

УДК 521.86

Ф. И. Кравцов, И. В. Лукьяник

Астрономическая обсерватория
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко
ул. Обсерваторная 3, Киев-53, 04053
igor.lukyanyk@gmail.com

**Определение физических параметров газа
в нейтральных атмосферах комет.
Метод изофот**

Рассматривается новый метод изофот для определения физических параметров газа в нейтральных атмосферах комет. Проводится сравнение с методом круговых диафрагм. Применение метода изофот к фотометрическим наблюдениям кометы 2009/P1 (Garradd) показало его полную пригодность для получения гидродинамической скорости истечения газа и времени жизни молекул в нейтральных атмосферах комет.

ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗУ В НЕЙТРАЛЬНИХ АТМОСФЕРАХ КОМЕТ. МЕТОД ІЗОФОТ, Кравцов Ф. І., Лук'яник І. В. — Розглядається новий метод ізофот для визначення фізичних параметрів газу в нейтральних атмосферах комет. Проводиться порівняння з методом кругових діафрагм. Застосування методу ізофот до фотометричних спостережень комети 2009/P1 (Garradd) показало його повну придатність для отримання гідродинамічної швидкості витікання газу і часу життя молекул в нейтральних атмосферах комет.

DETERMINATION OF PHYSICAL PARAMETERS OF THE GAS IN NEUTRAL ATMOSPHERES OF COMETS. METHODS OF ISOPHOTS, by Kravtsov F. I., Luk'yanyk I. V. — New method of isophots to determine the physical parameters of the gas in neutral atmospheres of comets is proposed in the paper. A comparison with the method of circular apertures is made. Application of isophots method to photometric observations of comet 2009/P1 (Garradd) showed that this method is suitable for determination of the hydrodynamic velocity of gas outflow and the lifetime of the molecules in the neutral atmospheres of comets.

© Ф. И. КРАВЦОВ, И. В. ЛУКЬЯНИК, 2015

ВСТУПЛЕНИЕ

В работе [7] Л. М. Шульман теоретически вывел общую формулу для вычисления поверхностной плотности кометной атмосферы при произвольном источнике родительских молекул с центром в ядре кометы, когда зона фотохимических превращений родительских молекул лежит в глубоко внутренних частях околоядерной области кометы. Для практических целей эта формула была слишком громоздкой. Исходя из этой теории Л. М. Шульмана, В. Л. Афанасьев [2] получил формулы и предложил методику для вычисления параметров течения газа, которые можно применять при обработке спектральных наблюдений комет. Для этого ему пришлось путем ряда допущений упростить формулу Л. М. Шульмана.

В работе [5] предложена другая методика определения физических параметров нейтральных атмосфер комет, в которой в качестве исходных берутся идеи В. Л. Афанасьева. Эта методика основывается на методе круговых диафрагм и применима лишь для фотометрических наблюдений комет в узких кометных фильтрах.

В нашей работе разработана ещё одна методика определения параметров истечения газа в атмосферах комет, которая основывается на методе изофот. Метод изофот может быть использован при интерпретации фотометрических наблюдений комет с помощью ПЗС-камер.

МЕТОД ИЗОФОТ

В работе [7] было показано, что в кометных атмосферах осуществляется режим свободномолекулярного течения вещества, причём зона фотохимических превращений родительских молекул лежит в внутренних частях околоядерной области кометы. Распределение молекул по скоростям успевает быстро релаксировать к локально-максвелловскому из-за столкновений. В результате в переходной области головы кометы находятся в основном дочерние молекулы, свечение которых мы и наблюдаем. Если мощность источника частиц известна во все моменты, предшествующие моменту наблюдений, то пространственная плотность молекул $N(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ согласно [7] будет равна

$$N(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) = e^{-\frac{d}{v}} S(\mathbf{r}, \mathbf{v}(t)) \frac{g}{2} (t)^2, \mathbf{v} = \mathbf{g}(t) d,$$

где \mathbf{r} — вектор, соединяющий ядро кометы с данной точкой головы, \mathbf{v} — скорость молекул, t — время, прошедшее с момента вылета молекул из поверхности ядра до момента наблюдений, \mathbf{g} — ускорение молекулы в гравитационных полях ядра кометы, Солнца и в поле радиации Солнца, $e^{-\frac{d}{v}}$ — вероятность исчезновения молекулы в результате диссоциации или ионизации, обратно пропорциональная времени

жизни, $S(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ — мощность источника частиц, которая в точечном приближении описывается выражением

$$S(r, v, t) = \frac{r_0^2 n_0}{v} \sqrt{\frac{m}{2kT_{\parallel}}} \exp\left[-\frac{m(v-u)^2}{2kT_{\parallel}}\right],$$

где u — средняя гидродинамическая скорость течения газа, T_{\parallel} — продольная температура, n_0 — плотность молекул у поверхности ядра кометы радиуса r_0 .

Тогда решение для $N(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ будет иметь следующий вид:

$$N(\mathbf{r}) = n_0 r_0^2 \sqrt{\frac{m}{2kT_{\parallel 0}}} \frac{e^{-\frac{m}{2kT_{\parallel 0}} \mathbf{r} \cdot \frac{\mathbf{g}}{2} - u^2}}{2kT_{\parallel 0}^2}.$$

Используя разработанную Л. М. Шульманом модель строения нейтральной атмосферы кометы, В. Л. Афанасьев [2] путем нескольких упрощений получил выражение для поверхностной яркости $I(\theta, \phi)$ ее головы в виде

$$I(\theta, \phi) = \frac{Q}{r_{0k}} \int_{r_{0c}} K_0(y) dy \left[1 - \frac{2}{r_{0c}} \sin \theta \cos \phi - \frac{2Q}{r_{0c}} \cos E_i \right] \frac{1}{r_{0k}}. \quad (1)$$

Здесь (θ, ϕ) — полярные кометоцентрические координаты с полярной осью, направленной к Солнцу, $K_0(y)$ — функция Макдональда, $E_i(x)$ — интегральная показательная функция, $r_{0c} = 2V^2/g$, $r_{0k} = V$, V — гидродинамическая скорость течения газа в атмосфере кометы, t — время жизни светящихся молекул до их распада или ионизации, g — ускорение этих молекул под действием лучевой радиации Солнца, θ — фазовый угол кометы. В этой модели принимается, что V , t , g в пределах головы кометы имеют постоянные значения.

Это выражение успешно использовалось для получения значений V , как по спектральным наблюдениям, так и по фотометрическим разрезам головы кометы в избранных направлениях на фотографических негативах, полученных с широкополосными фильтрами.

Если изображение кометы, полученное фотографическим методом либо с помощью ПЗС-камер, имеет достаточно протяженные размеры и допускает построение нескольких изофот головы кометы, то можно вычислить V , ещё одним способом, отличным от [5].

По определению вдоль изофоты $I(\theta, \phi) = \text{const}$. Таким образом,

$$I(\theta_1, 0) = I(\theta_2, \theta/2) = I(\theta_3, \dots). \quad (2)$$

Так как согласно [9] $\int_0^{\infty} K_0(y) dy = \frac{1}{2}$, то

$$\int_{r_{0k}}^{\infty} K_0(y) dy = \frac{1}{2} \int_0^{r_{0k}} K_0(y) dy. \quad (3)$$

Полученные в работах [1, 4, 8] численные значения r_{0k} показывают, что всегда выполняется условие $r_{0k} < 1$, а значит, согласно [6] приближенно можно записать: $K_0(y) \approx 0.1159 \ln y \dots$; таким образом,

$$\int_0^{r_{0k}} K_0(y) dy \approx 0.1159 \frac{r_{0k}}{r_{0k}} - \frac{1}{r_{0k}} \ln \frac{r_{0k}}{r_{0k}} \dots \quad (4)$$

Согласно [3]

$$E_i(x) \approx 0.5772 \ln x - x \dots \quad (5)$$

Подставляя выражения (2), (3), (4) в (1), получаем

$$I(1,0) = \frac{Q}{r_{0k} r_{0c}} (1.1159 r_{0c} - r_{0c} \ln \frac{r_{0c}}{r_{0k}} - r_{0c} \ln r_{0k} - 2.2318 \frac{r_{0c}}{r_{0k}} \sin \frac{2 r_{0c}}{r_{0k}} \sin \ln \frac{r_{0c}}{r_{0k}} - 2 \frac{r_{0c}}{r_{0k}} \sin \ln r_{0k} - 1.1544 r_{0k} \cos \frac{2 r_{0c}}{r_{0k}} \cos \frac{2 r_{0c}}{r_{0k}} \ln r_{0k}), \quad (6)$$

$$I(2, 1/2) = \frac{Q}{r_{0k} r_{0c}} (1.1159 r_{0c} - r_{0c} \ln \frac{r_{0c}}{r_{0k}} - r_{0c} \ln r_{0k} - 1.1544 r_{0k} \cos \frac{2 r_{0c}}{r_{0k}} \cos \frac{2 r_{0c}}{r_{0k}} \ln r_{0k}), \quad (7)$$

$$I(3, 1) = \frac{Q}{r_{0k} r_{0c}} (1.1159 r_{0c} - r_{0c} \ln \frac{r_{0c}}{r_{0k}} - r_{0c} \ln r_{0k} - 2.2318 \frac{r_{0c}}{r_{0k}} \sin \frac{2 r_{0c}}{r_{0k}} \ln \frac{r_{0c}}{r_{0k}} - 2 \frac{r_{0c}}{r_{0k}} \sin \ln r_{0k} - 1.1544 r_{0k} \cos \frac{2 r_{0c}}{r_{0k}} \cos \frac{2 r_{0c}}{r_{0k}} \ln r_{0k}). \quad (8)$$

Подставив выражения (6)—(8) в условия (2) и проведя необходимые алгебраические преобразования, получаем систему трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{aligned} A_1 r_{0k} - B_1 r_{0c} - C_1 \ln r_{0k} &= K_1, \\ A_2 r_{0k} - B_2 r_{0c} - C_2 \ln r_{0k} &= K_2, \\ A_3 r_{0k} - B_3 r_{0c} - C_3 \ln r_{0k} &= K_3. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь

$$B_1 = \ln \frac{1}{2}, \quad B_2 = \ln \frac{3}{2}, \quad B_3 = \ln \frac{1}{3},$$

$$A_1 = 2B_1 \cos \frac{r_{0c}}{r_{0k}}, \quad A_2 = 2B_2 \cos \frac{r_{0c}}{r_{0k}}, \quad A_3 = 2B_3 \cos \frac{r_{0c}}{r_{0k}},$$

$$C_1 = 2 \frac{r_{0c}}{r_{0k}} \sin \frac{r_{0c}}{r_{0k}}, \quad C_2 = 2 \frac{r_{0c}}{r_{0k}} \sin \frac{r_{0c}}{r_{0k}}, \quad C_3 = 2 \frac{r_{0c}}{r_{0k}} \sin \frac{r_{0c}}{r_{0k}},$$

$$K_1 = 2 \frac{r_{0c}}{r_{0k}} (\ln \frac{r_{0c}}{r_{0k}} - 1.1159) \sin \frac{r_{0c}}{r_{0k}} - 2 (\frac{r_{0c}}{r_{0k}} - \frac{r_{0c}}{r_{0k}}) \cos \frac{r_{0c}}{r_{0k}},$$

$$K_2 = 2 \frac{r_{0c}}{r_{0k}} (1.1159 - \ln \frac{r_{0c}}{r_{0k}}) \sin \frac{r_{0c}}{r_{0k}} - 2 (\frac{r_{0c}}{r_{0k}} - \frac{r_{0c}}{r_{0k}}) \cos \frac{r_{0c}}{r_{0k}},$$

$$K_3 = 2 \sin (\ln \frac{r_{0c}}{r_{0k}} - 1) - \frac{r_{0c}}{r_{0k}} \ln \frac{r_{0c}}{r_{0k}} - \frac{r_{0c}}{r_{0k}} \ln \frac{r_{0c}}{r_{0k}} - 2 \cos (\ln \frac{r_{0c}}{r_{0k}} - 1).$$

Исключив в системе (9) нелинейную составляющую $\ln r_{0k}$, приходим к системе двух линейных уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{aligned} F_1 r_{0k} & N_1 r_{0c} & M_1, \\ F_2 r_{0k} & N_2 r_{0c} & M_2, \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} F_1 & A_1 C_3 & A_3 C_1, & F_2 & A_2 C_3 & A_3 C_2, \\ N_1 & B_1 C_3 & B_3 C_1, & N_2 & B_2 C_3 & B_3 C_2, \\ M_1 & K_1 C_3 & K_3 C_1, & M_2 & K_2 C_3 & K_3 C_2. \end{aligned}$$

Отсюда

$$r_{0k} = \frac{M_1 N_2}{F_1 N_2} \frac{M_2 N}{F_2 N_1}, \quad r_{0c} = \frac{M_2}{N_2} \frac{F_2 r_{0k}}{N_2}.$$

С другой стороны,

$$r_{0k} = V, \quad r_{0c} = 2V^2 / g.$$

Таким образом, из фотометрических наблюдений кометы с узкополосными фильтрами можем однозначно получить значения гидродинамической скорости истечения соответствующих молекул и время их жизни.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ

В работе [5] для проверки метода диафрагм были обработаны изображения кометы C/2009 P1 (Garradd), полученные в 2011—2012 гг. А. Баранским в полосе V с помощью ПЗС-камеры в первичном фокусе телескопа АЗТ-8 ($D = 70$ см, $F = 2.8$ м) на наблюдательной станции Астрономической обсерватории Киевского национального университета имени Тараса Шевченко в селе Лесники. Для апробации предложенного выше метода изофот мы провели обработку этих же наблюдений. После стандартных первичных редуций наблюдений (bias, flat-field, удаление «космиков»), изображения кометы обрабатывались разработанным авторами программным обеспечением, которое реализует метод изофот. Результаты обработки приведены в табл. 1. Относительная ошибка расчетных параметров составляет 30 %.

Для сравнения в табл. 2 в работе [5] приведены значения физических параметров нейтральных атмосфер в полосе C_2 избранных комет, полученные по методике [2], на сравнимых расстояниях.

Таблица 1. Сравнение физических параметров нейтральной атмосферы в полосе C_2 кометы C/2009 P1 (Garradd)

Дата	r , а. е.	\bar{v} , м/с		\bar{t} , 10^6 с	
		Метод диафрагм	Метод изофот	Метод диафрагм	Метод изофот
23/06/2011	2.8200	53.6	53.3	1.77	1.75
18/03/2012	1.9399	1040	1176	0.4	1.1

Таблица 2. Значения физических параметров нейтральной атмосферы в полосе C_2 избранных комет из работы [5]

Комета	r , а. е.	\bar{v} , м/с	\bar{t} , 10^6 с	Литературный источник
C/2000 WM1 (LINEAR)	2.79	482.3	1.45	[10, 11]
153P/Ikeya-Zhang	1.15	201	3.08	[12]

Сравнивая гидродинамические скорости истечения и времена жизни, полученные методами круговых диафрагм и изофот между собой и, с теми же характеристиками, но полученными по методике В. Л. Афанасьева [2] (табл. 2) видим, что, в пределах ошибок обработки наблюдений и неизбежных ошибок их интерпретации предлагаемая методика дает приемлемый результат. Использование широкополосных фильтров ставит под сомнение точность полученных параметров, но идентичность результатов по порядку величин позволяет сделать вывод о применимости метода изофот для интерпретации результатов фотометрических наблюдений комет с узкополосными фильтрами, что и было главной целью этой работы.

ВЫВОДЫ

Представленный здесь метод изофот, как и метод диафрагм [5] вместе с методом Афанасьева (фотометрические разрезы), подходят для интерпретации результатов фотометрических наблюдений комет. В пределах погрешности методики оба метода дают близкие результаты. Следует отметить, что метод круговых диафрагм мало чувствителен к небольшим искажениям изображений комет, но не применим при высокой плотности звезд поля. Метод изофот дает лучшие результаты для ярких комет с явно выраженной большой головой и, к тому же, его можно применять при высокой плотности звезд поля.

1. *Амирханов Р. С., Чурюмов К. И., Городецкий Д. И.* Физические параметры нейтральной комы кометы Когоутек (1973 X11) // Пробл. космич. физики.— 1979.—Вып. 14.—С. 89—92.
2. *Афанасьев В. Л.* Физические характеристики нейтральной комы кометы Абе, 1970g // Пробл. космич. физики.—1974.—Вып. 9.—С. 120—129.
3. *Корн Г. А., Корн Т. М.* Справочник по математике. — М.: Наука, 1977.— 832 с.
4. *Кравцов Ф. И.* Поверхностная фотометрия и физические условия в голове кометы Кобаяси — Бергер — Милон, 1975 IX. — Киев, 1988.—84 с.—(Рукопись деп. в УкрНИИИТИ; № 41 Ук-88).
5. *Кравцов Ф. И., Лукьяник И. В.* Определение физических параметров газа в нейтральных атмосферах комет. Метод круговых диафрагм // Кинематика и физика небес. тел.—2013.—29, № 6.—С. 45—52.

6. *Сегал Б. И., Семендяев К. А.* Пятизначные математические таблицы. — М.: ГИФМЛ, 1962.—464 с.
7. *Шульман Л. М.* Динамика кометных атмосфер. Нейтральный газ. — Киев: Наук. думка, 1972.—242 с.
8. *Юревич Л. В., Чурюмов К. И.* Физические параметры нейтрального газа головы кометы Веста (1973n) по спектральным наблюдениям 15.03.1976 г. // Пробл. космич. физики.—1978.—Вып. 13.—С. 81—88.
9. *Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф.* Специальные функции. — М.: Наука, 1977.—342 с.
10. *Churyumov K. I., Lukyanyk I. V., Bereznoi A. A., et al.* Optical spectroscopy of comet C/2000 WM1 (LINEAR) at the Guillermo Harro Astrophysical Observatory in Mexico // Earth, Moon and Planets.—2002.—**90**.—P. 361—368.
11. *Churyumov K. I., Luk'yanyk I. V., Bereznoi A. A., et al.* Spectral observations of the comet C/2000 WM1 (LINEAR) in Mexico // Astron. and Astrophys. Trans.—2003.—**22**(3).—P. 1—5.
12. *Churyumov K. I., Lukyanyk I. V., Chubko L. S., et al.* Exploration of spectra of periodic Comet 153P/Ikeya-Zhang // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. Ser.—2005.—N 5.—P. 472—476.

Статья поступила в редакцию 16.03.15