

УДК 523.64

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕВОГО ХВОСТА КОМЕТЫ C/2012 S1 (ISON) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2015 г. С. В. Харчук¹, А. В. Иванова¹, П. П. Корсун¹, Н. Н. Киселев¹, А. С. Москвитин²

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

²Специальная астрономическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, Россия

e-mail: kharchuk@mao.kiev.ua

Поступила в редакцию 06.10.2014 г.

Представлены результаты динамического моделирования процесса формирования пылевого хвоста кометы C/2012 S1 (ISON). Изображения кометы были получены на метровом телескопе Zeiss-1000 в САО РАН. Для построения модельного пылевого хвоста были прослежены траектории 50 миллионов пылевых частиц. Модельно было воспроизведено распределение яркости в пылевом хвосте кометы. Согласно нашим модельным исследованиям, наблюдаемый хвост мог быть сформирован пылевыми частицами размерами от 0.5 до 16.6 мкм, скорости вылета которых составляли от 17 до 130 м/с, показатель степени закона распределения по радиусам равен -2.5 , максимальный возраст пылевых частиц, которые сформировали хвост кометы, составляет 25 сут. В работе также представлены оценка блеска кометы на момент наблюдения и исследование морфологии пылевой комы с использованием цифровых фильтров.

Ключевые слова: комета C/2012 S1 (ISON), пылевой хвост кометы, морфология комы кометы.

DOI: 10.7868/S0320930X15040052

ВВЕДЕНИЕ

Изучение природы комет важно в контексте понимания эволюции Солнечной системы. Кометы, находясь в окрестностях Солнечной системы, в поле слабой радиации, содержат первичное, практически не переработанное вещество, которое осталось со времен формирования Солнечной системы. Поэтому исследования динамически новых комет, впервые попадающих во внутренние части Солнечной системы, может дать новую информацию о физических условиях их формирования, свойствах их пыли и газа.

Динамически новая комета C/2012 S1 (ISON) была открыта Невским и Новичонком 21 сентября 2012 г. с помощью 0.4-метрового телескопа, который работает в рамках международной научной оптической сети в России (Novski и др., 2012). Первую активность комета проявила уже на гелиоцентрическом расстоянии 10 а. е. (Cochran, 2014). Комету относят к объектам облака Оорта, ее эксцентриситет составил $e = 1.000004$, а наклон орбиты $i = 62.4^\circ$ (Williams, 2013). Комета прошла перигелий 28 ноября 2013 года на расстоянии 0.0125 а. е., и полностью утратив летучее вещество, не пережила сближения с Солнцем и уже не наблюдалась после перигелия. Модельный анализ хвоста кометы вблизи перигелия, а также вопрос фрагментации и развала кометного ядра представлен в статье Sekanina, Kracht, 2014).

Поскольку комета наблюдалась как в зоне, где сублимация водяного льда незначительна, так и в зоне, где сублимация водяного льда уже ответственна за вынос вещества с поверхности ядра кометы, что позволило исследовать эволюцию как ее активности, так и изменения свойств пыли и химического состава в различных диапазонах длин волн. Обобщая полученные данные для кометы, представленные в литературе, можно выделить несколько важных результатов. Так исследование кривой блеска кометы, за весь наблюдательный период, показало, что активность кометы носила вспышечный и непредсказуемый характер, а также что распад кометы вероятнее всего начался еще до перигелия (Sekanina, Kracht, 2014). Сам ход кривой блеска типичен для комет семейства Крейтца, которые наблюдаются на ИСЗ SOHO и STEREO (Knight и др., 2013; Curdt и др., 2014).

Что касается газопроизводительности H_2O , то максимальное ее значение $\sim 2 \times 10^{30}$ мол/с было зафиксировано в комете за пять дней до перигелия. По спектральным данным было получено, что комета обеднена веществами CH_3OH , C_2H_6 и CH_4 , содержит повышенное количество NH_3 и показывает типичное содержание C_2H_2 и CHN (Dello Russo и др., 2014). Кроме того, наблюдения кометы на гелиоцентрических расстояниях от 1.2 до 0.3 а. е. показали, что содержание CO достаточно неизменно, а содержание H_2CO постепенно менялось от обед-

ненного до повышенного содержания вблизи перигелия (Dello Russo и др., 2014; Disanti и др., 2014).

По результатам наблюдения кометы в инфракрасном диапазоне, на гелиоцентрическом расстоянии 1.15 а. е., в рамках проекта СОФИЯ, было получено, что в коме кометы доминировали частицы от 0.7 до 1 мкм (Wooden et al., 2014).

В данной работе представлены результаты моделирования пылевого хвоста кометы C/2012 S1 (ISON). Кроме модельного воспроизведения пылевого хвоста кометы, были исследованы морфология комы и хвоста кометы с использованием цифровых фильтров. Также оценена видимая и абсолютная звездные величины кометы.

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Фотометрические наблюдения кометы C/2012 S1 (ISON) были выполнены на телескопе Zeiss-1000 в Специальной астрофизической обсерватории (САО РАН) 11 октября 2013 г., до прохождения кометой перигелия. В этот период комета находилась на расстоянии 1.45 а. е. от Солнца и 1.85 а. е. от Земли. В качестве приемника излучения использовалась ПЗС матрица EEV 42-40 с размерами 1044 × × 1046 пикселей. Размер полученных изображений и масштаб в режиме аппаратного биннинга 2 × 2 составлял 8' × 8' и 0.476"/пикс, соответственно.

Изображения были получены в широкополосных *BVRc* фильтрах. Эти фильтры достаточно близко реализуют полосы фотометрической системы Джонсона-Казинса. Зарегистрировано 8 кадров в фильтре *Rc* с экспозициями от 30 до 60 с, в фильтре *B* получено 8 кадров с экспозициями от 30 до 120 с и в фильтре *V* получено 5 кадров с экспозицией 30 с. В качестве плоских полей снималось сумеречное утреннее небо. Для абсолютизации фотометрических измерений, в ту же ночь, были получены изображения звездного поля PG1657 + 078 (Landolt, 1992). Спектральная зависимость коэффициента пропускания земной атмосферы бралась из работы Карташевой и Чунаковой (1978).

Для стандартной редукции ПЗС-кадров были созданы мастер-кадры электронного смещения и плоского поля. Все кадры с изображением кометы и стандартных звезд были исправлены за нуль-пункт и неравномерность чувствительности пикселей с помощью мастер-кадров. Фон неба был определен с помощью подпрограммы "sky" библиотеки IDL (Landsman, 1993).

Все кадры были приведены к единому центру, соответствующему координатам центра изображения кометы на одном из кадров, и просуммированы. Полученный набор кадров использовался для модельного анализа пылевого хвоста, оценки ее блеска и выделения структур в коме кометы.

ОЦЕНКА БЛЕСКА КОМЕТЫ

Звездные величины кометы C/2010 S1 (ISON) в *B*, *V* и *Rc* фильтрах, измеренные с апертурой радиусом 30", составили 14.1 ± 0.03 , 13.6 ± 0.01 и 12.7 ± 0.01 , соответственно. При вычислении ошибки звездной величины суммировались статистические ошибки, которые обусловлены соотношением *S/N*, для кометы и звезд сравнения, ошибки оценки коэффициента прозрачности атмосферы, а также ошибки каталожных звездных величин звезд-стандартов.

Мы получили также абсолютную звездную величину кометы в фильтре *Rc*, используя выражение:

$$m_R(1,1,0) = m_R - 5 \lg(r\Delta) - \Phi(\alpha),$$

где *r* и Δ — гелиоцентрическое и геоцентрическое расстояния в а. е., соответственно. $\Phi(\alpha)$ — фазовая функция, где α это фазовый угол кометы, равный 32.4°.

Для кометы было получено абсолютное значение 9.2 ± 0.01 зв. величин. Полученная величина согласуется с аналогичной оценкой для гелиоцентрического расстояния 1.45 а. е., представленной для этой кометы в статье Sekanina, Kracht, 2014.

МОДЕЛЬ

Для модельного воспроизведения пылевого хвоста кометы C/2010 S1 (ISON) была использована модель, разработанная Корсуном для анализа пылевых хвостов отдаленных комет (Korsun и др., 2010), с перигелийным расстоянием больше 4 а. е. Предложенная модель базируется на статистическом методе Монте-Карло (Cashwell, Everett, 1959). В модели исследуется движение частиц с переменной массой, которые состоят из силикатного ядра окруженного органической компонентой, и покрытого мантией из водяного льда с углеродными включениями.

В нашем случае, при модельном анализе пылевого хвоста кометы C/2010 S1 (ISON), которая находилась на близком к Солнцу расстоянии (1.45 а. е., 11.10.2013 г.) мы учитывали, что ледяная компонента частиц полностью сублимировала, и мы анализируем движение сильно пористых тугоплавких частиц. Такой вариант модели уже был применен для моделирования хвостов комет C/1995 O1 (Hale-Bopp) и C/2006 P1 (McNaught), которые наблюдались также на малых гелиоцентрических расстояниях (Харчук и др., 2009; Харчук, Корсун, 2010).

Для построения пылевой атмосферы кометы в этой модели прослеживаются траектории каждой отдельной пылинки от зоны столкновений вокруг ядра до момента наблюдения. Траектории частиц, которые покинули зону столкновения, контролируются солнечной гравитацией и давлением солнечного излучения. Движение частиц рассматривается в неинерциальной кометоцентрической си-

стеме координат $\{\xi, \eta, \zeta\}$ и систему уравнений движения для них можно представить в следующем виде (Chöorny, 2005, 2007):

$$\ddot{\xi} = \mu_s(1 - \beta) \frac{r + \xi}{y^3} \mu_c \frac{\xi}{x^3} - \ddot{\theta} \eta - \dot{\theta}^2 \xi - 2\dot{\theta} \dot{\eta} - \mu_s \frac{1}{r^2},$$

$$\ddot{\eta} = -\mu_s(1 - \beta) \frac{\eta}{y^3} - \mu_c \frac{\eta}{x^3} - \ddot{\theta} \xi + \dot{\theta}^2 \eta - 2\dot{\theta} \dot{\xi},$$

$$\ddot{\zeta} = -\mu_s(1 - \beta) \frac{\zeta}{y^3} - \mu_c \frac{\zeta}{x^3},$$

где $\mu_s = Gm_s$ – солнечный гравитационный параметр, $\mu_c = Gm_c$ – гравитационный параметр кометы, $r, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ – гелиоцентрическое расстояние кометы, ее угловая скорость и угловое ускорение относительно

Солнца; $x = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}$ и $y = \sqrt{(1 + \xi)^2 + \eta^2 + \zeta^2}$. Началом кометоцентрической системы координат является центр кометного ядра. Оси ξ, η представляют собой координаты плоскости орбиты кометы, где ось ξ направлена радиально на Солнце, ось η определяет гелиоцентрический вектор скорости кометы, взятый со знаком минус. Третья ось ζ направлена в перпендикулярном направлении относительно плоскости орбиты кометы.

Дополнительным уравнением в модели является скорость изменения размера частицы из-за ее сублимации:

$$\frac{da}{dt} = \frac{\mu m_p p_v}{\rho} \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu m_p k T}},$$

где μ – молекулярная масса испаряющихся молекул, m_p – атомная единица массы, k – постоянная Больцмана, T – температура частицы, и p_v – давление насыщенного пара летучих веществ. В случае модельного анализа кометных хвостов комет на близких расстояниях от Солнца принимается, что $da/dt = 0$.

Для расчета уравнений по алгоритму Монте-Карло задаются время и направление вылета пылинки. Также были заданы модельные параметры: радиус пылинки, скорость ее вылета из зоны столкновений, максимальный возраст пылевых частиц, которые могут формировать хвост, а также степень γ распределения по радиусам пылинок, $n(a) = a^{-\gamma}$. Значение максимального возраста частиц определяется при нахождении оптимальных модельных параметров, когда достигается совпадение изофот модельного и наблюдательного изображений. Результатом решения системы уравнений являются координаты одной пылинки на момент наблюдения, а их совокупность формирует смоделированный пылевой хвост кометы. Полученные кометоцентрические координаты пылинок проецируются на картинную плоскость для сравнения с наблюдательными данными.

Модельные параметры пыли в комете C/2012 S1 (ISON)

Модельный параметр	Значения
Максимальный возраст пылинок	25 суток
Радиусы пылинок	0.5–16.6 мкм
Степень закона распределения по размерам	–2.5
Скорости пылинок	17–130 м/с

Скорости вылета частиц определялись по эмпирической формуле, предложенной Sekanina и др., 1992:

$$V = r_d^{-0.5} / (A + B a^{0.5}).$$

Здесь V – скорость выброса пылинок; A, B – числовые параметры; r_d – гелиоцентрическое расстояние пылинки; a – радиус пылинки. В ходе данных модельных исследований была принята объемная плотность частиц, $\rho = 1 \text{ г/см}^3$.

ПРОЦЕСС МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Моделирование осуществлялось с помощью компьютерной программы, написанной на алгоритмическом языке Фортран. Интерфейс запуска и контроля полученных вычислений был реализован через пакет IDL, ориентированный на анализ изображений. В качестве критерия согласованности наблюдаемых и модельных данных мы выбрали степень совпадения наборов изофот. Значения всех модельных параметров для удобства были собраны в отдельном файле.

Смоделированное изображение сравнивалось с наблюдаемым изображением, полученным 11 октября 2013 года. Модельное изображение кометы C/2012 S1 (ISON) было образовано 50 млн частиц. Источником пылеобразования служил направленный на Солнце конус с углом раскрытия 100° . В результате моделирования были получены оптимальные модельные параметры (радиусы пылинок, скорости пылинок, максимальный возраст частиц и показатель степени распределения по размерам пылинок $n(a) = a^{-\gamma}$), которые являются характеристиками пыли, формирующей пылевую составляющую атмосферы комет. Значения модельных параметров собраны в таблице.

Наглядными результатами моделирования является пара из модельного и наблюдательного изображений, которые размещены рядом (рис. 1) и сопоставления наборов изофот (рис. 2).

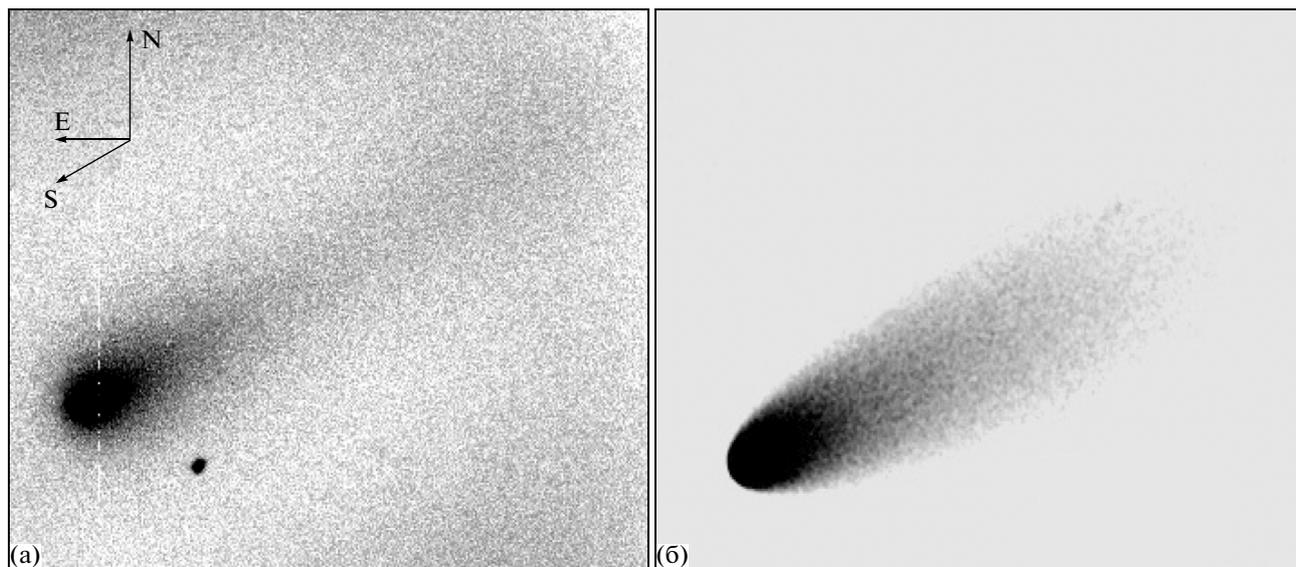


Рис. 1. Результаты моделирования кометы C/2012 S1 (ISON). Модельное изображение кометы (б) помещено на кадр справа от наблюдаемого изображения (а).

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУР В КОМЕ КОМЕТЫ

Комета C/2012 S1 (ISON) проявляла значительную джетовую активность, как на гелиоцентрических расстояниях больше 4 а. е. так и на более близких к перигелию расстояниях (Li и др., 2013; Knight и др., 2013; Scarmato, 2014). На больших гелиоцентрических расстояниях комета наблюдалась с помощью ИСЗ HST (Li и др., 2013) и по полученным изображениям исследовалась также морфология комы кометы. Авторами было получено, что в комете наблюдается джет (позиционный угол 291°) с углом раскрытия порядка 45° . Эта структура также

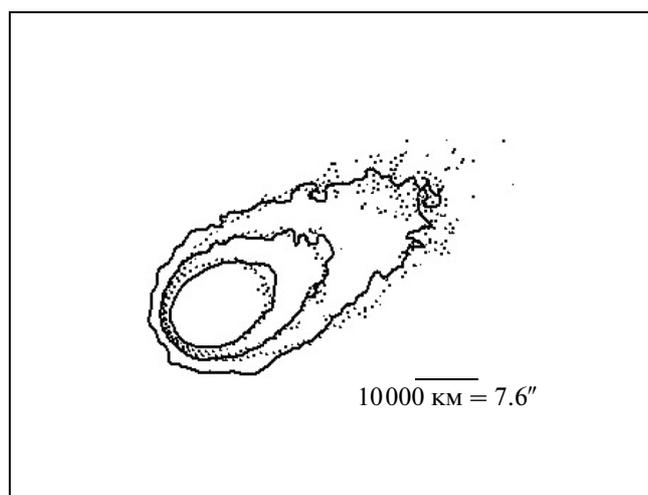


Рис. 2. Результаты моделирования кометы C/2012 S1 (ISON). Сравнение наборов из двух изофот: точечные – модельные, сплошной линией – наблюдательные.

была обнаружена и в наземных изображениях, хотя и с более низким пространственным разрешением, и сохранялась относительно неизменной с марта по май 2013 г. (Knight и др., 2013).

Применение цифровых фильтров и $1/\rho$ модели к наземным наблюдениям кометы C/2012 S1 (ISON), полученных с октября по ноябрь 2013 года (Scarmato, 2014), также показало наличие у кометы джетовых структур в кометной коме. Наши наблюдения кометы также были выполнены в этот период. Поэтому нами была использована методика цифровой фильтрации для поиска и выделения мало контрастных структур на наших изображениях.

Для выделения мало контрастных структур на изображениях пылевой комы кометы C/2012 S1 (ISON) мы использовали программу Астроарт (<http://www.msb-astroart.com/>) оснащенную рядом цифровых фильтров. Для исследования морфологии в комете использовалась методика выделения структур в коме, примененная для кометы C/2002 C1 (Ikeya-Zhang) в статье Manzini и др., 2007, для комет Schwassmann-Wachmann и C/2003 WT42 (LINEAR) (Korsun и др., 2008; 2010; Ivanova и др., 2012), а также для кометы C/2012 S1 (ISON) (Scarmato, 2014) и показала хорошие результаты. Более детальное описание используемых фильтров представлено в статье (Ivanova и др., 2012).

На рис. 3 представлены суммарное изображение в фильтре R_c и выделенные структуры в коме с помощью цифровых фильтров. Мы можем видеть структуру (джет) в направлении на Солнце.

Аналогичную структуру мы можем видеть на обработанных изображениях, представленных в статье Scarmato (2014), полученных 15 октября 2013 г.

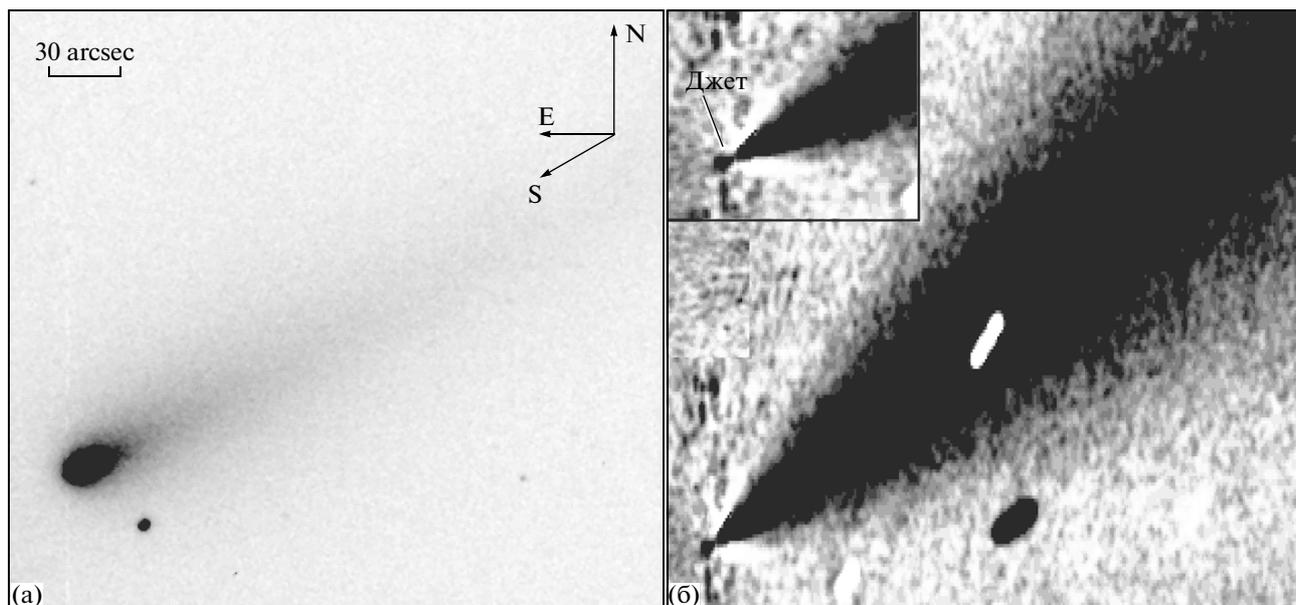


Рис. 3. Изображение кометы C/2012 S1 (ISON) в фильтре Rc (а) и изображение кометы после обработки цифровыми фильтрами (б). Также на рисунке представлены направления на север (N), восток (E) и на Солнце (S).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В статьях Cremonese и Fulle (1990) и Fulle и др. (1992) была озвучена идея о поиске корреляции свойств пыли между долгопериодическими кометами и динамически новыми кометами, которые впервые попадают во внутренние области Солнечной системы. Сравнительные данные по разным типам комет, представленные в статьях, показали, что у долгопериодических и динамически новых комет показатель степени закона распределения по размерам частиц заметно выше (от -3.0 до -3.5), чем у короткопериодических комет (-3.6 до -3.8). По данным нашего моделирования для динамически новой кометы C/2012 S1 (ISON) было получено, что показатель степени закона распределения по размерам пылинок имеет еще более высокое значение -2.5 . Такой показатель степени указывает на возрастание доли крупных частиц в хвосте кометы. Полученный нами показатель степени для кометы C/2012 S1 (ISON) коррелирует с оценками степени, полученными ранее для кометы D/1993 F2 Shoemaker-Levy-9 (Hahn, Rettig, 2000) и кометы 1P/Halley (Mazets et al., 1986). Также, согласно оценкам, приведенным в статье Vincent и др. (2010) показатель степени может колебаться в диапазоне от -2.5 до -3.0 для пылевых зерен с размерами от микрометра до миллиметра. Измерения потоков пыли при прохождении космических аппаратов вблизи ядер комет 1P/Halley (Giotto) и 81P/Wild 2 (Stardust) показали наличие частиц, которые имеют эквивалентные радиусы от нанометров до миллиметров, с показателем степени в диапазоне от -2 до -4 , в зависимости от их размеров и местонахождения в коме кометы (Kolokolova и др., 2010).

Оцененные радиусы пылинок, из которых был образован пылевой хвост кометы, лежат в диапазоне от 0.5 до 16.6 мкм, что коррелирует с оценками размеров пылинок полученных Wooden и др. (2014) для этой кометы.

Полученные в результате моделирования скорости, 17 – 130 м/с, согласуются с оценкой скоростей пыли кометы 9P/Tempel, выделенной из искусственно образованного кратера во время миссии Deep Impact. Комета тогда находилась на расстоянии около 1.5 а. е., и скорости, достигнутые пылью после пылегазового взаимодействия находились в диапазоне от 10 до 600 м/с с гауссовским максимумом около 190 м/с (Jorda и др., 2007).

В свою очередь, полученные результаты моделирования пылевых хвостов (Харчук и др., 2009; Харчук, Корсун, 2010) для динамически новых комет C/1995 O1 (Hale-Bopp) и C/2006 P1 (McNaught) показали, что показатель степени закона распределения по размерам пылевых частиц в среднем порядка -3.6 ... -3.5 , что соответствует верхнему пределу значений показателя для долгопериодических комет и нижней границе для короткопериодических комет.

На момент наблюдения в спектре кометы наблюдался ряд эмиссий, которые попадают в видимую область (DiSanti и др., 2014), поэтому полученные нами изображения в широкополосных BVRC фильтрах мы не могли использовать для реалистичной оценки цвета и продуктивности пыли. По полученным данным мы оценили абсолютную звездную величину кометы на момент наблюдения $9.2^m \pm 0.01$, которая соответствует результатам, представленным в литературе.

Была исследована морфология комы кометы. Нам удалось выделить структуру с помощью цифровых фильтров и метода удаления низкочастотных трендов. На изображениях, полученных 11 октября 2013 г., был выделен джет в солнечном направлении, что коррелирует с результатами, представленными в литературе, и подтверждает значительную вспышечную активность кометы вблизи перигелия.

Авторы выражают признательность Н.В. Борису за помощь в организации наблюдений кометы на телескопе Zeiss-1000 САО РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента Украины для молодых ученых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Карташева Т.А., Чунакова Н.М.* Спектральная прозрачность атмосферы в САО АН СССР в 1974–1976 гг. // *Астрофиз. исслед. Изв. САО.* 1978. Т. 10. С. 44.
- Харчук С., Корсун П., Микуш Г.* Модельный анализ пылевого хвоста кометы Хейла-Боппа // *Кинемат. и физ. небесн. тел.* 2009. Т. 25. № 5. С. 268–276.
- Харчук С.В., Корсун П.П.* Полосоподобные детали в пылевом хвосте кометы C/2006 P1 (Мак-Нота) // *Кинемат. и физ. небесн. тел.* 2010. Т. 26. № 6. С. 68–75.
- Cashwell E.D., Everett C.J.* The Monte Carlo Method for Random Walk Problems. New York: Pergamon Press, 1959.
- Chörny G.F.* Estimations of the energy quasi-integral of the restricted three-body problem // *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 2005. V. 5 (Suppl.). P. 500–503.
- Chörny G.F.* Quasiintegrals of the photogravitational eccentric restricted three-body problem with Poynting-Robertson drag // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2007. V. 97. P. 229–248.
- Cremonese G., Fulle M.* The dust tail of Comet Wilson 1987VII // *Astron. J.* 1990. V. 100. P. 1285–1292.
- Curdt W., Boehnhardt H., Vincent J.B., Solanki S.K., Schühle U., Teriaca L.* Scattered Lyman- α radiation of comet 2012/S1 (ISON) observed by SUMER/SOHO // *Astron and Astrophys.* 2014. V. 567. L1.
- Cochran A.* Review of the advances in comet studies // *Talk in ACM 2014, Helsinki.*
- Dello Russo N., Vervack R., Weaver H., Lisse C., Kawakita H., Kobayashi H., McKay A., Cochran A., Harris W., Biver N., Bockelee-Morvan D., Crovisier J., Jehin E., DiSanti M.* The evolving chemical composition of C/2012 S1 ISON as it approached the Sun // *Abstr. book in ACM 2014, Helsinki.*
- DiSanti B., Gibb E., Villanueva G., Paganini L., Mumma M., Keane Ja., Meech K., Blake G., McKay A.* The chemical composition of comet C/2012 S1 (ISON) between 1.2 au and 0.35 au from the Sun // *Abstr. book in ACM 2014, Helsinki.*
- Fulle M., Cremonese G., Jockers K., Rauer H.* The dust tail of Comet Liller 1988 V // *Astron. and Astrophys.* 1992. V. 253. № 2. P. 615–624.
- Jorda L., Lamy P., Faury G., Keller H.U., Hviid S., Küppers M., Koschny D., Lecacheux J., Gutiérrez P., Lara L.M.* Properties of the dust cloud caused by the Deep Impact experiment // *Icarus.* 2007. V. 187. P. 208–219.
- Ivanova A.V., Afanasiev V.L., Korsun P.P., Baranskii A.R., Andreev M.V., Ponomarenko V.A.* The rotation period of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 determined from the dust structures (Jets) in the coma // *Sol. Syst. Res.* 2012. V. 46(4). P. 313–319.
- Hahn J.M., Rettig T.W.* Comet Shoemaker–Levy 9 Dust Size and Velocity Distributions // *Astron. and Astrophys.* 2000. V. 146. P. 501–513.
- Knight M., Battams K., Sekanina Z., Boehnhardt H., Vincent J.B., Chifu C., Inhester B., Oklay N., Podlipnik B., Snodgrass C., Tubiana C. C.* Comet C/2012 S1 (ISON) // *CBET.* 2013. 3731. P. 1.
- Kolokolova L., Kimura H.* Comet dust as a mixture of aggregates and solid particles: Model consistent with ground-based and space-mission results // *Earth, Planets and Space.* 2010. V. 62. № 1. P. 17–21.
- Korsun P.P., Ivanova O.V., Afanasiev V.L.* C/2002 VQ94 (LINEAR) and 29P/Schwassmann Wachmann 1 – CO⁺ and N₂ + rich comets // *Icarus.* 2008. V. 198. P. 465–471.
- Korsun P., Kulyk I., Ivanova O., Afanasiev V., Kugel F., Rinner C., Ivashchenko Yu.* Dust tail of the active distant Comet C/2003 WT42 (LINEAR) studied with photometric and spectroscopic observations // *Icarus.* 2010. V. 210. № 2. P. 916–929.
- Landolt A.U.* UBVR photometric standard stars in the magnitude range 11.5–16.0 around the celestial equator // *Astron. J.* 1992. V. 104. № 1. P. 340–371, 436–491.
- Landsman W.B.* The IDL astronomy user's library, 1993.
- Li J.Y., Kelley M.S., Knight M.M., Farnham T.L., Weaver H.A., A'Hearn M.F., Mutchler M.J., Kolokolova L., Lamy P., Toth I.* Characterizing the dust coma of comet C/2012 S1 (ISON) at 4.15 AU from the Sun // *Astrophys. J.* 2013. V. 779(1). L3.
- Manzini F., Schwarz G., Cosmovici C.B., Guaita C., Comolli L., Brunati A., Crippa R.* Comet Ikeya-Zhang (C/2002 C1): Determination of the rotation period from observations of morphological structures // *Earth, Moon, and Planets.* 2007. V. 100. P. 1–16.
- Mazets E.P., Aptekar R.L., Golenetskii S.V., Guryan Yu.A., Dyachkov A.V., Ilyinskii V.N., Panov V.N., Petrov G.G., Savvin A.V., Sagdeev R.Z., Sokolov I.A., Khavenson N.G., Shapiro V.D., Shevchenko V.I.* Comet Halley dust environment from SP-2 detector measurements // *Nature.* 1986. V. 321. P. 276–278.
- Novski V., Novichonok A., Burhonov O., Ryan W.H., Ryan E.V., Sato H., Guido E., Sostero G., Howes N., Williams G.V.* C/2012 S1 (ISON) // *CBET.* 2012. 3238. 1.
- Sekanina Z., Larson S.M., Hainaut O., Smette A., West R.M.* Major outburst of periodic Comet Halley at a heliocentric distance of 14 AU // *Astron. and Astrophys.* 1992. V. 263. P. 367–386.
- Sekanina Z., Kracht R.* Disintegration of Comet C/2012 S1 (ISON) Shortly Before Perihelion: Evidence from Independent Data Sets // *arXiv preprint arXiv: 1404.5968.* 2014.
- Scarmato T.* Sungrazer Comet C/2012 S1 (ISON): Curve of light, nucleus size, rotation and peculiar structures in the coma and tail // *arXiv preprint arXiv: 1405.3112.* 2014.
- Vincent J.-B., Bönhardt H., Lara L.M.* A numerical model of cometary dust coma structures Application to comet 9P/Tempel 1 // *Astron. and Astrophys.* 2010. V. 512. id.A60. P. 1–8.
- Williams G.V.* Comet C/2012 S1 (ISON) // *MPEC.* 2013. V07.
- Wooden D. H., De Buizer J. M., Kelley M. S., Woodward C. E., Harker D. E., Reach W. T., Sitko M. L., Russell R. W., Gehrz R. D., De Pater I., Kolokolova L.* Comet C/2012 S1 (ISON)'s carbon-rich and micron-size-dominated coma dust // *ACM.* 2014. Helsinki.