

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМЕТЫ ЭНКЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ 1937—1974 гг.

М. З. Маркович, Р. С. Ошеров

Изучая зависимость блеска кометы Энке от гелиоцентрического расстояния r в ряде появленияй 1871—1951 гг., один из авторов [10] обратил внимание на существенные отличия кривых блеска этой кометы от кривых блеска других комет. За основу при сопоставлении фотометрических кривых кометы в различных появлениях была принята зависимость блеска от r , характерная для комет с чисто газовой оболочкой при свободном испарении поверхностных льдов ядра [9]

$$m_{\Delta} = A + Br^{\alpha}, \quad (1)$$

где

$$m_{\Delta} = m - 5 \lg \Delta. \quad (2)$$

m — наблюдаемая яркость в звездных величинах, Δ — геоцентрическое расстояние кометы в а. е., A, B, α — постоянные параметры, причем

$$B = \frac{L}{RT_0}. \quad (3)$$

Здесь L — молярная теплота сублимации льдов ядра, R — универсальная газовая постоянная, α — параметр, характеризующий зависимость поверхностной температуры льдов ядра от r

$$T = T_0 r^{-\alpha}. \quad (4)$$

Формула (1) представляет наблюдаемые значения яркости кометы в интервале наблюдений по r .

Вычисления показывают, что для всех доперигелийных наблюдений $\alpha > 0.5$ и, как правило, $\alpha \geqslant 1$. Для всех случаев послеперигелийных наблюдений $\alpha < 0.5$ (1878, II $\alpha = 0.44$ и 1898 XI $\alpha = 0.22$).

Комета Энке в большинстве случаев наблюдалась до прохождения ее через перигелий и почти всегда $\alpha > 1$ ($\alpha \div 1—3$ и даже больше 3). Между тем, температура сублимирующих льдов ядра при потоке солнечной радиации $q \sim r^{-2}$ меняется очень медленно ($\alpha \div 0.1—0.3$) [9]. Газы могут выделяться из ядра путем десорбции. Яркость кометы в этом случае описывается выражением (1). Выражения (3) и (4) сохраняют силу с той лишь разницей, что под L нужно понимать молярную теплоту десорбции, обычно не намного отличающуюся от теплоты испарения.

Как известно, температуры поверхности ядра и его глубинных слоев могут быть получены решением уравнения теплопроводности [2, 4, 9].

Время наблюдений	Число наблюдений	r а.е.	H_0	n
X—XI 1937 г.	10	1.30—0.75	10.08 ± 0.05	5.95 ± 0.21
IX—X 1947 г.	16	1.49 0.73	9.98 0.09	6.32 0.38
I—III 1951 г.	13	1.11 0.41	9.83 0.05	2.73 0.08
I 1961 г.	13	0.84 0.54	10.19 0.19	3.52 0.28
XI—XII 1970 г.	10	1.13 0.57	10.83 ± 0.10	5.13 ± 0.31

* По 8 наблюдениям, исключая вспышки блеска декабря 3^d.80 и 5^d.76, получается $H_0 =$

** По тем же 8 наблюдениям.

Анализ всех возможных предельных случаев (солнечное тепло целиком расходуется на испарение льдов, высокая теплопроводность поверхностного слоя ядра и т. п.) показывает, что в выражении (1) α не должно превышать 2. Однако у кометы Энке встречаются значения α даже большие 3. Из этого следует, что применительно к этой комете выражение (1) не имеет физического смысла и должно рассматривать-

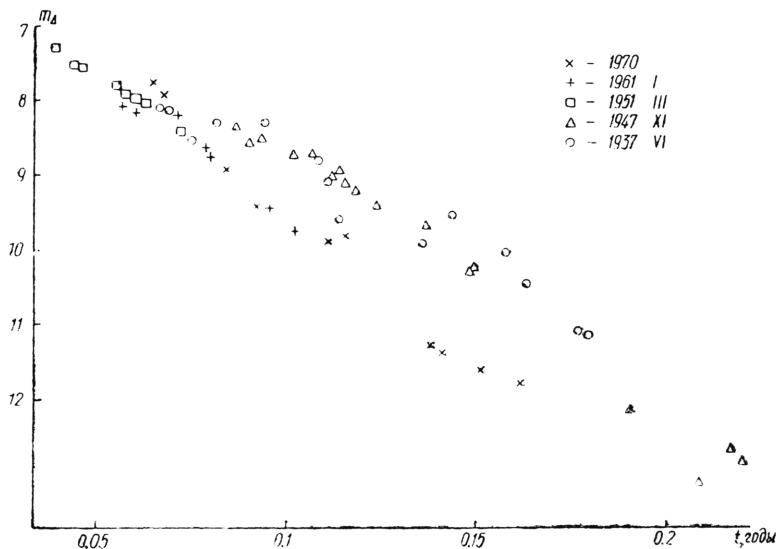


Рис. 1. Зависимость наблюдаемой яркости кометы m_D от временного параметра t .

ся как интерполяционные или же параметры A, B, α имеют другой физический смысл, чем в выражениях (1) — (4).

Наличие в (1) трех степеней свободы (независимые параметры A, B, α) позволит добиться хорошего согласия с оценками блеска на интервале наблюдений.

В настоящей работе продолжено изучение фотометрических особенностей кометы Энке на основании наблюдательного материала Бейера [16] для появления 1937, 1947, 1951, 1961, 1970 г.

В табл. 1 помещены фотометрические параметры кометы Энке: соответственно по графикам таблицы приведены время наблюдения, число наблюдений v , интервал наблюдений по t , классические параметры H_0 и n по Бейеру [16], A, B, α по (1), полученные способом, изложенным в [2], суммы квадратов невязок ($\Sigma \varepsilon^2$). Индексы $\Sigma \varepsilon^2$ соответственно относятся к классическому и данному способам. Почти всегда (1) дает лучшее приближение к наблюдениям, чем формула С. В. Орлова (три степени свободы в (1) против двух в классической формуле).

Большие α (>3) позволяют установить, что у кометы Энке свободное испарение с поверхности ядра не имеет места.

Таблица 1

$\Sigma \varepsilon_1^2$	A	B	$A+B$	α	$\Sigma \varepsilon_2^2$
9.12	7.85	1.41	9.26	3.73	0.77
2.10	7.80	1.58	9.38	3.11	0.67
0.27	3.96	5.88	9.84	0.60	1.12
0.27	7.45	3.74	11.19	3.14	0.11
0.42*	-10.25	21.03	10.78	0.27	0.15**

= $10m.93$, $n=5.19$ и $\Sigma \varepsilon_1^2=0.031$.

По данным [14], фильтрация газов через тугоплавкий дисперсный поверхностный слой, покрывающий льды ядра, не может обеспечить наблюдаемый блеск кометы. В этом случае пришлось бы приписать ядру размеры, равные размерам планет. При испарении загрязненных льдов на поверхности ядра образуется местами минеральная корка («пятнистое» ядро), площадь ее со временем увеличивается, что приводит к уменьшению открытой испаряющейся поверхности и вековому ослаблению блеска, причем, как показал Шульман [14], абсолютная звездная величина кометы линейно увеличивается со временем, а ее яркость убывает экспоненциально. Действительно, подобная закономерность наблюдается у кометы Энке [12], и, по-видимому, у некоторых других комет, например, у короткопериодической кометы Фая [17].

На рис. 1 представлены наблюдаемые значения m_{Δ} в зависимости от времени t , годы, отсчитываемого от момента прохождения кометы через перигелий; эта зависимость очень близка к линейного типа

$$m_{\Delta} = a + bt. \quad (5)$$

Значения параметров a и b и соответствующие суммы квадратов невязок приведены в табл. 2, в которой указано число наблюдений для

Таблица 2

Комета	v	a (t в годах)	b	$\Sigma \varepsilon^2_3$
1937 VI	10	6.07	29.13	0.350
1947 XI	16	5.16	38.74	0.878
1951 III	13	6.59	28.80	0.103
1961 I	13	6.24	38.47	0.167
1971 II	8	5.81	42.35	0.335

каждого появления кометы.

В работе [11] рассматривается функция $\lambda(q)$, определяющая вероятность распада ядра кометы в единицу времени

$$\lambda(q) = \frac{1}{M} \frac{dM}{dt}$$

(M — масса ядра в данный момент). Яркость кометы пропорциональна массе вещества, теряемой ядром в единицу времени

$$I \sim \frac{dM}{dt} \quad (m_{\Delta} = -2.5 \lg I).$$

Отсюда соотношение (5) означает, что λ не зависит или очень слабо зависит от q (а также от r и t).

Весьма возможно, что на небольшом отрезке времени наблюдений (около месяца) $\lambda(q)$ меняется очень мало, чем и объясняется линейный характер зависимости (5).

Все наблюдаемые фотометрические кривые комет (зависимости m_{Δ} от r) можно разбить на два основных типа: 1 — кривая в координатах m_{Δ}, r имеет выпуклость вверх, в соотношении (1) $\alpha < 1$ и 2 — кривая в указанных координатах вогнутая, в (1) $\alpha > 1$. Маркович [11] предложил соответственно для кривых I и II типа следующие выражения:

$$m_{\Delta} = A + B_1 t + B_2 \varphi + 5 \lg r, \quad (6)$$

$$m_{\Delta} = A + B_1 t + B_2 \varphi. \quad (7)$$

Здесь t имеет тот же смысл, что и в (5), φ — истинная аномалия кометы. Физический смысл параметров A, B_1, B_2 , а также зависимости t от τ для эллиптических параболических и гиперболических орбит приводится в [11].

Подавляющее большинство комет имеют фотометрические кривые I типа, у кометы Энке чаще всего наблюдаются кривые II типа.

В табл. 3 для каждого появления кометы соответственно приведены тип фотометрической кривой, число наблюдений, параметры A, B_1, B_2 , вычисленные по (6) и (7), сумма квадратов невязок $\Sigma \varepsilon^2$, а также ошибки одного наблюдения и среднего значения.

Средняя ошибка наблюдения (величины m_d , получаемые из (6) и (7), принимаются за математические ожидания) определяется по формуле

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\Sigma \epsilon^2}{v-1}}, \quad (8)$$

а ошибка среднего значения, определяемого по (6) или (7) и (8),

$$\sigma = \frac{\sigma_1}{\sqrt{v}}. \quad (9)$$

Средняя ошибка одного наблюдения Бейера $\bar{\sigma}_1$ составляет около $0^m.16$, а вычисленного по (6) или (7), $\bar{\sigma} \approx 0^m.041$ (см. табл. 3).

Выражения, представляющие зависимость m_d от r , должны удовлетворять определенным требованиям: 1) наилучшим образом соответствовать экспериментальным данным на интервале наблюдений, т. е. сумма квадратов невязок ($\Sigma \epsilon^2$) должна быть наименьшей; 2) быть уни-

Таблица 3

Комета	Тип фотометрической кривой	v	A	B ₁	B ₂	$\Sigma \epsilon^2 / 4$	σ_1	σ
1937 VI	II	10	5.595	0.092	-0.0437	0.362	0.200	0.064
1947 XI	II	16	12.764	0.167	-5.150	0.949	0.250	0.063
1951 III	I	13	9.756	0.051	-0.979	0.118	0.100	0.028
1961 I	II	13	10.434	0.243	-0.492	0.064	0.070	0.019
1971 II	I	8	1.530	-0.024	5.219	0.174	0.160	0.057

версальными, т. е. применительными к кометам газовым, пылевым и газо-пылевым; 3) исходить из физических предпосылок (фотометрические параметры этих выражений должны иметь физический смысл); 4) допускать возможность уверенной экстраполяции за пределы интервала наблюдений. Последнее требование имеет особенно важное значение для уверенного прогнозирования яркости кометы. В связи с этим весьма желательно наблюдать кометы на возможно большем интервале r .

Приведем суммарные квадраты невязок по пяти появлениюм кометы, характеризующие сравнительные достоинства формул с одним вводом по r (очевидно, что в выражениях (6) и (7) t и ϕ могут быть в конечном счете выражены через r [11]).

Формула	$\Sigma \epsilon^2$
Орлова (H_0, n)	5.79
(1)	2.82
(5)	1.83
(6) и (7)	1.67

Как видно, наилучшими являются формулы (6) и (7), худшей — классическая формула Орлова, которую следует признать мало пригодной для кометы Энке.

Формулы (6) и (7) также наилучшим образом удовлетворяют требованиям 2 и 3 [11].

Для выяснения характера векового ослабления блеска кометы Энке по (6) и (7) были вычислены значения m_d для некоторого фиксированного r . В качестве такого взято значение $r=0.8$ а. е. Эта точка входит в интервал наблюдений пяти детально рассматриваемых появлений кометы. Момент прохождения кометы через точку $r=0.8$ а. е. в

1937 г. принят за начальный ($\tau=0$) и от него в дальнейшем ведется отсчет времени τ .

Значения истинной аномалии φ вычисляются из выражения

$$\varphi = \arccos \frac{1}{e} \left(\frac{P}{r} - 1 \right), \quad (9)$$

где e и P — соответственно эксцентриситет и параметр орбиты. Значение t (временный параметр, отсчитываемый от момента прохождения кометы через перигелий), соответствующее φ , в каждом случае вычисляется путем линейной интерполяции.

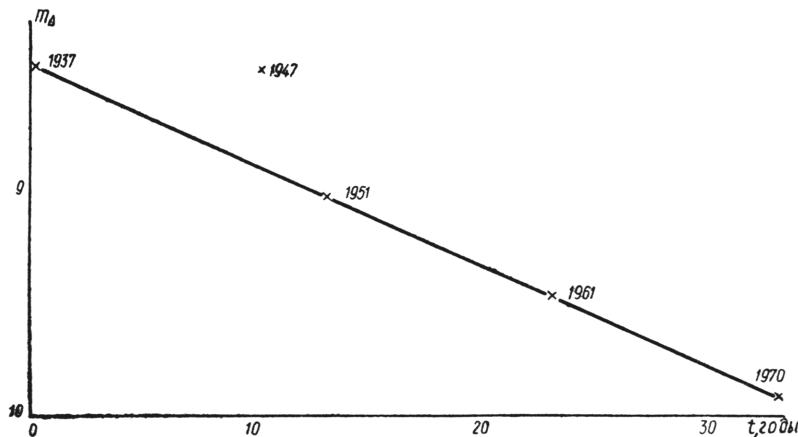


Рис. 2. Вековое падение блеска кометы Энке.

Элементы орбит взяты из [16]. Данные вычислений сведены в табл. 4, в которой соответственно приведены появления кометы r, φ в радианах, t — в сутках, r — в годах, примененная формула m_{Δ} (0.8) и среднемесячные индексы солнечной активности (числа Вольфа) — W , соответствующие месяцу, на который приходится момент прохождения кометы через точку $r=0.8$ а. е.

Таблица 4

Комета	r а.е.	φ	t	τ	Формула	m (0.8)	W
1937 VI	0.8	1.8477	31.820	0	(7)	8.44	74
1947 XI	0.8	1.8250	30.842	9.918	(7)	9.46	164
1951 III	0.8	1.8329	39.436	23.215	(6)	9.13	60
1961 I	0.8	1.8329	29.736	23.115	(7)	9.43	58
1970 II	0.8	1.8306	30.987	33.040	(6)	9.86	126

На рис. 2 изображена зависимость m_{Δ} (0.8) от τ , построенные точки 1937, 1951, 1961 и 1970 гг. точно ложатся на прямую. Отклонение от прямой в сторону больших яркостей дает точка 1947 г., это отклонение составляет $0^m.4$, что значительно превышает $3\sigma=3 \cdot 0^m.04=0^m.12$ и поэтому не может быть объяснено ошибками наблюдения.

Оно связано, по-видимому, с усилением солнечной активности в ноябре 1947 г. ($W=163$). Сделанный в [12] вывод о том, что звездная величина кометы Энке (при фиксированном r) возрастает со временем линейно, с высокой степенью достоверности (ошибки вычисленных значений m_{Δ} , как уже отмечалось, в среднем $0^m.04$) подтверждает рис. 2.

$$m_{\Delta}=8.44+0.043 \tau, \quad (10)$$

причем момент $\tau=0$ соответствует XI 25^d.43 1837 г. (аномальная точка 1947 г. не принята во внимание).

В [4] предложено обобщенное уравнение для кривой блеска с двумя вводами по r и по d' (d' — наблюдаемый диаметр головы кометы в минутах дуги):

$$m_{\Delta} = m_0 + 2.5 n \lg r + 2.5(\beta - 2) \lg d', \quad (11)$$

где

$$m_{\Delta} = m - 2.5 \beta \lg \Delta. \quad (12)$$

Здесь m_0 — яркость центральной части головы кометы с диаметром $d'=1'$ на единичном ($r=\Delta=1$ а. е.) расстоянии, β — эффективный показатель, характеризующий распределение поверхностной яркости в голове кометы

$$i = \text{const } \rho^{-\beta},$$

где ρ — расстояние до фотометрического центра. Для прогнозирования яркости кометы (11) не может быть использована, так как величина d' заранее неизвестна. Однако из (11) можно получить параметр β , знание которого позволяет количественно оценить физические характеристики кометы. Фотометрические параметры выражения (11) для пяти появлений кометы Энке были вычислены на машине «Мир-1» и приводятся в табл. 5, в которой указаны также суммы квадратов невязок.

Таблица 5

Комета	m_0	n	β	Σe_i^2
1937 VI	10.12 ± 0.42	5.31 ± 0.44	1.36 ± 0.49	0.336
1947 XI	9 71 0 76	7 18 1 05	2 05 0 48	0 844
1951 III	10 57 0 30	2 74 0 07	1 60 0 16	0 012
1961 I	7 36 2 88	2 79 1 09	4 19 2 15	0 174
1971 II	10.77 ± 0.78	5.17 ± 0.66	2.06 ± 0.80	0 422

Еще лучшую сходимость с наблюдениями можно получить, если построить выражение типа (11) применительно к данному типу фотометрической кривой кометы. Анализ приведенных в табл. 5 величин β и их ошибок показывает, что, по-видимому, эти значения в разных появлениях мало отличаются друг от друга. Было вычислено среднее весовое значение $\bar{\beta}$ из пяти неравноточных измерений

$$\bar{\beta} = \frac{\sum P_k \beta_k}{P}, \quad (13)$$

где $P = \sum P_k$. Веса неравноточных измерений P_k — определялись по способу, предложеному в [15]

$$P_k = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_k^2}. \quad (14)$$

σ_k — средние квадратичные ошибки β_k ; σ_0 выбирается произвольно, лучше всего значение, близкое к среднему из σ_k , (в нашем случае $\sigma_0 = 0.8$). Средняя квадратичная ошибка среднего весового

$$\sigma_{\bar{\beta}} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{P}}. \quad (15)$$

Из (13), (14) и (15) по данным табл. 5 получаем $\bar{\beta} = 1.64 \pm 0.14$.

В [3, 13] было показано, что между наблюдаемыми блеском I и угловыми размерами головы кометы d' существует четкая кубическая зависимость

$$I = I_0 d^3. \quad (16)$$

В связи с этим представляет интерес проверка зависимости между m , d' и для кометы Энке. Для этого были составлены условные уравнения типа

$$m = m_0 + a \lg d', \quad (17)$$

которые решались способом наименьших квадратов.

Постоянные m_0 и a оказались равными $m_0 = 12.33 \pm 0.23$ и $a = -5.32 \pm 0.29$. Переходя с помощью формулы Погсона к интенсивностям, получим

$$I = I_0 d^{1.2}. \quad (18)$$

Искалась также зависимость между m_Δ и линейными размерами головы кометы d_Δ .

Обнаружено, что зависимость $m_\Delta(d_\Delta)$ может быть описана выражением, аналогичным $m(d')$. Вычисления показали, что в этом случае $a_1 = -4.07 \pm 0.19$ и $m_{0\Delta} = 14.15 \pm 0.23$ или в интенсивностях

$$I_\Delta = I_{0\Delta} d_\Delta^{1.6}.$$

Обнаруженная в обоих случаях почти квадратическая зависимость между I и d может быть объяснена на основе теории, изложенной в [4].

При $\beta \leq 2$ наблюдаемая яркость кометы определяется выражением

$$I = \frac{C_1}{2-\beta} d^{2-\beta} \Delta^{-\beta}, \quad (19)$$

где C_1 — постоянная, а d — наблюденный диаметр головы кометы, выраженный в минутах дуги.

В случае визуальных наблюдений видимые размеры головы кометы определяются предельной поверхностной яркостью, еще различимой на фоне неба — i . Для однородных наблюдений эту яркость можно считать постоянной, т. е.

$$i_{\text{пр}} = \text{const} d_\Delta^{-\beta} = C_2, \quad (20)$$

где $d_\Delta = 4.35 \cdot 10^9 d \Delta$ (см), Δ в а. е.

Следует иметь в виду, что d_Δ определяет не истинные размеры головы, а линейный размер, соответствующий измеренному наблюдателем угловому диаметру головы кометы на геоцентрическом расстоянии Δ .

Подставляя (20) в (19), получаем

$$I = \frac{C_3}{2-\beta} d^2, \quad (21)$$

что и объясняет соотношение (18). Переходя в (21) к приведенным яркости и диаметру $(I = \frac{I\Delta}{\Delta^2}; d \sim \frac{d_\Delta}{\Delta})$, получим

$$I_\Delta = \frac{C_4}{2-\beta} d_\Delta^2.$$

ЛИТЕРАТУРА

- Добровольский О. В. К теории кометных форм, ч. 2. Бюл. САО, 1953, 7.
- Добровольский О. В. Кометы, М., «Наука», 1966.
- Добровольский О. В., Ошеров Р. С. О связи видимого диаметра комет с видимой яркостью. — ДАН ТаджССР, 1967, 10, 2.

4. Добровольский О. В., Ошеров Р. С., Маркович М. З. Зависимость интегрального блеска головы кометы от углового диаметра и расстояния до наблюдателя. — Проблемы космической физики, 1971, 6, 123.
5. Кометный циркуляр, 1973, 145.
6. Кометный циркуляр, 1973, 153.
7. Кометный циркуляр, 1973, 156.
8. Кометный циркуляр, 1974, 165.
9. Маркович М. З. Температура кометных ядер и изменение яркости комет с гелиоцентрическим расстоянием. — Бюл. ин-та, Астрофизики АН ТаджССР, 1959, 28, 25.
10. Маркович М. З. О некоторых особенностях изменения блеска кометы Энке-Баклунда. — Изв. отд. геол.-хим. и техн. наук АН ТаджССР, 1961, вып. 1(3), 15.
11. Маркович М. З. Анализ кривых блеска комет. — Проблемы космической физики, 1976, 11.
12. Маркович М. З., Туленкова Л. Н. Физические характеристики кометы Энке. — В кн.: Астрометрия и астрофизика, 1970, 11.
13. Ошеров Р. С. Статистические закономерности между наблюдаемыми параметрами комет. — В кн.: Астрометрия и астрофизика, 1972, 15.
14. Шульман Л. М. Динамика кометных атмосфер. Нейтральный газ. Киев, «Наукова думка», 1972, 61.
15. Щиголов Б. М. Математическая обработка наблюдений. Физ-мат. М., 1962, 229.
16. Веуг M. Physische Beobachtungen von Kometen. AN, 1938, № 265, 46; 1950, N 278, 225; 1955, N 282, 152; 1962, N 286, 337; 1972, N 293, 254.
17. Kurth R. Über die sakulare Helligkeitsabnahme der Kometen. AN, 1961, № 286, 83.

Институт астрофизики
АН ТаджССР

Поступила в редакцию
в феврале 1975 г.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ КОМЕТЫ 1965 VIII ИКЕЙЯ—СЕКИ ВБЛИЗИ ПЕРИГЕЛИЯ

В. А. Голубев

Комета 1965 VIII, открытая японскими «ловцами» комет К. Икейя и Ц. Секи утром 18 сентября 1965 г., по первым наблюдениям представляла собой диффузный объект 8^m с центральной конденсацией и без признаков хвоста. Предварительные вычисления орбиты (М. Мамедов, Л. Кеннингем, З. Секанина) показали, что комета пройдет через перигелий 21.2 октября на расстоянии 0.0074—0.0083 а. е. от центра Солнца. Элементы ее орбиты близки по значениям к элементам большой яркой кометы 1882 II [38], т. е. комета Икейя—Секи принадлежит к кометному семейству Креяца.

Комета была видна невооруженным глазом на дневном небе 20 октября, интегральная яркость в перигелии достигала 10^m — 11^m , а длина хвоста достигала в конце октября 40° [7]. Яркий небесный объект наблюдался с 18 сентября до середины февраля 1966 г. За этот период было проведено более 820 различных наблюдений кометы; от простых визуальных оценок блеска до получения спектров высокого разрешения [19].

Наблюдатели отмечали необычную активность кометы: быструю смену типа хвоста вблизи перигелия [13], заметное кручение в хвосте [16], движение излома в хвосте [10], деление ядра [32], расходжение компонент ядра [36].

Исследователи не только установили надежную статистическую связь между активностью комет и активностью Солнца [1, 14, 30], но и разработали методику определения параметров межпланетной среды по изменениям в кометах [12]. На возможность влияния солнечной активности на изменения в комете Икейя—Секи указывалось в [6], где отмечено, что во время прохождения кометой 1965 VIII перигелия на Солнце наблюдалась относительно большая группа солнечных пятен с тенью и полутенью. Быстрые изменения кометных форм и взрывные процессы в ядре кометы, с одной стороны, немногочисленность активных областей на Солнце в годы минимума солнечной активности, с другой стороны, заставляют более подробно исследовать вопрос о взаимодействии