

Проявления вспышечной активности кометы Энке в ее позиционных наблюдениях

© Ю. А. Чернетенко

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

На основании оптических наблюдений исследовались особенности структуры комы кометы Энке, проявляющиеся в зарегистрированных рядом наблюдений активных образованиях — выбросах, пылевых облаках. На интервале 1993–2014 гг., охватывающем 7 появлений кометы и включающем 3044 наблюдения, получена орбита кометы Энке. Учет негравитационных эффектов проводился по модели Марсдена. Анализ остаточных разностей, $O-C$, показал, что вблизи перигелиев всех рассматриваемых появлений значительно возрастает количество наблюдений, значения $O-C$ которых превышают критерий 3σ . Аномальные наблюдения сосредоточены примерно на интервале ± 100 суток в окрестности перигелиев. Анализ $O-C$ показывает, что в ряде случаев можно предполагать существование выбросов, центры яркости которых (фотоцентр) наблюдаются как ложное кометное ядро.

Ключевые слова: кометы, комета Энке, позиционные наблюдения, пылевые образования, фотоцентр, вспышечная активность

Введение

Комета 2P/Encke (Энке) принадлежит к семейству комет Юпитера, имеет наименьший период обращения, 3.3 года, и перигельное расстояние, равное 0.33 а. е. С момента открытия в 1778 г. в течение 150–100 лет комета имела значительное негравитационное ускорение, которое к настоящему времени существенно уменьшилось, и комета близка к окончанию своей активной жизни, которое может произойти к 2030–2050 гг. В течение всего времени наблюдений комета Энке активно изучалась и продолжает изучаться.

Комета Энке хорошо известна своей веероподобной комой (fan-like). Этот тип структуры комы обычно образуется, когда выброс родительских молекул и пылевых частиц происходит только на освещенной Солнцем стороне ядра. Из исследования ориентации веероподобной комы Секанина [1, 2] получил координаты северного полюса оси вращения кометы: $\alpha = 205^\circ$, $\delta = +2^\circ$, наклон оси вращения к плоскости орбиты $= 70^\circ$, а область образования веера — кометоцентрическая широта $\beta = +55^\circ$. Авторы работы [3] получили следующие

значения: $\alpha = 198^\circ$, $\delta = +0^\circ$, область образования веера — $\beta = +50^\circ$. В [4] авторы получили значения $\alpha = 218^\circ$, $\delta = +9^\circ$, а область образования веера — $\beta = +70^\circ$. Такая ориентация оси вращения определяет целый ряд особенностей в кометной активности, связанных с широтой предполагаемой активной области, над которой Солнце находится в зените, в частности, различие в активности кометы до и после перигелия. Возможно также, что направление оси вращения изменяется со временем. Диаметр ядра оценивается в 4.8 км [5], а для периода вращения получены следующие оценки: 11.07 час. [4], 11.083 час. [6], 15.08 час. [7].

Для кометы Энке, как и для ряда других комет, характерны нерегулярные изменения яркости, вызываемые, по-видимому, целым рядом причин: сложное вращение ядра неправильной формы, выбросы вещества (джеты) из отдельных активных областей, наличие в коме кометы сгущений, которые могут проявляться как дополнительный центр яркости (фотоцентр). Исследования последних лет подтвердили существование таких выбросов и позволили оценить размеры пылевых гранул (частиц), а в некоторых случаях — и их скорость. Так, в работе [8] представлены результаты наблюдений трех комет, в том числе и кометы Энке. Изучение полученных изображений комет привело к выводу о том, что протяженные структуры, видные вблизи кометы Энке и кометы Копффа до перигелия, были, вероятно, пылевыми («dust trails» — «пылевые хвосты»). В наблюдениях после перигелия отмечена высокая концентрация недавно выброшенных частиц. Эффективные размеры частиц, ответственных за рассеяние света, были оценены для кометы Энке в 1—100 мм. В работе [9] по результатам наблюдений кометы Энке в 2003 г. в оптическом и инфракрасном диапазонах обнаружено остроконечное облако пыли вблизи ядра и пылевой след вдоль орбиты. Моделирование показало, что максимальный размер пылевых частиц составляет порядка 10 мм, и выброс произошел через несколько дней после перигелия. Альbedo пылевого облака оценено как 0.01—0.04, что совпадает или, возможно, больше, чем альbedo ядра. Авторы полагают, что вспышечная активность в виде выбросов является ключом к пониманию особенностей активности кометы Энке (“We suppose that impulsive activity such as an outburst is a key to understanding the peculiar appearance of 2P/Encke”). По наблюдениям кометы Энке 31 октября 1997 г. было обнаружено резкое увеличение скорости пыли до 37 м с^{-1} , продолжавшееся только несколько дней вблизи перигелия, максимальный размер частиц составил 100 мм [10]. По результатам наблюдений кометы 14 июля 1997 г. делается вывод о том, что размеры частиц, образующих инфракрасную кому, больше миллиметра [11].

Таким образом, в настоящее время получен ряд наблюдений нерегулярных пылевых джетов, выбрасываемых из ядра кометы в окрестности перигелия, при этом размеры частиц оцениваются в 1—100 мм, а их альbedo сравнимо с альbedo самого ядра. Также наблюдались резкие изменения скорости пылевых частиц.

Представляет интерес вопрос о том, как могут проявляться эти особенности активности кометы в позиционных наблюдениях. Обычно точность наблюдений комет хуже, чем точность наблюдений астероидов. Прежде всего, это связано с тем, что кометы при приближении к Солнцу становятся протяженными объектами, зачастую с неравномерным распределением яркости в коме, которая, к тому же, может меняться со временем. Возможно отклонение центра яркости от центра тяжести (ядра), что приводит к такому явлению как смещение фотоцентра. Могут влиять на точность и такие известные причины как зависимость от видимой звездной величины, от высоты кометы над горизонтом, от неблагоприятных условий наблюдений, связанных с яркой Луной. Могут также проявляться систематические ошибки отдельных обсерваторий и ошибки звездных каталогов. Поэтому представляет интерес вопрос о том, какие факторы действительно влияют на точность наблюдений кометы Энке, как найти и исключить ошибочные наблюдения, не потеряв при этом полезную информацию. Эти вопросы и рассматриваются в работе.

Определение орбиты и анализ остаточных разностей

Было выполнено объединение 7 появлений кометы Энке на интервале 1993–2014 гг. с использованием всех имеющихся позиционных наблюдений. Уравнения движения и уравнения в вариациях интегрировались методом Эверхарта 15-го порядка. При этом учитывались возмущения от планет, Плутона, Цереры, Паллады и Весты. Координаты планет вычислялись в соответствии с эфемеридой DE405 [12]. Учет влияния негравитационных сил проводился по модели Марсдена. Систематические ошибки звездных каталогов учитывались в наблюдениях, выполненных после 2001 г., в соответствии с рекомендациями работы [13].

Были использованы наблюдения из базы данных Международного планетного центра (МПЦ) [14]. Для исключения ошибочных наблюдений использовался критерий 3σ . Общее число наблюдений равно 3044, и их распределение по появлениям следующее: 1993 — 145, 1997 — 118, 2000 — 56, 2003 — 1113, 2007 — 272, 2010 — 110, 2013 — 1230. В таблице приводятся полученные

Таблица

Негравитационные параметры (в 10^{-8} ае сут $^{-2}$)

Негравитационные параметры	МПЦ	Настоящая работа	
		1	2
Номер решения	1	2	3
A_1	0.0088	0.0081 ± 0.0006	0.0062 ± 0.0006
A_2	-0.000616	-0.000656 ± 0.000001	-0.000660 ± 0.000001
A_3	—	—	-0.0181 ± 0.0035
σ_0 (сек. дуги)	0.80	0.80	0.81

значения негравитационных параметров в сравнении с решением МПЦ. Как видно из решений 2 и 3, включение в число определяемых параметров нормальной составляющей A_3 практически не изменяет значения других параметров и точность решения. Поэтому дальнейшее исследование $O-C$ выполнено на основе решения 2.

На рис. 1 показаны значения $O-C$ в зависимости от времени прохождения кометы перигелия. Здесь и далее R.A. (прямое восхождение) означает $\Delta\alpha\cos\delta$, а DEC (склонение) — $\Delta\delta$. Штриховыми горизонтальными линиями отмечены значения $\pm 3\sigma$. Видно, что ошибочные наблюдения распределены вдоль орбиты не случайным образом, а сосредоточены в интервале примерно ± 100 сут относительно перигелия, при этом диапазон изменений по R.A. составляет $-12''$ — $+14''$, по DEC $-7''$ — $+10''$, что в несколько раз превышает значение 3σ . Видно также, что комета Энке наблюдается в течение всего оборота.

Возникает вопрос о том, являются ли эти наблюдения ошибочными, или отражают некоторые реальные процессы, происходящие с кометой. Поэтому дальше сопоставлены значения $O-C$ и некоторые параметры, которые могут приводить к увеличению систематических и случайных ошибок наблюдений.

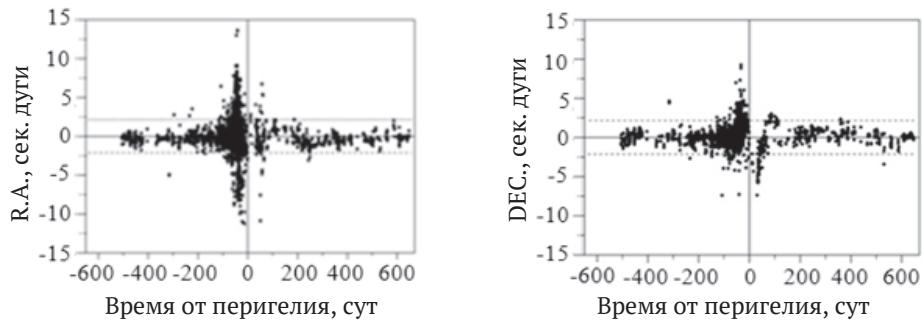


Рис. 1. $O-C$ относительно момента прохождения через перигелий для семи появлений кометы (слева R.A., справа DEC)

На рис. 2 приводятся $O-C$ отдельно для каждого появления, также относительно момента прохождения через перигелий, и на интервалах наблюдений в течение примерно ± 100 суток относительно перигелия. Открытыми кружками показаны значения R.A., сплошными — DEC. Вертикальными стрелками указаны даты полнолуний. Видно, что нет очевидной связи между увеличениями значений $O-C$ и полнолуниями, ухудшающими условия наблюдений.

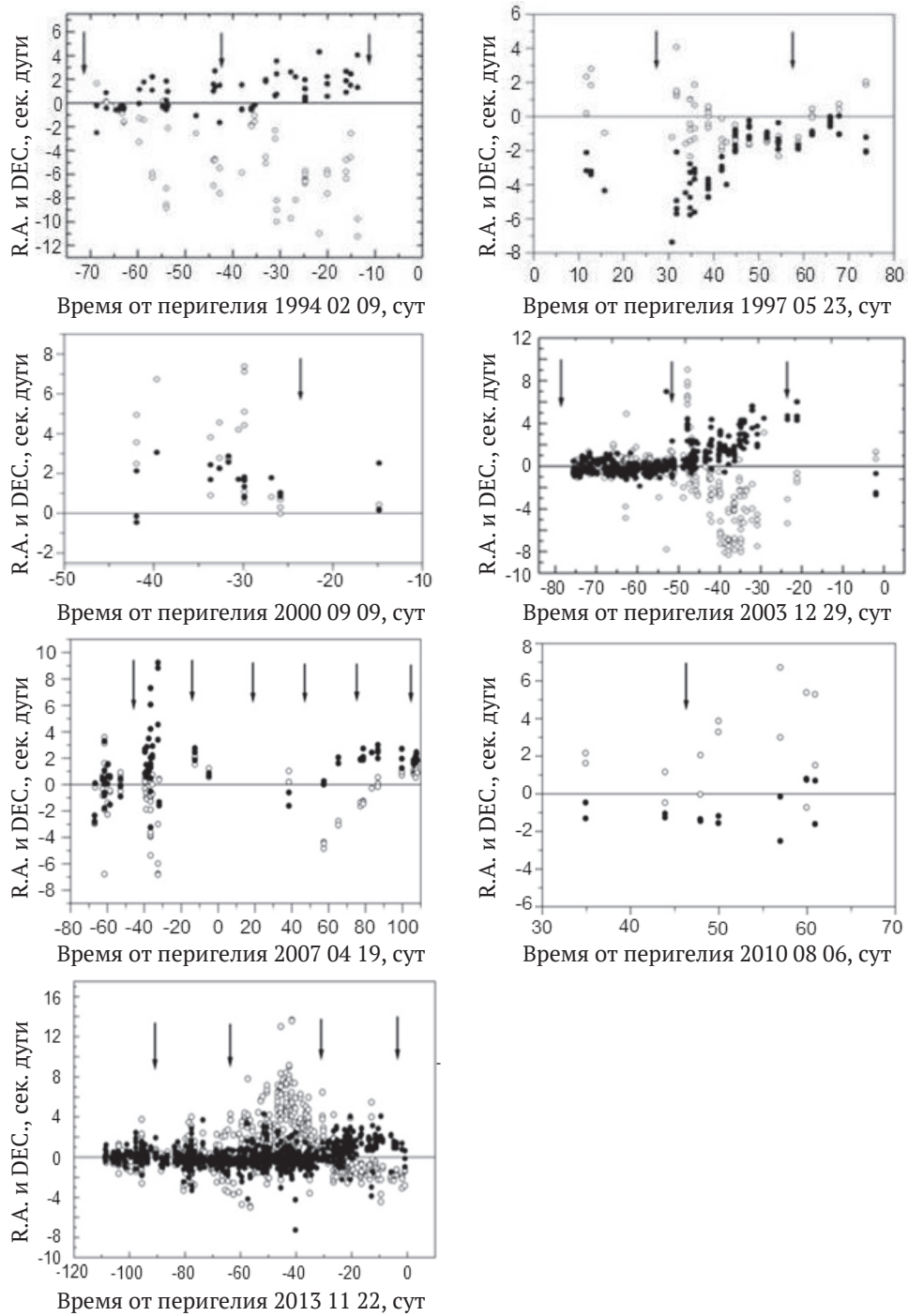


Рис. 2. $O-C$ для 7-ми появлений кометы. Открытыми кружками показаны значения R.A., сплошными — DEC. Вертикальными стрелками указаны даты полнолуний

На рис. 3 приводятся $O-C$ в зависимости от видимой звездной величины кометы, m , для тех наблюдений, которые сопровождаются информацией о видимой звездной величине. Наибольшие значения $O-C$ приходятся скорее на средние значения m в диапазоне $14^m - 16^m$. Сплошная линия на рис. 3 и 4 представляет аппроксимацию $O-C$ полиномом 4-ой степени. Видно, что в R. A. нет зависимости от звездной величины, хотя для DEC. можно отметить систематическое смещение примерно в $+1''$ для значений $m < 14$. Для значений $m < 18$ имеет место большой разброс значений $O-C$, подтверждая известный факт о том, что неточечное изображение кометы (при приближении к Солнцу) труднее для измерений, чем точечное, когда комета находится в области афелия.

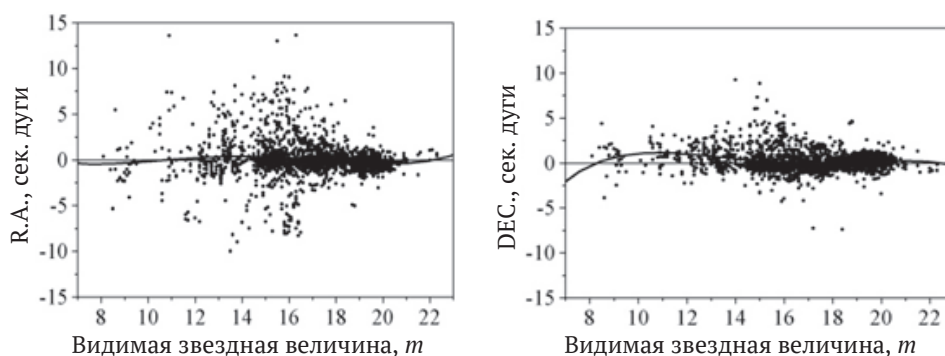


Рис. 3. R.A. и DEC. в зависимости от видимой звездной величины кометы

На рис. 4 $O-C$ сопоставляются с зенитными расстояниями, z , кометы в моменты наблюдений. Видно, что наибольшие значения $O-C$ приходятся на наблюдения высоко над горизонтом. В значениях R. A. можно отметить некоторый систематический сдвиг примерно до $-2.5''$ для значений z в интервале $30^\circ - 45^\circ$, причем эти значения z не являются предельными для рассматриваемого ряда наблюдений.

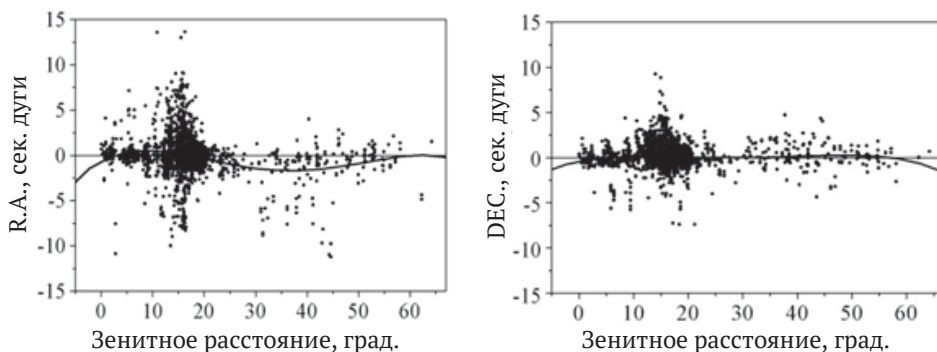


Рис. 4. R.A. и DEC. в зависимости от зенитного расстояния кометы в моменты наблюдений

На исследуемом интервале комета Энке наблюдалась на 168 обсерваториях. На рис. 5 значения $O-C$ сопоставляются с номерами этих обсерваторий по каталогу МПЦ [15]. Видно, что их большие значения присутствуют в наблюдениях многих обсерваторий, что исключает предположение о значительных систематических ошибках отдельных обсерваторий. Что же касается влияния систематических ошибок звездных каталогов, то их оценки, выполненные по работе [13], показали, что они не превышают $\pm 1''$. А это примерно на порядок меньше тех значений $O-C$, о которых идет речь.

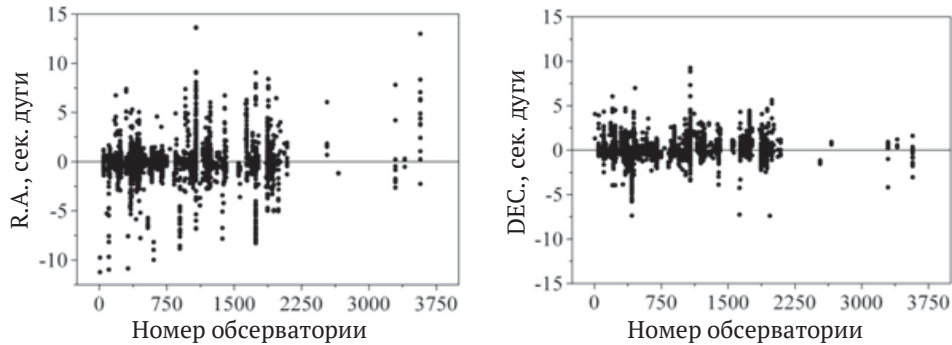


Рис. 5. R.A. и DEC. в сопоставлении с номерами обсерваторий

Таким образом, можно предположить, что большие значения $O-C$ не являются ошибочными, а имеют некоторую реальную физическую причину. Вероятнее всего, пылевое сгущение в отдельных случаях может быть ярче для оптических наблюдений, чем центральное сгущение, образуя фотоцентр, движение которого и приводит к систематическим изменениям $O-C$. Иллюстрирует это предположение представление $O-C$ в кометоцентрической полярной системе координат, координаты r и φ : $r = \sqrt{(\Delta\alpha \cos \delta)^2 + \Delta\delta^2}$, $\varphi = \arctg(\Delta\delta/(\Delta\alpha \cos \delta))$. На рис. 6 показаны эти $O-C$ для появления 1993–1994 гг. и 2003 г. Видно, что $O-C$ распределены не случайным образом, а образуют выброс (или выбросы). На рис. 7 приводятся расстояния, r , в зависимости от времени, на которых показаны предполагаемые джеты, интервалы между которыми составляют примерно 15 суток, для появления 1993–1994 гг. Для 2013 г. (рис. 8) можно выделить 6 джетов (разделены на этих рисунках прямыми линиями), по-видимому, производимых одной или двумя активными областями также через интервал примерно в 10–15 суток. Можно выделить джет и в появлении 2003 г. Остальные появления имеют недостаточное число непрерывных наблюдений, поэтому можно только отметить, что и они имеют значительно уклоняющиеся от номинальной орбиты наблюдения (см. рис. 2).

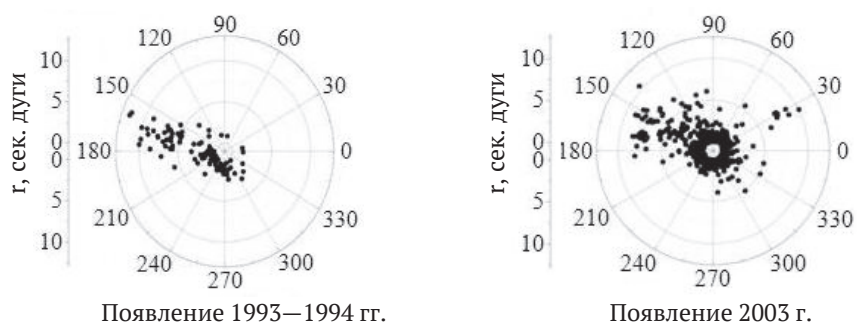


Рис. 6. O–S появления 1993–1994 гг. и 2003 г. в полярной системе координат

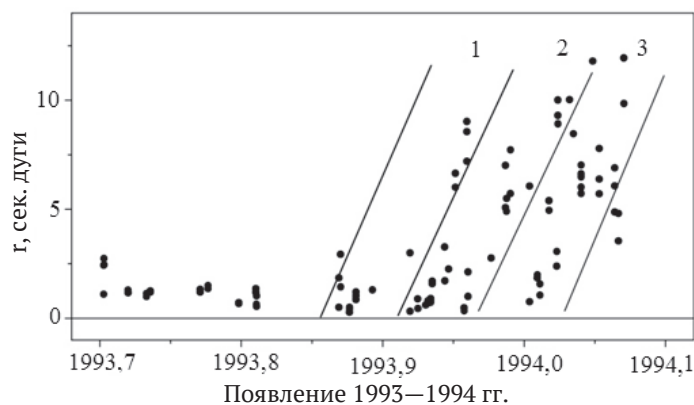


Рис. 7. Расстояние от центра тяжести ядра до центра яркости (фотоцентра), координата r , для появления 1993–1994 гг. Разделительными линиями и цифрами указаны предполагаемые джеты

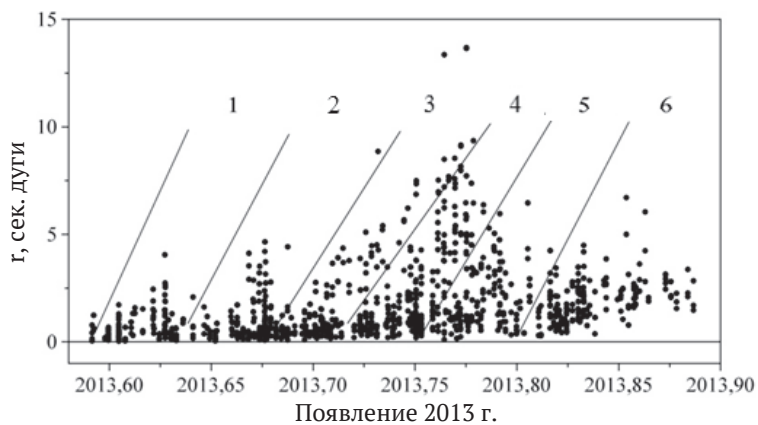


Рис. 8. Расстояние от центра тяжести ядра до центра яркости (фотоцентра), координата r , для появления 2013 г. Разделительными линиями и цифрами указаны предполагаемые джеты

При анализе рис. 7 и особенно рис. 8 (3–5-ый джеты) возникает непрос-той вопрос: почему для некоторых моментов времени существуют практиче-ски одновременно наблюдения, относящиеся и к одному джету, и к другому, а, возможно, и к самому ядру. Фактически это означает, что в коме кометы существуют одновременно несколько сгущений, которые по-разному наблю-даются на разных обсерваториях, имеющих разные инструменты и разные погодные условия в момент наблюдений. В то же время хорошо видно на рис. 7 (джет 3) и рис. 8 (джет 6), что эти последние джеты 'не накладываются' на другие джеты и отсутствуют наблюдения вблизи $r = 0$, т. е. наблюдения центрального сгущения — ядра.

Оценим приближенно максимальное линейное расстояние, соответству-ющее значению $r = 10''$. Оно зависит от ряда факторов и составляет 2000–4000 км, что примерно на порядок меньше среднего радиуса комы, ко-торый на гелиоцентрическом расстоянии в 1 а. е. оценивается в 5×10^4 км [16]. А видимый угловой диаметр комы составляет десятки и сотни угловых секунд.

Выводы

Получена орбита кометы Энке и рассмотрены остаточные разности ($O-C$) для 7-ми появлений 1993–2013 гг. Показано, что в пределах примерно ± 100 суток относительно моментов прохождения через перигелий значитель-но возрастает количество наблюдений, остаточные разности которых превы-шают предел в $\pm 3\sigma$, поэтому формально эти наблюдения можно отнести к ошибочным. Однако соответствующие значения $O-C$ распределены не слу-чайным образом, и в их изменениях просматривается некоторая систематика.

Для выяснения причин этих отклонений рассмотрены такие известные факторы, приводящие к ухудшению точности наблюдений, как видимая звездная величина кометы; высота над горизонтом в момент наблюдения; засветка неба яркой луной; систематические ошибки звездных каталогов и обсерваторий. Оказалось, что ни один из этих факторов не может полностью объяснить наличие всех таких наблюдений и величины их отклонений от но-минальной орбиты.

Рассмотрение остаточных разностей в полярной системе координат поз-воляет сделать предположение о том, что возрастающая в окрестности пери-гелия вспышечная активность кометы, для которой характерны выбросы ве-щества (джеты), проявляется в образовании движущихся в коме сгущений и приводит к такому явлению, как смещение фотоцентра. Для интенсивно наблюдаемой кометы в 1993–1994 гг. можно выделить 3 джета, разделенных интервалами в 14–15 сут; в 2013 г. можно выделить 6 джетов, разделенных интервалом примерно в 10–16 сут. Так как период обращения кометы со-ставляет 11–15 часов, то такие интервалы, по-видимому, можно объяснить сложным вращением кометного ядра, имеющего неправильную форму, и наличием одной или двух относительно небольших активных областей на его поверхности.

Литература

1. *Sekanina Z.* Outgassing asymmetry of periodic Comet Encke. I. Apparitions 1924–1984 // *The Astron. J.* — 1988. — Vol. 95. — P. 911–924.
2. *Sekanina Z.* Outgassing asymmetry of periodic Comet Encke. II. Apparitions 1868–1918 and a study of nucleus evolution // *The Astron. J.* — 1988. — Vol. 96. — P. 1455–1475.
3. *Festou M. C. and Barale O.* The Asymmetric Coma of Comets. I. Asymmetric outgassing from the Nucleus of Comet 2P/Encke // *The Astron. J.* — 2000. — Vol. 119. — P. 3119–3132.
4. *Woodney L., Schleicher D. G., Rutz K. M., Ryan K. J.* Rotational Properties of Comet 2P/Encke Based on Nucleus Lightcurves and Coma Morphology // *Bulletin of the AAS* — 2007. — Vol. 38. — P. 486.
5. *Lamy P. L., Toth I., Fernandez Y. R., Weaver H. A.* The Sizes, Shapes, Albedos, and Colors of Cometary Nuclei // 2004. In *Comets II*. Ed. M. C. Festou et al. — 2004. — P. 223–264.
6. *Warner B. D., Harris A. W., Pravec P.* The asteroid lightcurve database // *Icarus* — 2009. — Vol. 202. — P. 134–146.
7. *Luu J., Jewitt D.* The Nucleus of Comet P/Encke // *Icarus* — 1990. — Vol. 86. — P. 69–81.
8. *Ishiguro M., Sarugaku Y., Ueno M., Miura N., Usui F., Chun M. -Y., Minn Kwon S.* Dark red debris from three short-period comets: 2P/Encke, 22P/Kopff, and 65P/Gunn // *Icarus* — 2007. — Vol. 189. — Issue 1. — P. 169–183.
9. *Sarugaku Y., Ishiguro M., Ueno M., Reach W.* Infrared and Optical Imagings of the Comet 2P/Encke Dust Cloud in the 2003 // *The Astroph. J.* — 2015. — Vol. 804 (2): 127–(9 pp.).
10. *Epifani E., Colangeli L., Fulle M., Brucato J. R., Bussoletti E., De Sanctis M. C., Mennella V., Palomba E., Palumbo P., Rotundi A.* ISOCAM Imaging of Comets 103P/Hartley 2 and 2P/Encke // *Icarus* — 2001. — Vol. 149. — P. 339–350.
11. *Reach W. T., Sykes M. V., Lien D., Davies J. K.* The Formation of Encke Meteoroids and Dust Trail // *Icarus* — 2000. — Vol. 148. — Issue 1. — P. 80–94.
12. *Standish E. M.* JPL Interoffice Memorandum // 1998. — 312. F-98-048.
13. *Chesley S. R., Baer J., Monet D. G.* Treatment of star catalog biases in asteroid astrometric observations // *Icarus* — 2010. — Vol. 210. — P. 169–183.
14. https://minorplanetcenter.net/db_search
15. <https://minorplanetcenter.net/iau/info/ObservatoryCodes.html>
16. *Taylor F. W., Michaux C. M., Newburn R. L., Jr.* A Model of the Physical Properties of Comet Encke // JPL, California Institute of Technology, Pasadena, California. — 1973. — Technical Report 32–1590. — P. 38.

Appearance of the Comet Encke's Outburst Activity in Its Positional Observations

Yu. A. Chernetenko

An attempt is made to investigate the features of the comet Encke' coma on the basis of its optical observations. The orbit of the comet Encke is obtained on the interval from 1993 to 2014 which covers 7 apparitions of the comet and in-

cludes 3044 observations. The Marsden's model has been used to account nongravitational effects. The analysis of residuals shows that the number of observations where the $O-C$ values exceed the 3σ criterion grows substantially near the perihelion passages of all the considered apparitions. Abnormal observations are focused on about ± 100 -day intervals with respect to the perihelion passages. Our analysis of the $O-C$ shows that it is possible to assume the existence of emissions in some cases. They are observed as false cometary nuclei and are showed up in the systematic deviations of the residuals.

Keywords: comets, the comet Encke, positional observations, dust clouds, impulsive activity, photocenter.