

ПИСЬМА  
В  
АСТРОНОМИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

Том 13

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

10

---

МОСКВА · 1987

УДК 523.64

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОКРЕСТНОСТИ  
КОМЕТОПАУЗЫ ПО ДАННЫМ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
ПЛАЗМЫ, МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ВОЛН НА КОСМИЧЕСКОМ  
АППАРАТЕ «ВЕГА-2»**

*М. И. ВЕРИГИН, А. А. ГАЛЕЕВ, Р. ГРАР,  
К. И. ГРИНГАУЗ, Е. Г. ЕРОШЕНКО, С. И. КЛИМОВ,  
М. Э. МОГИЛЕВСКИЙ, А. П. РЕМИЗОВ, В. РИДЛЕР,  
Р. З. САГДЕЕВ, С. П. САВИН, К. СЕГЁ,  
А. Ю. СОКОЛОВ, М. ТАТРАЛЬЯИ и К. ШВИНГЕНШУ*

В статье анализируются физические процессы в окрестности кометопаузы на основе данных одновременных измерений плазмы, магнитного поля и волн на космическом аппарате «Вега-2». Крупномасштабные вариации потока плазмы и магнитного поля, являющиеся признаком развития планговой неустойчивости вблизи кометопаузы, приводят к рассеянию поpitch-углам и торможению потока протонов. В результате этого перезарядка становится эффективным механизмом, ускоряющим нагужение потока плазмы. Повышенная интенсивность плазменных волн в нижнегибридном диапазоне частот приводит к ускорению сверхтепловых электронов и к возбуждению высокочастотных косых ленгмюровских волн.

PHYSICAL PROCESSES NEAR THE COMETOPAUSE ACCORDING TO IN-SITU PLASMA, MAGNETIC FIELD AND WAVES MEASUREMENTS ON BOARD THE «VEGA-2», SPACECRAFT, by M. I. Verigin, A. A. Galeev, R. Grard, K. I. Gringauz, E. G. Eroshenko, S. I. Klimov, M. E. Mogilevsky, A. P. Remizov, W. Riedler, R. Z. Sagdeev, S. P. Savin, K. Szegö, A. Yu. Sokolov, M. Tátrallyay and K. Schwingenschuh. The physical processes near the cometopause are analyzed on the basis of simultaneous plasma, magnetic field and plasma wave data measured on board the «Vega-2» spacecraft. Large-scale magnetic field and plasma flow variations, indicating the fire-hose instability development, lead to the pitch angle scattering and deceleration of proton flow. As a result, the charge exchange is becoming efficient process for the increasing loading of the plasma flow. The enhanced plasma waves intensity in lower hybrid frequency range results in the suprathermal electrons acceleration and in the high frequency oblique Langmuir waves excitation.

*Введение.* Плазменные измерения при помощи прибора ПЛАЗМАГ-1 в окрестности кометы Галлея на космических аппаратах «Вега» обнаружили за фронтом ударной волны на расстояниях  $\approx 1.6 \cdot 10^5$  км от ядра кометопаузы — резкую границу, разделяющую область, контролируемую потоком протонов солнечного ветра, от области кометной плазмы с преобладанием медленно движущихся

тяжелых кометных ионов (Грингауз и др., 1986а—г). Существование этой границы в околокометном пространстве было подтверждено как по данным волнового эксперимента АПВ-Н на «Вега-1», «Вега-2», (Савин и др., 1986), так и в экспериментах РИССА, JPA на космическом аппарате «Джотто» (Корт и др., 1986; Амата и др., 1986).

Несмотря на то что признаки пересечения кометопаузы можно найти в опубликованных данных многих экспериментов на космических аппаратах «Вега-1», «Вега-2» и «Джотто» (см., например, Грингауз и др., 1986б, в), описание совокупности явлений, происходящих в ее окрестности, основанное на совместном рассмотрении одновременных плазменных, магнитных и волновых измерений, еще отсутствует. Отсутствует также и теоретический анализ физических механизмов образования кометопаузы. В настоящей работе предпринята попытка анализа физических процессов в окрестности кометопаузы на основе данных одновременных измерений плазмы, магнитного поля и волн в окрестности кометопаузы на космическом аппарате «Вега-2».

*Экспериментальные данные.* На космическом аппарате «Вега-2» измерения энергетических спектров ионной и электронной компонент плазмы проводились при помощи комплекса ПЛАЗМАГ-1 (Грингауз и др., 1986б). Входящий в состав этого комплекса анализатор кометных ионов (АК), ориентированный в направлении вектора скорости космического аппарата относительно кометы, регистрировал ионы в диапазоне энергий/заряд 15—3500 эВ/е. Ориентированный в направлении на Солнце анализатор (АС) измерял потоки ионов в диапазоне 50—25000 эВ/е. Электростатический анализатор, проводивший измерения энергетических спектров электронов (АЭ) в диапазоне энергий 3—10000 эВ, был ориентирован перпендикулярно к плоскости эклиптики.

Измерения магнитного поля осуществлялись трехкомпонентным феррозондовым магнитометром МИША в диапазоне  $\pm 100$  нТл по каждой компоненте с разрешением 0.05 нТл (Ридлер и др., 1986).

Интенсивность плазменных волн на «Вега-2» измерялась при помощи двух приборов: АПВ-Н (Климов и др., 1986) и АПВ-В (Трар и др., 1986). При помощи первого прибора измерялась амплитуда колебаний одной из компонент электрического поля и амплитуда флуктуаций потока ионов в направлении вектора скорости космического аппарата относительно кометы в диапазоне частот 0.01—1000 Гц. При помощи прибора АПВ-В — измерения амплитуды этой же самой компоненты электрического поля проводились в частотном диапазоне 0—300 кГц.

В верхней части рис. 1 приведена спектрограмма ионных потоков, измеренная АК-анализатором прибора ПЛАЗМАГ-1 в окрестности кометопаузы. Самые внешние изолинии на этом рисунке соответствуют скорости счета АК-анализатора  $10^3$  с<sup>-1</sup>. Каждая последующая внутренняя изолиния соответствует увеличению скорости счета этого анализатора в 2 раза. Вертикальными пунктирными линиями на рис. 1 отмечен интервал времени 6.43—6.45 UT, на котором «Вега-2» пересекла кометопаузу (Грингауз и др., 1986а).

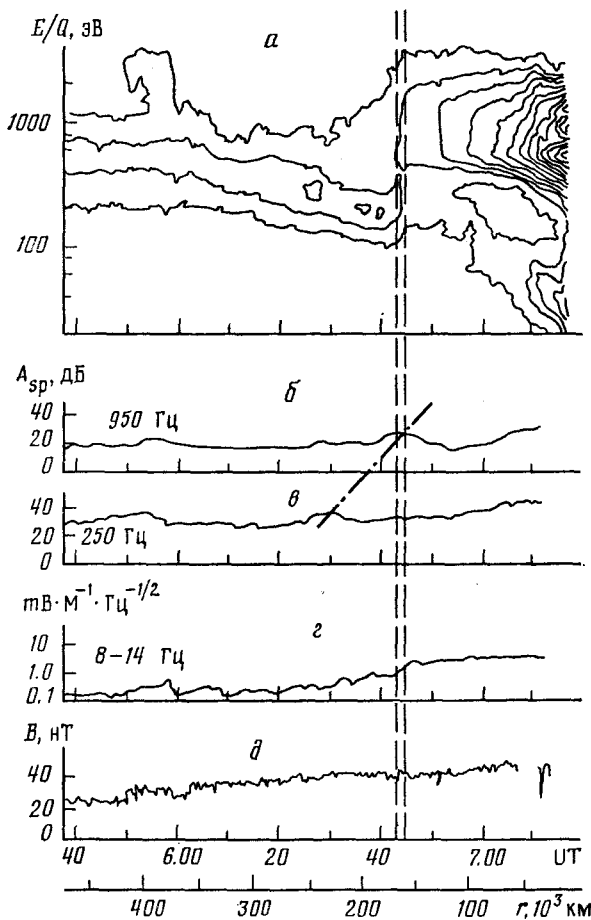


Рис. 1. Спектрограмма потоков ионов (а), спектральная амплитуда ( $A_{sp}$ ) флуктуаций их потока (б, в) и электрического поля (г) и абсолютная величина магнитного поля (д) в окрестности кометопазы (вертикальные пунктирные линии) по данным измерений на космическом аппарате «Вега-2». Рост частоты косых лангмюровских волн около этой границы отмечен наклонной штрихпунктирной линией

Как можно видеть из приведенной на рис. 1 спектрограммы, в окрестности кометопазы происходит значительное увеличение средней величины энергии/заряд ионов, регистрируемых АК-анализатором, с  $\approx 170$  до  $\approx 900$  В. Это увеличение, очевидно, связано с изменением функции распределения по скоростям и массового состава плазмы в окрестности кометопазы, в результате чего преобладающие в кометопазе протоны ( $m = 1$ ) замещаются ионами группы воды ( $M \approx 16-18$ ). Поток протонов, регистрируемых АК-анализатором, после кометопазы значительно уменьшается, однако при

этом расширяется их энергетический спектр (Грингауз и др., 1986а) и увеличивается средняя энергия до  $\approx 250$  эВ.

Перед кометопаузой энергетические спектры ионов, регистрируемые АС-анализатором, имеют два максимума (см. рис. 1 в работе Грингауза и др. (1986а)). Средняя энергия первого максимума, в основном сформированного протонами, составляла  $\approx 300$  эВ. Типичная энергия ионов (группы воды), регистрируемых во втором максимуме, составляла  $\approx 900$  эВ. После кометопаузы протоны в направлении АС-анализатора практически перестают регистрироваться; средняя энергия тяжелых ионов остается практически неизменной (Грингауз и др., 1986а).

Измеренные АЭ энергетические спектры электронов и, следовательно, концентрация плазмы и температура электронов при пересечении «Вегой-2» кометопаузы не испытывают существенных изменений (Грингауз и др., 1986а).

Об отсутствии существенных изменений концентрации плазмы при пересечении «Вегой-2» кометопаузы свидетельствуют и результаты измерений магнитного поля в окрестности этой границы при помощи магнитометра МИША. Как видно из приведенных в нижней части рис. 1 измерений абсолютной величины магнитного поля, его величина в окрестности кометопаузы практически не изменяется. Незначительные изменения наблюдались только в  $B_y$  и  $B_z$  компонентах магнитного поля (Ридлер и др., 1986, Грингауз и др., 1986а).

В средней части рис. 1 показаны результаты измерения волновой активности на «Вега-2» при помощи приборов АПВ-Н и АПВ-В. В целом, для приведенных на этом рисунке (и для других) спектральных интервалов характерен рост средней амплитуды колебаний потока плазмы и электрического поля при приближении «Веги-2» к ядру, начиная с  $(1.5-2) \cdot 10^5$  км от него. Кроме того, в окрестности кометопаузы (6.30—6.50 UT) регистрируются колебания потока плазмы в свистовом диапазоне частот 0.2—1 кГц и на протяжении  $\approx 2$  мин отмечен быстрый рост амплитуды колебаний электрического поля в нижнегибридном диапазоне частот (8—14 Гц).

О присутствии в районе кометопаузы волновой активности в более низкочастотном диапазоне можно сделать вывод из представленных на рис. 2 более детальных измерений плазмы, магнитного поля и волн. На этом рисунке на спектрограмме АК-анализатора изолинии построены с инкрементом  $440 \text{ с}^{-1}$  (самая внешняя соответствует скорости счета  $10^3 \text{ с}^{-1}$ ). Точками на спектрограмме в десятиминутной окрестности кометопаузы отмечены моменты времени, когда наблюдались локальные максимумы потока ионов. Сравнение одновременных спектрограмм АК- и АС-анализаторов (см., например, рис. 1 в работе Грингауза и др. (1986а)), где эти спектрограммы представлены в цветовой кодировке), показывает, что изменения потоков ионов, проходящих в эти анализаторы, происходит в противофазе. Это свидетельствует о присутствии в окрестности кометопаузы крупномасштабных МГД-вариаций направления и/или скорости потока плазмы с характерным периодом  $T \approx 1$  мин.

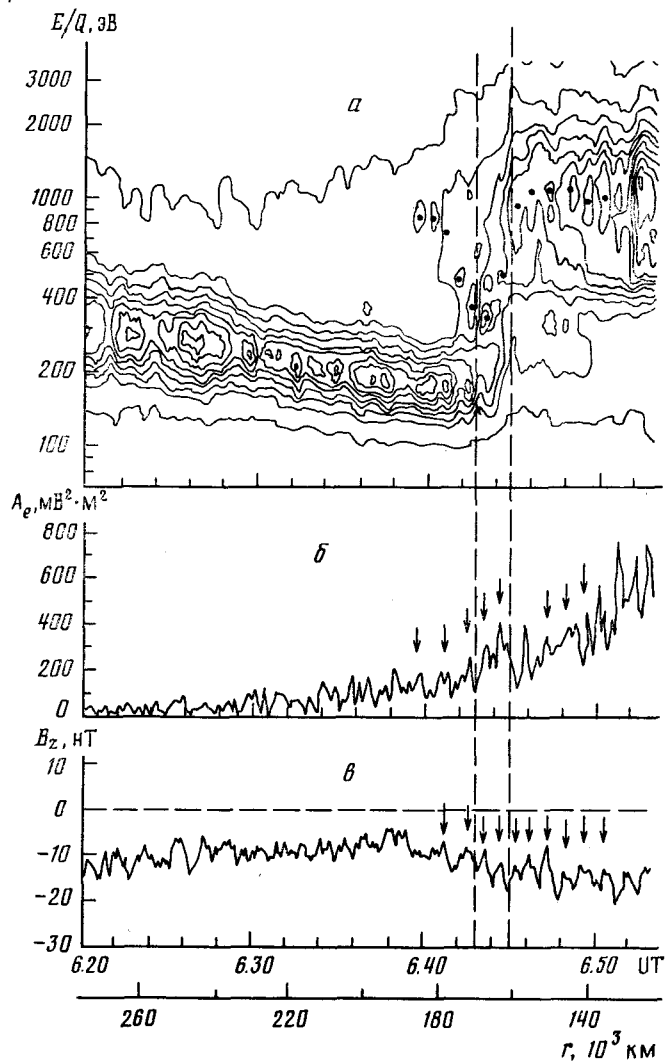


Рис. 2. Детальная спектрограмма потоков ионов (а), амплитуды колебаний электрического поля —  $A_e$  (б) и  $B_z$  — компонента магнитного поля (в) в окрестности кометопаузы. Точками отмечены локальные максимумы потока ионов, стрелками — соответствующие им максимумы нижнегибридных колебаний электрического поля и  $B_z$  — компоненты магнитного поля

Крупномасштабные МГД-вариации потока плазмы в окрестности кометопаузы проявляются и в приведенных на рис. 2 вариациях амплитуды колебаний электрического поля в нижнегибридном диапазоне частот (2—32 Гц) и в вариациях  $B_z$  компоненты магнитного поля с характерным временем  $\approx 1$  мин. Максимумы амплитуды нижнеги-

бридных колебаний и  $B_z$  компоненты, соответствующие максимумам потока ионов, отмечены на рис. 2 стрелками.

*Обсуждение.* Быстрое (на протяжении  $\approx 2$  мин,  $\Delta \approx 10^4$  км вдоль траектории «Веги-2») уменьшение потоков протонов в анализаторах, направленных на комету (рис. 2) и на Солнце, невозможно объяснить без привлечения бесстолкновительных механизмов торможения и/или изотропизации распределения протонов вследствие развития неустойчивости относительного движения протонов солнечного ветра и кометных ионов. Поэтому прежде всего оценим скорости протонов и ионов, регистрируемых прибором ПЛАЗМАГ-1.

Наблюдавшаяся перед кометопазузой средняя энергия протонов солнечного ветра  $\approx 170$  эВ в направлении на комету и  $\approx 300$  эВ в направлении на Солнце позволяет грубо оценить их переносную скорость относительно космического аппарата  $V_{pr} \approx 250$  км/с. Скорость протонов относительно кометы  $V_p \approx 200$  км/с находится векторным вычитанием скорости космического аппарата относительно кометы  $V_{sc} \approx 80$  км/с. Возможная векторная диаграмма упомянутых скоростей в системе координат, связанной с космическим аппаратом, приведена на рис. 3. Здесь же показаны сектора зрения АК- и АС-анализаторов, а вертикальной штриховкой отмечены возможные области пространства скоростей, из которых протоны попадали в эти анализаторы. Аналогичным образом можно оценить скорость тяжелых кометных ионов относительно космического аппарата  $V_{ir} \approx \approx 120$  км/с и относительно кометы  $V_i \approx 60$  км/с.

Магнитное поле, согласно измерениям, направлено почти вдоль потока. Поэтому можно было бы ожидать развития гидродинамической шланговой неустойчивости. Однако при плотности протонов  $n_p \approx 10-20$  см $^{-3}$  и напряженности магнитного поля  $B \approx 40$  нТл перед кометопазузой условие для развития шланговой неустойчивости потока солнечного ветра относительно кометной плазмы не выполняется. С другой стороны, при плотности тяжелых ионов  $n_i \approx \approx 10$  см $^{-3}$  и их скорости относительно кометы  $V_i \approx 60$  км/с ионизация сравнимого количества кометного газа приводит к неустойчивости движения протонов и кометных ионов относительно ионизируемых атомов кометного газа. Как следствие этого происходит торможение протонов и их рассеяние по питч-углам, что приводит к падению интенсивности потока ионов, регистрируемого АК- и АС-анализаторами.

Несомненным признаком развития неустойчивости вблизи кометопазузы являются крупномасштабные вариации потока плазмы, коррелирующие с колебаниями поперечных (к основному полю) компонент магнитного поля (рис. 2). Характерный масштаб этих колебаний вдоль траектории космического аппарата  $\delta \approx V_{sc} \cdot T \approx \approx 5000$  км сопоставим с масштабом кометопазузы  $\Delta$ , но много больше ларморовского радиуса кометных ионов  $\rho_{ci} \approx V_i / \omega_{ci} \approx 300$  км ( $\omega_{ci} \approx 0.2$  с $^{-1}$  — циклотронная частота ионов группы воды). В отсутствие измерений колебаний вектора скорости плазмы невозможно установить тип колебаний, возбуждаемых в результате неустойчивости. Однако из постоянства модуля магнитного поля следует, что

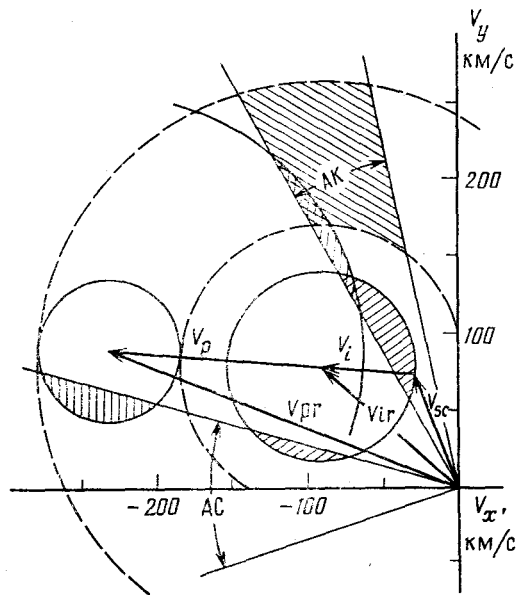


Рис. 3. Качественная векторная диаграмма скоростей протонной и ионной компонент потока плазмы в окрестности кометоплаузы. Показаны скорости относительно кометы ( $V_p$  и  $V_i$ ), относительно космического аппарата, ( $V_{pr}$ ,  $V_{ir}$ ), относительно космического аппарата ионов, покоящихся в системе координат, связанной с кометой ( $V_{sc}$ )

колебания являются поперечными. Амплитуда колебаний скорости  $\delta V_{\perp}$ , оцененная по величине амплитуды колебаний  $\delta B_{\perp}$  поперечных компонент магнитного поля:

$$\delta V_{\perp} \approx V_A \frac{\delta B_{\perp}}{B} \approx 10 \text{ км/с}, \quad (1)$$

где  $V_A \approx 60 \text{ км/с}$  — альвеновская скорость, достаточная, чтобы вызвать сильную модуляцию потока ионов в обоих анализаторах. В то же время большой по сравнению с ларморовским радиусом ионов масштаб этих колебаний указывает, что они возбуждаются нерезонансным образом. Иначе говоря, наблюдаем, по-видимому, развитие планговой неустойчивости, инкремент которой значительно больше инкремента резонансной неустойчивости. Источником энергии такой неустойчивости является энергия движения рождающихся в потоке плазмы кометных ионов относительно этого потока, имеющего плотность значительно бóльшую плотности протонов солнечного ветра.

Значительное уменьшение потока протонов в окрестности кометоплаузы и далее в глубь области кометной плазмы указывает на то, что дополнительным эффективным механизмом образования кометных ионов, ускоряющим нагружение потока плазмы в этой области, является перезарядка протонов на кометном газе. При оценке харак-



терного времени перезарядки  $\tau_{ct}$  его следует определять по полной скорости протона:

$$\tau_{ct} \approx (\sigma_{ct} V_p n_n)^{-1} \approx 6 \cdot 10^3 \text{ с}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{ct} \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$  — сечение перезарядки,  $n_n \approx 4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$  — плотность нейтрального газа вблизи кометоплаузы на кометоцентрических расстояниях  $R \approx 1,6 \cdot 10^5 \text{ км}$  (Ремизов и др., 1986),  $V_p \approx \approx 200 \text{ км/с}$  — скорость течения протонов перед кометоплаузой, по порядку величины равная скорости их гировращения на кометоплаузе и за ней вследствие питч-углового рассеяния на возбуждаемых колебаниях. Оцененное выше  $\tau_{ct}$  сравнимо с характерным временем обтекания кометы потоком плазмы в окрестности кометоплаузы  $\approx 2R/V_i \approx 5 \cdot 10^3 \text{ с}$  при гидродинамической скорости потока  $V_i \approx \approx 60 \text{ км/с}$ , что свидетельствует об эффективности перезарядки в этой области.

Следствием присутствия пучка кометных ионов в потоке плазмы является повышенная интенсивность плазменных волн вблизи кометоплаузы в нижнегибридном диапазоне частот (рис. 3). Их рост прекращается благодаря квазилинейной релаксации пучков ионов к устойчивому состоянию при интенсивности волн порядка (Формизано и др., 1982):

$$E_f^2 \approx \frac{n_n M^2 V_p^2}{\tau_i n_p e^2} \approx 1 \text{ мВ}^2 \cdot \text{М}^{-2} / \text{Гц}, \quad (3)$$

где  $E_f^2/8\pi$  — спектральная плотность энергии электрического поля нижнегибридных колебаний,  $\tau_i \approx 5 \cdot 10^5 \text{ с}$  — характерное время ионизации нейтрального газа с учетом приводившихся выше соображений об увеличении эффективности перезарядки в окрестности кометоплаузы. Измеренная приборами АПВ-В (рис. 1) и АПВ-Н (рис. 2) интенсивность нижнегибридных волн в этой области находится в разумном согласии с теоретической оценкой (3).

Возбужденные нижнегибридные волны в свою очередь ускоряют надтепловые электроны, находящиеся в черенковском резонансе с ними (Вайсберг и др., 1983; Галеев и Хабибрахманов, 1983). Если бы время жизни надтепловых электронов было бы значительно больше времени ускорения, то их максимальная плотность  $n_{Te}$  определялась бы условием малости электронного затухания Ландау по сравнению с инкрементом неустойчивости. В этом случае эффективность передачи энергии от ионов пучка с плотностью  $n_b \approx \eta n_i$ , где  $\eta \approx 7.5\%$  — эффективность передачи энергии электронам, оказывается порядка единицы, так что плотность  $n_{Te}$  и энергию  $\varepsilon_e$  надтепловых электронов можно оценить как (Вайсберг и др., 1983):

$$n_{Te} \approx n_b \approx 1 \text{ см}^{-3}, \quad \varepsilon_e \approx M V_i^2 / 2 \approx 300 \text{ эВ}. \quad (4)$$

Оцененная по выражению (4) плотность надтепловых электронов согласуется с данными прямых измерений (д'Юстон и др., 1986), однако ее недостаточно для объяснения наблюдаемого роста плотности кометных ионов электронным ударом.

Ускорение сверхтепловых электронов вдоль силовых линий магнитного поля приводит к возбуждению в плазме косых ленгмюровских волн (свистовых в плазме с высоким  $\beta$ ) вследствие возникающей анизотропии распределения электронов по скоростям. Частота, на которой интенсивность этих волн максимальна, приблизительно равна

$$\bar{\omega} \approx \omega_{ce} v_{Te} / (\epsilon_e / m_e)^{1/2} \approx 2.3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1} \quad (5)$$

при  $\omega_{ce} \approx 7 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  — циклотронной частоте электронов и  $v_{Te} \approx \approx 2.5 \cdot 10^8 \text{ см/с}$  — тепловой скорости электронов, соответствующей их температуре в окрестности кометопазы  $\approx 2 \cdot 10^5 \text{ К}$  (Грингауз и др., 1986г). С учетом нелинейного ограничения амплитуду высокочастотных ленгмюровских волн можно оценить как (Галеев и Хабибрахманов, 1985)

$$E^2 \approx 4\pi n_{Te} \epsilon_e (\omega_{ce} / \omega_{pe})^2 (\bar{\omega} / \omega_{ce})^5 \approx 20 \text{ мВ}^2 \cdot \text{М}^{-2}, \quad (6)$$

где  $\omega_{pe} \approx 2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  — плазменная частота электронов. В соответствии с оценками (3) и (6) и с измерениями спектральная плотность энергии колебаний электрического поля в косых ленгмюровских волнах того же порядка, что и в нижнегибридных волнах. Заметим, что возбуждение нижнегибридных и свистовых колебаний плазмы с близкими плотностями энергий является типичным для взаимодействия потока плазмы с газом и обсуждалось ранее в приложении к плазменному тору Ио (Галеев и Хабибрахманов, 1985).

В согласии с выражением (5) частота высокочастотных ленгмюровских волн растет по мере торможения плазмы в окрестности кометопазы из-за уменьшения энергии надтепловых электронов в соответствии с (4). Этот рост отмечен на рис. 1 наклонной штрихпунктирной линией. Повышенный уровень нижнегибридных и свистовых колебаний плазмы является лишь следствием быстрого нагружения солнечного ветра кометными ионами в окрестности кометопазы и его последующего торможения, а не его причиной.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Амата и др. (Amata E., Formisano V., Cerulli-Irelli R. et al.) // Exploration of Halley's comet. ESA SP-250. 1986. V. 1. P. 213.
- Вайсберг О. Л., Галеев А. А., Застенкер Г. Н., Климов С. И., Поздрачев М. Н., Сагдеев Р. З., Соколов А. Ю. и Шапиро В. Д. // Журн. эксперим. и теор. физики. 1983. Т. 85. С. 1232.
- Галеев А. А. и Хабибрахманов И. X. Origin and energetics of Io thorus // Giant planets and their satellites / Ed. Kivelson M. G. Oxford: Pergamon Press, 1983. P. 71.
- Галеев А. А. и Хабибрахманов И. X. // Письма в Астрон. журн. 1985. Т. 11. С. 292.
- Грар Р., Бегин К., Могилевский М., Михайлов Ю., Молчанов О., Педерсен А., Тротиньон Ж.-Г. и Фармизано В. // Письма в Астрон. журн. 1936. Т. 12. С. 683 (см. также Ggard R., Pedersen A., Trotignon J.-G. et al. // Nature. 1986. V. 321. P. 290).
- Грингауз К. И., Гомбоши Т., Татральяи М. и др. (Gringauz K. I., Gombosi T. I., Tátrallyay M. et al.) // Geophys. Res. Letters. 1986a. V. 13. P. 613.
- Грингауз К. И., Гомбоши Т., Ремизов А. П. и др. // Письма в Астрон. журн. 1986б. Т. 12. С. 666 (см. также Gringauz K. I., Gombosi T. I., Remi-

- зов А. П. et al. // Nature. 1986. V. 321. P. 282; Advanse Space Res. 1985 V. 5. P. 165).
- Грингауз и др.* (Gringauz K. I., Verigin M. I., Richter A. K. et al.) // Exploration of Halley's comet. ESA SP-250. 1986в. V. 1. P. 93.
- Грингауз и др.* (Gringauz K. I., Remizov A. P., Verigin M. I. et al.) // Exploration of Halley's comet. ESA SP-250. 1986г. V. 1. P. 195.
- Климов С., Савин С., Алексеевич Я. и др.* // Письма в Астрон. журн. 1986. Т. 12. С. 688 (см. также Klimov S., Savin S., Aleksevich Ya. et al. Nature. 1986. V. 321. P. 292).
- Корт и др.* (Korth A., Richter A. K., Anderson K. A., Carlson C. W., Curtis D. W., Lin R. P., Rème H., Sauvaud J. A., D'Uston C., Cotin F., Cros A., Mendis D. A.) // Advanse Space Res. 1986. V. 5. P. 221.
- Ремизов и др.* (Remizov A. P., Verigin M. I., Gringauz K. I., Apáthy I., Szemeréy I., Gombosi T. I., Richter A. K.) // Exploration of comet Halley's. ESA SP-250. 1986. V. 1. P. 387.
- Ридлер В., Швингеншуп К., Ерошенко Е. Г., Стяжкин В. А. и Россел К. Т.* // Письма в Астрон. журн. 1986. Т. 12. С. 674 (см. также Riedler W., Schwingenshup K., Yeroshenko Ye. G., Rossell C. T. // Nature. 1986. V. 321. P. 288).
- Савин и др.* (Savin S., Avanesova G., Balikhin M. et al.) // Exploration of Halley's comet. ESA SP-250. 1986. V. 3. P. 433.
- Формизано и др.* (Formisano V., Galeev A. A., Sagdeev R. Z.) // Planet. Space Sci. 1982. V. 30. P. 491.
- Д'Юстон и др.* (D'Uston C., Rème H., Sauvaud J. A. et al.) // Exploration of Halley's comet. 1986. V. 1. ESA SP-250. P. 77.

Ин-т космических исследований  
АН СССР, Москва

Поступила в редакцию

Ин-т земного магнетизма  
и распространения радиоволн  
АН СССР, Троицк

24 апреля 1987 г.

Ин-т космических исследований  
Австрийской АН, Грац

Отдел космической физики  
Европейского космического агентства,  
Нидерланды