

УДК 523.72

*К. И. Грингауз, М. И. Веригин, А. Рихтер, Т. Гомбоши,
К. Сеге, М. Татральяи, А. П. Ремизов, И. Апати*

ОБЛАСТЬ КОМЕТНЫХ ИОНОВ В ГОЛОВЕ КОМЕТЫ ГАЛЛЕЯ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ВЕГА-2»

Измерения плазмы в окрестности кометы Галлея на борту космического аппарата «Вега-2» обнаружили существование на $\approx 1,6 \cdot 10^5$ км от ядра повой достаточно резкой границы — кометоплазмы, разделяющей внешнюю, контролируемую протонами солнечного ветра область — кометошит, от внутренней области кометной плазмы, где преобладают тяжелые кометные ионы [1–3]. Эти измерения проводились при помощи комплекса приборов «Плазмаг-1» [4–6]. В настоящей работе приводятся дополнительные экспериментальные данные и обсуждаются особенности физических характеристик области кометной плазмы.

Экспериментальные данные. Основные экспериментальные данные об области кометной плазмы на борту «Вега-2» были получены при помощи входящего в состав «Плазмаг-1» широкоугольного $14 \times 32^\circ$ электростатического анализатора, ориентированного по вектору скорости космического аппарата относительно кометы — кометного напорного анализатора АК. Энергетические спектры ионов при помощи АК-анализатора ежесекундно измерялись в 120 логарифмически расположенных энергетических интервалах в диапазоне энергий 15–3500 эВ/Q (Q — зарядовое число) с энергетическим разрешением $\Delta E/E = 0,055$.

В наиболее близких к ядру частях области кометной плазмы каналотрон датчика АК работал в нелинейном режиме, в котором значительным приращением потоков ионов соответствовали малые изменения скорости счета [1–3]. В настоящей работе этот эффект учтен на основе данных калибровки и одновременных измерений при помощи кометного напорного цилиндра Фарадея КЦФ.

На рис. 1 приведена спектрограмма ионных потоков, измеренная АК анализатором прибора «Плазмаг-1» на КА «Вега-2» с ≈ 06.20 по ≈ 06.50 UT 9.III 1986 г. В этот период времени «Вега-2» приблизилась к ядру с $\approx 2,8 \cdot 10^5$ до $\approx 1,3 \cdot 10^5$ км. Самые внешние изолинии на рис. 1 соответствуют скорости счета АК-анализатора $f_0 = 10^3$ с⁻¹. Каждая последующая внутренняя изолиния соответствует увеличению скорости счета этого датчика на $df = 440$ с⁻¹.

На расстоянии $\approx 2,8 \cdot 10^5$ км от ядра (06.20 UT) в кометошите характерная энергия ионов солнечного ветра (в основном протонов), регистрируемых АК-анализатором, в результате нагружения кометными ионами уже уменьшилась до ≈ 250 эВ. Его скорость и температуру можно оценить как ≈ 230 км/с и $\approx 2 \cdot 10^5$ К соответственно. Поток протонов еще более замедляется до ≈ 200 км/с при приближении к кометоплазме, которая наблюдалась между 06.43 и 06.45 UT ($(1,7 \div 1,6) \cdot 10^5$ км, вертикальные штриховые линии на рис. 1.) [2]. В это время происходит значительное увеличение до ≈ 900 эВ средней энергии/заряд ионов, регистрируемых АК-анализатором (рис. 1), связанное с изменением функции распреде-

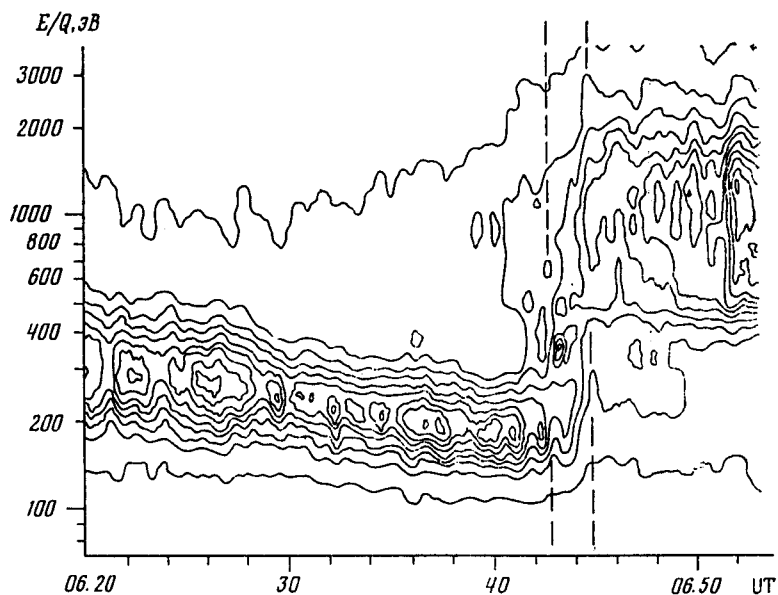


Рис. 1. Спектрограмма ионных потоков по данным АК анализатора прибора «Плазмаг-1» при переходе КА «Вега-2» из кометошита через кометопазу (пунктир) в область кометной плазмы

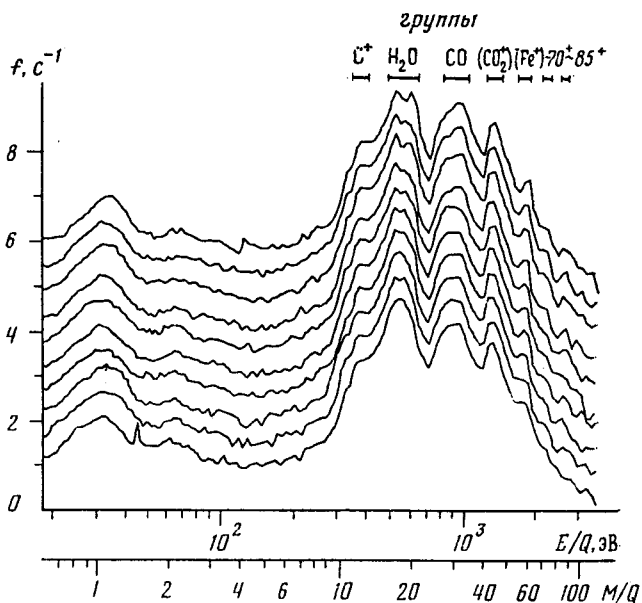


Рис. 2. Спектры кометных ионов, зарегистрированные на КА «Вега-2» на расстояниях $1,4 \div 1,7 \cdot 10^6$ км от ядра (усреднение 4 с) с учетом поправки на граничную скорость счета ионов (см. текст)

ления по скоростям и массового состава плазмы. В окрестности кометопазы преобладающие в кометошите протоны замещаются тяжелыми кометными ионами группы воды.

При углублении космического аппарата в область кометной плазмы потоки и концентрация тяжелых ионов возрастали, их температура падала, так что начиная с 07.10 UT ($\approx 5 \cdot 10^6$ км от ядра) в энергетическом распределении ионов появились достаточно четкие пики, которые могли быть интерпретированы как соответствующие ионам различных масс.

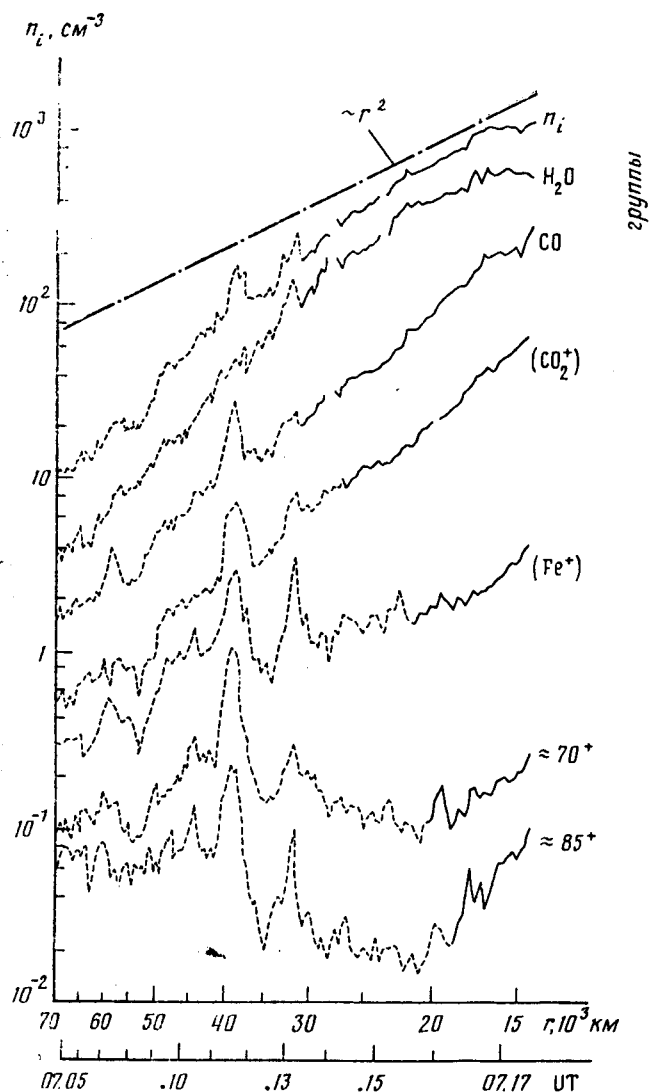


Рис. 3. Кометоцентрическая зависимость концентрации некоторых групп ионов, оцененная по результатам измерения ионных спектров при помощи АК (см. рис. 2)

В окрестности наибольшего приближения «Веги 2» к ядру, где тепловая и направленная скорости ионов малы по сравнению со скоростью космического аппарата $V_{КА}$, т. е. скорость всех ионов, проходящих в АК-анализатор, близка к $V_{КА} = 76,78$ км/с; регистрируемые этим анализатором E/Q спектры можно интерпретировать как M/Q спектры. На рис. 2 показаны усредненные по 4-с интервалам времени энергетические спектры ионов, измеренные АК-анализатором на расстоянии $(1,4-1,7) \cdot 10^4$ км от ядра с учетом направки на нелинейность (см. выше). На основании приведенных на рис. 2 данных можно достаточно уверенно говорить о присутствии области кометной плазмы ионов H^+ , C^+ , CO_2^+ и Fe^+ . Структурированный пик при $14 \leq M/Q \leq 20$ наиболее вероятно происходит из родительских молекул H_2O и состоит в основном из ионов O^+ , OH^+ , H_3O^+ . Пик при $24 \leq M/Q \leq 34$ может быть сформирован родительскими молекулами CO/CO_2 или молекулами, содержащими N или S, и состоять из таких ионов, как CO^+ , N_2^+ , H_2CO^+ , HCO^+ , CN^+ , HCN^+ или O_2^+ , или атомных ионов, таких, как Mg^+ , Al^+ , Si^+ , P^+ , или S^+ . Несколько меньших пиков при $M/Q \approx 2, 8,$

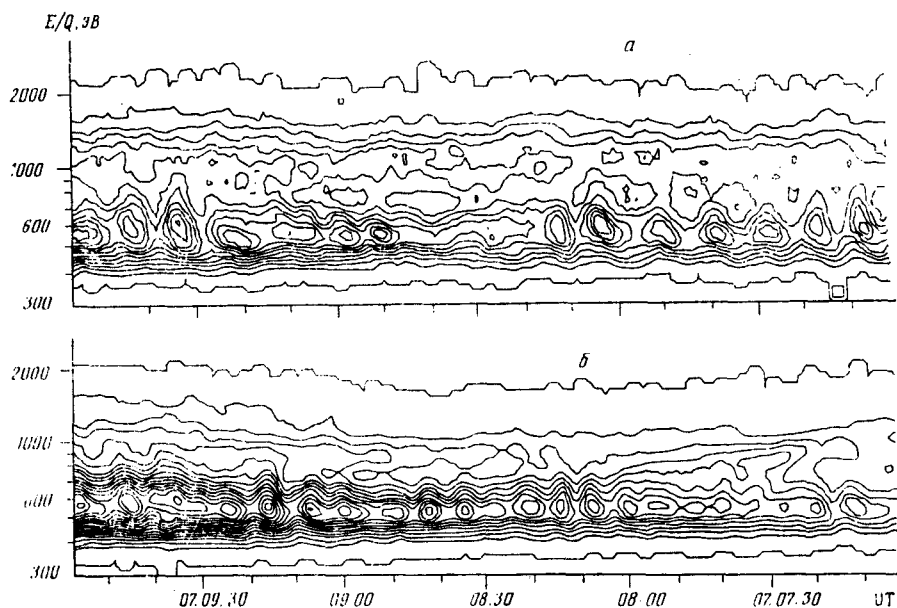


Рис. 4. Спектрограммы ионных потоков в области кометной плазмы на расстояниях $\approx 8 \cdot 10^4$ и $\approx 5 \cdot 10^4$ км от ядра. Очевидно присутствие квазипериодической модуляции потоков ионов в этой области

70 и 85 могут быть образованы ионами H_2^+ , O^{++} , некоторыми тяжелыми органическими ионами или ионно-водяными кластерами.

Для того чтобы получить представление о зависимости от кометоцентрического расстояния концентрации тяжелых ионов в области кометной плазмы, на рис. 3 представлена зависимость от r потока ионов, зарегистрированного АК-анализатора как в отдельных, приведенных в верхней части рис. 2 интервалах E/Q (M/Q), так и суммарного потока ионов с $0,3 \leq E/Q \leq 3$ кэВ. Для покоящихся относительно кометы и холодных кометных ионов эта величина пропорциональна их концентрации. С удалением от кометы оба условия, вообще говоря, нарушаются. Поэтому при больших r приведенные на рис. 4 данные с меньшей степенью достоверности можно интерпретировать как кометоцентрические профили концентрации ионов.

В верхней части рис. 3 штрихпунктирной прямой показана зависимость r^{-2} . Сравнивая эту зависимость с суммарной концентрацией кометных ионов n_i , можно видеть, что последняя спадает несколько быстрее, чем r^{-2} с увеличением r : $n_i(r) \approx r^{-2,4}$ в диапазоне кометоцентрических расстояний $3 \cdot 10^4 \geq r \geq 1,5 \cdot 10^4$ км.

Очевидный из представленных на рис. 3 данных АК-анализатора общий рост концентрации тяжелых кометных ионов при углублении космического аппарата в области кометной плазмы не является монотонным. На рис. 4, а, б представлены спектрограммы ионных потоков, зарегистрированных этим датчиком в интервалы времени 07.00÷07.04 и 07.06÷07.10 UT, на расстояниях $\approx 8 \cdot 10^4$ и $\approx 5 \cdot 10^4$ км от ядра соответственно. Значения f_0 и df для приведенных на этом рисунке спектрограмм равны соответственно $4 \cdot 10^3$ и $4 \cdot 10^2$ с $^{-1}$ (рис. 4, а) и 10^4 и 10^3 с $^{-1}$ (рис. 4, б). Характерной особенностью представленных на рис. 4 данных является присутствие квазипериодической модуляции интенсивности потоков ионов [1, 3]. Типичная амплитуда модуляции потоков ионов группы воды ($E/Q=500-600$ эВ) $A = (f_{\max} - f_{\min}) / (f_{\max} + f_{\min}) \approx 0,05-0,1$. Обращает на себя внимание уменьшение «периода» модуляции при приближении к комете с $T \approx 10$ с при $r \approx 8 \cdot 10^4$ км до $T \approx 8$ с при $r \approx 5 \cdot 10^4$ км.

Другим проявлением немоптонности роста концентрации тяжелых ионов n_i вглубь области кометной плазмы является быстрый рост n_i , сопровождающийся последующим спадом в так называемых «горячих пятнах» [2], зарегистрированных АК на КА «Вега-2» в 07.11.30–07.12.10 UT и в 07.13.00–07.13.30 UT при $r \approx 4 \cdot 10^4$ и $\approx 3 \cdot 10^4$ км соответственно (рис. 3). В «горячих пятнах» наблюдается также всплеск интенсивности плазменных волн на нижней гибридной частоте; для их объяснения в работе [7] привлечены представления о критической полизационной скорости Альвена.

Обсуждение

Неожиданным и поэтому представляющим наибольший интерес явилось обнаружение по данным АК на космическом аппарате «Вега-2» существования кометопазы — «химической» границы в околокометном пространстве и присутствие в области кометной плазмы квазипериодической модуляции концентрации кометных ионов. Эти особенности околокометного пространства еще до конца не поняты.

Существование кометопазы (рис. 1) было подтверждено как по данным волнового эксперимента АПВ-Н на «Вегах» [8], так и в экспериментах РИССА, РРА на КА Джотто [9, 10]. Физические процессы, происходящие в окрестности этой границы, и причина ее образования обсуждаются в работе [11].

Остановимся на возможной причине наблюдавшейся в области кометной плазмы квазипериодической модуляции концентрации тяжелых ионов с периодом порядка 10 с (рис. 4). Наблюдаемые флуктуации потока тяжелых кометных ионов можно было бы объяснить либо сильной нестационарностью ионизации газа, либо развитием крупномасштабной неустойчивости анизотропного по своей природе распределения кометных ионов по скоростям. Первый эффект мог бы возникнуть, если в результате очень быстрой ионизации атомов газа (за время меньшее или сравнимое с гириодом ионов) образовался сгусток ионов, сбунчированный по фазе циклотронного вращения. Однако характерный период флуктуаций потока плазмы в несколько раз выше циклотронной частоты ионов группы воды, доминирующих в плазме. Поэтому более вероятно, что наблюдаемые флуктуации связаны с генерацией магнитогидродинамических волн вследствие неустойчивости анизотропного распределения вновь образующихся ионов по скоростям, подобно тому как это происходит в солнечном ветре перед околокометной ударной волной. Эта неустойчивость связана с циклотронным резонансом ионов с альвеновскими колебаниями, и поэтому длина волны возбуждаемых колебаний может быть оценена как $\lambda \approx V_{\parallel} / f_{ci}$ (f_{ci} — циклотронная частота ионов, V_{\parallel} — их скорость вдоль магнитного поля). При измеренных величинах магнитного поля в этой области $B \approx 50 \gamma$ и пространственном масштабе флуктуаций потока в плазме $8 \text{ с} \times 80 \text{ км/с} \approx 640 \text{ км}$ получаем оценку продольной скорости $V_{\parallel} \approx 30 \text{ км/с}$, что не является невероятным. Наблюдавшееся уменьшение периода флуктуаций с $T \approx 10 \text{ с}$ при $r \approx 8 \cdot 10^4 \text{ км}$ до $T \approx 8 \text{ с}$ при $r \approx 5 \cdot 10^4 \text{ км}$, по-видимому, можно связать с зарегистрированным на КА «Вега-2» увеличением магнитного поля с $B \approx 40$ до 50γ [12].

Достаточно неожиданным явилось и наблюдение отчетливо выраженного пика на спектрах АК-анализатора в окрестности $M/Q \sim 56$ (рис. 2). Причины, которые могут привести к присутствию заметного количества металлических ионов (Fe^+) в околокометном пространстве, рассматривались в работе [13].

Наблюдавшийся на КА «Вега-2» несколько более крутой, чем r^{-2} , спад концентрации кометных ионов в диапазоне кометоцентрических расстояний $1,5 - 3 \cdot 10^4 \text{ км}$ (рис. 3) согласуется с зависимостью $n_i / r \approx r^{-2}$, полученной в работе [14] по данным датчика HIS прибора IMS в этом же

диапазоне r . Более того, в режиме H-mode скорости счета спектрометра HIS также спадают быстрее, чем r^{-2} (см. рис. 4 в [14]).

Достаточно очевидно, что близкая к r^{-2} зависимость $n_i(r)$ в этой части области кометной плазмы определяется тем, что локальная скорость образования кометных ионов Q_i пропорциональна концентрации нейтральных частиц n_n , которая в свою очередь так же спадает, как r^{-2} [1, 3, 15–17]. Несколько более быстрый, чем r^{-2} спад n_i , по-видимому, связан с тем, что скорость потерь ионов L_i возрастает с увеличением r вследствие увеличения конвективного выноса ионов. Такие представления о процессах, определяющих n_i на расстояниях в несколько десятков тысяч километров от ядра, кажутся вполне оправданными. Действительно, по данным КЦФ, на КА «Вега-2» при $r \approx 2 \cdot 10^4$ км $n_n \approx 1,5 \cdot 10^5$ см $^{-3}$ [15]. При характерном времени ионизации $\tau_i \approx 10^6$ с $^{-1}$ локальная скорость ионообразования $Q_i \approx n_n / \tau_i \approx 0,15$ см $^{-3} \cdot$ с $^{-1}$. Для того, чтобы на таких расстояниях при $Q_i = L_i$ обеспечить $n_i \approx 10^3$ см $^{-3}$ (см. рис. 3), достаточно, чтобы скорость конвективного выноса ионов была $V_i \approx Q_i / n_i \approx 3$ км/с, что находится в разумном согласии с результатами измерения V_i спектрометром HIS прибора IMS на Джотто [14].

По данным АК-анализатора, на расстояниях в несколько десятков тысяч километров от ядра содержание ионов группы воды составляет 70÷80%, ионов группы CO/CO $_2$ – 15÷20% (рис. 4) и ионов с $M \approx 44$ (CO $_2^+$) – 2÷5%. Эти соотношения находятся в разумном согласии с результатами измерения спектров кометных ионов на Джотто приборами PICCA [18] и IMS [14].

В случае, когда основным механизмом потерь ионов является их конвективный вынос (и потенциалы ионизации исходных молекул близки), соотношения между концентрациями различных ионов и исходных молекул должны быть близкими. Поэтому полученное по измерениям NMS на Джотто $\approx 5\%$ содержание молекул CO $_2$ по отношению к H $_2$ O [17] следует также считать находящимся в разумном согласии с приведенным выше относительным содержанием ионов с $M \approx 44$ (CO $_2^+$). В таком случае относительное содержание родительских молекул H $_2$ O и CO/CO $_2$, по данным датчика АК прибора «Плазмаг-1», может быть оценено как 70÷80 и 15÷20% соответственно, что согласуется с относительным содержанием скоростей производства H $_2$ O и CO по измерениям УФ-спектров со спутника IUE [19].

Авторы выражают свою искреннюю благодарность Р. З. Сагдееву и А. А. Галееву за очень полезные обсуждения некоторых вопросов, затронутых в этой 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. Detection of a New «Chemical» Boundary at Comet Halley // Geophys. Res. Lett. 1986. V. 13. P. 613.
3. 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.
4. 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.
5. Gringauz K. I. et al. The Vega Plasmag-1 Experiment Description and First Results // Field Particle and Wave Experiments on Cometary Missions. Graz: Austrian Academy of Sciences Publication. 1986. P. 157.
6. Apathy J. 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.
7. Galeev A. et al. Critical ionization velocity effects in the inner coma of comet Halley: Measurements by Vega-2 // Geophys. Res. Lett. 1986. V. 13. P. 845.
8. Savin S. et al. ELF Waves in the Plasma Regions near the Comet // Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986. V. 3. P. 433.

9. *Korth A. et al.* Cometary Ion Observations at and within Cometopause-Region of Comet Halley // *Adv. Space Res.* 1985. V. 5. № 12. P. 221.
10. *Amata E. et al.* The Cometopause Region at Comet Halley // *Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250.* 1986. V. 1. P. 213.
11. *Веригин М. П. и др.* Физические процессы в окрестности кометопазы по данным прямых измерений плазмы, магнитного поля и волн на космическом аппарате «Вега-2» // Письма в «Астрон. журн.». 1987. Т. 13. № 10.
12. *Schwingschuh K. et al.* Cometary Boundaries: Vega Observations at Halley // *Adv. Space Res.* 1986. V. 6. № 1. P. 217.
13. *Ip W.-H., Axford W. I.* Metallic Ions in Cometary Comae and Plasma Tails // *Nature.* 1986. V. 321. P. 682.
14. *Balsiger H. et al.* Ion Composition and Dynamics at Comet Halley // *Nature.* 1986. V. 321. P. 330.
15. *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.
16. *Grard R. et al.* Interpretation of the Measurements of Secondary Electron Currents Induced by Impacts During the Flyby of Comet Halley // *Adv. Space Res.* 1985. V. 5. № 12. P. 149.
17. *Krankowsky D. et al.* In - situ Gas and Ion Measurements at Comet Halley // *Nature.* 1986. V. 321. P. 326.
18. *Korth A. et al.* Mass Spectra of Heavy Ions near Comet Halley // *Nature.* 1986. V. 321. P. 335.
19. *Festou M. C. et al.* IUE Observations of Comet Halley during the Vega and Giotto Encounters // *Nature.* 1986. V. 321. P. 361.

Поступила в редакцию
13.VIII.1987