

УДК 523.64

КОМЕТА ЕЛЕНИНА (C/2010 X1). НЕСБЫВШИЕСЯ НАДЕЖДЫ© 2012 П. П. Корсун^{1*}, И. В. Кулик¹, А. В. Моисеев², В. Л. Афанасьев²¹Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 03680 Украина²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 16 мая 2012 года; принята в печать 30 августа 2012 года

Выполнен анализ фотометрических и спектральных данных, полученных для кометы C/2010 X1 (Elenin), когда она находилась на расстоянии 2.92 а.е. от Солнца. Наблюдения были проведены в первичном фокусе 6-м телескопа БТА с использованием фокального редуктора SCORPIO. Звездная величина кометы, измеренная в фильтре R_c с апертурой радиусом $9''$, составила $16^m8 \pm 0^m1$. Рассчитанная пылепроизводительность оценивается около 6 кг/с. В коме кометы зарегистрированы эмиссии фиолетовой системы молекулы CN в полосе (0–0) и ряд кантов эмиссионных полос молекулы C₃. Газопродуктивность молекул определена с помощью модели Хазера и составляет 1.41×10^{24} молекул в секунду (мол/с) и 4.20×10^{23} мол/с для CN и C₃, соответственно. Отношение газопродуктивностей $\log[Q(C_3)/Q(CN)] = -0.85$, что близко к среднему значению, определенному для значительного количества комет. Нормированный спектральный градиент пыли кометы, определенный для спектрального диапазона 4430–6840 Å, составляет $14.3 \pm 1.2\%$.

Ключевые слова: кометы—кометы: индивидуальные: C/2010 X1 (комета Еленина)

1. ВВЕДЕНИЕ

Комета C/2010 X1 (Elenin) была открыта 10 декабря 2010 г. российским астрономом Леонидом Елениным [1]. Открытие было сделано с помощью 45-см астрографа на российской обсерватории ISON-NM, которая расположена в американском штате Нью-Мексико (координаты $32^\circ 54' 12''$ с.ш., $105^\circ 31' 42''$ з.д., высота над уровнем моря 2217 м), полностью автоматизирована и управляется дистанционно. На четырех кадрах, полученных за промежуток времени 10.42–10.46 декабря 2010 г., интегральный блеск кометы оценивался в 19^m5 – 19^m6 . Размер диффузной комы кометы, которая имела форму слезы, был $6''$, а короткий хвост длиной в 10 – $12''$ имел позиционный угол 298° . На момент открытия комета находилась на расстоянии 4.22 а.е. от Солнца и 4.31 а.е. от Земли. Согласно вычисленной орбите, ожидалось, что комета пройдет точку перигелия 10.7 сентября 2011 г. на расстоянии 0.48 а.е. от Солнца. Комета принадлежит к классу динамически новых комет, то есть это ее первый визит из облака Оорта к окрестностям Солнца. Если предположить, что возрастание яркости кометы будет типичным для динамически новых комет, то на момент максимального сближения с Землей после прохождения

перигелия её яркость могла бы достигнуть около 4^m . Вплоть до середины августа 2011 г. поведение кометы соответствовало предположениям, о чём свидетельствуют многочисленные оценки её яркости [2, 3]. 30 июля 2011 г., когда комета находилась на расстоянии 1.07 а.е. от Солнца, были проведены её наблюдения в субмиллиметровом диапазоне [4]. В полученных спектрах была зарегистрирована эмиссионная линия HCN, а темп поступления этого вещества в кому кометы в предположении изотропного его истечения со скоростью 500 м/сек составлял 1.5×10^{25} мол/с. Начиная с 17 августа, когда яркость кометы достигла примерно 8^m1 , наблюдатели стали отмечать падение ее яркости и заметные изменения морфологии комы. Возможной причиной этому могло стать воздействие коронального выброса с Солнца, который настиг комету 19 августа. Процесс взаимодействия выброса с комой кометы детально зафиксирован космическим аппаратом СТЕРЕО-В [5]. К концу августа, когда комета вошла в соединение с Солнцем, ее яркость, вместо возрастания, упала приблизительно до 12^m , а кома постепенно менялась, становясь все более вытянутой по форме и напоминая сигару. Это было явным признаком того, что уровень активности кометы катастрофически быстро падает. Подтверждением этого стали радионаблюдения кометы, выполненные с помощью 100-м радиотелескопа (Грин Бэнк) 7 сентября

*E-mail: korsun@mao.kiev.ua

2011 г. Эмиссия ОН не была зарегистрирована, и оценен лишь верхний предел газопроизводительности ОН, $Q(\text{OH}) < 3.0 \times 10^{27}$ мол/сек [6]. После появления кометы на утреннем небе активные поиски позволили обнаружить на месте кометы мало контрастное сильно вытянутое пятно без какого-либо сгущения, длина которого превышала 1° [7].

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Мы наблюдали комету C/2010 X1 (Elenin) 28 марта 2011 г. В этот момент она находилась на расстоянии 2.92 а.е. от Солнца и 1.95 а.е. от Земли, ее интегральная звездная величина была 16^m8 . Наблюдения выполнены с помощью универсального редуктора светосилы SCORPIO, установленного в прямом фокусе 6-м телескопа БТА (САО РАН) [8]. Прибор SCORPIO в качестве приемника излучения, в котором используется ПЗС матрица E2V 42–90 размером $2\text{K} \times 4.6\text{K}$, был задействован как в фотометрическом, так и в спектральном режимах.

Для фотометрических наблюдений использовался фильтр R_c с центральной длиной волны 6030 \AA и полушириной (FWHM) 1500 \AA . Этот фильтр достаточно близко реализует красную полосу фотометрической системы Джонсона-Коузинса. Зарегистрировано 9 кадров с экспозициями от 30 до 120 секунд. Размер полученных изображений составляет $6'.1 \times 6'.1$, а масштаб изображений равен $0''.18$ на пиксель. Для уменьшения избыточности информации и повышения отношения сигнал/шум (S/N) изображения сохранялись с бинированием равным 2, поэтому рабочий масштаб изображений составляет $0''.36$ на пиксель. В качестве плоских полей снималось сумеречное утреннее небо. Для абсолютизации фотометрических измерений были получены изображения звездного поля PG 1657+078 со стандартными звездами из каталога Ландольта [9]. Так как в течение ночи погода не была устойчиво фотометрической, полученные спектры стандартной звезды HZ 44 также использовались для абсолютизации фотометрических измерений в качестве контроля [10].

Спектральные наблюдения проводились в режиме длинной щели. Высота щели составляла $6'.1$, а ширина — $1''$. В качестве диспергирующего элемента использовалась голографическая решетка VPHG 940. Из-за низкой квантовой эффективности решетки и приемника излучения в голубой области спектра и отсутствия фильтра разделения порядков (для красной области) рабочий диапазон длин волн составил $3800\text{--}7500 \text{ \AA}$. Спектральное

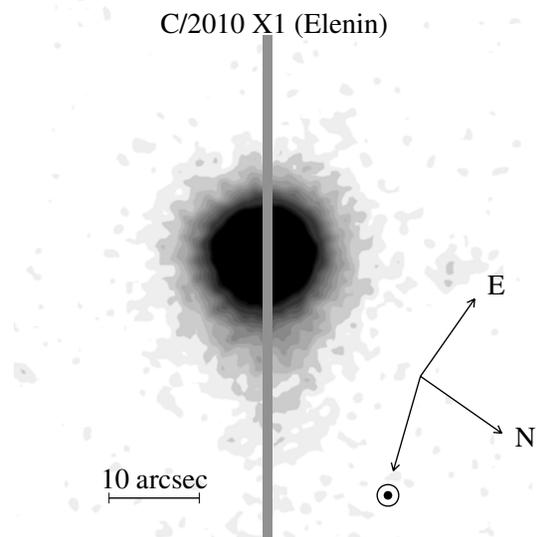


Рис. 1. Общий вид кометы C/2010 X1 (Elenin) в момент наблюдений. Показаны проекция щели спектрографа на кому кометы, направления на север, восток и Солнце.

разрешение на полученных спектрах составляет примерно 5 \AA . Более детальная информация, касающаяся наблюдательного материала, размещена в Таблице 1. Общий вид кометы и проекцию щели спектрографа на кому кометы можно видеть на Рис. 1. Калибровка спектров по длинам волн осуществлялась с помощью лампы, заполненной смесью He-Ne-Ag газов. Для перевода спектров кометы в абсолютные энергетические единицы наблюдался спектрофотометрический стандарт HZ 44 [10], а спектральная зависимость коэффициента пропускания земной атмосферы бралась из работы Карташевой и Чунаковой [11]. Спектр звезды-стандарта экспонировался с широкой щелью равной $20''$, чтобы избежать потерь света на щели. Во время экспозиции зенитное расстояние HZ 44 составляло $38^\circ4$. Спектр свечения утреннего неба экспонировался для более корректного вычитания спектра ночного неба. Для компенсации различной чувствительности пикселей матрицы регистрировался спектр лампы накаливания со сглаженным распределением энергии.

3. ФОТОМЕТРИЯ КОМЕТЫ

3.1. Предварительная обработка изображений

Анализ спектра кометы, результаты которого приведены в следующем параграфе, показал отсутствие газовых эмиссий в области спектра, которую покрывает фильтр R_c . Поэтому все полученные изображения были обработаны с целью анализа пылевой компоненты кометной комы.

Таблица 1. Журнал наблюдений кометы С/2010 X1 (Elenin)

Момент (начало) наблюдений, UT	Экспозиция, с	Δ , а.е.	r , а.е.	Z , град.	Данные
28.8104 марта 2011 г.	30	1.954	2.916	41.5	изображение
28.8135 марта 2011 г.	30	1.954	2.916	41.3	изображение
28.8185 марта 2011 г.	30	1.954	2.916	41.2	изображение
28.8590 марта 2011 г.	30	1.954	2.915	41.1	изображение
28.8305 марта 2011 г.	600	1.954	2.916	40.6	спектр
28.8404 марта 2011 г.	600	1.954	2.916	40.5	спектр
28.8486 марта 2011 г.	600	1.954	2.916	40.7	спектр
28.8613 марта 2011 г.	600	1.954	2.915	41.2	спектр
28.8694 марта 2011 г.	600	1.954	2.915	41.7	спектр
28.8780 марта 2011 г.	600	1.954	2.915	42.5	спектр
28.8861 марта 2011 г.	600	1.954	2.915	43.3	спектр

Для стандартной обработки ПЗС-кадров были созданы мастер-кадры нулевой экспозиции 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 стандартной процедуры `sky` пакета IDL, в том числе и для кадров с кометой, так как изображение кометы занимает небольшую площадь на кадрах, не более $1 \square'$. Поскольку изображение кометы смещается относительно звезд поля, все кадры необходимо было преобразовать таким образом, чтобы изображение кометы оставалось “неподвижным”. С этой целью положения центров избранных звезд поля и центра кометы были измерены с субпиксельной точностью. Затем все изображения смещались таким образом, чтобы на выходе получить набор кадров, приведенных к единому центру, соответствующему координатам центра изображения кометы на одном из кадров. После вычитания фона неба межкадровая медианная фильтрация применялась к набору этих кадров, на каждом из которых фотометрический центр кометы имел одинаковые координаты, а центры звезд были смещены от кадра к кадру. Межкадровая медианная фильтрация позволила увеличить отношение S/N , а также частично избавиться от звезд поля.

Эта же последовательность процедур была проделана еще раз, но теперь уже с тем, чтобы привести центры всех кадров к одной и той же координате, соответствующей центру звезды, выбранной на одном из кадров. Этот набор кадров после межкадровой медианной фильтрации давал изоб-

ражение, которое использовалось для апертурной фотометрии звезд поля.

Как уже было отмечено выше, атмосферная прозрачность менялась в ходе наблюдений, и между наблюдениями кометы и площадки Ландольта PG 1657+078 прошло значительное время. Вследствие этого звезды поля служили промежуточным звеном абсолютизации фотометрических измерений кометы С/2010 X1. Кроме того, параллельная калибровка производилась также с использованием спектрофотометрического стандарта HZ 44 для контроля фотометрических измерений.

Для апертурной фотометрии звезд использовалась диафрагма радиусом $9''$, что было обусловлено тем, что полуширина гауссового профиля для звезд поля составляла около $3''$. Остаточный фон неба оценивался при помощи кольцевой апертуры.

Для измерений изображений кометы использовался набор апертур разного радиуса, которые позволяли захватить частично или полностью кометную кому. На Рис. 2 представлена зависимость величины S/N кометы от размера выбранной апертуры. Горизонтальная линия отмечает среднеквадратичную ошибку фона неба, вычисленную с помощью процедуры `sky`. Видно, что кометная кома на расстоянии более чем $30''$ от центрального сгущения находится на уровне или ниже шума изображения. Поэтому в качестве внешней границы комы мы принимали это расстояние, которое соответствует примерно 35 000 км в проекции на картинную плоскость при расстоянии кометы от Земли 1.954 а.е., а также соответствует поверхностной яркости 26^m2 на пиксель.

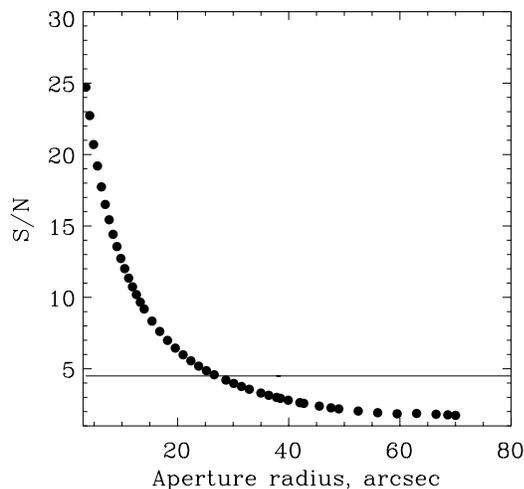


Рис. 2. Зависимость отношения S/N от радиуса фотометрической апертуры. Горизонтальная линия отмечает стандартное отклонение величины среднего фона неба на кадре с кометой.

3.2. Фотометрическая привязка

Для фотометрической привязки мы использовали каталог USNO-A2.0. Хотя этот каталог не является фотометрическим каталогом, в литературе можно найти примеры его успешного применения для стандартизации фотометрических измерений комет [12–15]. Звездные величины B и R ярких звезд каталога USNO-A2.0 привязаны к высокоточному каталогу Tycho, и, как было показано в работе Киджера и др. [16], среднеквадратичная ошибка для более чем 50% звезд каталога не превышает $0^{\text{m}}.2$. Киджер [14] предложил уравнение, с помощью которого R -величины каталога USNO-A2.0 можно привести к стандартной фотометрической системе Джонсона-Моргана-Коузинса. Чтобы проверить вид связи между R -величинами USNO-A2.0 и стандартной фотометрической системой, звездные величины звезд каталога, которые попали в площадку PG 1657+078 и оказались пригодными для измерения, были определены в стандартной системе посредством привязки к звездам Ландольта. Найденное уравнение связи, оказавшееся близким к тому, которое использовали Киджер [14] и Хикс и др. [15], имеет вид:

$$R_{\text{Landolt}} = 1.062 (R_{\text{USNOA2.0}} - 0.55). \quad (1)$$

С помощью этого уравнения измеренные R -величины звезд поля USNO-A2.0 на снимке с кометой C/2010 X1 были приведены к стандартной фотометрической системе каталога Ландольта. Ошибка регрессии составляет $0^{\text{m}}.12$. Измерения стандартной звезды ZH 44 использовались для фотометрической калибровки в качестве контроля. Для

вычисления потока от стандартной звезды была использована процедура свертки спектра звезды, исправленного за атмосферное поглощение, с кривой пропускания фильтра R_c . Звездная величина кометы C/2010 X1, измеренная с апертурой радиусом $9''$ составила $16^{\text{m}}.8 \pm 0^{\text{m}}.1$ и $17^{\text{m}}.02 \pm 0^{\text{m}}.02$ при использовании звезд поля и спектрофотометрического стандарта ZH 44 соответственно. Расхождение обусловлено разницей нуль-пунктов фотометрических систем, так как спектрофотометрический стандарт привязан к AB -фотометрической системе Оке [10]. Эта систематическая разница не влияет на оценку пылепроизводительности, так как автоматически учитывается за счет различной звездной величины Солнца в двух разных фотометрических системах. При вычислении ошибки звездной величины суммировались статистические ошибки, которые обусловлены отношением S/N для кометы и звезд сравнения, ошибки оценки коэффициента прозрачности атмосферы, а также ошибки каталожных звездных величин звезд-стандартов (в случае использования каталога USNO-A2.0 ошибка для звезд сравнения принималась равной $0^{\text{m}}.12$).

3.3. Оценка параметра Afp

Для того, чтобы сравнить наблюдения комет, выполненные в разные эпохи, на разных инструментах и при различных геометрических условиях наблюдений, широко используется величина Afp , которая характеризует пылепроизводительность ядра кометы. Эта величина была введена Ахирном и др. [17] и определяется отношением эффективного поперечного сечения рассеяния всех частиц, попадающих в поле зрения приемника, к проекции его поля зрения на небесную сферу. Математическое выражение, которое часто используется для определения Afp имеет следующий вид [18]:

$$Afp = (4r^2 \Delta^2 10^{0.4(m_{\odot} - m_R)}) / \rho. \quad (2)$$

В данном выражении величина Afp выражена в см; Δ — расстояние от Земли до кометы, выраженное также в см; r — гелиоцентрическое расстояние кометы, выраженное в астрономических единицах; ρ — радиус апертуры, использовавшейся для интегрирования сигнала от кометы, спроектированный на небесную сферу и выраженный в см, то есть соответствующий кометоцентрическим радиусам; m_{\odot} и m_R — видимые звездные величины Солнца и кометы соответственно в полосе R . R -величина Солнца бралась равной $-26^{\text{m}}.94$ и $-27^{\text{m}}.26$ в случае использования для фотометрической калибровки спектрофотометрического стандарта ZH 44 и звезд каталога USNO-A2.0 соответственно. При использовании Afp в качестве параметра для оценки

пылепроизводительности предполагается идеальное условие стационарного истечения вещества из ядра кометы, что в действительности, вероятно, редко имеет место. Воронцов-Вельяминов [19], а затем Коноплева [20] установили, что поверхностная плотность в атмосферах комет в картинной плоскости изменяется примерно как ρ^{-1} , а объемная плотность молекул на луче зрения примерно как ρ^{-2} . В соответствии с этим, и при идеальном условии стационарного истечения вещества с поверхности ядра кометы, градиент изменения профиля интегральной поверхностной яркости должен быть равен -1 . Рис. 3 представляет логарифмическую зависимость изменения интегральной поверхностной яркости, измеренной с апертурами, соответствующими пространственным кометоцентрическим радиусам в интервале от 5000 км до 30 000 км. Градиент изменения интегральной поверхностной яркости составляет соответственно -1.60 ± 0.02 и -1.56 ± 0.01 в случае использования звезд каталога USNO-A2.0 и стандартной звезды ZH 44 для фотометрической калибровки. Как отмечают Лоури и Фицсимонс [21], отклонение градиента изменения поверхностной яркости от -1 может объясняться воздействием силы давления солнечной радиации на пылевые частицы, но и в этом случае абсолютная величина градиента не должна превышать 1.5. Большие абсолютные величины градиента поверхностной яркости указывают на возможную сублимацию пылевых частиц. Как видно из оценок градиента изменения поверхностной яркости кометы С/2010 X1, нестационарные процессы имеют место в пылевой коме кометы. Несмотря на это, мы посчитали величину $Af\rho$ которая составила 58 ± 7 см и 60 ± 2 см при фотометрической калибровке по звездам каталога USNO-A2.0 и ZH 44 соответственно и при использовании апертуры в $9''$.

3.4. Оценки пылепроизводительности кометного ядра

Для вычисления пылепроизводительности ядра кометы С/2010 X1 использовались два разных подхода, которые основаны на измерениях интегрального блеска кометной комы, но несколько различаются методически. Один из них, предложенный Джюитом [22], предполагает оценку видимой звездной величины пылевой комы кометы в кольцевой апертуре:

$$m_d = -2.5 \log(10^{-0.4m_2} - 10^{-0.4m_1}). \quad (3)$$

Здесь m_1 и m_2 — звездные величины соответствующие апертурным радиусам ρ_1 и ρ_2 . Связь звездной величины m_d с p_r — геометрическим альбедо частиц, и C_d — эффективным сечением рассеяния частиц пыли, содержащихся в кольцевой апертуре,

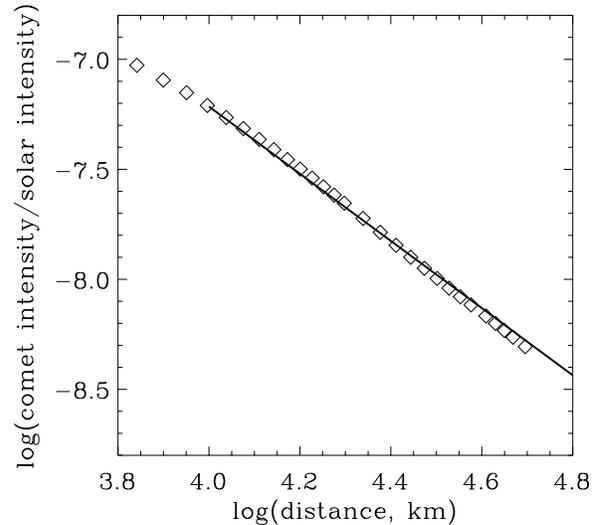


Рис. 3. Изменение профиля поверхностной яркости кометы с расстоянием от ядра кометы, выраженным в км. Аппроксимация изменения поверхностной яркости проводилась методом линейной регрессии.

спроецированной на небесную сферу, выражается соотношением из [23]:

$$p_r \Phi(\alpha) C_d = 2.25 \times 10^{22} r^2 \Delta^2 10^{-0.4(m_d - m_\odot)} \quad (4)$$

Здесь r и Δ — гелиоцентрическое и геоцентрическое расстояния, выраженные в астрономических единицах; m_\odot — видимая звездная величина Солнца для соответствующего фильтра; $\Phi(\alpha) = 10^{-0.4 \times 0.04 \times \alpha}$ — фазовая функция, описывающая изменение блеска кометы, где α — фазовый угол кометы. Геометрическое альбедо мы принимали равным 0.1 [22]. В этой же работе показано, что эффективное сечение рассеяния частиц и общая масса частиц, попадающих в кольцевую апертуру, спроектированную на небесную сферу, выражается соотношением:

$$M_d = \frac{4}{3} \rho_{\text{пыль}} \sqrt{a_{\min} a_{\max}} C_d. \quad (5)$$

Здесь $\rho_{\text{пыль}}$ — плотность пылевой составляющей комы кометы, которая принималась не зависящей от радиуса частиц и равной 1000 кг/м^3 ; a_{\min} и a_{\max} — минимальный и максимальный радиусы пылевых частиц, которые мы принимали $1 \times 10^{-1} \text{ мкм}$ и $1 \times 10^3 \text{ мкм}$ соответственно [24]. Для оценки пылепроизводительности в качестве параметра вводится время пребывания частицы в пространстве, ограниченном кометоцентрическими радиусами, которые соответствуют апертурным радиусам ρ_1 и ρ_2 :

$$\tau(r) = 1.5 \times 10^{11} \Delta (\rho_2 - \rho_1) / v(r). \quad (6)$$

Таблица 2. Оценки пылепроизводительности ядра кометы C/2010 X1

Метод фотом. стандартизации	Кометоцентрич. радиус, км	Звездная величина	$Af\rho$, см	Пылепроизводительность, кг/с
USNO-A2.0	~12 000	16.8 ± 0.1	58 ± 7	5.8
ZH 44	~12 000	17.02 ± 0.02	60 ± 2	6.1
USNO-A2.0*	12 000–30 000	17.67**	—	6.2

* Метод определения пылепроизводительности из [22].

** Интегральная звездная величина, полученная из кольцевой диафрагмы (см. текст).

Здесь Δ выражено в астрономических единицах, ρ_1 и ρ_2 — в радианах. Для вычисления скорости истечения частиц из головы кометы, $v(r)$, использовалось общепринятое допущение $v(r) = 535 r^{-0.6}$, при этом скорость исчисляется в м/с, а гелиоцентрическое расстояние — в астрономических единицах. Соотношение $M_d/\tau(r)$ позволяет оценить искомую пылепроизводительность кометного ядра.

Формула (4) часто используется в литературе для оценки эффективного радиуса ядер комет, принимая во внимание простое соотношение $C_d = \pi R^2$. Хотя подобные оценки размеров ядер допустимы для комет, пребывающих на больших гелиоцентрических расстояниях и не проявляющих активности, мы оценили верхнюю границу размера ядра кометы C/2010 X1. Учитывая, что фотометрические профили точечных изображений звезд поля описываются гауссовой кривой с FWHM около $2''5$, мы оценили величину C_d , исходя из звездной величины, подсчитанной с наименьшей апертурой равной $2 \times \text{FWHM}$. Таким образом, верхний предел радиуса кометы C/2010 X1 оценивается нами в 3.5 км.

Другой подход для вычисления пылепроизводительности кометного ядра состоит в вычислении числа частиц, Q_N , населяющих кому кометы, используя известный параметр $Af\rho$ [25]:

$$Q_N = \frac{Af\rho}{2\pi^2 A_B \Phi(\alpha) \int ((f(a) a^2)/v(a)) da}. \quad (7)$$

В этом выражении a — радиус пылевой частицы, A_B — альbedo Бонда частицы, которое мы принимали равным 0.2, основываясь на дискуссии, представленной в работе [25], $\Phi(\alpha)$ — фазовая функция, которую мы принимали в виде, упомянутом выше, $f(a)$ — нормированная функция распределения частиц по размерам, $v(a)$ — скорость частицы по отношению к ядру кометы, зависящая от радиуса частицы. Интегрирование проводилось в пределах $a_{\min} - a_{\max}$, соответствующим минимальному и максимальному радиусам частиц. Мы

принимали степенной закон распределения частиц по размерам в виде $f(a) = a^{-3.5}$. Методы оценки скорости частиц относительно ядра подробно дискутируются в работе [25], где авторы приводят результаты модельных расчетов скорости вылета частиц разных размеров. Опираясь на выводы, изложенные в этой работе, мы приняли для скорости частиц величину, определяющуюся соотношением $v = 0.535 r^{-0.6}$, где r — гелиоцентрическое расстояние, выраженное в астрономических единицах, а скорость — в км/сек. Пылепроизводительность кометного ядра рассчитывается при помощи следующего выражения:

$$Q_M = Q_N \frac{4\pi}{3} \int \rho_{\text{пыл}}(a) a^3 f(a) da. \quad (8)$$

Пределами интегрирования служат, как и в формуле (7), минимальный и максимальный радиусы пылевых частиц a_{\min} и a_{\max} . В данном выражении $\rho_{\text{пыл}}(a)$ — плотность пыли, зависящая от размеров частиц. Для оценки этой величины использовалось следующее соотношение в соответствии с [26]: $\rho_{\text{пыл}}(a) = \rho_0 - \rho_1 [a/(a - a_0)]$. Здесь $\rho_0 = 3.0 \text{ г/см}^3$ и $\rho_1 = 2.2 \text{ г/см}^3$, a выражено в мкм, a_0 равняется 2 мкм. Рассчитанная пылепроизводительность оценивается около 6 кг/сек и приведена в Таблице 2.

Из Таблицы 2 видно, что значения пылепроизводительности, вычисленные с использованием двух разных подходов, хорошо согласуются между собой. В работе [15] проанализирована большая выборка комет, $Af\rho$ которых могут служить оценками пылепроизводительности их ядер. Как показывают результаты, представленные в этой статье, большинство динамически новых комет, которые впервые попали во внутренние области Солнечной системы, подобно комете C/2010 X1, характеризуются значениями $Af\rho$ намного превышающими значение, которое получено нами для кометы Елены, даже в том случае, когда эти кометы пребывали на больших расстояниях от Солнца. $Af\rho$ кометы C/2010 X1 скорее сопоставимо с величинами

для периодических комет и, в частности, тех, которые уже наблюдались в предыдущих появлениях. В пользу этого свидетельствуют также результаты Елифани и др. [18], показавших, что, например, пылепроизводительность динамически новой кометы С/2007 D1 (LINEAR) составляла 530 кг/с на расстоянии 9.7 а.е. В другой работе Елифани и Паламбо [27] приведена зависимость пылепроизводительности ядер ряда короткопериодических комет от гелиоцентрического расстояния, откуда следует, что пылепроизводительность короткопериодических комет на расстояниях около 3 а.е. от Солнца, аналогичных тому, на котором пребывала комета Еленина во время наших наблюдений, оценивается около 1–10 кг/с, что сопоставимо с величиной пылепроизводительности, полученной в нашем исследовании.

4. СПЕКТРЫ КОМЕТЫ

4.1. Обработка спектров

Предварительная обработка спектров проводилась с помощью сервисных программных кодов, разработанных в САО. Она включает в себя вычитание нулевого кадра, коррекцию за плоское поле, компенсацию пространственной кривизны спектральных линий, привязку по длинам волн и представление данных с равномерным шагом по шкале длин волн. Для повышения отношения S/N было проведено сложение полученных спектров с использованием алгоритма робастного усреднения между кадрами. Такой метод сложения к тому же позволяет избавиться от следов космических частиц, имеющих на кадрах со спектрами кометы.

На каждом кадре с объектом кроме спектра кометы присутствует и спектр ночного неба. Для его корректного вычитания использовались спектры утреннего неба. Они дают информацию о пространственном распределении интенсивности вдоль щели спектрографа.

Для анализа распределения энергии в спектре кометы и поиска возможных молекулярных эмиссий мы получили одномерный спектр путем суммирования по пространственной координате. Дальнейшая корректировка одномерного спектра кометы проводилась путем компенсации искажений, которые вносят в наблюдаемый спектр атмосфера Земли, оптика телескопа и приемник излучения. Совокупность этих искажений оценивалась сравнением распределения энергии в спектре звезды-стандарта с результатом его регистрации наблюдательным комплексом. Окончательные поправки учитывали различия спектральной зависимости пропускания земной атмосферой на зенитном расстоянии звезды-стандарта и кометы в момент наблюдения.

4.2. Анализ спектра кометы

Результирующий спектр кометы С/2010 Х1 (Elenin) после проведения описанных выше процедур представлен на Рис. 4а.

Для сравнения на этом же рисунке приведен спектр Солнца в относительной шкале интенсивностей [28]. Спектр Солнца приведен к спектральному разрешению в спектре кометы путем свертки с гауссианой, полуширина которой равна полуширине аппаратной функции. Качественный анализ спектра кометы указывает на наличие в нем молекулярных эмиссий и на различия в распределении энергии в континууме кометы и в спектре Солнца.

Спектральную зависимость различий континуумов кометы и Солнца, которая связана с различной эффективностью рассеяния солнечного излучения кометной пылью с длиной волны, можно оценить путем деления спектра кометы на спектр Солнца. В кривой результата деления участки, которые соответствуют длинам волн спектра с зарегистрированными молекулярными эмиссиями, заменены интерполированными значениями. Применив медианный фильтр с широким окном, мы получили сглаженный вариант этой кривой, которая представляет собой спектральную зависимость эффективности рассеяния солнечного света кометными пылинками. Результат представлен на Рис. 4б. Из рисунка видно, что в области длин волн больше примерно 4200 Å наблюдается почти линейное возрастание эффективности рассеяния с длиной волны, а в коротковолновой части спектра эффективность рассеяния резко падает с уменьшением длины волны.

Умножив спектр Солнца на кривую эффективности рассеяния, мы получим оценку реального континуума кометы (Рис. 4с). А после вычитания из наблюдаемого спектра континуума будем иметь потоки в молекулярных эмиссиях. Линейчатый спектр кометы представлен на Рис. 4д. Несмотря на сильную зашумленность эмиссионного спектра в голубой области спектра, нам все же удалось уверенно зарегистрировать ряд спектральных деталей, которые принадлежат излучению молекул в коме кометы. Их отождествление проводилось путем сравнения с лабораторными и вычисленными спектрами молекул, которые наблюдаются в спектрах комет в анализируемом участке спектра. Спектр молекулы CN был рассчитан с помощью пакета LIFBASE в предположении больцмановского распределения населенностей уровней при температуре 180 К [29], а для поиска полос С₃ были использованы данные анализа ее лабораторного эмиссионного спектра [30]. Результаты сравнения приведены на Рис. 5 и показывают, что

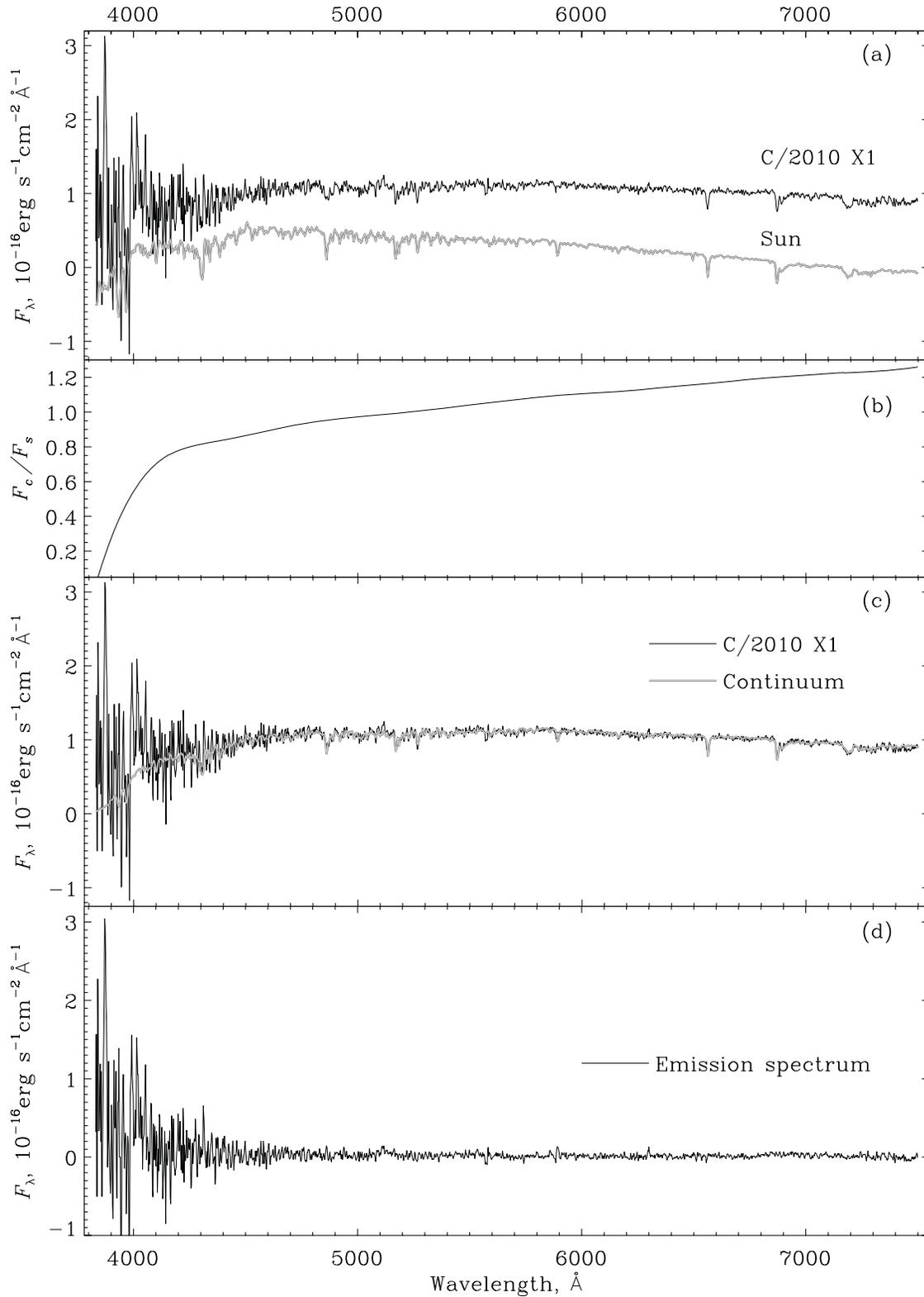


Рис. 4. Результаты обработки спектра кометы C/2010 X1 (Elenin); (a) распределение энергии в спектре кометы и произвольно нормированный спектр Солнца; (b) нормированная спектральная зависимость отражательной способности пыли, 1 соответствует длине волны 5200 \AA ; (c) спектр кометы и оценка континуума кометы; (d) эмиссионная составляющая в спектре кометы.

Таблица 3. Потоки и газопродуктивность зарегистрированных молекул

Молекула	Поток, эрг с ⁻¹ мол ⁻¹	Пределы интегрирования, Å	Газопродуктивность, мол/с
CN (0-0)	38.43×10^{-16}	3858–3888	1.41×10^{24}
C ₃	53.54×10^{-16}	3982–4085	4.20×10^{23}

в коме кометы мы зарегистрировали излучение молекулы CN в полосе (0–0) ее фиолетовой системы и ряд кантов эмиссионных полос молекулы C₃.

Потоки в полосах зарегистрированных молекул были измерены путем интегрирования эмиссионной составляющей спектра в соответствующих спектральных диапазонах. Величины потоков в полосах молекул CN и C₃ и диапазоны интегрирования приведены в Таблице 3.

Темп поступления этих молекул в кому кометы можно оценить, сделав ряд упрощающих предположений о физических процессах в коме кометы. Довольно часто, несмотря на примитивность, для этих целей используют модель Хазера [31]. В модели предполагается, что ядро кометы является точечным источником вещества, которое поступает в кому равновероятно во всех направлениях и с постоянной скоростью. В коме под воздействием солнечного излучения происходит фотодиссоциация молекул, называемых родительскими, а фрагменты распада, так называемые дочерние молекулы, продолжают радиальный разлет до их исчезновения. Именно наблюдения дочерних молекул мы и анализируем в наших исследованиях.

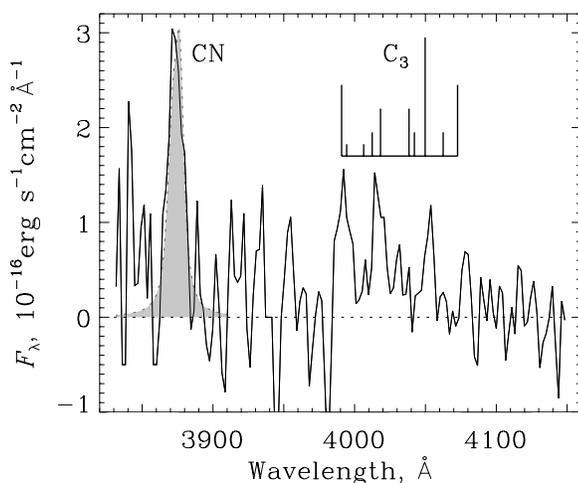


Рис. 5. Эмиссии в спектре кометы C/2010 X1 (Elenin). Вычисленный профиль полосы (0–0) молекулы CN заштрихован, а для молекулы C₃ представлены положения кантов полос, взятые из работы [30].

В рамках модели Хазера плотность вещества в столбе на луче зрения выражается через соотношения

$$N(x) = \frac{Q}{2\pi v} \frac{l_d}{l_p - l_d} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\frac{\sqrt{x^2+z^2}}{l_p}} - e^{-\frac{\sqrt{x^2+z^2}}{l_d}}}{x^2 + z^2} dz, \quad (9)$$

где Q — газопродуктивность изучаемого вещества, v — скорость его истечения, l_p и l_d — характерные масштабы для родительских и дочерних молекул, x — расстояние от ядра кометы в проекции на небесную сферу, а z — расстояние вдоль луча зрения.

Из наблюдений мы имеем потоки энергии в столбе на луче зрения. Поскольку преобладающим механизмом высвечивания молекулярных эмиссий в комах комет является резонансная флюоресценция, то для перевода наблюдаемых потоков $F(x)$ в плотность вещества в столбе на луче зрения $N(x)$ мы можем воспользоваться известными значениями эффективности флюоресценции (g -факторами) для соответствующих спектральных переходов. В этом случае справедливо соотношение:

$$N(x) = \frac{4\pi}{g} \frac{F(x)}{\Omega}. \quad (10)$$

Множитель $g/4\pi$ соответствует количеству энергии, переизлученной одной молекулой за секунду в телесный угол равный одному стерadianу. Ω — телесный угол, который определяется проекцией единичного элемента приемника излучения на небесную сферу.

Сравнивая наблюдаемые плотности в столбе на луче зрения с соответствующими вычисленными значениями по модели Хазера, мы можем определить искомую величину газопродуктивности. Обычно в подобных исследованиях сопоставляются модельные и наблюдаемые пространственные профили плотностей в столбе на луче зрения. В нашем случае, вследствие низкой эффективности приемной аппаратуры в фиолетовой части спектра и слабости анализируемого сигнала, мы использовали следующий подход.

Поскольку формула Хазера справедлива для круговой апертуры, то для определения газопродуктивности молекул CN и C₃ сравнивались

Таблица 4. Параметры, используемые для определения газопродуктивности (для $r = 1$ а.е.), и их зависимость от гелиоцентрического расстояния r [32]

Молекула	g -фактор, 10^{-13} эрг с^{-1} мол $^{-1}$	l_p , 10^4 км	l_d , 10^4 км
CN (0-0)	$5.8^* r^{-0.5}$	$3.0 r^{1.3}$	$19.9 r^{0.6}$
C ₃	$10.0 r^{-0.5}$	$0.6 r^{0.8}$	$8.9 r^{2.8}$

* Для гелиоцентрической скорости кометы -22.5 км/сек.

модельные и вычисленные по результатам наблюдений плотности количества частиц в апертуре, размер которой определяется пределами суммирования наблюдаемых спектров по пространственной координате, а именно $36''$. Щель спектрографа не является круговой апертурой, и для корректного применения формулы Хазера в измеренные данные нужно ввести множитель равный отношению площадей используемой апертуры и щели спектрографа в пределах этой апертуры.

Определяемые значения газопродуктивности в значительной степени зависят от используемых модельных параметров. Мы использовали набор модельных параметров (см. Таблицу 4), обоснованный в результате недавнего тщательного анализа длиннощелевых спектров 26 комет принадлежащих к разным динамическим группам [32].

Поскольку g -фактор для полосы CN (0-0) зависит ещё от гелиоцентрической скорости кометы, то его значение на момент наблюдения уточнялось, используя расчеты, выполненные в [33]. Для скорости истечения газа принималось значение, используемое в подавляющем большинстве подобных вычислений, 1 км/сек. Результаты оценок представлены в Таблице 3.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Что касается самого факта отождествления эмиссий в спектрах кометы C/2010 X1 (Elenin) на расстоянии около 3 а.е. от Солнца, то в этом нет ничего удивительного. Эмиссии молекул CN и C₃ на таком гелиоцентрическом расстоянии ранее наблюдались в ряде комет. Для этой же кометы в печати нет сведений о регистрации эмиссий в оптическом диапазоне спектра как на таком, так и на более близких гелиоцентрических расстояниях. Мы же, получив спектры кометы на расстоянии 2.92 а.е. от Солнца, имели надежду провести ее спектральные наблюдения и в период прохождения ею перигелия. К сожалению, комета, для которой ожидалось, что в окрестностях перигелия она

станет доступной для наблюдений широкому кругу исследователей, достигнув звездной величины примерно 4^m , при приближении к перигелию полностью прекратила свою активность и стала невидимой.

В результате анализа полученных нами спектров мы измерили потоки в зарегистрированных эмиссиях, а также оценили темп поступления молекул CN и C₃ в кому кометы. Полученные газопродуктивности — модельно зависимые величины [32, 34]. Если сравнивать наши результаты с массивом данных, полученным с таким же набором модельных параметров [32], то можно заключить, что они в общем согласуются с сопоставляемыми данными, но близки к их нижнему пределу и свидетельствуют о довольно низкой газопродуктивности кометы. Соотношение темпов поступления разных газов в кому кометы составляет $\log[Q(\text{C}_3)/Q(\text{CN})] = -0.85$. Это значение, напротив, близко к среднему значению для всего массива данных и подтверждает отсутствие изменения отношения газопродуктивностей с изменением гелиоцентрического расстояния.

Распределение энергии в непрерывном спектре свидетельствует о наличии эффекта покраснения, то есть о возрастании отражательной способности пылинок с увеличением длины волны,

$$S(\lambda) = F_c(\lambda)/F_s(\lambda), \quad (11)$$

где $F_c(\lambda)$ — поток от кометы, а $F_s(\lambda)$ — поток от Солнца (в данной работе он нормирован на поток от кометы на длине волны 5200 \AA). В голубой части спектра, примерно до длины волны 4200 \AA , кривая изменения отражательной способности возрастает довольно круто, далее ее крутизна заметно уменьшается. Нормированную отражательную способность S' можно описать как

$$S' = \frac{2}{(S_1 + S_2)} \frac{(S_2 - S_1)}{(\lambda_2 - \lambda_1)}. \quad (12)$$

S_1 и S_2 соответствуют измерениям на длинах волн λ_1 и λ_2 при $\lambda_2 > \lambda_1$. Обычно эту величину в исследованиях кометного континуума приводят в процентах на 1000 \AA . Для сравнения с ранее полученными результатами приведем результаты линейной аппроксимации наших данных для наиболее характерных спектральных диапазонов, которые определяются эффективными длинами волн фильтров для регистрации континуума (BC (4430 \AA), GC (5260 \AA) и RC (6840 \AA)) [35]: $20.7 \pm 0.9\%$ для диапазона $4430\text{--}5260 \text{ \AA}$, $11.2 \pm 0.4\%$ для диапазона $5260\text{--}6840 \text{ \AA}$ и $14.3 \pm 1.2\%$ для диапазона $4430\text{--}6840 \text{ \AA}$. Анализ цветовых особенностей пыли комет был предметом исследований, выполненных в [36]. Результатом этих исследований является вывод о том, что нормированная отража-

тельная способность уменьшается с возрастанием длины волны, а для оптического диапазона среднее значение этой величины составляет 13% и изменяется в пределах от 5% до 18%. Предыдущие исследования [26] дают значение для $S' \sim 7\%$ на 1000 Å. Измерения для отдельных комет имеют довольно значительный разброс. Так, в [37] определили, что для кометы С/2000 WM1 (LINEAR) нормированный спектральный градиент достигает 15%; Борисов и др. [38] приводят значение 6% для кометы 8P/Tuttle; а Лин и др. [39] зарегистрировали изменение нормированного спектрального градиента от 0.6% до 9.0% при наблюдениях кометы С/2004 Q2 (Machholz). Наши результаты, определенные для спектрального диапазона 4430–6840 Å, для которого наиболее часто проводятся подобные измерения, свидетельствуют, что спектральная зависимость рассеяния света пылинками кометы С/2010 X1 (Elenin), типична для совокупности ранее наблюденных комет.

Вычисленный градиент изменения профиля поверхностной яркости кометы, равный -1.56 ± 0.01 , значительно превышает ожидаемое значение при условии равномерного истечения вещества из ядра кометы. Значение A_{fr} , определенное с использованием апертуры, эквивалентной кометоцентрическому радиусу около 12 000 км, составляет 58 ± 10 см. Полученная пылепроизводительность ядра, около 6 кг/с, существенно ниже тех значений, которые приводятся в литературе для динамически новых комет, и гораздо лучше согласуется со значениями пылепроизводительности для короткопериодических комет, в частности, уже побывавших во внутренних областях Солнечной системы. Верхняя оценка радиуса кометы, сделанная на основании фотометрических измерений, составляет 3.5 км.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 16.552.11.7028, 16.518.11.7073).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Sergeev, A. Novichonok, W. H. Ryan, et al., *СВЕТ* **2584**, 1 (2010).
2. S. Yoshida, <http://www.aerith.net/comet/catalog/2010X1/2010X1.html>.
3. J. Castellano, E. Reina, and R. Naves, <http://www.astrosurf.com/cometas-obs/>.
4. M. Drahus, B. Yang, and J. Hoge, *СВЕТ* **2781**, 1 (2011).
5. Л. Еленин, <http://spaceobs.org/2011/08/24/>.
6. E. Howell, R. W. Byrd, and D. W. E. Green, *IAU Circ.* **9232**, 3 (2011).
7. K. Beatty, <http://www.skyandtelescope.com/community/skyblog/observingblog/132526728.html>.
8. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astron. Lett.* **31**, 194 (2005).
9. A. U. Landolt, *Astronom. J.* **104**, 340 (1992).
10. J. B. Oke, *Astronom. J.* **99**, 1621 (1990).
11. Т. А. Карташева и Н. М. Чунакова, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)* **10**, 44 (1978).
12. D. G. Monet, *Bull. Amer. Astronom. Soc.* **30**, 1427 (1998).
13. M. R. Kidger, *Earth, Moon and Planets* **90**, 259 (2002).
14. M. R. Kidger, *Astronom. and Astrophys.* **408**, 767 (2003).
15. M. D. Hicks, R. J. Bamberg, K. J. Lawrence, et al., *Icarus* **188**, 457 (2007).
16. M. Kidger, F. Martin-Luis, J. Nicolas Gonzalez Perez, et al., *New Astronomy Reviews* **48**, 505 (2004).
17. M. F. A'Hearn, D. G. Schleicher, R. L. Millis, et al., *Astronom. J.* **89**, 579 (1984).
18. E. M. Epifani, M. Dall'Ora, L. di Fabrizio, et al., *Astronom. and Astrophys.* **513**, A33 (2010).
19. Б. А. Воронцов-Вельяминов, *Бюлл. Абастуманской Астрофиз. Обс.* **17**, 49 (1954).
20. В. П. Коноплева, *Публикации КАО* **8**, 53 (1959).
21. S. C. Lowry and A. Fitzsimmons, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **358**, 641 (2005).
22. D. Jewitt, *Astronom. J.* **137**, 4296 (2009).
23. H.N. Russel, *Astrophys. J.* **43**, 173 (1916).
24. E. Grün, M. S. Hanner, S. B. Peschke, et al., *Astronom. and Astrophys.* **377**, 1098 (2001).
25. M. Weiler, H. Rauer, and J. Knollenberg, *Astronom. and Astrophys.* **403**, 313 (2003).
26. R. L. Newburn and H. Spinrad, *Astronom. J.* **90**, 2591 (1985).
27. E. M. Epifani and P. Palumbo, *Astronom. and Astrophys.* **525**, A62 (2012).
28. H. Neckel and D. Labs, *Solar Physics* **90**, 205 (1984).
29. J. Luque and D. R. Crosley, *LIFBASE SRI International Report MP 99-009* (1999).
30. L. Gausset, G. Herzberg, A. Lagerqvist, et al., *Astrophys. J.* **142**, 45 (1965).
31. L. Haser, *Bull. Acad. Roy. Belgique, Classe des Sciences* **43**, 740 (1957).
32. L. E. Langland-Shula and G. H. Smith, *Icarus* **213**, 280 (2011).
33. D. G. Schleicher, *Astronom. J.* **140**, 973 (2010).
34. R. Schulz, *IAUS* **229**, 413.
35. D. G. Schleicher and T. L. Farnham, in *Comets II*, Ed. by M. Festou, H. U. Keller, and H. A. Weaver (The University of Arizona Press, Tucson, 2004), pp. 449–470.
36. D. Jewitt and K. J. Meech, *Astrophys. J.* **310**, 937 (1986).

37. T. Bonev and K. Jockers, in *Proceedings of International Conference on Asteroids, Comets, Meteors - ACM 2002, Berlin, Germany, 2002* (ESA Publications Division, Noordwijk, 2002), pp. 587–591.
38. G. Borisov, W. Waniak, T. Bonev, et al., *Bulgarian Astron. J.* **10**, 59 (2008).
39. Z. Y. Lin, M. Weiler, H. Rauer, et al., *Astronom. and Astrophys.* **469**, 771 (2007).

Comet C/2010 X1 (Elenin). Unrealized Expectations

P.P. Korsun, I.V. Kulyk, A.V. Moiseev, A.V. Afanasiev

We present the analysis of the photometric and spectroscopic data obtained for comet C/2010 X1 (Elenin) when it was at a distance of 2.92 AU from the Sun. The observations were made at the prime focus of the 6-m BTA telescope with the SCORPIO focal reducer. The magnitude of the comet, measured in the R_c -band with an $9''$ aperture radius amounted to $16^m.8 \pm 0^m.1$. The computed dust production rate was estimated to be about 6 kg/s. The cometary coma manifested the emissions in the (0–0) band of the CN molecule violet system, and a number of emission band heads of the C_3 molecule. The gas production rate of the molecules is determined using the Haser model and amounts to 1.41×10^{24} and 4.20×10^{23} molecules per second for CN and C_3 , respectively. The ratio of gas production rates $\log[Q(C_3)/Q(CN)]$ is equal to -0.85 , which is close to the mean value, determined for a significant number of comets. A normalized gradient of the cometary dust reflectivity, calculated for the 4430–6840 Å spectral range amounts to $14.3 \pm 1.2\%$.

Keywords: *comets: general—comets: individual: C/2010 X1 (Elenin)*