

УДК 523.64

**ПЕРВЫЕ ПРЯМЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ
ВЕЛИЗИ КОМЕТЫ ГАЛЛЕЯ**

**А. ШОМОДИ, К. И. ГРИНГАУЗ, К. СЕГЁ,
Л. САБО, Д. КОЗМА, А. П. РЕМИЗОВ,
Я. ЭРЁ, И. Н. КЛИМЕНКО, И. СЮЧ, М. И. ВЕРИГИН,
И. ВИНДБЕРГ, Т. КРАВЕНС, А. В. ДЬЯЧКОВ,
Г. ЭРДЁШ, М. ФАРАГО, Т. ГОМБОШИ,
К. БЕЧКЕМЕТИ, Е. БЕШПЛЕР, Т. КОВАЧ,
А. КОНДОР, Ю. И. ЛОГАЧЕВ, Л. ЛОХОНЯИ,
Р. МАРСДЕН, Р. РЕДЛ, А. РИХТЕР,
В. Г. СТОЛПОВСКИЙ, И. САБО, И. СЕНТПЕТЕРИ,
А. СЕПЕШВАРИ, М. ТАТРАЛЬЯИ, А. ВАРГА,
К. ВЕНЦЕЛЬ, Г. А. ВЛАДИМИРОВА и А. ЗАРАНДИ**

Прибор «Тюнде-М», установленный на борту станции «Вега-1», предназначен для регистрации энергичных частиц. Этот прибор регистрировал интенсивные потоки энергичных (≥ 40 кэВ) ионов в окрестности кометы Галлея, начиная с расстояния $\approx 10^7$ км от точки максимального сближения. Были обнаружены три области с различными характеристиками ионов. Во внешней области на расстоянии нескольких миллионов километров регистрируются тяжелые кометные ионы, захваченные солнечным ветром. Вторая область протяженностью несколько сотен тысяч километров внутри ударного фронта содержит наиболее интенсивные потоки ионов, в то время как самая внутренняя область на расстояниях нескольких десятков тысяч километров от ядра характеризуется пониженными интенсивностями потоков энергичных ионов (зона обеднения) и резкими всплесками их интенсивности при максимальном сближении (8900 км от ядра).

FIRST OBSERVATIONS OF ENERGETIC PARTICLES NEAR COMET HALLEY, by A. J. Somogyi, K. I. Gringauz, K. Szegő, L. Szabo, Gy. Kozma, A. P. Remizov, J. Erő, I. N. Klimenko, I. T. Szűcs, M. I. Verigin, J. Windberg, T. Cravens, A. V. Dyachkov, G. Erdős, M. Farago, T. Gombosi, K. Kecskemeti, E. Kerpier, T. Kovacs, A. Kondor, Yu. I. Logachev, L. Lohonyai, R. Marsden, R. Redl, A. Richter, V. G. Stolpovskii, J. Szabo, I. Szentpeteri, A. Szepesvary, M. Tatrallyai, A. Varga, K. Wenzel, G. A. Vladimirova and A. Zarandy. The «Tunde-M» energetic particle instrument aboard the «Vega-1» spacecraft detected intense fluxes of energetic (>40 keV) ions in the vicinity of comet Halley, starting at a distance of 10^7 km from closest approach. Three regions of differing ion characteristics have been identified. An outer region, several million kilometres in extent, contains pick-up ions in the solar wind. A second region, inside the bow shock (scale length of several hundred thousand kilometers), contains the most intense fluxes, whereas the innermost region (several ten thousand kilometers) is characterized by lower intensities and sharp spikes near closest approach (~ 8900 km from the nucleus).

Кометные ионы образуются в процессе фотоионизации нейтралов кометного происхождения, а также при их зарядно-обменных реакциях с частицами солнечного ветра. Вновь образованные кометные

ионы практически покоятся. Затем они ускоряются электростатическим полем E солнечного ветра, приводящим прежде всего к электростатическому дрейфу в направлении $E \times B$, где B — межпланетное магнитное поле (Галея и др., 1985; Кравенс, 1986). Функция распределения кометных ионов в пространных скоростях имеет вид комы. Дрейфующего параллельно полю (Кравенс, 1986; Ивашья и др., 1978). Этот чрезвычайно неустойчивый тип распределения создает магнитные флуктуации, которые могут привести к расщеплению ионов по пяти углам и, таким образом, к изопродинации этого распределения (Галея и др., 1985; Галея и др., 1986). Ожидается, что пересечение ударного фронта ионами, рожденными выше по течению, приведет к дальнейшему ускорению и повышению энергии этих ионов (Галея и др., 1986; Кравенс, 1986; Ип и Аксфорд, 1986) либо за счет градиентного дрейфа, либо за счет ускорения Ферми, либо в результате аднабатического сжатия. Дальнейшее ускорение кометных ионов вна по потоку от ударного фронта может происходить за счет металнизации Ферми I и II рода, аднабатического сжатия (в частности, в зоне магнитного барьера волеи ядра), а также за счет пересечения нения магнитного поля вверх и вниз по потоку от ядра. В результате этих процессов ионы H^+ , например, могут быть ускорены до энергий от нескольких сотен кэВ до МэВ (Ип и Аксфорд, 1986; Галея и Сатлер, 1986).

Движение космических аппаратов Вета происходило под углом 110° к линии Солнце — комета Галлея. Телескоп «Тюнде-М» направлен по нормали к линии Солнце — комета в плоскости эклиптики и направлен, приблизительно противоположном скоросте движения станции (Шомоди и др., 1983, 1986).

Этот телескоп регистрирует ионы в конусе с полураствором 25° в окол ширинной 10° кэВ для энергии в диапазоне $40-490$ кэВ и в окол нах шириной 20° кэВ для энергетического диапазона $490-630$ кэВ. Здесь не рассматриваются другие каналы для электронов более высоких энергий, для протонов и ионов. Прибор «Тюнде-М» не может определить массу падающего иона заданной энергии, однако предпологается, что лишь тяжелые ионы, захваченные солнечным ветром и ускоренные под действием перечисленных механизмов, могут обладать достаточной для их регистрации энергией.

На рис. 1 приведены данные низкоэнергетичных каналов телескопа «Тюнде-М», а на рис. 2 представлены временные гистограммы потоков наблюдавшихся при близком подходе к комете. Энергия, указанная на рис. 1-3, соответствует энергиям, запасенным в виде комы-защитной энергии кремниевоег слоя внешнего детектора телескопа «Тюнде-М» за счет ионов, полностью поглощенных в этом слое. В случае протонов эти значения очень близки к энергиям падающих на кремниевом слое, может быть значительно меньше энергии падающих частиц. Более подробно эти характеристики описаны в работе Ивашья и др. (1978).

Следует также отметить, что можно пренебречь загрязнением электронами при измерениях ионных потоков при нормальных усло-

рис. 2. Ионные потоки в области наибольшего приближения к ядру (поиснения в тексте)

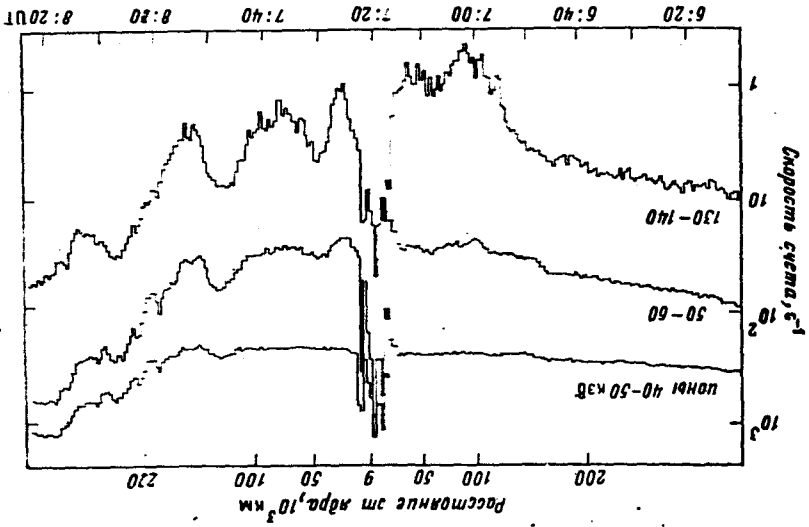
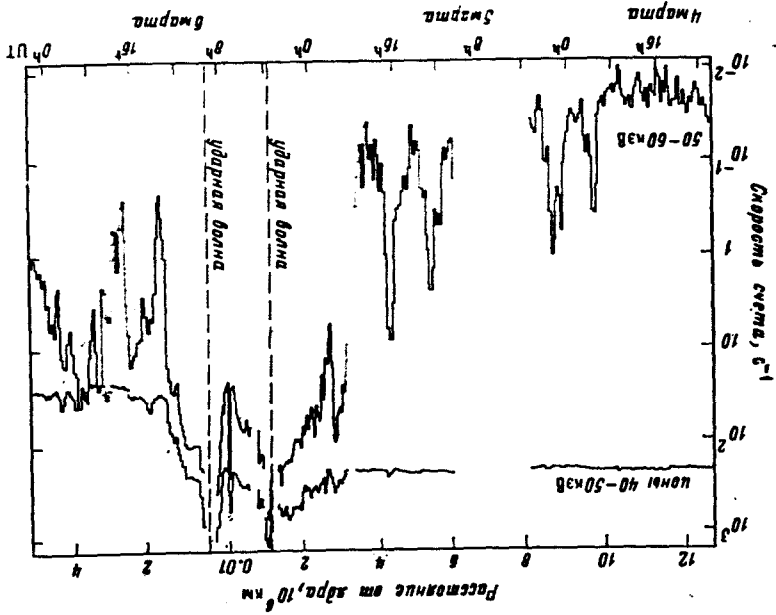


рис. 1. Ионные потоки в двух каналах «Тюнде-М» с наименьшими энергиями в зависимости от времени (поиснения в тексте)



ионы практически покоятся. Затем они ускоряются электрическим полем В солнечного ветра, приводящим прежде всего к электрическому дрейфу в направлении $E \times B$, где В — межпланетное магнитное поле (Галея и др., 1985; Кравенс, 1986). Функция распределения кометных ионов в пространстве скоростей имеет вид кольца, дрейфующего параллельно потоку (Кравенс, 1986; Иваша и др., 1978). Этот чрезвычайно неустойчивый тип распределения создает магнитные флуктуации, которые могут привести к рассеянию ионов по пути и таким образом, к изотропизации этого распределения (Галея и др., 1985; Галея и др., 1986). Ожидается, что пересечение ударного фронта ионами, рожденными выше по течению, приведет к дальнейшему ускорению и повышению энергии этих ионов (Сатл-ев и др., 1986; Кравенс, 1986; Ип и Аксфорд, 1986) либо за счет тра-диционного дрейфа, либо за счет ускорения Ферми, либо в результате адiabатического сжатия. Дальнейшее ускорение кометных ионов вниз по потоку от ударного фронта может происходить за счет меха-низмов Ферми I и II рода, адiabатического сжатия (в частности, в зоне магнитного барьера вблизи ядра), а также за счет пересече-ния этих процессов ионов H_2O^+ , например, могут быть ускорены до энергий от нескольких сотен кэВ до МэВ (Ип и Аксфорд, 1986; Гале-ев и Сатлеев, 1986).

Движение кометических аппаратов Вера произошло под углом 110° к линии Солнце — комета Галлея. Детектор «Люнде-М» направ-лен по нормали к линии Солнце — комета в плоскости эклиптики и направленности, приблизительно противоположном скросту движения станции (Шомодя и др., 1983, 1986).

Этот детектор регистрирует ионы в конусе с полураствором 25° нах шириной 20 кэВ для энергии в диапазоне $40-490$ кэВ и в ок-нах шириной 10 кэВ для энергии в диапазоне $490-630$ кэВ. Здесь не рассматриваются другие каналы для электронов более вы-соких энергий, для протонов и ионов. Прибор «Люнде-М» не может определить массу падающего иона заданной энергии, однако пред-полагается, что лишь тяжелые ионы, захваченные солнечным ветром и ускоренные под действием перечисленных механизмов, могут об-ладать достаточной для их регистрации энергией.

На рис. 1 приведены данные низкоэнергичных каналов детектора «Люнде-М», а на рис. 2 представлены временные histograms потоков наблюдавшихся при ближайшем подходе к комете. Энергия, указан-ная на рис. 1—3, соответствует энергиям, запасенным в виде ион-защитной энергии трети внешнего детектора детектора телескопа «Люнде-М» за счет ионов, полностью поглощенных в этом слое. В слу-чае протонов эти значения очень близки к энергиям падающих на детектор частиц. В случае тяжелых ионов энергия, запасенная в кремниевом слое, может быть значительно меньше энергии падаю-щих частиц. Более подробно эти характеристики описаны в работе Иваша и др. (1978).

Следует также отметить, что можно пренебречь загрязнением электронами при измерении ионных потоков при нормальных усло-виях.

Рис. 2. Ионные потоки в области наибольшего приближения к ядру (ионс-нента в тексте)

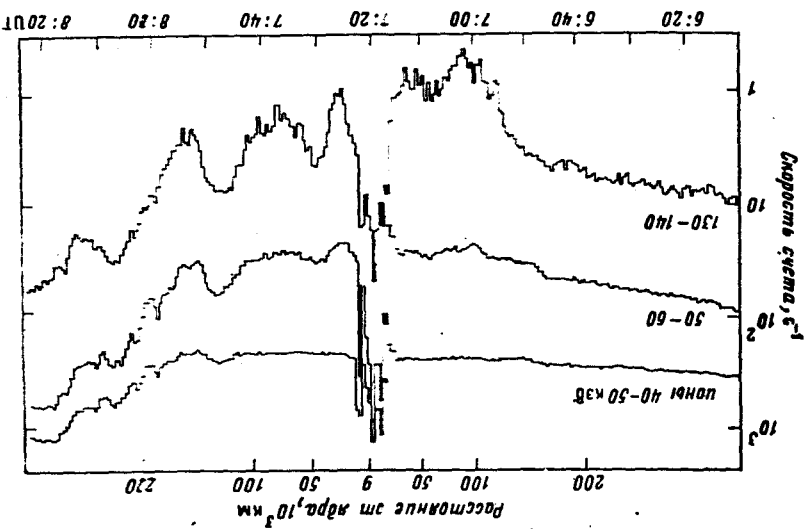
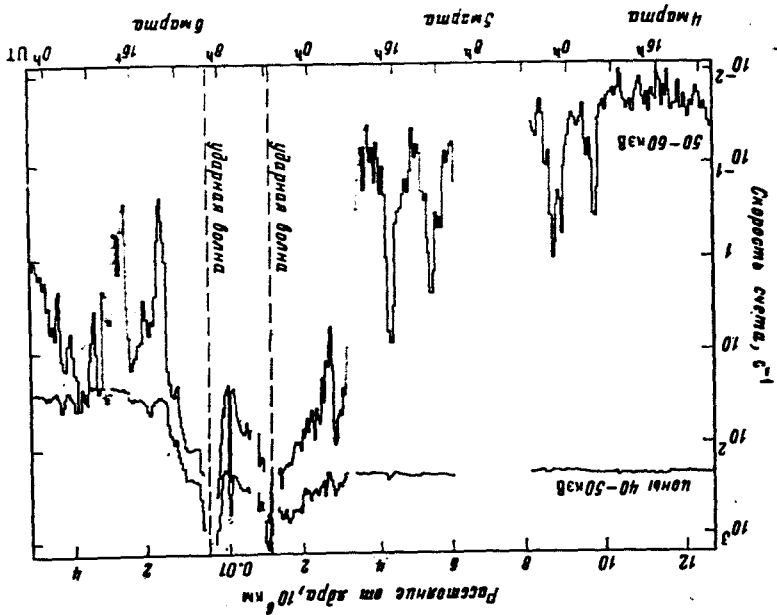


Рис. 1. Ионные потоки в двух каналах «Люнде-М» с наименьшими энер-гиями в зависимости от времени (показания в тексте)



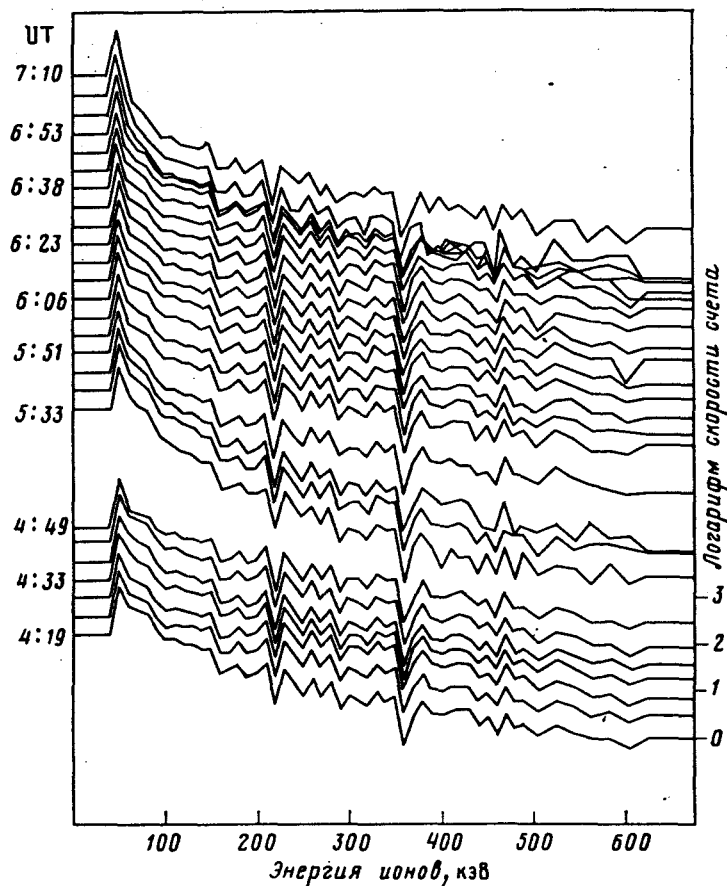


Рис. 3. Энергетические спектры ионных потоков, измеренные прибором «Тюнде-М» на борту станции «Вега-1» в течение 3 ч, предшествующих максимальному сближению (пояснения в тексте). Резкие спады скоростей счета на энергиях 210 и 350 кэВ обусловлены разной шириной энергетических каналов, за которую еще не внесена коррекция

виях (которые преобладали в период описываемых здесь наблюдений) отчасти благодаря применению отклоняющего магнита на внешнем детекторе, а отчасти — схеме антисовпадений при регистрации частиц на этом детекторе.

На рис. 1 и рис. 2 можно выделить следующие три области.

1. Внешняя зона — вне точки пересечения ударного фронта при подлете и отходе от кометы, которое происходило на расстоянии $\approx 10^6$ км от ядра (Грингауз и др., 1986). Энергичные ионы регистрировались вплоть до расстояния $\approx 10^7$ км от ядра; характерный масштаб этой зоны несколько миллионов километров.

2. Область регистрации наиболее интенсивных потоков, включающая ударный фронт и большую часть переходной области. Характерный масштаб этой зоны составляет сотни тысяч километров.

3. Внутренняя зона, характеризующаяся понижением уровня потока и всплесками интенсивности на этом фоне. Характерный масштаб этой зоны несколько десятков тысяч километров.

В районе наибольшего сближения наблюдалось несколько всплесков интенсивности в области с характерным масштабом несколько тысяч километров. Подобные области были выделены по измерениям энергичных частиц вблизи кометы Якобини — Циннера (Глеклер и др., 1986; Хайндс и др. 1986).

Внешняя зона характеризуется тем, что по мере приближения к ударному фронту наблюдается общий рост интенсивности в энергетическом диапазоне 50—60 кэВ. Наиболее крутой подъем наблюдается в пределах $3 \cdot 10^6$ км. На этом фоне наблюдаются дискретные усиления интенсивности на 1—2 порядка величины имеющие квазипериодическую структуру с периодом около 4ч. Эти всплески, очевидно, связаны с условиями в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле. Температура, оцененная по энергетическому спектру ионов, составляет 5 кэВ.

По мере приближения к ударному фронту рост ионных потоков ускоряется (см. рис. 1). При этом быстрее увеличиваются потоки ионов на более высоких энергиях, что приводит к ужесточению спектра. Наиболее вероятно это обусловлено ускорением на ударном фронте (в его окрестности) или адиабатическим сжатием в зоне ударной волны. Энергетический спектр дает для эффективной температуры оценку 20—40 кэВ вблизи ударного фронта. Максимумы усиления ионных потоков наблюдались вблизи ударного фронта с обеих сторон от максимального сближения. За ударным фронтом в переходной зоне уровень ионного потока испытывает лишь небольшое понижение (исключение составляет зона, обедненная тяжелыми ионами, которую мы рассмотрим позднее). Поскольку скорость солнечного ветра постепенно понижается в этой области (Грингауз и др., 1986), эти данные свидетельствуют о дальнейшем ускорении кометных ионов после их захвата турбулентными движениями в переходной области (механизмы Ферми I и II рода). Кроме того, во внутренней зоне происходит более полная изотропизация распределения ионов, чем во внешней, скорее всего за счет усиления уровня турбулентности, которое наблюдалось в волновом эксперименте на борту аппарата «Вега-1» (Грар и др., 1986), что может создать дополнительный источник ионов, регистрируемых детекторами «Тюнде-М». Эти данные требуют специального исследования.

Рассмотрим теперь самую внутреннюю область или область обеднения энергичными ионами, простирающуюся от 06.50 до 08.05 UT 6 марта (рис. 2). В этой области потоки энергичных ионов гораздо менее интенсивны, особенно на более высоких энергиях, так что энергетический спектр смягчается (рис. 3). Эта зона обеднения энергичных ионов, по-видимому, соответствует области плазмы кометного происхождения, наблюдавшейся приборами комплекса «Плазмаг» (Грин-

гауз и др., 1986) — области, где исчезают протоны солнечного ветра, которая также связана с процессами на магнитном барьере. По-видимому, эти данные могут быть объяснены действием двух механизмов.

1. Число энергичных ионов уменьшается за счет зарядно-обменных реакций при столкновениях с нейтралами (Галеев и др., 1985). При скорости газообразования $Q = 10^{30} \text{ с}^{-1}$ характерное время зарядно-обменных реакций вблизи края зоны обеднения ($R \lesssim 10^6 \text{ км}$) оценивается как 10^3 с , что действительно сравнимо со временем транспортного пробега или конвекции для почти остановленного солнечного ветра ($u \approx 30 \text{ км/с}$).

2. Энергичные ионы могут уходить из внутренней зоны вдоль магнитных силовых линий, поскольку их продольные скорости для большинства значенийpitch-углов значительно больше массовой скорости. Действительно, следует ожидать «конического» распределения ионов.

Другая интересная особенность внутренней зоны — тесные острые зубчатые пики, отчетливо наблюдаемые на всех энергиях (см. рис. 2) вблизи максимального приближения аппарата «Вега-1» к ядру (07.20UT на рис. 2). Это явление тем более примечательно, что совпадает с максимумом напряженности и быстрыми изменениями направления магнитного поля (Ридлер и др., 1986).

Наконец, хотелось бы отметить, что интенсивность электронов в диапазоне 160—300 кэВ по измерениям «Тюнде-М» очень быстро возрастает над фоновой скоростью счета при наибольшем сближении с ядром кометы и остается высокой в течение 4 ч после сближения.

Таким образом, эксперимент «Тюнде-М» на аппарате «Вега-1» показал, что поведение энергичных ионов феноменологически связано с взаимодействием солнечного ветра с кометой Галлея. Для выяснения основных процессов взаимодействия солнечного ветра с кометами необходим более детальный анализ этих уникальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

- Галеев и др. (Galeev A. A., Cravens T. E., Gombosi T. I.). *Astrophys. J.*, 1985, v. 289, p. 807.
 Галеев А. А. и Сагдеев Р. З. Журн. эксперим. и теорет. физики, 1986 (в печати).
 Грар Р., Бегин К., Мосилевский М. и др. Письма в Астрон. журн., 1986, т. 12, № 9.
 Глекер и др. (Gloeckler G., Hovestadt D., Ipavich F. M., Scholer M., Klecker B., Galvin A. B.). *Geophys. Res. Letters*, 1986, v. 13, p. 251.
 Грингауз К. И., Гомбоши Т., Ремизов А. П. и др. Письма в Астрон. журн., 1986, т. 12, № 9.
 Ип и Аксфорд (Ip W.-H., Axford W. I.). Preprint MPAE, 1986.
 Ипавич и др. (Ipavich F. M., Lundgren R. A., Lambird B. A., Gloeckler G.). *Nucl. Instr. and Methods*, 1978, v. 154, p. 291.
 Ипавич и др. (Ipavich F. M., Galvin A. B., Gloeckler G., Hovestadt D., Klecker B. and Scholer M.). *Science*, 1986, (in press).
 Кравенс (Cravens T. E.). *Geophys. Res. Letters*, 1986, v. 13, p. 275.
 Ридлер В., Швингеншю К., Ерошенко Е. Г. и др. Письма в Астрон. журн., 1986, т. 12, № 8.
 Сагдеев и др. (Sagdeev R. Z., Shapiro V. D., Shevchenko V. I., Szegő K.). *Geophys. Res. Letters*, 1986, v. 13, p. 85.

Хайндс и др. (Hynds R. J., Cowley S. W. H., Sanderson T. R., Van Rooijen J. J., Wenzel K. P.). *Science*, 1986 (in press).

Шомоди и др. (Somogyi A. J. et al.). In: *Cometary Exploration: Proceedings of the International Conference on Cometary Exploration*, Nov. 15—19, 1982. Budapest, 1983, v. 3, p. 351.

Шомоди и др. (Somogyi A. J. et al.). Preprint KFKI-1986-02/1c, 1986.

Центральный ин-т физических исследований
 Венгерской АН, Будапешт (ВНР)

Поступила в редакцию
 22 апреля 1986 г.

Ин-т космических исследований
 АН СССР, Москва

Ин-т аэронавтики общества М. Планка,
 Катленбург — Линдау (ФРГ)

Технический университет, Будапешт (ВНР)

Отдел космических исследований ЕКА,
 Нордвайк (Голландия)

Московский гос. университет