

УДК 523.72

*К. И. Грингауз, А. П. Ремизов, М. И. Веригин, А. Рихтер,
М. Татралья, К. Сега, И. Н. Клименко, П. Апати,
Т. Гомбоши, Т. Семереи*

**ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПОНЕНТ ПЛАЗМЫ В ОКРЕСТНОСТИ
КОМЕТЫ ГАЛЛЕЯ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОГО
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА КОМПЛЕКСА
«ПЛАЗМАГ-1» НА КА «ВЕГА-2»**

Для измерения энергетических спектров электронного компонента плазмы на КА «Вега-2» использовался электростатический анализатор электронов (АЭ), входящий в состав плазменного комплекса «Плазмаг-1». Этот анализатор, ориентированный перпендикулярно плоскости эклиптики, позволял ежесекундно проводить измерения электронных потоков в 30 энергетических интервалах, логарифмически расположенных в диапазоне энергий 3–10 000 эВ. Примеры энергетических спектров электронов, измеренных при помощи АЭ в окрестности кометы Галлея, и более подробное описание прибора можно найти в [1–4]. В настоящей работе приводятся и обсуждаются результаты электронных измерений на «Вега-2» в околокометном пространстве, проводится их сопоставление с результатами аналогичных измерений на Джотто.

Результаты измерений. На рис. 1 представлены усредненные по 2-мин интервалам времени результаты измерений энергетических спектров электронов при помощи анализатора АЭ, полученные при приближении КА «Вега-2» к ядру кометы Галлея в диапазоне кометоцентрических расстояний $r \approx 8 \cdot 10^5 \div 1,5 \cdot 10^4$ км. Данные приведены в логарифмическом масштабе, исходный уровень соответствует скорости счета АЭ $\approx 10^3$ с⁻¹. Для того чтобы учесть различие геометрического фактора АЭ в первых 15 энергетических интервалах от остальных 15 из-за различной схемы подачи анализирующих напряжений на этот анализатор [4], приведенные на рис. 1 скорости счета АЭ в первых энергетических интервалах умножены на фактор 2.

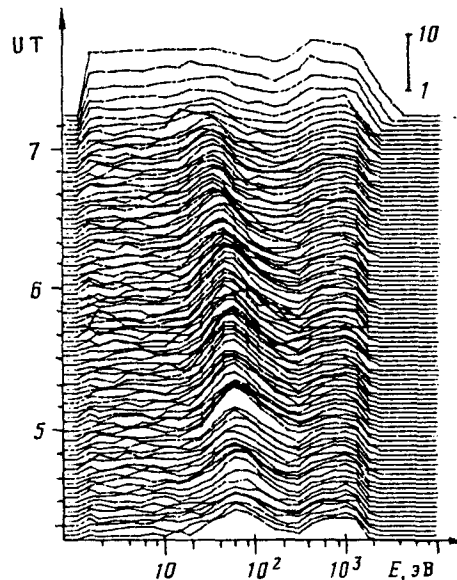


Рис. 1. Результаты измерений в околокометном пространстве энергетических спектров электронов 9.III 1986 г. на КА «Вега-2» на расстояниях $\approx 8 \cdot 10^5$ км от ядра кометы Галлея

К моменту начала приведенных на рис. 1 данных «Вега-2» уже пересекла в $\approx 02.20 \div 02.30$ UT на $r \approx 1,3 \cdot 10^6$ км фронт околокометной ударной волны [5] и находилась в кометошите. Основной особенностью энергетических спектров электронов в этой области является присутствие на них четко выраженного максимума электронных потоков с энергией E_m в несколько десятков электронвольт. Этот максимум создан тепловыми электронами кометошита, его энергия систематически уменьшается при углублении КА «Вега-2» в кометошит и приближении к кометопаузе (≈ 06.45 UT, $r \approx 1,6 \cdot 10^5$ км [6]).

Уменьшение E_m при углублении в кометошит отражает процесс охлаждения электронного компонента плазмы, так как в случае изотропного максвелловского распределения электронов с температурой T_e , зависимость скорости счета АЭ от энергии E пропорциональна $E^2 \cdot \exp(-E/kT_e)$

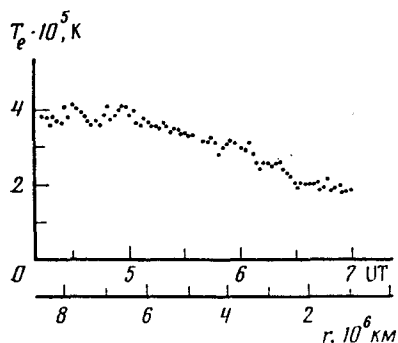


Рис. 2

Рис. 2. Распределение температуры электронов в кометошите между $\approx 8 \cdot 10^5$ км и кометопаузой, расположенной на $\approx 1,6 \cdot 10^5$ км

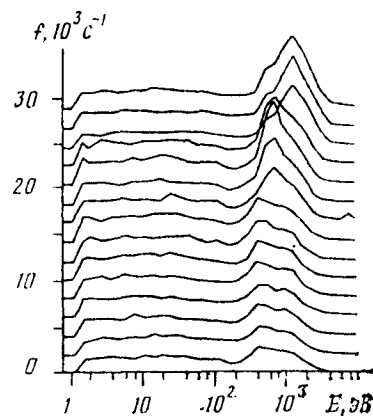


Рис. 3

Рис. 3. Результаты измерений при помощи электростатического электронного анализатора в глубине области кометной плазмы 9.III 1986 г. с 07.14.56 по 07.17.23 UT. $r = (24,7 \div 14,5) \cdot 10^3$ км

и, следовательно, $E_m = 2T_e$. На рис. 2 представлены результаты оценок T_e по приведенным на рис. 1 данным АЭ. Как видно из рис. 2, температура электронов в кометошите уменьшилась в ≈ 2 раза, от $T_e \approx 4 \cdot 10^5$ К в его внешних областях до $\approx 2 \cdot 10^5$ К у кометопаузы. Следует отметить, что при подлете «Веги-2» к комете на расстояниях $\approx 5 \div 6 \cdot 10^6$ км от ядра в солнечном ветре T_e была также $\approx 2 \cdot 10^5$ К, ближе к фронту ударной волны параметр испытывал ряд вариаций и, наконец, за $\approx 3 \cdot 10^5$ км до фронта значения T_e составляли уже $3,5 \div 4 \cdot 10^5$ К.

На рис. 3 показаны усредненные по 10-с интервалам времени результаты измерений энергетических спектров электронов при помощи анализатора АЭ в последний период работы этого прибора на КА «Вега-2». непосредственно перед тем, как комплекс «Плазмаг-1» временно вышел из строя, по-видимому, из-за удара твердой частицы. Как видно из приведенных на этом рисунке данных, на расстояниях $1,5 \div 2,5 \cdot 10^4$ км от ядра возрастают не только скорости счета АЭ в диапазоне энергий 0,3 ÷ 3 кэВ, но изменяется и профиль распределения скоростей счета по энергиям таким образом, что наибольшие скорости счета регистрируются АЭ при все больших энергиях.

Кроме измерений электронных потоков при помощи АЭ на борту КА «Вега-2», измерения энергетических спектров электронов в окрестности кометы Галлея проводились только на КА «Джотто», при помощи входившего в эксперимент RPA — COPERNIC электростатического анализатора электронов RPA1 — EESA [7]. Поэтому представляет интерес сравнить результаты обоих экспериментов.

Перед встречей Джотто с кометой температура электронов в солнечном ветре была $\approx 2,5 \cdot 10^5$ К, т. е. сходной с температурой электронов перед встречей КА «Вега-2» с кометой Галлея. Как и на КА «Вега-2», на Джотто наблюдался рост T_e до $\approx 3,5 \cdot 10^5$ К (в foreshock-области) за несколько сот тысяч километров до фронта ударной волны [7].

По данным EESA в кометошите (transition region [7]) на расстояниях $1,5 \cdot 10^6 \div 5,5 \cdot 10^5$ км от ядра наблюдались большие флуктуации T_e при практически постоянном ее среднем уровне $\approx 3,5 \cdot 10^5$ К. Близкий к этому значению постоянный средний уровень T_e наблюдался на КА «Вега-2» с $\approx 8 \cdot 10^5$ км (начало измерений) до $6 \cdot 10^5$ км (см. рис. 2). При дальнейшем приближении к ядру температура электронов в кометошите по данным АЭ на КА «Вега-2» систематически уменьшалась и достигала $\approx 2 \cdot 10^5$ К у кометонаузы (рис. 2). Аналогичное уменьшение T_e при приближении к кометонаузе (collisionopause [7]) наблюдалось и на Джотто.

Охлаждение электронного компонента плазмы с $\approx 4 \cdot 10^5$ К около ударной волны до $\approx 2 \cdot 10^5$ К у кометонаузы, наблюдавшееся на КА «Вега-2» и на Джотто, по-видимому, связано с потерями энергии электронами в процессе их неупругих столкновений с кометным нейтральным газом. Действительно, в окрестности кометонаузы при $r \approx 1,6 \cdot 10^5$ км концентрация нейтральных молекул составляет $n_n \approx 5 \cdot 10^3$ см⁻³ [8]. Потери энергии электрона на неупругие столкновения при движении сквозь водяной пар такой плотности составляют $n_n L_e \approx 2 \cdot 10^{-11}$ эВ/см, где $L_e \approx 4 \cdot 10^{-15}$ см²/эВ — функция потерь энергии электрона при $E_e \approx 40$ эВ [9]. Скорость течения плазмы в окрестности кометонаузы $V \approx 200$ км/с [6] и, следовательно, характерное время обтекания составляет $\tau \approx r/V \approx 800$ с. За это время электрон, движущийся со скоростью ≈ 4000 км/с, пролетит $\approx 3 \cdot 10^6$ км и потеряет на этом расстоянии энергию ≈ 6 эВ. Эта величина сравнима с наблюдающимся охлаждением электронного компонента плазмы. Таким образом, объяснение наблюдавшегося на КА «Вега-2» и Джотто в кометошите охлаждения электронов потерями их энергии в неупругих столкновениях представляется вполне обоснованным.

Особенность электронного компонента плазмы, наблюдавшаяся на КА «Вега-2» при $r \approx 1,5 \div 2 \cdot 10^4$ км и совсем не наблюдавшаяся на Джотто, — присутствие на этих кометоцентрических расстояниях потоков энергетичных электронов с $E_e \approx 1$ кэВ (см. [1, 2] и рис. 3). Регистрация энергичных электронов на КА «Вега-2» и отсутствие их во время пролета Джотто даст основание предположить, что присутствие таких электронов в околокометном пространстве — спорадическое и является следствием происходящих там процессов типа «суббури». Возможность протекания таких процессов в окрестности комет впервые рассматривалась в работах [10, 11]. На рис. 4 в соответствии с работами [12, 13] показана схематическая модель кометной суббури. В стационарном случае идеализирования токовая система кометного хвоста имеет обычную 0-образную форму. При частичном разрыве текущего поперек хвоста тока возникают направленные вдоль него токи, замыкающиеся через кому (рис. 4). В таких нестационарных процессах электроны могут ускориться до энергий в несколько килоэлектронвольт, подобно авроральным электронам в верхней атмосфере Земли. Поток энергичных электронов, генерированных во время такой кометной суббури, возможно, и наблюдался на КА «Вега-2».

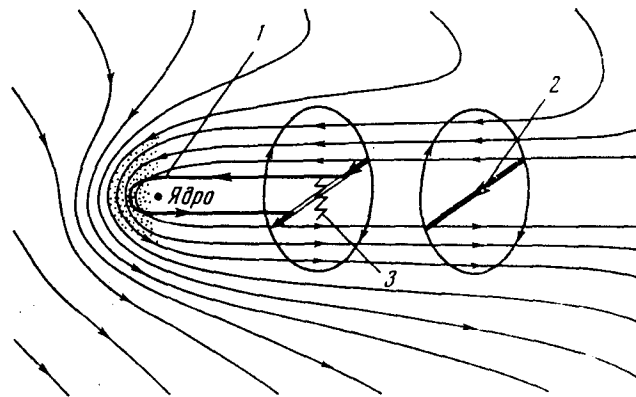


Рис. 4. Схематическая модель процессов, приводящих к образованию энергичных электронов в околокометном пространстве согласно [12, 13]
 1 — разряд поперечного тока через кому; 2 — ток поперек кометного хвоста; 3 — частичный разрыв поперечного тока

Косвенным свидетельством в пользу спорадического появления энергичных электронов в околокометном пространстве могут являться результаты измерения УФ-спектров кометы Галлея 18–19.III 1986 г. на спутнике IUE [14]. За 37 мин между двумя из приведенных в этой работе спектров в ≈ 4 раза упала интенсивность линии CO_2^+ , тогда как яркость ОН осталась практически прежней. Для объяснения такой особенности в работе [14] привлекается предположение о дополнительной ионизации потоками энергичных электронов.

Остановимся теперь на возможных приборных эффектах. Особенность работы АЭ на КА «Вега-2» — значительный рост приборного фонового счета, наблюдавшийся при углублении КА «Вега-2» в область кометной плазмы после пересечения кометоплазмы. Для расширения динамического диапазона АЭ в этом приборе было предусмотрено периодическое включение режима измерений с пониженной (в ≈ 100 раз) чувствительностью на первых 15 энергетических интервалах ($E_e \leq 150$ эВ). В таком режиме измерений в кометошите максимум скорости счета, обусловленный тепловыми электронами, уже не регистрировался. Сравнение показаний АЭ в первых энергетических интервалах в обоих режимах работы позволяет оценить приборный фон и сделать вывод, что максимум скорости счета этого прибора при энергиях ≤ 150 эВ обусловлен тепловыми электронами и не является приборным эффектом.

Во внутренних частях области кометной плазмы скорости счета АЭ при $E_e \leq 150$ эВ практически перестали изменяться при включении режима измерений с пониженной чувствительностью. Таким образом, быстрый рост скоростей счета АЭ при $E_e \leq 150$ эВ при углублении в область кометной плазмы является следствием увеличения приборного фона и не отражает истинное изменение электронных потоков в этой области.

Хотя измерения пика энергичных электронов при $E_e \approx 1$ кэВ представляются вполне надежными и его спорадическое появление находит удовлетворительное объяснение, мы тем не менее озабочены возможными приборными эффектами и при таких энергиях, поскольку в энергетическом диапазоне $E_e \geq 150$ эВ не было предусмотрено режима измерений с пониженной чувствительностью. На кометоцентрических расстояниях $r \leq \leq 2 \cdot 10^4$ км скорости счета АЭ при энергиях ≈ 1 кэВ возрастают быстрее, чем при меньших энергиях, и энергия, соответствующая наибольшим скоростям счета, увеличивается (рис. 3). В это время наибольшие скорости счета в пике энергичных электронов в 5–7 раз превышают фоновые скорости счета при 200–300 эВ. Однако то обстоятельство, что небольшой

максимум скорости счета АЭ остается при тех же энергиях даже 2 сут спустя после пролета КА «Вега-2» кометы Галлея (см. рис. 5 в [1] и рис. 6 в [2]) дает основание предположить, что по крайней мере частично он является приборным эффектом. Лабораторные испытания оставшегося образца прибора не выявили в нем аналогичных приборных эффектов. Исследования, касающиеся этой проблемы, будут продолжены.

Авторы выражают искреннюю благодарность Д. А. Мендису за полезные обсуждения некоторых вопросов, затронутых в статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gringauz K. I. и др.* Первые прямые измерения плазмы и нейтрального газа у кометы Галлея: Первоначальные результаты с космических аппаратов «Вега» // Письма в «Астрон. журн.». 1986. Т. 12. С. 666.
2. *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.
3. *Gringauz K. I. et al.* The Vega Plasmas-1 Experiment: Description and First Results // Field Particle and Wave Experiments on Cometary Missions. Graz: Austrian Academy of Sciences Publication, 1986. P. 157.
4. *Apathy I. et al.* Plasmag-1 Experiment 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.
5. *Galeev A. A. et al.* Position and Structure of the Comet Halley Bow Shock: VEGA-1 and VEGA-2 Measurements // *Geophys. Res. Lett.* 1986. V. 13. P. 841.
6. *Gringauz K. I. et al.* Detection of a New «Chemical» Boundary at Comet Halley // *Geophys. Res. Lett.* 1986. V. 13. P. 613.
7. *Rème H. et al.* Comet Halley – Solar Wind Interaction from Electron Measurements aboard Giotto // *Nature.* 1986. V. 321. P. 349.
8. *Ремизов А. П. и др.* Измерение концентрации нейтральных частиц вблизи кометы Галлея комплексом приборов «Плазмаг-1» на космических аппаратах «Вега-1» и «Вега-2» // *Космич. исслед.* 1987. Т. 25. № 5.
9. *Olivero J. J. et al.* Electron Deposition in Water Vapor with Atmospheric Application // *J. Geophys. Res.* 1972. V. 77. P. 4797.
10. *Ip W.-H., Mendis D. A.* The Generation of Magnetic Fields and Electric Currents in the Cometary Plasma Tails // *Icarus.* 1976. V. 29. P. 147.
11. *Ip W.-H.* Currents in Cometary Atmosphere // *Planet. Space Sci.* 1976. V. 27. P. 121.
12. *Ip W.-H., Asford W. I.* Theories of Physical Processes in the Cometary Comae and Ion Tails // *Comets.* Tucson: Univ. of Arizona Press, 1982. P. 588.
13. *Mendis D. A., Houpsis H. L. F., Markoni M. L.* The Physics of Comets // *Fundamentals of Cosmic Physics.* 1985. V. 10. P. 1.
14. *Feldman P. D. et al.* Is CO₂ Responsible for the Outbursts of Comet Halley // *Nature.* 1986. V. 324. P. 433.

Поступила в редакцию
13.VIII.1987