

УДК 527.591

А. П. Ремизов, М. И. Веригин, Ю. И. Грингауз,
И. Анати, Т. Семерей, Т. Гомбоши,
А. К. Рихтер

**ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ
ВБЛИЗИ КОМЕТЫ ГАЛЛЕЯ КОМПЛЕКСОМ ПРИБОРОВ ПЛАЗМАГ-1
НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ «ВЕГА-1» И «ВЕГА-2»**

В комплексе научной аппаратуры ПЛАЗМАГ-1 на КА «Вега-1, 2» для измерения концентрации нейтрального газа вблизи кометы Галлея использовался напорный цилиндр Фарадея [1–3], ориентированный по вектору скорости КА относительно кометы (КЦФ). Результаты, полученные при приближении КА «Вега-1» к ядру кометы, опубликованы в работах [4, 5]. В настоящей работе более подробно описывается методика измерений и дополнительно приводятся экспериментальные данные, полученные на КА «Вега-2» и при удалении КА «Вега-1» от ядра кометы.

Методика измерений. На рис. 1 приведена принципиальная схема цилиндра Фарадея КЦФ, который использовался в комплексе аппаратуры ПЛАЗМАГ-1 для измерения распределения концентрации нейтрального газа вдоль траекторий КА «Вега-1, 2». В отличие от традиционно используемых на КА цилиндров Фарадея в датчике КЦФ для того, чтобы избежать повреждения сеток частицами кометной пыли, система анализирующих сеток была заменена системой электродов C_1 – C_6 , каждый из которых являлся плоским диском с 19 отверстиями, диаметр которых увеличивался по мере приближения к коллектору К. За счет такой электродной системы осевое сечение угловой характеристики датчика имело форму трапеции с основаниями 26° и 14° .

В режиме измерения потока нейтральных частиц на электроды C_2 и C_4 (рис. 1) подавались потенциалы -40 В и $+3500$ В, соответственно. Эти потенциалы предотвращали попадание на коллектор фото- и вторичных электронов с поверхности КА тепловых электронов окружающей плазмы с энергиями $E_e \lesssim 40$ эВ, кометных ионов и ионов солнечного ветра с энергиями $E_i \lesssim 3500$ эВ.

Таким образом, коллекторный ток

$$I_K \approx I_{ve} - I_{vi} + I_\phi - I_e \quad (1)$$

где I_{ve} и I_{vi} — токи вторичных электронов и ионов, выбитых из коллектора, пропорциональные потоку нейтральных молекул, I_ϕ — ток фотоэлек-

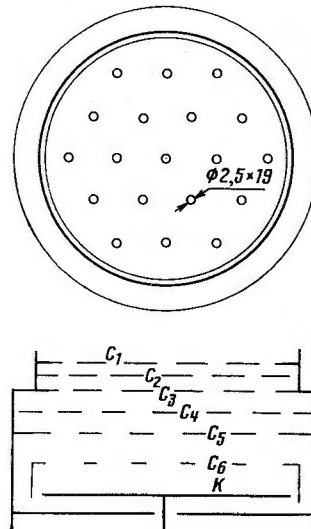


Рис. 1. Схема напорного цилиндра Фарадея (КЦФ)

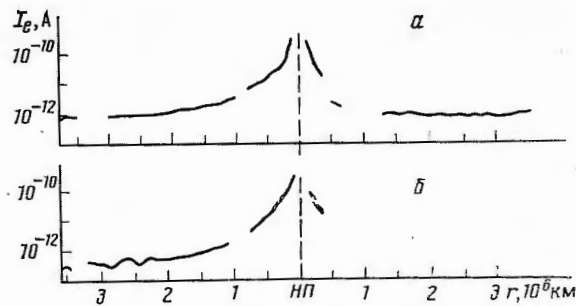


Рис. 2. Результаты измерений при помощи КЦФ на КА «Вега-1, 2» в режиме измерения тока вторичных электронов ($\times 0,1$) на расстояниях $\pm 3 \cdot 10^6$ км от точки наибольшего сближения (НП) к ядру кометы
 а — «Вега-1», 5÷6.III 1986 г.; б — «Вега-2», 8÷9.III 1986 г.

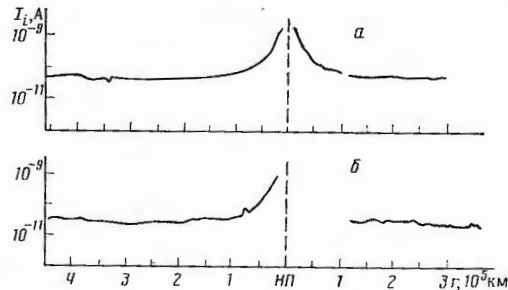


Рис. 3. Результаты измерений при помощи КЦФ на КА «Вега-1, 2» в режиме измерения тока вторичных ионов на расстояниях $\pm 3 \cdot 10^5$ км от точки наибольшего сближения (НП) к ядру кометы
 Обозначения те же, что на рис. 2

тронов и I_e — ток проникающих в датчик энергичных электронов. Для раздельной регистрации I_{ve} и I_{vi} на электрод S_6 подавались потенциалы $+40$ В и -60 В, соответственно. В первом случае — режим измерения тока вторичных электронов, подавлялся ток I_v и основной вклад в I_k давали I_{ve} , I_ϕ и I_e :

$$I_{ke} \simeq I_{ve} + I_\phi - I_e. \quad (2)$$

Во втором случае — режим измерения тока вторичных ионов, подавлялся ток I_{ve} , существенно уменьшался и изменял знак I_ϕ (этот ток теперь создавался не фотоэлектронами, выбитыми из коллектора, а приходящими на коллектор фотоэлектронами, выбитыми из электрода S_6), и несколько уменьшался ток I_e , поскольку в этом случае на коллектор могли попадать только электроны с $E_e \geq 60$ эВ:

$$I_{ki} \simeq -I_{vi} - I_\phi - I_e. \quad (3)$$

В настоящей работе для оценки концентрации нейтрального газа по измерениям $I_{ve, i}$ использовалось следующее выражение:

$$n_{\Pi} = \frac{I_{ve, i} - I_0}{Y_{e, i} q V S}, \quad (4)$$

где I_0 — суммарный вклад токов I_ϕ и I_e , q — заряд электрона, $V = 79,2$ км/с (76,8 км/с) — скорость КА «Вега-1» («Вега-2») относительно кометы, $S = 0,93$ см² — суммарная площадь входных отверстий датчика (рис. 1) и $Y_{e, i}$ — выход вторичных электронов и ионов при столкновении нейтральных частиц с коллектором. Вообще говоря, в выражении (4) I_0 не является постоянной величиной, а слабо меняется от времени и расстояния до

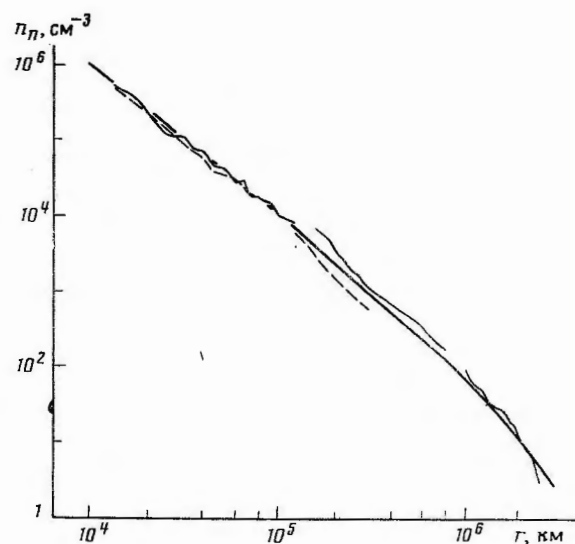


Рис. 4. Кометоцентрический профиль концентрации нейтральных частиц, оцененный по данным прибора КЦФ на КА «Вега-1». Сплошной жирной кривой показана аппроксимирующая зависимость $n_n(r) \sim r^{-2} \exp(-r/\lambda)$

кометы. Однако, при оценках n_n предполагалось $I_0 = \text{const}$ и использовались его значения, зарегистрированные датчиком на больших расстояниях от кометы, где $I_{ve, i} = 0$.

Результаты измерений. На рис. 2 показаны результаты измерений I_{ke} датчика КЦФ на КА «Вега-1, 2» в режиме измерений тока вторичных электронов. Как можно видеть из приведенных на этом рисунке данных, связанное с приближением к комете возрастание I_{ke} , определяющееся ростом n_n , началось за $3 \cdot 10^6$ км от ядра. Это расстояние значительно превышает дистанции, начиная с которых обнаружили присутствие нейтрального газа другие приборы, предназначенные для прямых измерений нейтрального газа кометы Галлея на всех космических аппаратах.

Аналогичный датчику КЦФ по принципу регистрации нейтрального газа ударный плазменный датчик (УПД), входящий в состав комплекса ПЛАЗМАГ-1, начал регистрировать связанный с увеличением n_n рост I_{ke} на кометоцентрических расстояниях $\sim 2 \cdot 10^5$ км [6]. На два порядка величины меньшая чувствительность УПД по сравнению с КЦФ определяется существенно большим уровнем фонового тока ($I_0 \approx 6 \cdot 10^{-9}$ А) этого датчика [6] по сравнению с $I_0 < 10^{-11}$ А у КЦФ. Большой уровень I_0 у УПД связан с тем, что коллектор этого детектора подвержен прямому воздействию ионов солнечного ветра и УФ излучения, тогда как на коллектор датчика КЦФ может попадать только рассеянное ультрафиолетовое излучение Солнца и ионы с $E_i > 3500$ эВ. Меньшая чувствительность существенно более сложного, чем КЦФ и УПД, масс-спектрометра нейтральных частиц (NMS) на КА Джотто, который начал регистрировать n_n , начиная с расстояний от ядра $\sim 4 \cdot 10^4$ км [7], определяется сравнительно малой эффективностью ионизации нейтралов электронным источником внутри этого прибора.

Начиная с расстояний до ядра $\sim 10^5$ км, коллекторный ток I_{ke} датчика КЦФ в режиме измерения тока вторичных электронов превышает максимально измеряемую этим прибором величину (рис. 2), однако приблизительно с этих же расстояний на КА «Вега-1» и «Вега-2» начинается рост тока I_{ni} в режиме измерения тока кометных понов (рис. 3). При расстояниях $\approx 1,5 \cdot 10^4$ км и в этом режиме измерений значения регистрируемого тока выходят за верхнюю границу диапазона измерений токов датчиком

КЦФ. Таким образом, в обоих режимах работы датчика КЦФ возможно получить информацию о распределении n_n вдоль траектории КА «Вега-1, 2» в диапазоне кометоцентрических расстояний $1,5 \cdot 10^4 \div 3 \cdot 10^6$ км.

На рис. 4, 5 приведена кометоцентрическая зависимость концентрации нейтрального газа в окрестности кометы Галлея, рассчитанная с использованием выражения (4) по результатам измерения $I_{ke, i}$.

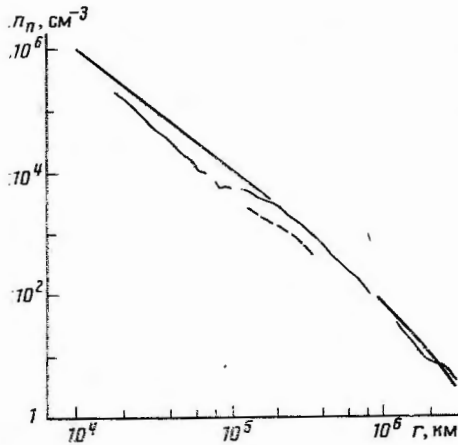


Рис. 5. То же, что и на рис. 4 по данным КЦФ на КА «Вега-2»

$$n_n(r) = n_0(r_0/r)^2 \exp(-r/\lambda) \quad (5)$$

при $n_0 = 10^4$ см⁻³, $r_0 = 10^5$ км, $\lambda = 2 \cdot 10^6$ км. При расчетах n_n по результатам измерений I_{ke} ($r \geq 10^5$ км) предполагалось, что выход вторичных электронов $Y_e \approx 0,3$. В качестве значений I_0 для КА «Вега-1» использовалась величина $I_0 = 8,5 \cdot 10^{-12}$ А, а для КА «Вега-2» $I_0 = 2,8 \cdot 10^{-12}$ А (ср. с рис. 2). При расчетах n_n по результатам измерений I_{ki} ($r \leq 10^5$ км) величина выхода ионов $Y_i \approx 0,005$ и токов I_0 выбирались таким образом, чтобы обеспечить стыковку результатов определения n_n в

обоих режимах работы датчика КЦФ ($I_0 = 3,2 \cdot 10^{-11}$ А для КА «Вега-1» и $I_0 = 1,5 \cdot 10^{-11}$ А для КА «Вега-2»).

Обсуждение полученных результатов. Как можно видеть из представленных на рис. 4, 5 данных, результаты оценки n_n по данным КЦФ на КА «Вега-1, 2» в целом достаточно хорошо (с точностью до фактора ~ 2) описываются простейшей зависимостью (5), полученной в работе [8] в предположении радиального истечения нейтральных молекул с постоянной скоростью V и ограниченным временем жизни λ/V . Это обстоятельство дает возможность оценить скорость производства газа кометой Галлея как $Q = 4\pi V n_0 r_0^2 \approx 1,3 \cdot 10^{30}$ с⁻¹ при $V = 1$ км/с [4, 5].

Однако в ряде областей наблюдались и систематические отклонения n_n от простейшей $r^{-2} \exp(-r/\lambda)$ зависимости. Так, например, на подлетной части траектории КА «Вега-2» в диапазоне от $1,5 \cdot 10^4$ до 10^5 км оцененные значения n_n были в ~ 2 раза меньше, чем на КА «Вега-1», тогда как дальше от ядра оцененные n_n по измерениям на обоих КА существенно ближе друг к другу. Для обоих КА на отлетной части траектории значения n_n , рассчитанные по измерениям I_{ke} в диапазоне расстояний $1,5 \cdot 10^5 \div 3 \cdot 10^6$ км, были в ~ 2 раза меньше, чем по аналогичным измерениям на подлетной части траектории (рис. 4 и 5). Эти отклонения возможно связаны с дже-тами, испускаемыми вращающимся ядром кометы, в которых наряду с пылью выбрасывается и нейтральный газ. Некоторое влияние на показания приборов могло оказать рассеянное кометой УФ-излучение Солнца; на асимметрию распределения нейтралов вдоль траектории КА могло влиять давление солнечного излучения. Влияние подобных факторов на полученные результаты мы предполагаем исследовать в дальнейшем. Отметим также, что отклонения n_n от r^{-2} зависимости на кометоцентрических расстояниях $\leq 3 \cdot 10^4$ км наблюдались также по данным приборов УПД и ИНГ на КА «Вега-1» [6, 11].

Хотя аппроксимирующее выражение (5) достаточно хорошо описывает представленное на рис. 4, 5 распределение $n_n(r)$ по данным КЦФ, однако точность определения входящих в него параметров невысокая. В настоящее время основная погрешность определения величины $n_0 r_0^2$ связа-

на с неопределенностью знания коэффициентов выхода электронов и ионов $Y_{e,i}$ при столкновении с никелевым коллектором КЦФ нейтрального газа. Точность определения величины $n_0 r_0^2$ и скорости производства газа кометой Галлея по данным КЦФ оценивается нами фактором $2 \div 3$.

Скорость производства газа ядром кометы Галлея, оцененное по данным КЦФ на КА «Вега-1, 2», находится в разумном согласии с оценками этого параметра по данным других экспериментов на КА «Вега-1, 2» и Джотто. По результатам спектральных измерений в видимом и близком инфракрасном диапазонах при помощи трехканального спектрометра ТКС на борту КА «Вега-2» скорости производства молекул H_2O и OH были оценены, соответственно, как $\sim 4 \cdot 10^{29} \text{ с}^{-1}$ и $\sim 1,7 \cdot 10^{30} \text{ с}^{-1}$ [9]. По данным измерений этим же прибором в ближнем ультрафиолетовом и видимом диапазонах $Q_{OH} \approx 9 \cdot 10^{29} \text{ с}^{-1}$ [10]. Оцененные в работе [6] значения Q по данным УПД на КА «Вега-1» изменяются в пределах от 10^{30} до $4 \cdot 10^{30} \text{ с}^{-1}$. Наконец, предварительные оценки скорости производства газа кометой Галлея по данным прибора NMS на борту КА Джотто составляет $\approx 6,9 \cdot 10^{29} \text{ с}^{-1}$ [7].

Заключение

Сравнивая приведенные выше результаты независимых экспериментов, можно сделать вывод, что измерения при помощи входящего в состав комплекса ПЛАЗМАГ-1 датчика КЦФ обеспечили достаточно надежное в целом описание распределения нейтрального газа в окрестности кометы Галлея. Причем, в диапазоне кометоцентрических расстояний $2 \cdot 10^5 \div 3 \cdot 10^6$ км датчик КЦФ оказался единственным на всех космических аппаратах, способным непосредственно измерять распределение нейтрального газа вдоль траектории. Дальнейшее уточнение количественных характеристик распределения нейтрального газа в окрестности кометы Галлея по данным прибора КЦФ возможно на основе тщательных экспериментальных измерений коэффициентов выхода вторичных электронов и ионов $Y_{e,i}$ и учета влияния всех факторов околокометного пространства на показания КЦФ.

Авторы статьи выражают свою благодарность д-ру Р. Гарду за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gringauz K. I. et al. The VEGA probe instrument package for measuring charged particles with energies less than 25 keV // Cometary Exploration III/Ed. T. 1. Gombosi. Central Research Institute for Physics. Budapest. 1982.
2. Gringauz K. I. et al. The VEGA PLAZMAG 1 experiment: description and first experimental results // Field Particle and Wave Experiments on Cometary Mission/Eds. K. Schwingenschuh and W. Riedler. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Wien. 1986. V. 203.
3. Apathy I. et al. Solar wind measurements during the closest approach to comet Giacobini – Zinner by the ICE probe and to comet Halley by the Giotto and Suisei spacecraft // Exploration of Halley's comet. ESA SP-250. 1986. V. 1. P. 65.
4. Gringauz K. I. et al. First in situ plasma and neutral gas measurements at comet Halley // Nature. 1986. V. 321. № 6067. P. 282.
5. Gringauz K. I. et al. First results of plasma and neutral gas measurements from VEGA-1/2 near comet Halley // Adv. Space Res. 1985. V. 5. № 12. P. 165.
6. Gard R. et al. Interpretation of the measurements of secondary electron currents induced by impact during the flyby of comet Halley // Adv. Space Res. 1985. V. 5. № 12. P. 149.
7. Krankowsky D. et al. In situ gas and ion measurements at comet Halley // Nature. 1986. V. 321. № 6067. P. 326.
8. Haser L. Distribution d'intensité dans la tête d'une comète // Bull. Acad. Roy. Belgique. Classe des Sciences. 1957. V. 43. P. 470.
9. Krasnopolsky V. A. et al. Spectroscopic study of comet Halley by the VEGA-2 three – channel spectrometer // Nature. 1986. V. 321. № 6067. P. 269.
10. Moreels G. et al. Near – ultraviolet and visible spectrometry of comet Halley from VEGA-2 // Nature. 1986. V. 321. № 6067. P. 271.
11. Keppler E. et al. Neutral gas measurements of comet Halley from VEGA-1 // Nature. 1986. V. 321. № 6067. P. 273.