

УДК 521.86

**Ф. И. Кравцов, И. В. Лукьяник**

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета  
имени Тараса Шевченко,  
ул. Обсерваторная 3, Киев-53, 04053

**Определение физических параметров газа  
в нейтральных атмосферах комет.  
Метод круговых диафрагм**

*Рассматривается новый метод определения физических параметров газа в нейтральных атмосферах комет по фотометрическим наблюдениям — метод круговых диафрагм. Проверка показала его пригодность для вычисления гидродинамической скорости истечения газа и времени жизни молекул в нейтральной атмосфере кометы 2009/P1 (Garradd).*

*ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗУ В НЕЙТРАЛЬНИХ АТМОСФЕРАХ КОМЕТ. МЕТОД КРУГОВИХ ДІАФРАГМ, Кравцов Ф. І., Лук'яник І. В. — Розглядається новий метод визначення фізичних параметрів газу в нейтральних атмосферах комет за даними фотометричних спостережень — метод кругових діафрагм. Перевірка показала його придатність для розрахунку гідродинамічної швидкості витікання газу і часу життя молекул в нейтральній атмосфері комети 2009/P1 (Garradd).*

*DETERMINATION OF PHYSICAL PARAMETERS OF THE GAS IN NEUTRAL ATMOSPHERES OF COMETS. METHODS OF CIRCULAR APERTURE, by Kravtsov F. I., Luk'yanyk I. V. — New method to determine the physical parameters of the gas in neutral atmospheres of comets is proposed in the paper. Application of circular diaphragms 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.*

## ВСТУПЛЕНИЕ

Теория нейтральных кометных атмосфер разрабатывалась в несколько этапов. В работах [9—11, 22, 23] были разработаны простейшие модели, с помощью которых можно было оценить отдельные физические параметры. Модель Хазера [22] — одна из наиболее часто используемых, хотя и имеет ряд недостатков. Главный недостаток — это неучет лучевого давления Солнца на кометные молекулы. В модели предполагается, что кома кометы сферически-симметричная, и что дочерние молекулы образуются в результате фотолитических процессов. Предполагается, что дочерние молекулы одного сорта образуются только из одного сорта родительских молекул в результате одношаговой реакции диссоциации. Многие исследователи указывают на физическую необоснованность этой модели, но, тем не менее, отмечают, что она правильно описывает наблюдательные данные. Согласно модели Хазера распределение плотности молекул в голове кометы описывается формулой

$$n = Q(4r^2v)^{-1} \frac{(e^{-\lambda_0 r} - e^{-\lambda_1 r})}{\lambda_1 - \lambda_0},$$

где  $Q$  — газопроизводительность родительских молекул,  $r$  — кометоцентрическое расстояние,  $v$  — скорость молекул,  $\lambda_0, \lambda_1$  — длины пробегов родительских и дочерних молекул соответственно.

Для преодоления недостатков модели Комби и Дельзем [20] использовали допущение, что радикалы выбрасываются перпендикулярно к движению родительских молекул. Фестоу [21] предложил «векторную» модель, в которой предполагает изотропный выход радикалов относительно движущегося центра масс, однако эта модель слишком сложна и неудобна в применении. В работе [6] Л. М. Шульман теоретически показал, что в кометных атмосферах осуществляется режим свободномолекулярного течения вещества. Применительно к этому случаю он получил общую формулу для вычисления поверхностной плотности кометной атмосферы для произвольного источника родительских молекул с центром в ядре кометы. При этом зона фотохимических превращений родительских молекул лежит во внутренних частях околоядерной области кометы. Распределение молекул по скоростям успевает быстро релаксировать к локально-максвелловскому из-за столкновений. В результате переходная область головы кометы состоит в основном из дочерних молекул, свечение которых мы и наблюдаем. Работа Л. М. Шульмана носит чисто теоретический характер. В. Л. Афанасьев [3] адаптировал теорию Шульмана для вычисления параметров течения газа из спектральных и фотометрических наблюдений комет.

В данной работе разработан метод круговых диафрагм, который может быть использован при интерпретации фотометрических наблюдений комет с помощью ПЗС-камер.

МЕТОД КРУГОВЫХ ДИАФРАГМ

Для вычисления яркости головы кометы необходимо знать пространственную плотность молекул  $N(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ , 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. В общем случае задача определения  $N(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$  сводится к задаче об истечении газа в вакуум в поле электромагнитного излучения Солнца. В таких условиях течение газа в голове кометы будет бесстолкновительным и его можно описать дифференциальным уравнением без столкновительного члена:

$$\frac{dN}{dt} + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} N - \mathbf{g} \cdot \nabla_{\mathbf{v}} N = S(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) - N \nu(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t),$$

где  $\mathbf{g}$  — ускорение молекулы в гравитационных полях ядра кометы, Солнца и в поле радиации Солнца,  $\nu$  — вероятность исчезновения молекулы в результате диссоциации или ионизации, которая обратно пропорциональна времени жизни  $\tau$ ,  $S(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$  — мощность источника частиц.

Если мощность источника частиц известна во все моменты, предшествующие моменту наблюдений, то решение этого уравнения согласно теории Шульмана [13] будет иметь вид

$$N(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) = \int_{t_0}^t \exp\left(-\int_{t'}^t dS(\mathbf{r}, \mathbf{v}(t'), \mathbf{g}(t')^2/2, \mathbf{v} - \mathbf{g}(t'))\right) dS(\mathbf{r}, \mathbf{v}(t'), \mathbf{g}(t')^2/2, \mathbf{v} - \mathbf{g}(t')) dt'.$$

В работах [4, 5] в качестве  $S(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$  использовано выражение

$$S(r_0, \mathbf{v}_0, t_0) = G(v_0, t_0) \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \sqrt{3/4\pi} G(t_0) \exp(-\mathbf{v}_0^2/2),$$

где  $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r} - \mathbf{v} \mathbf{g} t^2/2$ ,  $\mathbf{v}_0 = \mathbf{v} - \mathbf{g} t$ ,  $t_0 = t - |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|/v$ ,  $\delta(r_0)$  —  $\delta$ -функция Дирака,  $G(t_0) = \frac{m}{2KT} \exp(-\mathbf{v}_0^2/2)$ .

В работе [13] приведено выражение для мощности источника молекул в точечном приближении:

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

где  $u$  — средняя гидродинамическая скорость течения газа,  $T_{\parallel}$  — «продольная» температура, которая характеризует тепловую скорость молекул вдоль радиуса-вектора,  $n_0$  — плотность молекул у поверхности ядра кометы радиуса  $r_0$ . Тогда решение для  $N(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$  будет иметь вид

$$N(\mathbf{r}) = n_0 r_0^2 \sqrt{\frac{m}{2kT_{\parallel 0}}} \frac{\exp\left(-\frac{m(\mathbf{v} - \mathbf{g} t)^2}{2kT_{\parallel 0}}\right)}{\exp\left(-\frac{m}{2kT_{\parallel 0}}(|\mathbf{r} - \mathbf{g} t^2/2| - u)^2\right)} \frac{d}{|\mathbf{r} - \mathbf{g} t^2/2|}.$$

Используя этот результат, В. Л. Афанасьев [3] получил выражение для яркости  $I(\theta, \varphi)$  головы кометы:

$$I(\theta, \varphi) = \frac{Q}{r_{0k}} \int_0^{r_{0k}} K_0(y) dy \left( 1 - \frac{2}{r_{0c}} \sin \theta \cos \varphi - \frac{2Q}{r_{0c}} \cos \theta E_i \right) \frac{1}{r_{0k}}. \quad (1)$$

Здесь  $(\theta, \varphi)$  — 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,  $\theta$  — фазовый угол кометы. В этой модели принимается, что  $V$ ,  $t$ ,  $g$  в пределах головы кометы имеют постоянные значения. Это выражение использовалось в работах [2, 8, 14, 16—19] для определения  $V$ , как по спектральным наблюдениям, так и по фотометрическим разрезам фотографических негативов головы кометы в избранных направлениях, полученных с широкополосными фильтрами.

Применение ПЗС-камер для наблюдений комет с узкополосными интерференционными фильтрами, позволяет иначе подойти к вычислению значений  $V$ ,  $t$ , что является сутью предлагаемого метода. В предлагаемом нами методе для решения уравнения (1) предлагается иной, чем в работе [3], математический подход. В основе нашего метода лежит определение набора значений интегральной яркости  $I(R)$  сферически-концентрических областей разных радиусов  $R$  вокруг головы кометы с центром в ее ядре. Интегральная яркость в диафрагме радиусом  $R$  может быть вычислена по формуле

$$I(R) = \int_0^R \int_0^R I(\theta, \varphi) d\theta d\varphi. \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2), получим

$$I(R) = \frac{Q}{r_{0k}} \int_0^R \int_0^R \int_0^{r_{0k}} K_0(y) dy d\theta d\varphi \left( 1 - \frac{2}{r_{0c}} \sin \theta \cos \varphi - \frac{2Q}{r_{0c}} \cos \theta E_i \right) \frac{1}{r_{0k}} d\theta d\varphi. \quad (3)$$

После интегрирования по полярному углу получаем

$$I(R) = \frac{2Q}{r_{0k}} \int_0^R \int_0^R K_0(y) dy \frac{4Q}{r_{0c}} \cos \theta E_i \frac{1}{r_{0k}}. \quad (4)$$

Так как согласно [15]  $\int_0^{r_{0k}} K_0(y) dy = \frac{1}{2}$ , то  $\int_0^{r_{0k}} K_0(y) dy = \frac{1}{2} \int_0^{r_{0k}} K_0(y) dy$ ,

вследствие чего выражение (4) перепишется в виде

$$I(R) = 2Q \int_0^R \frac{1}{2} K_0(y) dy d = \frac{4Q}{r_{0c}} \cos \int_0^R E_i \frac{1}{r_{0k}} d. \quad (5)$$

Полученные в работах [2, 8, 14] численные значения  $r_{0k}$  показывают, что всегда  $r_{0k} < 1$ , тогда согласно [12] можно приближенно записать  $K_0(y) = 0.1159 - 0.2790y^2 + \ln y - 0.25y^2 \ln y \dots$  Таким образом,

$$\int_0^{r_{0k}} K_0(y) dy = 1.1159 \frac{1}{r_{0k}} - 0.1208 \frac{1}{r_{0k}^3} - \frac{1}{r_{0k}} \ln \frac{1}{r_{0k}} - 0.0833 \frac{1}{r_{0k}^3} \ln \frac{1}{r_{0k}} \dots \quad (6)$$

Следовательно,

$$\int_0^R \frac{1}{2} K_0(y) dy d = R \left( 1.5708 - 0.6830 \frac{R}{r_{0k}} - \frac{R}{2r_{0k}} \ln \frac{R}{r_{0k}} \right). \quad (7)$$

Согласно [7]  $E_i(x) = 0.5772 - \ln x - x + 0.25x^2 \dots$ , то есть

$$\int_0^R E_i \frac{1}{r_{0k}} d = \frac{R^2}{2} \left( 0.0772 - \ln \frac{R}{r_{0k}} - \frac{2R}{3r_{0k}} \right), \quad (8)$$

вследствие чего выражение (5) приобретает вид

$$I(R) = 2Q R \left( 1.5708 - 0.6830 \frac{R}{2r_{0k}} - \frac{R}{2r_{0k}} \ln \frac{R}{2r_{0k}} - \frac{2Q}{r_{0k}} R^2 \cos \left( 0.0772 - \ln \frac{R}{r_{0k}} - \frac{2R}{3r_{0k}} \right) \right). \quad (9)$$

Вводя новые обозначения

$$A = \frac{0.6830}{r_{0k}} \frac{\ln r_{0k}}{2r_{0k}} - 0.0772 \frac{\cos}{r_{0c}} \cos \frac{\ln r_{0k}}{r_{0c}},$$

$$B = \frac{1}{2r_{0k}} \frac{\cos}{r_{0c}}, C = \frac{2 \cos}{3r_{0k} r_{0c}},$$

перепишем (9) в виде

$$I(R) = 2Q R (1.5708 - AR - BR \ln R - CR^2). \quad (10)$$

Если из наблюдений удалось получить некоторое количество ( $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ) значений  $I(R_i)$  (можно и в относительных единицах) из одного и того же изображения кометы, то можно составить систему условных уравнений с тремя неизвестными  $A, B, C$ :

$$\frac{I(R_i)}{2QR_i} = \frac{1}{2} (AR_i - BR_i \ln R_i - CR_i^2). \quad (11)$$

Из решения этой системы условных уравнений определяются значения  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , а затем вычисляются  $r_{0k}$  и  $r_{0c}$ .

Как говорилось выше, в найденные значения  $r_{0k}$  и  $r_{0c}$  входят три параметра течения нейтрального газа в атмосфере кометы: гидродинамическая скорость  $V$  течения газа, время жизни его молекул, ускорения  $g$  этих молекул под действием лучевого давления радиации Солнца, которое можно вычислить по формуле [6]:

$$g = \frac{1209 \cdot 10^3}{mr^2} \sum_i f_i F_i \text{ см/с}^2.$$

Здесь  $m$  — масса молекулы в атомных единицах массы,  $r$  — гелиоцентрическое расстояние кометы в астрономических единицах,  $\lambda_i$  — длина волны  $i$ -го электронного перехода молекулы,  $f_i$  — сила осциллятора этого перехода,  $F_i$  — интенсивность излучения Солнца на длине волны  $\lambda_i$  по [5], суммирование ведется по всем электронным переходам. Окончательно получаем:

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

#### АПРОБАЦИЯ МЕТОДА

Для проверки метода была проведена обработка наблюдений кометы C/2009 P1 (Garradd) проведенных в 2011—2012 гг. А. Баранским в фотометрической 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.

Наблюдения в фильтре  $V$  фотометрической системы Джонсона — Моргана позволяет регистрировать излучение кометы в полосах Свана молекулы  $C_2$ . Использование этого фильтра связано с тем, что по техническим причинам в данный момент кометные фильтры не могут быть установлены на телескоп АЗТ-8. Однако следует вспомнить, что до появления кометы Галлея для определения физических параметров нейтральных атмосфер, как правило, использовались широкополосные фильтры, причем вполне успешно. Тем не менее, для проверки метода желательнее в дальнейшем использовать наблюдения с кометными фильтрами.

Комета C/2009 P1 (Garradd) наблюдалась дважды: до перигелия на расстоянии 2.82 а. е. и после перигелия на расстоянии 1.9399 а. е. (табл. 1). После стандартных первичных редуцированных наблюдений изображения кометы обрабатывались разработанным авторами программным обеспечением. Вся обработка проводилась с 15 круговыми диафрагмами, радиус первой диафрагмы 5 пкл, радиус каждой последующей увеличивался на 3 пкл (1 пкл = 0.948"). Размер минимальной диафрагмы определялся технической возможностью построения круговой диафрагмы. Выбор максимальной диафрагмы определялся плот-

**Таблица 1. Физические параметры нейтральной атмосферы в полосе C<sub>2</sub> кометы C/2009 P1 (Garradd)**

Дата	$r$ , а. е.	$r_{0k}$ , 10 <sup>5</sup> км	$r_{0c}$ , 10 <sup>4</sup> км	$V$ , м/с	$t$ , 10 <sup>5</sup> с
23/06/2011	2.8200	0.94	1.22	376	2.5
18/03/2012	1.9399	4.20	10.8	1040	4.0

**Таблица 2. Физические параметры нейтральной атмосферы в полосе C<sub>2</sub> избранных комет**

Комета	$r$ , а. е.	$V$ , м/с	$t$ , 10 <sup>6</sup> с	Источник
C/2000 WM1 (LINEAR)	2.79	482.3	1.45	[20, 21]
C/1986 III (Halley)	1.76	323	1.28	[22]
153P/Ikeya-Zhang	1.15	201	3.08	[23]

ностью звезд поля на конкретном снимке. Результаты обработки приведены в табл. 1. Относительная ошибка расчетных параметров составляет 30 %.

Для сравнения в табл. 2 приведены значения физических параметров нейтральных атмосфер в полосе C<sub>2</sub> некоторых комет, полученные по методике [3] на сравнимых расстояниях.

Сравнивая значения гидродинамической скорости истечения и времени жизни, полученные методом круговых диаграмм и методом Афанасьева [7] (табл. 2), видим, что в пределах ошибок обработки наблюдений и неизбежных ошибок их интерпретации обе методики дают сходный результат, несмотря на использование для наблюдений широкополосных фильтров.

## ВЫВОДЫ

На основании модели нейтральных кометных атмосфер Шульмана разработан новый метод круговых диаграмм, который позволяет получить из фотометрических наблюдений некоторые физические параметры нейтральных атмосфер комет, а именно: время жизни светящихся молекул и гидродинамическую скорость их течения. Результат применения метода к широкополосным фотометрическим наблюдениям кометы C/2009 P1 (Garradd) показал его пригодность для оценок параметров газа, однако он нуждается в апробации на большем количестве наблюдательного материала. Кроме того, пробное применение метода позволяет заключить, что:

1) метод круговых диафрагм мало чувствителен к небольшим искажениям изображений комет, в то время как метод Афанасьева [7] сильно зависит от качества исходного материала;

2) метод круговых диафрагм неприменим при высокой плотности звезд поля.

1. Аллен К. У. Астрофизические величины. — М.: Мир, 1977.—448 с.
2. 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.
3. Афанасьев В. Л. Физические характеристики нейтральной комы кометы Абе, 1970g // Пробл. космич. физики.—1974.—Вып. 9.—С. 120—129.
4. Гнедин Ю. Н., Долгинов А. З. Распределение частиц в голове кометы // Астрон. журн.—1966.—**43**, № 1.—С. 181—191.
5. Гнедин Ю. Н., Долгинов А. З., Новиков Г. Г. Физические процессы в голове кометы // Астрон. журн.—1970.—**47**, № 4.—С. 870—884.
6. Добровольский О. В. Кометы.— М.: Наука, 1966.—288 с.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1977.—832 с.
8. Кравцов Ф. И. Поверхностная фотометрия и физические условия в голове кометы Кобаяси — Бергер — Милон, 1975 IX.—84 с.—Деп. в УкрНИИНТИ 4.01.1988 г.—№41.—Ук-88.
9. Мохнач Д. О. Распределение видимой плотности в голове кометы и его влияние на определение элементов орбиты // Бюл. Ин-та теор. астрон. АН СССР.—1956.—**6**, № 5.—С. 269—311.
10. Мохнач Д. О. Общий случай стационарного распределения видимой плотности в голове кометы при условии постоянной изотропной эмиссии // Докл. АН СССР.—1958.—**120**, № 6.—С. 1228—1230.
11. Рийвес В. Г. О фотометрии комет // Публ. Тартус. астрон. обсерватории.—1946.—**31**, № 2.—С. 2—15.
12. Сегал Б. И., Семендяев К. А. Пятизначные математические таблицы. — М.: ГИФМЛ, 1962.—464 с.
13. Шульман Л. М. Динамика кометных атмосфер. Нейтральный газ. — К.: Наук. думка, 1972.—242 с.
14. 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.
15. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. — М.: Наука, 1977.—342 с.
16. 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.
17. 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**, N 3.—P. 1—5.
18. Churyumov K. I., Kleshchenok V. V., Kravtsov F. I. Physical parameters of the neutral gas coma of Halley's comet (1986 III) on May 8, 9, and 10, 1986 // Astron. Lett.—1994.—**20**, N 4.—P. 456—460.
19. 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.
20. Combi M. R., Delsemme A. H. Neutral cometary atmospheres. 1. An average random walk model // Astrophys. J.—1980.—**237**, N 2.—P. 663—671.
21. Festou M. C. The density distribution of neutral compound in cometary atmospheres. 1. Model and equation // Astron. and Astrophys.—1981.—**95**, N 1.—P.69—80.
22. Haser L. Distribution d'intensite dans la tete d'une comete // Bull. Sci. Acad. roy. Belg. Class des Sci.—1957.—**43**, N 10.—P. 740—750.
23. Wallace L. V., Miller F. D. Isophote configurations for model comets // Astron. J.—1958.—**63**—P. 213—220.

Статья поступила в редакцию 29.01.13