

УДК 523.72

*М. И. Веригин, К. Н. Грингауз, А. Рихтер, Т. Гомбоши,
А. П. Ремизов, К. Сеге, Н. Апати, Т. Семери,
М. Тамральни, Л. А. Лежен*

**ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТИ КОМЕТЫ
ГАЛЛЕЯ (КОМЕТОШИТА) ПО ДАННЫМ КА «ВЕГА-1»
И «ВЕГА-2»**

Плазменные измерения, проводившиеся в окрестности кометы Галлея на КА «Вега-1, -2» при помощи комплекса научных приборов «Плазмаг-1» [1–3], выявили существование на $\approx 10^6$ км от ядра околокометной ударной волны, сформировавшейся в результате нагружения солнечного ветра кометными ионами [4, 5]. Этот процесс приводит к ряду особенностей плазменного потока до фронта ударной волны и после его пересечения — в кометошите, ранее не наблюдавшихся при обтекании планет солнечным ветром. В настоящей работе приводятся дополнительные экспериментальные данные, полученные на КА «Вега-1, -2» в возмущенном присутствием кометного нейтрального газа солнечном ветре, в окрестности ударной волны и в кометошите, и обсуждаются особенности физических характеристик плазмы в этих областях.

Экспериментальные данные. На КА «Вега-1, -2» основные сведения о свойствах плазмы в самых внешних областях взаимодействия солнечного ветра с кометой Галлея были получены при помощи двух электростатических анализаторов, входящих в состав комплекса «Плазмаг-1». Эти анализаторы измеряли энергетические спектры ионов, приходящих в направлении от Солнца (АС) и вдоль вектора скорости КА относительно кометы (АК). Поле зрения АС-анализатора составляло $30 \times 38^\circ$, энергетические спектры ионов измерялись в 60 логарифмически расположенных энергетических интервалах в диапазоне энергий $50 \div 25\,000$ эВ/ Q (Q — зарядовое число). При помощи АК-анализатора энергетические спектры ионов измерялись в 120 логарифмически расположенных интервалах в диапазоне энергий $15 \div 3500$ эВ/ Q ; поле зрения этого прибора $14 \times 32^\circ$. Более подробное описание приборов можно найти в [3].

На рис. 1 показана зависимость от кометоцентрического расстояния r переносной скорости протонов солнечного ветра V , полученная по данным АС-анализаторов на КА «Вега-1, -2». Положение околокометной ударной волны на этом рисунке отмечено в соответствии с работой [6] на основе одновременных плазменных, волновых и магнитных измерений. Как видно из приведенных на рис. 1 данных, падение скорости солнечного ветра вследствие нагрузки тяжелыми кометными ионами началось за $(2 \div 3) \cdot 10^6$ км от ядра, за $(1 \div 2) \cdot 10^6$ км до фронта ударной волны.

Энергетические спектры ионов, измеренные АС-анализатором на КА «Вега-1» при пересечении околокометной ударной волны на подлетной и отлетной частях траектории, показаны на рис. 2. При приближении к комете, за несколько часов до фронта ударной волны кроме уже отмечавшегося выше постепенного торможения протонов происходит и постепен-

ное расширение энергетических спектров ионов, т. е. их температура возрастает (рис. 2). После 20-мин перерыва в данных рост ионной температуры приводит к практическому слиянию пиков протонов и α -частиц. Вскоре значительно увеличивается градиент падения переносной скорости ионов, связанный с пересечением ударной волны на расстоянии $1,02 \cdot 10^6$ км от ядра (≈ 03.46 UT), пики протонов и α -частиц на энергетических спектрах становятся неразличимы.

Более сложная картина наблюдалась при пересечении околокометной ударной волны на отлетной части траектории «Вега-1». Наибольший градиент скорости плазмы здесь наблюдался в окрестности $09.00 \div 09.30$ UT на расстояниях $\approx 5,5 \cdot 10^5$ км от ядра, однако ионная температура оставалась высокой и пики протонов и α -частиц были неразличимы вплоть до

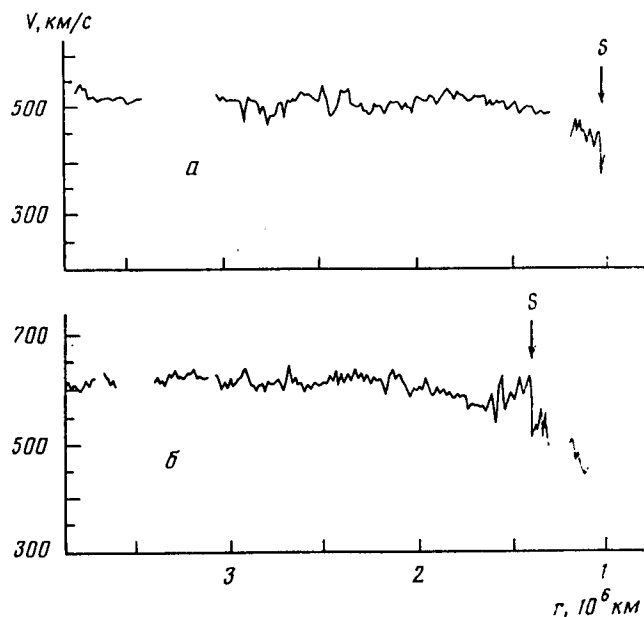


Рис. 1. Кометоцентрическая зависимость переносной скорости протонов солнечного ветра перед околокометной ударной волной S по измерениям на КА «Вега-1» 5–6.III (а) и «Вега-2» 8–9.III 1987 г. (б)

11.30 ($r \approx 1,2 \cdot 10^6$ км). По-видимому, в этом случае пересечение ударной волны происходило на $(5,5 \pm 1) \cdot 10^5$ км, а наблюдавшийся после этого на протяжении $\approx 8 \cdot 10^5$ км до ≈ 12.20 UT повышенный уровень температуры ионов связан с повышенным уровнем МГД-турбулентности перед квазипараллельной [7] ударной волной.

Ниже по потоку за ударной волной оба КА «Вега» вошли в переходную область, названную кометошитом, для того, чтобы отметить принципиальное различие между физическими процессами, происходящими в ней и процессами, определяющими формирование магнитошита у планет с сильным собственным магнитным полем, или ионошита у планет с намного более сильными гравитационными полями по сравнению с кометными. На рис. 3 представлены спектрограммы потока ионов по данным АС-анализатора на «Вега-1». Приведенные на этом рисунке данные начинаются и заканчиваются в кометошите при $r \approx 8 \cdot 10^5$ и $\approx 3 \cdot 10^5$ км соответственно; в $07.02.06$ UT «Вега-1» находилась в точке наибольшего приближения к ядру на расстоянии 8889 км от него. Самая внешняя из показанных на рис. 3 изолиний соответствует скорости счета $f_0 = 5 \cdot 10^2$ с $^{-1}$; при переходе к следующей изолинии скорость счета этого прибора увеличивается в $1,5$ раза.

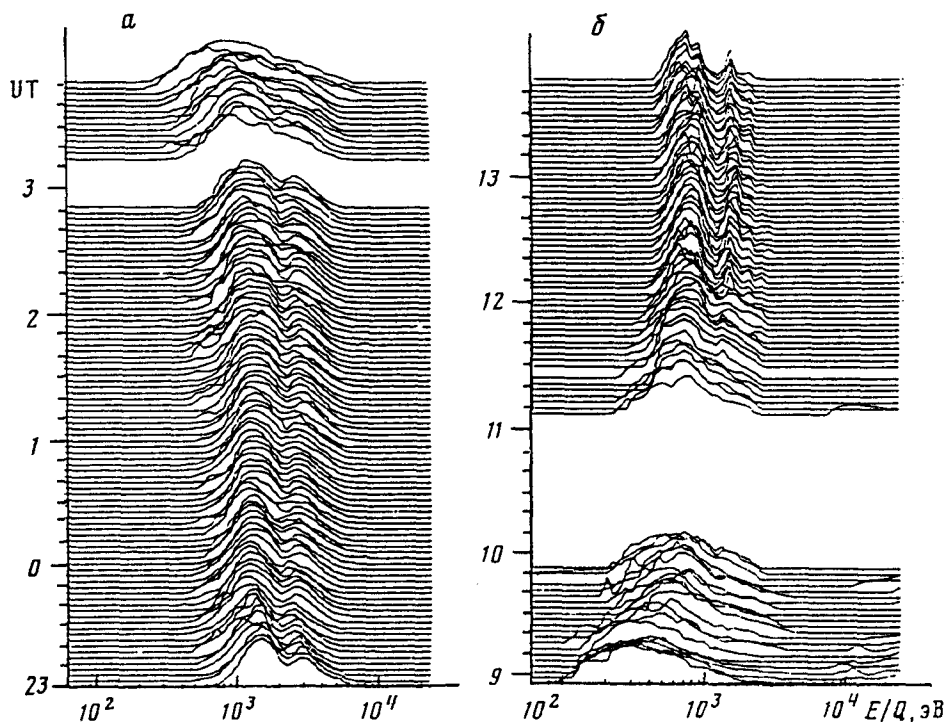


Рис. 2. Энергетические спектры ионов, измеренные при пересечении околокометной ударной волны при подлете КА «Вега-1» к ядру кометы Галлея (а) и отлете от него (б)

Характерной особенностью приведенной на рис. 3 спектрограммы является присутствие в кометошите до ≈ 06.40 UT двух ветвей в энергетическом распределении ионов. Левая, менее энергичная из них, очевидно, создана термализованными и заторможенными на фронте околокометной ударной волны протонами и α -частицами солнечного ветра. Более энергичная правая ветвь создана кометными ионами (рис. 3), поскольку ионы с такими энергиями в солнечном ветре при помощи АС-анализатора никогда не наблюдались. Экстраполируя энергию максимума пика кометных ионов на большие расстояния от ядра (где она выходит за 25 кэВ — верхнюю границу энергетического диапазона АС) можно сделать вывод, что регистрируемые этим датчиком кометные ионы являются ионами группы воды (например, O^+ , OH^+ , H_2O^+), захваченными магнитным полем и ускоренными на тех расстояниях до удвоенной скорости протонов солнечного ветра.

При углублении в кометошит энергия протонов постепенно уменьшается. Энергия кометных ионов, регистрируемых АС-анализатором, уменьшается значительно быстрее, так что отношение энергий в обеих ветвях спектрограммы уменьшается. На расстояниях $3 \div 4 \cdot 10^5$ км от ядра (06.00–06.15 UT) скорость кометных ионов в направлении этого анализатора уменьшается до скорости протонов, их потоки становятся сопоставимыми с потоками протонов. После этого скорость уменьшения энергии кометных ионов, регистрируемых АС-анализатором, еще более возрастает, тогда как энергия протонов остается практически неизменной (рис. 3).

В окрестности кометопаузы ≈ 06.45 UT, отделяющей кометошит от области кометной плазмы, протоны, происходящие из солнечного ветра, исчезают из поля зрения АС-анализатора; характерная величина энергии кометных ионов близка к ≈ 1 кэВ. С учетом скорости КА «Вега-1» относи-

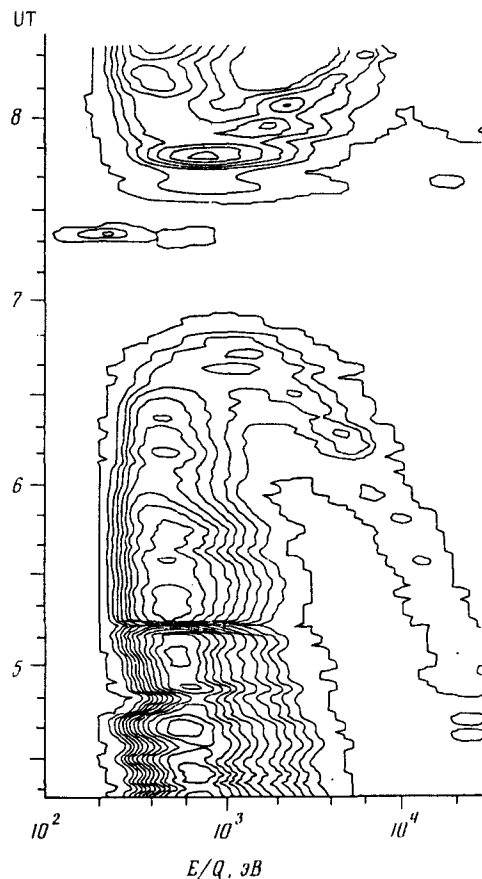


Рис. 3. Спектрограммы потоков ионов по данным АС-анализатора в кометошите кометы Галлея

тельно кометы (79,2 км/с) скорость тяжелых ионов в окрестности кометоплаузы можно оценить в несколько десятков км/с, тогда как скорость протонов в этом месте еще несколько сотен км/с.

После наибольшего приближения к комете изменения характеристик плазмы в кометошите в основном повторяются в обратном порядке.

Кроме крупномасштабных изменений характеристик течения плазмы в кометошите, определяющих картину обтекания кометы солнечным ветром в целом, для этой области характерен очень большой уровень МГД-турбулентности в широком диапазоне частот. Представленную на рис. 3 спектрограмму ионных потоков можно рассматривать так же, как пример регистрации крупномасштабных/долгопериодических колебаний интенсивности потока плазмы в кометошите с характерным периодом ≈ 15 мин.

Пример регистрации вариаций потока плазмы в кометошите с меньшим характерным временем $\approx 20 \div 30$ с приведен на рис. 4. На этом рисунке показаны спектрограммы ионных потоков, полученные в кометошите ($r \approx 7,4 \cdot 10^5$ км) при помощи АК- и АС-анализаторов. Наблюдавшиеся в показаниях обоих датчиков вариации интенсивности потоков ионов можно связать с вариациями направления ионного потока в кометошите. Действительно, при уменьшении потока ионов в направлении АК-анализатора одновременно происходит увеличение интенсивности ионного потока в АС-анализаторе, и наоборот. Величину отклонения потока протонов от первоначального направления можно оценить как $\delta\alpha \approx \frac{2kT}{MV^2} \ln(n_{\max}/n_{\min}) \approx$

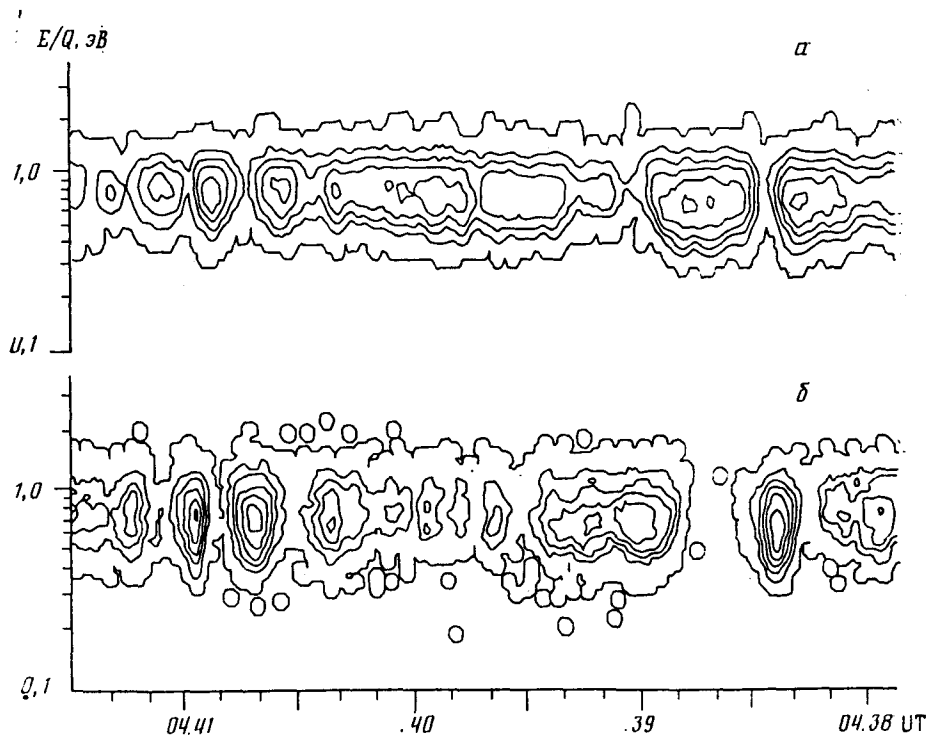


Рис. 4. Пример регистрации вариаций направления обтекающей кометы плазмы в кометошите кометы Галлея. На спектрограммах АС-анализатора (а) самым внешним изолинием соответствует скорость счета $f_0 = 2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, на спектрограммах АК-анализатора (б) — $f_0 = 10^3 \text{ с}^{-1}$. При переходе к следующим внутренним изолиниям скорость счета анализаторов увеличивается в 1.4 раза

$\approx 5^\circ$ при температуре ионов в кометошите $T \approx 3 \cdot 10^5 \text{ К}$, их переносной скорости $V \approx 350 \text{ км/с}$ и отношении наибольшей скорости счета к наименьшей $n_{\text{max}}/n_{\text{min}} \approx 3 \div 5$.

Обсуждение

Эффект торможения солнечного ветра за несколько миллионов километров от кометы (рис. 1) вследствие его нагружения тяжелыми кометными ионами еще до околокометной ударной волны S рассматривался в первых гидродинамических моделях околокометного пространства (см., например, [9]). Качественно наблюдавшийся эффект согласуется с характерной шкалой ионизации нейтрального газа $\approx 2 \cdot 10^6 \text{ км}$, оцененной по данным кометного цилиндра Фарадея КЦФ, входившего в состав датчиков эксперимента «Плазмаг-1» [4, 5, 10].

Ионы, образующиеся в солнечном ветре при ионизации кометного нейтрального газа, первоначально образуют пучок в пространстве скоростей. Альвеновские волны, возбуждаемые ионно-циклотронной неустойчивостью такого распределения, приводят к быстрой изотропизации вновь образовавшихся ионов в системе координат, движущейся с солнечным ветром [11]. Таким образом, независимо от угла между магнитным полем и скоростью солнечного ветра после нескольких циклотронных периодов вновь образовавшиеся ионы, приходящие в направлении от Солнца, должны иметь скорость, равную удвоенной скорости солнечного ветра, и энергию в $4M$ раз больше энергии протонов солнечного ветра.

В солнечном ветре энергия тяжелых ионов группы воды на этой стадии вовлечения их в поток лежит вне энергетического диапазона АС-анализа-

тора ($E_i/Q \leq 25$ кэВ). Однако измерения при помощи этого датчика во внешних частях кометошита, где поток солнечной плазмы частично заторможен на ударной волне и нагрузкой кометными ионами, свидетельствуют в пользу реализации описанного выше механизма вовлечения кометных ионов в поток на больших расстояниях от кометы (см. рис. 3 и обсуждение происхождения ветви энергичных ионов).

Измерения энергетических спектров кометных ионов при помощи прибора «Плазмаг-1» во внутренних частях кометошита можно интерпретировать двояким образом. Здесь отношение энергий, регистрируемых АС-анализатором, кометных ионов E_i и протонов E_p , существенно меньше $4M$ ($\approx 60 \div 80$) и систематически уменьшается с уменьшением r . Как показали измерения, проведенные на борту Джотто при помощи датчика IIS прибора JPA, позволявшего оценивать массу и производить измерения энергетических спектров ионов с $E_i/Q \leq 90$ кэВ, в кометошите кроме обнаруженной АС-анализатором ветви тяжелых ионов присутствует и более энергичная ветвь с энергией $E_{i2} \approx 4M \cdot E_p$ [12].

В случае, если отношение $E_{i2}/E_p \approx 4M$ и постоянно в кометошите (такая тенденция не противоречит данным IIS на подлетной части траектории Джотто и отсутствует на отлетной части траектории (см. рис. 2 в [12])), энергичные ионы с энергией E_{i2} можно рассматривать как локально образовавшиеся в кометошите и вовлеченные в поток обсуждавшимся выше механизмом. В таком случае ионы, наблюдающиеся АС-анализатором как ветвь с энергией $E_{i1} < E_{i2}$, могли быть образованы вверх по потоку от точки наблюдения и потерять энергию в некоторых коллективных процессах [5].

Более вероятной представляется следующая возможность. Ионы, регистрируемые в ветви с энергией E_{i2} , образованы далеко вверх по потоку от точки наблюдения, однако так как в кометошите энергия протонов в направлении датчика АС изменяется незначительно, то и отношение E_{i1}/E_p также изменяется не слишком сильно, хотя и не постоянно, как в первом случае. Ионы, регистрируемые в ветви с энергией E_{i1} , образованы в окрестности КА. В поток солнечной плазмы они вовлекаются только частично, поскольку при приближении к кометопаузе эти ионы уже не являются малой добавкой, и первой стадией этого процесса уже не является полная изотропизация по питч-углам в системе координат, связанной с солнечным ветром. При приближении к кометопаузе и росте концентрации таких ионов (рис. 3) энергии потока протонов и α -частиц солнечного ветра становится недостаточно для значительного увеличения скорости вновь образующихся тяжелых кометных ионов. В окрестности кометопаузы эти ионы ускоряются только до скоростей в несколько десятков км/с. Так как КА сам движется со скоростью 79,2 км/с относительно кометы, то медленно движущиеся вновь образовавшиеся кометные ионы будут регистрироваться АС при $E_i \sim 1$ кэВ в окрестности кометопаузы (рис. 3).

Дополнительным свидетельством в пользу того, что кометные ионы менее энергичной ветви образуются не слишком далеко от КА является рост потоков таких ионов с уменьшением r (см. рис. 2 в [12] и рис. 3), связанный с ростом концентрации нейтрального газа. Потоки же тяжелых кометных ионов в более энергичной ветви, как можно видеть из приведенных на рис. 2 в [12] данных, не увеличиваются.

Характерное время вариаций направления потока плазмы, обнаруженных на КА «Вега-2» в кометошите (рис. 4), составляет $20 \div 30$ с. По-видимому, эти вариации связаны с сильной турбулентностью потока плазмы в этой области, вызванной увлечением в поток вновь образовавшихся тяжелых ионов. Сильная МГД-турбулентность с пиком на частоте $\approx 10^{-2}$ Гц, связанная с этим процессом, наблюдалась по измерениям магнитного поля [13] и в электронном компоненте плазмы [14] в кометошите кометы Джакобини — Циннера на КА ICE.

Очень долгопериодические (≈ 15 мин) вариации потока плазмы в кометошите (рис. 3) также могут быть связаны с более крупномасштабной

МГД-турбулентностью. Период этих вариаций уже сопоставим с характерным временем протекания солнечного ветра в кометошите $\tau \approx r/V \approx 10^3$ с при $r \approx 3 \cdot 10^5$ км и $V \approx 300$ км/с, а их протяженность вдоль траектории КА $\approx 10^5$ км сопоставима с размерами кометошита. Это дает основание предположить, что наблюдавшиеся на КА «Вега-1» вариации потока плазмы в кометошите с характерным временем ≈ 15 мин могут быть связаны с возбуждением МГД-турбулентностью собственных частот системы кометошит — солнечный ветер.

Наконец, остановимся на причинах различия протяженности (вдоль траектории КА) области разогретого солнечного ветра вверх по течению от фронта околометной ударной волны на подлетной и отлетной частях траектории КА «Вега-1». Как видно из приведенных на рис. 2 данных, заметный нагрев протонов и α -частиц при приближении «Веги-1» к комете начался в ≈ 02.30 UT ($r \approx 1,3 \cdot 10^6$ км); на таких же кометодцентрических расстояниях в ≈ 12.20 UT прекратилась регистрация разогретых по сравнению с солнечным ветром протонов и α -частиц на отлетной части траектории «Веги-1». По-видимому, это расстояние определяется только распределением концентрации нейтрального газа n_n в окрестности кометы Галлея, и возрастание ее до $n_n \approx 30$ см $^{-3}$ на $\approx 1,3 \cdot 10^6$ км от ядра [10] достаточно для того, чтобы обеспечить заметный турбулентный разогрев ионов солнечного ветра, вызванный неустойчивым пучковым распределением продуктов ионизации кометного газа. Положение ударной волны и связанного с ней градиента скорости ионов естественным образом различно на подлетной $r \approx 1,02 \cdot 10^6$ км и отлетной $r \approx (5,5 \pm 1) \cdot 10^6$ км частях траектории КА «Вега-1» (рис. 2), поскольку ударная волна при подлете пересекается на фланге, а при отлете — ближе к подсолнечной точке. Поэтому различна и пространственная протяженность области разогретого солнечного ветра при подлете КА «Вега-1» к ударной волне и при отлете от нее.

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. Budapest: Central Res. Inst. Phys. Press, 1983. P. 333.
2. Gringauz K. I. et al. The Vega Plasmag-1 Experiment: Description and First Results // Field, Particle and Wave Experiments on Cometary Missions. Graz: Austria, Academy of Sciences Publ., 1986. P. 157.
3. 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 Giotto and Suisei Spacecraft // Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986.
4. Грингауз К. И. 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.
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. 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.
7. Schwingenschuh K. et al. Cometary Boundaries: Vega Observations at Halley // Adv. Space Res. 1986. V. 6. № 1. P. 217.
8. Gringauz K. et al. Detection of a New «Chemical» Boundary at Comet Halley // Geophys. Res. Lett. 1986. V. 13. P. 613.
9. Wallis M. K. Weakly Shocked Flows of the Solar Wind Plasma through Atmospheres of Comets and Planets // Planet. Space Sci. 1973. V. 21. P. 1647.
10. 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.
11. Sagdeev R. Z. et al. MHD Turbulence in the Solar Wind-Comet Interaction Region // Geophys. Res. Lett. 1986. V. 13. P. 85.
12. Johnstone A. et al. Ion Flow at Comet Halley // Nature. 1986. V. 321. P. 344.
13. Tsurutani B. T. et al. Strong Hydromagnetic Turbulence Associated with Comet Giacobini — Zinner // Geophys. Res. Lett. 1986. V. 13. P. 259.
14. Gosling J. T. et al. Large Amplitude, Low Frequency Plasma Fluctuations at Comet Giacobini — Zinner // Geophys. Res. Lett. 1986. V. 13. P. 267.

Поступила в редакцию
13.VIII.1987