HDO                              | $4 \times 10^{26}$     | 0.914       |
| CH <sub>3</sub> OCHO             | $6 \times 10^{27}$     | 0.92        |
| Пыль                             | $3.2 \times 10^5$ кг/с | 1.144       |

**Таблица 3.** Значения относительных обилий основных компонентов комы кометы C/1995 O1 (Хэйла–Боппа) по данным Bockelée-Morvan и др., 2000; Crovisier и др., 2004a, 2004b; Biver и др., 2014

| Молекула                          | Обилие относительно H <sub>2</sub> O, % |
|-----------------------------------|---|
| HCN                               | 0.25                                    |
| CO                                | 23                                      |
| H <sub>2</sub> CO                 | 1.1                                     |
| CH <sub>3</sub> OH                | 2.4                                     |
| HCOOH                             | 0.09                                    |
| (CH <sub>2</sub> OH) <sub>2</sub> | 0.25                                    |
| HNCO                              | 0.10                                    |
| NH <sub>2</sub> CHO               | 0.02                                    |
| HCOOCH <sub>3</sub>               | 0.08                                    |
| CH <sub>3</sub> CHO               | 0.025                                   |
| CH <sub>2</sub> OHCHO             | <0.04                                   |

зации воды составляла от 5 до  $11 \times 10^{30}$  мол с<sup>-1</sup>. Позднее полученные спектры комы дали возможность определить еще две молекулы: ацетальдегид (CH<sub>3</sub>CHO), и этилен гликоль ((CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub>) (Crovisier и др., 2004). В этой работе приведена также сводная таблица значений верхних пределов относительных мольных содержаний 24 летучих компонентов в комете C/1995 O1 (Hale-Bopp)

по данным радио спектроскопии. В данной статье в табл. 3 приведены значения относительных обилий основных компонентов комы кометы Хэйла–Боппа.

Основными летучими веществами комы кометы Хэйла–Боппа, были вода, монооксид и диоксид углерода в соотношении 10 : 6 : 2 (по числу молекул) (Crovisier и др., 1997). CO впервые наблюдалось на  $r \approx 6.8$  а. е. (Jewitt и др., 1996), а CO<sub>2</sub> на  $r \approx 4–5$  а. е. (Crovisier, 1997; Weaver и др., 1997). Столь большое преобладание CO над CO<sub>2</sub>, не характерно для комет, у которых обычно  $Q(\text{CO}_2) \gg Q(\text{CO})$ . У кометы C/1995 O1 CO<sub>2</sub> наблюдалось выделение на  $r = 4.3$  а. е. до перигелия, а его дегазация заканчивается на 4.9 а. е. после перигелия (Crovisier, 1997).

Темп выделения CO и характер его изменения наилучшим образом описывается моделью, согласно которой, в ядре кометы Хэйл–Боппа CO присутствует в основном в виде молекул, захваченных аморфным льдом воды и небольшого количества CO<sub>лед</sub>. На  $r \sim 7$  а. е., когда начинается кристаллизация аморфного льда H<sub>2</sub>O, происходит освобождение CO (Capria et al., 2002). Но по мере приближения к Солнцу выделение CO резко возрастает за счет реакции, происходящей непосредственно в коме. В ней происходит фотохимическое разрушение легколетучих органических молекул, содержание которых в комете весьма велико (DiSanti и др., 1999), с последующим окислением углерода газообразной H<sub>2</sub>O. Этот дополнительный источник носит название “распределенного источника” (Crovisier и др., 1999; DiSanti и др., 1999), который весьма распространен в кометах. Например, источником радикала CN, наблюдаемого в коме C/1995 O1, как было показано в (Irvine и др., 1996; Raue и др., 1997) является родительская молекула HCN. Ее фотолиз происходил, начиная с  $r \sim 4$  а. е., молекула CN является по отношению к ней “дочерней”.

Характерной особенностью состава кометы Хэйла–Боппа является присутствие в ней большого количества летучих органических соединений, в числе которых этан (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), ацетилен (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), диметиловый эфир (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O), ацетальдегид (CH<sub>3</sub>CHO), метилформиат (HCOOCH<sub>3</sub>), формальдегид (H<sub>2</sub>CO), метанол (CH<sub>3</sub>OH), муравьиная кислота (CH<sub>3</sub>COOH), а также, что особенно важно при рассмотрении комет как потенциального источника жизни на телах Солнечной системы, органические молекулы, содержащие в своем составе азот: изоциановая кислота (CHNO), метилцианид (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>N), цианоацетилен (HC<sub>3</sub>N), формамид (NH<sub>2</sub>CHO) (данные Crovisier и др., 2004a; 2004b; Bockelée-Morvan и др., 2004).

Среди других газов, в коме кометы Хэйла–Боппа были обнаружены инертные газы, в том

числе аргон (который позднее был также найден в комете 67P/CG, в миссии ROSETTA (Balsiger и др., 2015)) и неон. Ne более летучий, чем аргон, и его содержание оказалось примерно в 25 раз ниже солнечных пропорций, что неудивительно (Krasnopolsky и др., 1997). Ранее Ne в кометных комах не наблюдался.

Определенное сомнение вызывает оценка содержания аргона в комете C/1995 O1 (Stern и др., 2000). Ag был обнаружен в период максимальной активности кометы в ранний постперигельный период, когда она находилась на  $r = 0.915$  а. е., а скорость производства  $H_2O$  составляла  $1.1 \times 10^{31} \text{ с}^{-1}$ . Было определено, что скорость производства аргона составляла  $(1.1 \pm 0.3) \times 10^{29} \text{ с}^{-1}$  (Stern и др., 2000). Дальнейшие построения авторов можно принять лишь как оценочные. Содержание аргона определялось авторами относительно содержания кислорода [O], которое оценивалось из предположения, что  $Q_O = 1.5 \times Q_{H_2O}$ . Тогда в коме кометы значение  $[Ar/O] = (5.8 \pm 1.7) \times 10^{-3}$ . Учитывая, что отношение солнечных обилий  $[Ar/O]_{\odot} = 0.00372$  (Grevesse, Sauval, 1998), был получено, что комета Хэйла–Боппа обогащена аргоном в  $1.8 \pm 0.5$  раза относительно солнечных пропорций. Эта оценка нуждается в уточнении, тем более, что в эксперименте Rosetta значение мольного отношения аргона к воде оказалось на два порядка ниже:  $^{36}Ar/H_2O = (0.1-2.3) \times 10^{-5}$  (Balsiger и др., 2015).

Присутствие таких высоколетучих газов, как аргон и неон, служит косвенным признаком низких (около 20 К) температур, при которых формировалось ядро кометы, но при этом необходимо учитывать, в какой форме происходила аккумуляция рассматриваемого компонента. Что касается Ag, то, опираясь на данные миссии Rosetta (Balsiger и др., 2015), в результате которой была установлена высокая линейная корреляция содержаний в коме кометы  $^{36}Ag$  и другого высоколетучего компонента – молекулярного азота  $N_2$ , можно полагать, что оба этих газа были аккумулярованы в порах аморфного льда воды в условиях плотного молекулярного облака или в дальних регионах околосолнечного диска. Согласно современным динамическим моделям, долгопериодические кометы, подобные C/1995 O1, сформировались за орбитой Нептуна, а в облако Оорта были выброшены вследствие гравитационных процессов в ранней Солнечной системе.

### ИЗОТОПНЫЕ ОТНОШЕНИЯ В КОМЕТЕ C/1995 O1 (HALE-BOPP)

**Изоотопные отношения азота** в кометах впервые были определены в комете C/1995 O1 (Hale-Bopp). Измерения, проводились с помощью ИК телескопа имени Джеймса Кларка Максвелла

(JCMT, Гавайи). Было получено значение соотношения изотопов азота  $^{14}N/^{15}N$  в цианистом водороде (HCN)  $^{14}N/^{15}N = 323 \pm 46$  (Jewitt и др., 1997), что было близко значению  $^{14}N/^{15}N$ , предполагавшееся для протосолнечной небулы ( $^{14}N/^{15}N \approx 460 \pm 100$ ) (Dahmen и др., 1995), но существенно превышавшее значение для земной атмосферы, на тот момент принятое как  $^{14}N/^{15}N = 270$  (Anders, Grevesse, 1989), позднее уточненное в (Jehin и др., 2009)  $^{14}N/^{15}N = 272$ . Однако позже в работе (Arpigny и др., 2003) было сообщено об обнаружении для кометы Hale–Bopp значительного обогащения тяжелым изотопом  $^{15}N$  в радикале CN, наблюдавшегося на частоте 390 нм, в итоге было получено значение  $^{14}N/^{15}N_{CN} = 140 \pm 35$ . Поскольку CN – дочерняя молекула HCN, было пересмотрено и значение  $^{14}N/^{15}N$  в молекуле HCN. Коррекция, внесенная в работе (Bockelée-Morvan и др., 2008) в данные (Jewitt и др., 1997), дала значение  $^{14}N/^{15}N_{HCN}$  близкое  $^{14}N/^{15}N_{CN}$ . В дальнейшем значения  $^{14}N/^{15}N$ , подобные C/1995 O1, как в молекуле HCN, так и в радикале CN были получены еще в 22 кометах разных динамических типов, для которых было определено  $^{14}N/^{15}N_{CN} = 147.8 \pm 5.7$  (Manfroid и др., 2009), что почти вдвое ниже земного значения.

**Изоотопные отношения углерода.** Одновременно с определением  $^{14}N/^{15}N_{HCN}$  и  $^{14}N/^{15}N_{CN}$  проводились измерения соотношений изотопов углерода  $^{12}C/^{13}C$  в HCN кометы C/1995 O1 (Хейл–Бопп). Было получено  $^{12}C/^{13}C_{HCN} = 111 \pm 12$  (Jewitt и др., 1997). Позже эти данные были пересмотрены, в результате чего получено  $^{12}C/^{13}C_{HCN} = 94 \pm 8$  и  $^{12}C/^{13}C_{CN} = 91.0 \pm 3.6$  (Manfroid-09) что в пределах ошибки согласуется со значениями  $^{12}C/^{13}C = 89$  для Солнечной системы (Anders, Grevesse, 1989).

**Изоотопные отношения серы** в комете Hale-Bopp были измерены в моносульфиде углерода, CS. Значение  $C^{32}S/C^{34}S = 27 \pm 3$  (Jewitt и др., 1997) лежит между солнечной величиной 22.6 (Anders, Grevesse, 1989) и значением для межзвездной среды  $32 \pm 5$  (Chin и др., 1996). Соотношение изотопов серы было определено также в молекуле  $H_2S$ , которое оказалось существенно более низким, чем  $C^{32}S/C^{34}S$  и ниже земной величины, составляющей  $22 \pm 2$ :  $H_2^{32}S/H_2^{34}S = 17 \pm 4$  (Crovisier и др., 2004).

**Изоотопные отношения водорода в молекуле воды** особенно важны при построении моделей образования и эволюции Солнечной системы, а также происхождения воды и других летучих на планетах земной группы. В комете Hale–Bopp было обнаружено относительно высокое содержание дейтерия: по данным (Meier, Owen, 1999) значение отношения  $D/H_{H_2O} = (3.3 + 0.8) \times 10^{-4}$ , а по результатам (Crovisier и др., 2004)  $D/H_{H_2O} =$

$(4.1 + + 1.0) \times 10^{-4}$ . Неопределенность последнего значения включают 10% неопределенности в значениях  $Q$  [ $H_2O$ ]. Таким образом,  $D/N$  в молекуле воды в долгопериодической комете C/1995 O1 (Hale–Bopp) в 2–3 раза больше земного стандарта океанической воды ( $D/N_{SMOW} = 1.56 \times 10^{-4}$ ) и близко значению  $D/N$  для других долгопериодических комет. Согласно представлениям о возникновении льдов в туманностях, отношение  $D/N_{H_2O}$  в комете Хейла–Боппа, присутствие аргона и неона, а также характер газовой выделенности  $CO$  указывают, что лед  $H_2O$  кометы, также как и льды других летучих, вероятнее всего формировались в межзвездном облаке, а не в протопланетном диске.

Как уже отмечалось выше, ядро кометы Хейла–Боппа обладали необычно высокой производительностью летучих. По оценке (Sekanina, Kracht, 2017), за один оборот кометы C/1995 O1 массовая потеря ею основных летучих соединений ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ) составляет  $3.4 \times 10^{15}$ ,  $1.1 \times 10^{15}$  и  $0.8 \times 10^{15}$  г соответственно, при этом массовая потеря 18-ти легколетучих органических соединений составляет  $\sim 0.7 \times 10^{15}$  г, т.е. более 11 мас. %. Таким образом суммарная потеря вещества ядром кометы Хейла–Бопп за счет высоколетучих соединений за один оборот составила  $6.0 \times 10^{15}$  г, причем доля воды составляет менее 60 мас. %.

Но еще большую массу комета теряла в виде пыли, потеря которой по массе превышала производительность летучих в 7–8 раз (Sekanina, Kracht, 2017). Ее присутствие в коме после прохождения перигелия фиксировалось даже на радиальных расстояниях около 30-ти а. е. (Szabó и др., 2012). Основную массу кометной пыли, помимо силикатной компоненты, составляли тяжелые органические соединения с низкой летучестью, в состав которых входило 6 и более атомов углерода, например,  $C_6H_4(CH)_2$ ,  $C_6H_4(NH_2)_2$ ,  $C_6H_4CNOOH$  и другие. Если принять величину указанных потерь пыли и летучих, согласно оценкам (Sekanina, Kracht, 2017), а массу ядра, как было рассчитано выше  $10^{19}$  г, то общая потеря массы вещества за один оборот кометы Хейла–Бопп составила чуть менее 0.5% массы ядра кометы.

### ВРАЩЕНИЕ ЯДРА КОМЕТЫ C/1995 O1

Одним из основных параметров динамики кометного ядра является угловая скорость его вращения. Детальный теоретический анализ эволюции вращения кометных ядер выполнили А. Нейштадт и его коллеги (Нейштадт и др., 2002). Авторы, в частности, отмечали: "...конечный тренд заключается в том, что угловой момент должен линейно возрастать со временем для ядра кометы, подверженного действию реактивных моментов. Эволюция кометы (ее асимптотическое развитие) приво-

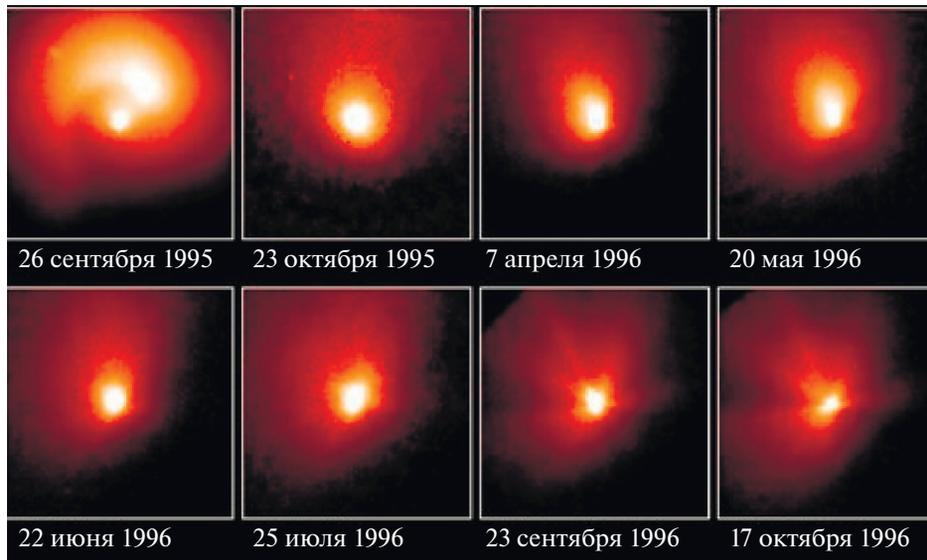
дит к случайному разрушению. Такие кометы наблюдаются относительно часто и рассматриваются как естественное явление".

Вращение ядра кометы Хейла–Боппа иллюстрирует рис. 10 – снимки, сделанные широкоугольной камерой космического телескопа им. Хаббла. На снимках видны изменения положения комы и выбросов газопылевой среды. Из-за высокой активности кометы, случайное направление выбросов отчасти маскирует вращение ядра, а протяженная среда комы маскирует и сами выбросы и усложняет определение угловой скорости ядра. Тем не менее, интенсивный выброс, образующий виток спирали, был хорошо виден 25 сентября 1995 г. (первый кадр рис. 10).

Ядра комет подвергаются реактивным воздействиям выбрасываемых пылевых и газовых струй. Заметный эффект от реактивных воздействий испытывают, главным образом, ядра малой массы. Комету C/1995 O1-видимому, можно отнести к молодым, масса ее велика, тем не менее, огромная масса ее потерь также может создать заметный реактивный эффект. Что касается возможного разрушения, из-за относительно быстрого вращения и больших размеров, напряжения от центробежных сил в ядре довольно значительны. Но значительны и противостоящие гравитационные силы. Чтобы выполнить подробные расчеты, необходимо знать не только угловую скорость вращения ядра, но и его форму.

В определении вращения ядра кометы C/1995 O1 были получены постепенно уточняющиеся результаты. В работе Licandro и др. (1998) в ближней инфракрасной области спектра в коме наблюдались три структуры типа спиральных струй. Наблюдения охватили несколько полных периодов вращения ядра, с 1 апреля по 28 апреля 1997 г. Авторы заключили, что наблюдаемые структуры, в основном, являются именно пылевыми струями. Период вращения ядра  $11.35 \pm 0.05$  ч определялся путем сравнения струй на изображениях, полученных в разные ночи, в одинаковых фазах вращения. Использовался поиск периодичности угла положения максимальной интенсивности пылевой комы вокруг ядра. Наилучшее значение периода вращения составило  $11.34 \pm 0.02$  ч. Изменений периода вращения из-за прецессионных эффектов обнаружено не было. Авторы отмечают хорошее согласие полученных результатов с периодами вращения, сообщаемых другими группами исследователей.

В работе группы К.И. Чурюмова (Churumov и др., 1995) был получен период  $11.41 \pm 0.05$  ч, что близко к последующим результатам Licandro и др. (1998), по наблюдениям, полученным в апреле 1997 г. Но за 2 месяца до того, в марте 1997 г., было обнаружено, что в промежутке с февраля по март, признаки, по которым определялось вращение



**Рис. 10.** Снимки, сделанные широкоугольной камерой космического телескопа им. Хаббла (HST) в период, предшествующий прохождению перигелия (сентябрь 1995–октябрь 1996). Съемка была прекращена в октябре 1996 г. из соображений защиты камер телескопа от прямых лучей Солнца (NASA press release ID: STScI-1997-08). Интенсивные односторонние выбросы можно видеть на первом кадре (снимок сделан 26 сентября 1995 г.).

ядра кометы, изменили направление вращения на противоположное (Гнедин, 1999). В тот же период были выполнены наблюдения с аппаратов HST и IUE. Если учесть огромную массу ядра C/1995 O1 (оценка  $10^{16}$  кг приведена выше), изменение направления вращения представляется невозможным. Тем не менее, сообщение обсуждалось; наиболее вероятно, что эффект был связан с местным изменением направления выбросов, определяемым локальными особенностями участков поверхности ядра. (Изменение направления выбросов наблюдалось неоднократно, например, у кометы 67P/CG в 2015 г.) Предлагалось другое объяснение особенностей вращения, связанное с уже упоминавшимся предполагаемым спутником ядра кометы (Секанина, 1997; 1998). Работа была основана на теоретических исследованиях, и автор не ссылаясь на какие-либо непосредственные наблюдения вторичного ядра. Было заявлено, однако, что ядро спутника должно было иметь диаметр 30 км, при размере главного ядра 70 км, расстояние между ними 180 км и период взаимного обращения 3 сут. Для объяснения наблюдавшегося характера выбросов пылевых струй было также предположено наличие у кометы двойного ядра. Автор приводил уточненный период вращения: 11 ч 20 мин.

В работе Licandro и др. (1998), в наблюдениях длительностью около 10 дней, изменений периода вращения найдено не было. Авторы отмечают, что временные ограничения наблюдений не позволяют, тем не менее, утверждать, что такие вариации не существуют.

Пылевые и газовые струи от активных областей на поверхности вращающегося ядра нерегулярно воздействуют на его угловую скорость. Моделирование сил реакции, воздействующих на ядро от выбрасываемых газопылевых масс, показывает, что в некоторых случаях реакция может несколько изменять угловую скорость вращения ядра. Представляется, что для массивного ядра C/1995 O1 эффект реакции струй не может быть существенным. Однако это не так. На снимках (рис. 6, 7) интенсивные выбросы расположены несимметрично. Если произвольно принять, что всего  $10^{-6}$  потерянной массы ( $3 \times 10^7$  кг) было выброшено преимущественно в одном (экваториальном) направлении с указанной выше скоростью  $v_g = 330$  м/с, изменение угловой скорости  $\omega$  ядра можно оценить через потерю (или добавку) энергии  $\Delta E = 2 \times 10^{12}$  Дж к энергии  $E$  вращения ядра. Соответственно, энергия  $E$ , запасенная вращающимся условно сферическим ядром есть:

$$E = I\omega^2/2 = 1.3 \times 10^{16} \text{ Дж},$$

(момент инерции  $I = 2/5MR^2$ , эквивалентный радиус  $R = 16.5$  км, масса  $M = 10^{16}$  кг и угловая скорость  $\omega_0 = 2\pi/T$ ). Соответственно, изменение угловой скорости ядра составит

$$\omega/\omega_0 = (\Delta E/E)^{1/2} = 1.3\%,$$

величину достаточно заметную для измерений.

Период вращения ядра кометы Хейла–Боппа значительно короче периода ядра кометы Галлея (11.34 и 52 ч соответственно). Вращение определяет напряжения  $F$  от центробежных сил в равно-

весном сечении  $S$  от всех элементов массы  $M_i$ , которые составляют:

$$F = \Sigma M_i R \omega^2 / S.$$

Так как комета Хейла–Боппа намного больше и по размерам  $R$ , и по массе  $M$ , а скорость ее вращения  $\omega$  в 4.5 раз больше, центробежные силы, создаваемые вращением, различаются примерно в 700 раз (по сравнению с кометой Галлея) и в некоторых сечениях могут быть близки к разрушающим. Однако для подробных расчетов необходимы сведения о форме ядра, которая остается неизвестной.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены некоторые свойства кометы Хейла–Боппа C/1995 O1, которая обладает гигантским ядром, высокой активностью газопылевых джетов, а также многими впервые обнаруженными в составе кометы молекулами и высокой производительностью паров воды, монооксида и двуоксида углерода, карбонил сульфида, цианидов и других составляющих. Она содержит большое количество летучих органических соединений, частичное окисление которых в коме, происходящее на радиальных расстояниях, близких перигелию, является дополнительным распределенным источником CO. В коме кометы C/1995 O1 (Hale–Bopp) были первые измерены значения изотопных соотношений  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  и  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  в молекулах HCN и CN, а также значение  $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$  в молекулах CS и  $\text{H}_2^{32}\text{S}$ . Впоследствии значения этих отношений определялись во многих кометах. Были определены значения отношения D/H в молекуле воды, которое оказалось в 2–3 раза больше земного стандарта океанической воды и близко значению D/H для других долгопериодических комет.

Комета обладает рекордной производительностью пыли. Один из выводов заключается в том, что поверхность ядра, вероятно, “молодая”, сохранила большое количество конденсированных летучих и мало подвергалась воздействию солнечной радиации. Интенсивные выбросы создают потери, достигающие  $3 \times 10^{13}$  кг за одно прохождение перигелия. Сделана попытка оценить массу ядра кометы Хейла–Боппа, которая должна быть близка к  $10^{16}$  кг или более. На основе снимков со спиральными галосами и снимков в поляризованном свете определена примерная скорость истечения газопылевых выбросов, которая лежит, в основном, в пределах 290–350 м/с. Рассмотрено суммарное влияние выбросов на динамику ядра. Расчеты сравниваются с некоторыми результатами, приведенными в статьях тематического сборника Earth, Moon and Planets (2002. Т. 89. № 1–4). Эти и другие материалы, частично рассмотренные в статье, представляют подробные исследования

этой необычной кометы, которую, по-видимому, можно считать “молодой” массивной кометой в начале ее орбитальной, физической и химической эволюции.

Работа выполнена при частичной поддержке Программами Президиума РАН П12, П17 и П28.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гнедин Ю.Н. Астрономические наблюдения кометы века: Новые, неожиданные результаты // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 6. С. 82–89.
- Ксанфомалити Л.В. Сравнение некоторых характеристик комет 1P/Галлея и 67P/Чурюмова–Герасименко, по данным аппаратов *VEGA* и *ROSETTA* // Астрон. вестн. 2017. Т 51. № 3. С. 225–242.
- Arpigny C., Jehin E., Manfroid J., Hutsemékers D., Schulz R., Stüwe J.A., Zucconi J.-M., Ilyin I. Anomalous nitrogen isotope ratio in comets // Science. 2003. V. 301. P. 1522–1524.
- A’Hearn M.F., Millis R.L., Schleicher D.G., Osip D.J., Birch P.V. The Ensemble Properties of Comets: Results from Narrowband Photometry of 85 Comets, 1976–1982 // *Icarus*. 1995. V. 118. P. 223–270.
- Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1989. V. 53. P. 197–214.
- Bailey M.E., Emel’yanenko V.V., Hahn N.W., Harris K.A., Hughes K.A., Muinonen K., Scotti J.V. Orbital evolution of Comet 1995 O1 Hale–Bopp // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1996. V. 281. № 3. P. 916–924.
- Biver N., Bockelée-Morvan D., Colom P., Crovisier J., Germain B., Lellouch E., Davies J.K., Dent W.R.F., Moreno R., Paubert G. and 13 coauthors. Long-Term Evolution of the Outgassing of Comet Hale–Bopp from Radio Observations // *Earth, Moon, and Planets*. 1997. V. 78. Iss. 1–3. P. 5–11.
- Biver N., Bockelée-Morvan D., Colom P., Crovisier J., Henry F., Lellouch E., Winnberg A., Johansson L.E.B., Gunnarsson M., Rickman H., and 13 coauthors. The 1995–2002 Long-Term Monitoring of Comet C/1995 O1 (Hale–Bopp) at Radio Wavelength // *Earth, Moon, and Planets*. 2002. V. 90. Iss. 1–4. P. 5–14.
- Biver N., Bockelée-Morvan D., Debout V., Crovisier J., Boisvieux J., Lis D.C., Dello Russo N., Moreno R., Colom P., Paubert G., Vervack R., Weaver H.A. Complex organic molecules in comets C/2012 F6 (Lemmon) and C/2013 R1 (Lovejoy): detection of ethylene glycol and formamide // *Astron. and Astrophys.* 2014. V. 566. L5.
- Bockelée-Morvan D., Lis D.C., Wink J.E., Despois D., Crovisier J., Bachiller R., Benford D.J., Biver N., Colom P., Davies J.K., and 8 coauthors. New Molecules Found in Comet C/1995 O1 (Hale–Bopp): Investigating the Link between Cometary and Interstellar Material // *Astron. and Astrophys.* 2000. V. 353. P. 1101–1114.
- Bockelée-Morvan D., Wink J., Despois D., Colom P., Biver N., Crovisier J., Gautier D., Gérard E., Lellouch E., Moreno R., and 4 coauthors. A Molecular Survey of Comet C/1995 O1 (Hale–Bopp) at the IRAM Telescopes // *Earth Moon Planets*. 1997. V. 78. P. 67.
- Bockelée-Morvan D., Biver N., Jehin E., Cochran A.L., Wisemeyer H., Manfroid J., Hutsemékers D., Arpigny C.,

- Boissier J., Cochran W., and 8 coauthors.* Large excess of heavy nitrogen in both hydrogen cyanide and cyanogen from comet 17P/Holmes // *Astrophys. J. Lett.* 2008. V. 679. L49–L52.
- Bockelée-Morvan D., Crovisier J., Mumma M.J., Weaver H.A.* The Composition of Cometary Volatiles // *Comets II / Ed. Festou M.C., Keller H.U., Weaver H.A.* Tucson: Univ. Arizona, 2004. P. 391–423.
- Capria M.T., Coradini A., de Sanctis M.C.* C/1995 O1 Hale–Bopp: Short and Long Distance activity from a Theoretical Model // *Earth, Moon, and Planets.* 2002. V. 90. Iss. 1–4. P. 217–225.
- Cevolani G., Bortolotti G.* Debris from Comet Halley, Comet's Mass Loss and Age // *Nuovo Cimento Note Brevi.* 1987. V. 10 C. № 5. P. 587–591.
- Chin Y.-N., Henkel C., Whiteoak J.B., Langer N., Churchwell E.B.* Interstellar sulfur isotopes and stellar oxygen burning // *Astron. and Astrophys.* 1996. V. 305. P. 960–969.
- Cochran A.L., Cochran W.D., Barker E.S.* N<sub>2</sub>(+) and CO+ in comets 122P/1995 S1 (deVico) and C/1995 O1 (Hale–Bopp) // *Icarus.* 2000. V. 146. № 2. P. 583–593.
- Combi M.* Hale–Bopp: What makes a big comet different? Coma dynamics: Observations and theory // *Earth, Moon, and Planets.* 2002. V. 89. № 1. P. 73–90.
- Cremonese G., Boehnhardt H., Crovisier J., Fitzsimmons A., Fulle M., Licandro J., Pollacco D., Rauer H., Tozzi G.P., West R.M.* Neutral Sodium from Comet Hale–Bopp: A Third Type of Tail // *Astrophys. J. Lett.* 1997. V. 490. L199–L202.
- Crovisier J., Leech K., Bockelée-Morvan D., Brooke T.Y., Hanner M.S., Altieri B., Keller H.U., Lellouch E.* The spectrum of comet hale–bopp (C/1995 O1) observed with the infrared space observatory at 2.9 astronomical units from the sun // *Science.* 1997. V. 275. P. 1904–1907.
- Crovisier J., Bockelée-Morvan D.* Remote observations of the composition of cometary volatiles // *Space Sci. Rev.* 1999. V. 90. P. 19–32.
- Crovisier J., Bockelée-Morvan D., Biver N., Colom P., Despois D., Lis D.C.* Ethylene glycol in comet C/1995 O1 (Hale–Bopp) // *Astron. and Astrophys.* 2004a. V. 418. L35–L38.
- Crovisier J., Bockelée-Morvan D., Colom P., Biver N., Despois D., Lis D.C., and the Team for target-of-opportunity radio observations of comets.* The composition of ices in comet C/1995 O1 (Hale–Bopp) from radio spectroscopy. Further results and upper limits on undetected species // *Astron. and Astrophys.* 2004b. V. 418. P. 1141–1157.
- Churyumov K.I., Evtushevsky O.M., Kravtsov F.I.* Motion of the near-nucleus shells of comet Hale–Bopp and rotation of its nucleus // *Proc. IAU.* 1999. Coll. 173. P. 265–268.
- Fernandez Y.R.* The Nucleus of Comet Hale–Bopp (C/1995 O1): Size and Activity // *Earth, Moon, and Planets.* 2002. V. 89. № 1. P. 3–25.
- Dahmen G., Wilson T.L., Matteucci F.* The nitrogen isotope abundance in the galaxy. 1: the galactic disk gradient // *Astron. and Astrophys.* 1995. V. 295. P. 194–198.
- DiSanti M.A., Mumma M.J., Dello Russo N., Magee-Sauer K., Novak R., Rettig T.W.* Identification of two sources of carbon monoxide in comet Hale–Bopp // *Nature.* 1999. V. 399. P. 622–665.
- Ganesh S., Joshi U.C., Baliyan K.S., Deshpande M.R.* Polarimetric observations of the comet Hale–Bopp // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 1998. V. 129. P. 489–493.
- Irvine W.M., Bockelée-Morvan D., Lis D.C., Matthews H.E., Biver N., Crovisier J., Davies J.K., Dent W.R.F., Gautier D., Godfrey P.D. and 8 coauthors.* Spectroscopic evidence for interstellar ices in comet Hyakutake // *Nature.* 1996. V. 383. P. 418–420.
- Jehin E., Manfroid J., Hutsemékers D., Arpigny C., Zucconi J.-M.* Isotopic ratios in comets: status and perspectives // *Earth, Moon, and Planets.* 2009. V. 105. P. 167–180.
- Jewitt D., Senay M., Matthews H.* Observations of Carbon Monoxide in Comet Hale–Bopp // *Science.* 1996. V. 271. P. 1110–1113.
- Jewitt D.C., Matthews H.E., Owen T., Meier R.* Measurements of <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C, <sup>14</sup>N/<sup>15</sup>N, and <sup>32</sup>S/<sup>34</sup>S ratios in comet Hale–Bopp (C/1995 O1) // *Science.* 1997. V. 278. P. 90–93.
- Jewitt D., Matthews H.* Particulate Mass Loss from Comet Hale–Bopp // *Astronomical J.* 1999. V. 117. № 2. P. 1056–1062.
- Jones T.J., Gehrz R.D.* Infrared Imaging Polarimetry of Comet C/1995 O1 (Hale–Bopp) February // *Icarus.* 2000. V. 143. № 2. P. 338–346.
- Krasnopolsky V.A., Mumma M.J., Abbott M., Flynn B.C., Meech K.J., Yeomans D.K., Feldman P.D., Cosmovici C.B.* Detection of Soft X-rays and a Sensitive Search for Noble Gases in Comet Hale–Bopp (C/1995 O1) // *Science.* 1997. V. 277. P. 1488–1491.
- Ksanfomality L.* Comets // *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science.* Oxford University Press. 2018. <https://oxfordre.com/planetaryscience/view/10.1093/acrefore/9780190647926.001.0001/acrefore-9780190647926-e-21>
- Keller H.U., Arpigny C., Barbieri C., Bonnet R.M., Cazes S., Coradini M., Cosmovici C.B., Delamere W.A., Huebner W.F., Hughes D.W. and 8 coauthors.* First Halley Multi-colour Camera Imaging Results from Giotto // *Nature.* 1986. V. 321. P. 320–326.
- Licandro J., Rubio L.R.B., Boehnhardt H., Casas R., Göetz B., Gómez A., Jorda L., Kidger M.R., Osip D., Sabalisk N. and 4 coauthors.* The Rotation Period of C/1995 O1 (Hale–Bopp) // *Astrophys. J.* 1998. V. 501. L221–L225.
- Lis D.C., Mehringer D., Benford D., Gardner M., Phillips T.G., Bockelée-Morvan D., Biver N., Colom P., Crovisier J., Despois D., Rauer H.* New Molecular Species in Comet C/1995 O1 (Hale–Bopp) Observed with the Caltech Submillimeter Observatory // *Earth, Moon, and Planets.* 1997. V. 78. Issue 1–3. P. 13–20.
- Manfroid J., Jehin E., Hutsemékers D., Cochran A., Zucconi J.-M., Arpigny C., Schulz R., Stüwe J.A., Ilyin I.* The CN isotopic ratios in comets // *Astron. and Astrophys.* 2009. V. 503. P. 613–624.
- McCarthy D.W., Stolovy S.R., Campins H., Larson S., Samarasinha N.H., Kern S.D.* Comet Hale–Bopp in outburst: Imaging the dynamics of icy particles with HST/NICMOS // *Icarus.* 2007. V. 189. № 1. P. 184–195.
- McDavid D.* APOD (Astronomy Picture of the Day) April 25, 1997. <https://apod.nasa.gov/apod/ap970425.html>
- Meech K.J.* Setting the scene: what did we know before Rosetta? // *Philos. Trans. Royal Soc.* 2017. A. V. 375. Iss. 2097. id.20160247.
- Meier R., Owen T.C.* Cometary Deuterium // *Space Sci. Rev.* 1999. V. 90. № 1–2. P. 33–43.

- Mendis D.A.* A Postencounter view of comets // *Annu. Rev. of Astron. Astrophys.* 1988. V. 26. P. 11–49.
- Miles R., Faillace G.A., Mottola S., Raab H., Roche P., Soulier J.-F., Watkins A.* Anatomy of outbursts and quiescent activity of Comet 29P/Schwassmann-Wachmann // *Icarus.* 2016. V. 272. P. 327–355.
- Moore P.* Comet Hale Bopp, The Great Comet of 1997 // *BBC, The Sky at Night*, 14 Aug 2017. <https://www.youtube.com/watch?v=HtZN9QMUNqU> (Your Tube)
- Neishtadt A.I., Scheeres D.J., Sidorenko V.V., Vasiliev A.A.* Evolution of Comet Nucleus Rotation // *Icarus.* 2002. V. 157. P. 205–218.
- Rauer H., Arpigny C., Boehnhardt H., Colas F., Crovisier J., Jorda L., Küppers M., Manfroid J., Rembor K., Thomas N.* Optical observations of comet Hale-Bopp (C/1995 O1) at large heliocentric distances before perihelion // *Science.* 1997. V. 275. P. 1909–1912.
- Rodgers S.D., Charnley S.B.* Organic synthesis in the coma of Comet Hale–Bopp? // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2002. V. 320. № 4. P. L61–L64.
- Szabó Gy. M., Kiss L.L., Sárneczky K.* Cometary Activity at 25.7 AU: Hale-Bopp 11 Years after Perihelion // *Astrophys. J. Lett.* 2008. V. 677. Iss. 2. P. L121.
- Szabó Gy. M., Kiss L.L., Pál A., Kiss C., Sárneczky K., Juhász A., Hogerheijde M.R.* Evidence for fresh frost layer on the bare nucleus of comet Hale-Bopp at 32 AU distance // *Astrophys. J.* 2012. V. 761: 8 (7 p.)
- Sekanina Z.* Detection of a Satellite Orbiting The Nucleus of Comet Hale–Bopp (C/1995 O1) // *Earth, Moon, and Planets.* 1997. V. 77. № 3. P. 155–163.
- Sekanina Z.* Modeling Dust Halos in Comet Hale-Bopp (1995 O1): Existence of Two Active Nuclei Unequivocally Implied // *Astrophys. J.* 1998. V. 509. L133–L136.
- Sekanina Z., Kracht R.* 2017. Orbital evolution, activity, and mass loss of comet c/1995 O1 (HALE-BOPP). I. Close encounter with Jupiter in third millennium BCE and effects of outgassing on the comet’s motion and physical properties // *Earth and Planet. Astrophys. (astro-ph.EP)* arXiv:1703.00928.
- Schambeau C.A., Fernández Y.R., Lisse C.M., Samarasinha N., Woodney L.M.* A new analysis of Spitzer observations of Comet 29P/Schwassmann–Wachmann 1 // *Icarus.* 2015. V. 260. P. 60–72.
- Simpson J.A., Tuzzolino A.J., Ksanfomality L.V., Sagdeev R.Z., Vaisberg O.L.* Confirmation of dust clusters in the coma of Comet Halley // *Adv. Space Res.* 1989. V. 9. № 3. P. 259–262.
- Simpson J.A., Tuzzolino A.J., Ksanfomality L.V., Sagdeev R.Z.* DUCMA measurements of comet Halley dust mass spectra based on post-encounter calibration / *Asteroids. Comets. Meteors. III* / Eds. Lagerkvist C.I. et al. Uppsala Reprocentralen HSC. 1990. P. 435–438.
- Stern S.A., Slater D.C., Festou, M.C., Parker J.W., Gladstone G.R., A’Hearn M.F., Wilkinson E.* The Discovery of Argon in Comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) // *Astrophys. J.* 2000. V. 544. № 2. P. L169–L172.
- Szabo Gy. M., Sarneczky K., Kiss L.L.* Frozen to death? Detection of comet Hale-Bopp at 30.7 AU // *Astron. and Astrophys.* 2011. V. 531. id. A11. 4 pp.
- Szabo Gy. M., Kiss L.L., Sarneczky K.* Cometary Activity at 25.7 AU: Hale-Bopp 11 Years after Perihelion // *Astrophys. J. Lett.* 2008. V. 677. Iss. 2. P. L121.
- Weaver H.A., Feldman P.D., A’Hearn M.F., Arpigny C., Brandt J.C., Festou M.C.* The Activity and Size of the Nucleus of Comet Hale-Bopp (C/1995 O1) // *Science.* 1997. V. 275. № 5308. P. 1900–1904.