

УДК 523.64

ПЕРВЫЕ ПРЯМЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛАЗМЫ И НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗА У КОМЕТЫ ГАЛЛЕЯ: ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ С КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ «ВЕГА»

К. И. ГРИНГАУЗ, Т. ГОМБОШИ, А. П. РЕМИЗОВ,
И. АПАТИ, Т. СЕМЕРЕИ, М. И. ВЕРИГИН,
Л. И. ДЕНЩИКОВА, А. В. ДЬЯЧКОВ, Е. БЕППЛЕР,
И. Н. КЛИМЕНКО, А. РИХТЕР, А. ШОМОДИ,
К. СЕГЁ, С. СЕНДРЁ, М. ТАТРАТЬЯИ,
А. ВАРГА и Г. А. ВЛАДИМИРОВА

В статье представлены первые результаты прямых (локальных) измерений плазмы и описание плазменных образований, наблюдавшихся в окрестности кометы Галлея. Научными задачами плазменных экспериментов на космических аппаратах «Вега» являлись: 1) исследование изменения параметров и распределения плазмы в зависимости от расстояния до кометы; 2) исследование положения и структуры ударной волны у кометы; 3) определение изменения химического состава плазмы по мере ее нагружения тяжелыми ионами в процессе приближения к комете и 4) измерения распределения нейтрального газа вдоль траектории станции.

FIRST IN SITU PLASMA AND NEUTRAL GAS MEASUREMENTS AT COMET HALLEY, by K. I. Gringauz, T. I. Gombosi, A. P. Remizov, I. Apathy, T. Szemerey, M. I. Verigin, L. I. Denshchikova, A. V. Dyachkov, E. Keppler, I. N. Klimenko, A. Richter, A. Somogyi, K. Szegő, S. Szendrő, M. Tatrallyay, A. Varga and G. A. Vladimirova. We present the first in situ observations and a description of the large-scale behaviour of comet Halley's plasma environment. The PLASMA-1 experiment, carried aboard the spacecrafts «Vega-1» and «Vega-2», had the following aims: 1) to study the change of plasma parameters and distribution as a function of cometocentric distance; 2) to investigate the existence and structure of the cometary bow shock; 3) to determine the change in chemical composition of the heavily masstons-loaded plasma as the spacecraft approached the comet; and 4) to measure the neutral gas distribution along the spacecraft trajectory. We observed a discontinuity (the 'cometopause') between the solar-wind-controlled cometosheath and the magnetized cometary plasma region. From the measured neutral gas density distribution we estimate a total gas production rate of 1.3×10^{30} molecules s^{-1} .

Для реализации перечисленных научных задач на КА «Вега» был установлен комплекс приборов ПЛАЗМАГ-1, включавший шесть различных датчиков.

Два сферических электростатических анализатора измеряли энергетические спектры ионов в направлении вектора относительной скорости КА-комета и в направлении на Солнце. Эти датчики будем называть соответственно анализатором кометных ионов (АК) и анали-

затором, ориентированным в направлении на Солнце (АС). Поскольку направление солнечного ветра может меняться в пределах $\pm 10^\circ$, применение традиционных электростатических анализаторов с малой угловой апертурой могло бы привести к ошибкам (таким, как кажущееся уменьшение величины потока за счет изменения его направления) измерений на космическом аппарате, стабилизированном по трем осям. Поэтому перед обоими электростатическими анализаторами были установлены электростатические линзы для расширения угловой апертуры без потери разрешения по энергии. Анализатор кометных ионов (АК) имел угловую апертуру $14 \times 32^\circ$ и регистрировал ионы в диапазоне энергий/заряд $15-3500$ эВ/В в 120 интервалах, равномерно распределенных в логарифмическом масштабе без зазоров между соседними интервалами, обеспечивая таким образом полное перекрытие всего диапазона. Анализатор АС имел угловую апертуру $38 \times 30^\circ$ и измерял ионы в диапазоне $50-25000$ эВ/В в 60 энергетических интервалах. Все данные об угловых характеристиках приведены по 10%-ному уровню. Для такого же уровня энергетического разрешения этих анализаторов составляло $\Delta E/E \approx 0.055$.

Цилиндрический электростатический анализатор электронов (АЭ) с угловой апертурой $7 \times 7^\circ$ был ориентирован перпендикулярно плоскости эклиптики. Измерения с помощью АЭ проводились в диапазоне энергий $3-10000$ эВ с $\Delta E/E = 0.075$ в 30 энергетических интервалах, равномерно распределенных в логарифмическом масштабе.

Энергетические спектры электронов и ионов на космических аппаратах «Вега» измерялись непрерывно каждую секунду в течение ≈ 4 ч, начиная за ≈ 3 ч до наибольшего приближения к ядру. В течение 2 сут до и 1 сут после сближения спектры измерялись непрерывно каждые ≈ 3 мин.

В состав комплекса ПЛАЗМАГ-1 входили также два интегральных цилиндра Фарадея (ловушки заряженных частиц). Цилиндр Фарадея, направленный на Солнце с угловой апертурой $84 \times 84^\circ$, измерял потоки ионов солнечного ветра. Напорный цилиндр Фарадея, ориентированный по вектору скорости КА относительно кометы, с угловой апертурой $25 \times 25^\circ$ имел четыре периодически меняющихся режима работы. Два из них давали возможность измерять поток нейтральных частиц от кометы путем измерения тока вторичных электронов, создаваемых в результате ударов нейтральных частиц о металлический эмиттер.

Плазменный ударный детектор для измерения потока нейтральных частиц также входил в состав комплекса ПЛАЗМАГ-1. Этот детектор был того же типа, что и разработанный д-ром Граром для аппарата «Джотто». Результаты, полученные при помощи этого прибора, будут опубликованы впоследствии.

Более детальное описание эксперимента ПЛАЗМАГ-1 приведено в работах Грингауза и др. (1982, 1986).

На рис. 1 схематически представлены основные плазменные области, наблюдавшиеся при подлете КА «Вега-1» и «Вега-2». При подлете оба анализатора АС измеряли относительно быстрый и горячий солнечный ветер: на кометоцентрических расстояниях $2-3 \cdot 10^8$ км

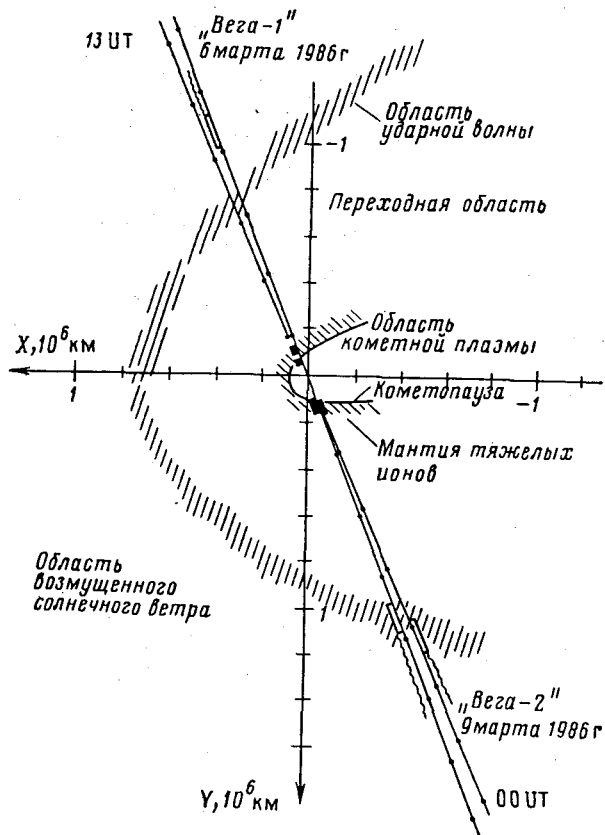


Рис. 1. Плазменные области, наблюдавшиеся при подлете к комете Галлея космических аппаратов «Вега-1» и «Вега-2»

по данным «Веги-1» скорость, концентрация и температура протонов были равны соответственно $V \approx 580$ км/с, $n \approx 12$ см⁻³, $T \approx 1.2 \cdot 10^5$ К, в то время как на «Вега-2» наблюдались значения $V \approx 620$ км/с, $n \approx 11$ см⁻³, $T \approx 3 \cdot 10^5$ К. Следует отметить, что характеристики потоков протонов, приведенные здесь, являются лишь результатом предварительных оценок и могут быть уточнены впоследствии.

Первые признаки кометы были зарегистрированы анализатором АК, который зарегистрировал следы ионов кометного происхождения на расстоянии $\approx 5 \cdot 10^6$ км от ядра. По мере приближения к области ударного фронта в солнечном ветре стали усиливаться возмущения плазмы. На рис. 1 тонкой волнистой линией отмечены области, где наблюдались эти возмущения. На расстоянии $1.1-1.2 \cdot 10^6$ км от ядра оба КА «Вега» вошли в широкую ($\approx 10^6$ км) область ударного фронта и затем попали в переходную околокометную область. В области

ударного фронта поток солнечной плазмы замедляется и функция распределения протонов значительно расширяется, так что становится невозможным выделить максимум α -частиц в энергетическом спектре. Направление потока плазмы больше не является антисолнечным, на «Вега-2» оба анализатора АК и АС регистрировали значительные потоки ионов приблизительно одинаковой энергии. Кроме этого, в переходной области на этом КА наблюдались вариации направления потока плазмы: протоны иногда исчезали в спектрах АС и появлялись в спектрах АК и наоборот.

При отходе от кометы область ударного фронта на «Вега-1» наблюдалась на кометоцентрическом расстоянии около $1.1 \cdot 10^6$ км. После ее пересечения ветер оказался более медленным и холодным, чем во время приближения к комете: $V \approx 380$ км/с, $n \approx 17$ см⁻³, $T \approx 4 \cdot 10^4$ К.

На рис. 2 представлены результаты двухминутного усреднения спектров высокого разрешения, полученных АС-анализатором на КА «Вега-1» в течение 4 ч высокоскоростной передачи данных. На расстоянии около 800 000 км, (4.20 UT) от ядра в спектре преобладает одиночный широкий максимум, соответствующий термализованным протонам и α -частицам солнечного ветра, движущимся со скоростью 350—400 км/с.

Ближе к ядру солнечный ветер постепенно еще более замедляется и в энергетическом спектре АС-анализатора появляется второй пик, соответствующий энергии, существенно превышающей энергию протонов солнечного ветра. Очевидно, что второй пик образован кометными ионами (возможно, группы воды), поскольку в солнечном ветре никогда не наблюдались значительные потоки ионов столь высоких энергий.

На расстоянии около 300 000 км от кометы (6.15 UT) потоки протонов солнечного ветра становятся сравнимы с потоками кометных ионов. На основе данных, представленных на рис. 2, и результатов КА «Вега-2» можно заключить, что на расстоянии около 150 000 км от ядра (6.45 UT) ионы, пришедшие из солнечного ветра, перестают наблюдаться в направлении от Солнца. В этой области АС-анализатор регистрирует лишь широкое распределение медленных кометных ионов. Эту область, где плазма все еще медленно обтекает комету, можно назвать мантией тяжелых ионов. Вскоре после этой области на кометоцентрическом расстоянии около 100 000 км (7.00 UT) АС-анализатор практически прекращает регистрацию частиц. При отходе от кометы кометные ионы вновь появляются в данных АС-анализатора на расстоянии примерно 70000 км от ядра (7.35 UT), затем снова начинают наблюдаться термализованные протоны солнечного ветра.

На рис. 3 представлены результаты двухминутных усреднений спектров с высоким разрешением, полученных с КА «Вега-2» при помощи АК-анализатора. Первые спектры, представленные на этом рисунке, были получены на расстоянии около 800 000 км от ядра кометы вниз по потоку от области ударного фронта. Между 800 000 (4.20 UT) и 150 000 км (6.45 UT) зарегистрировано широкое энерге-

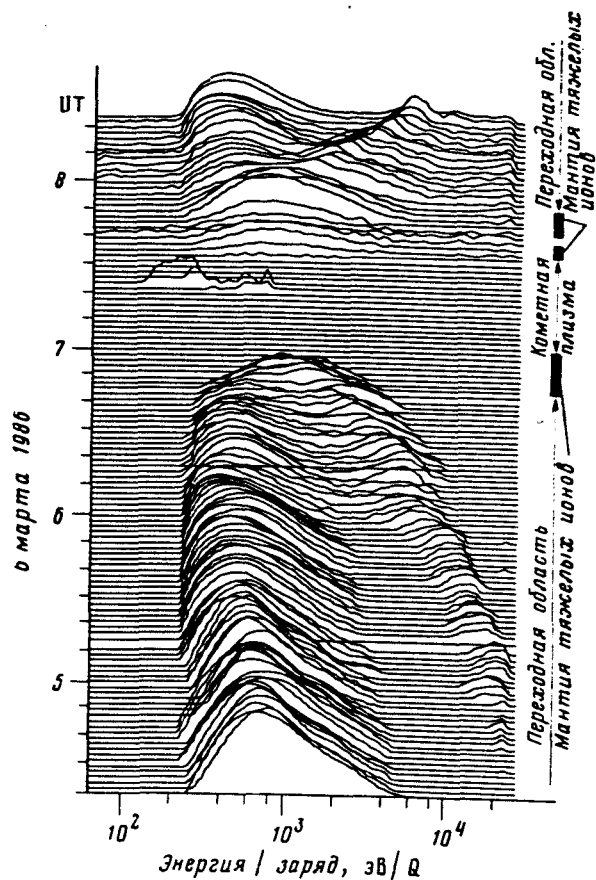


Рис. 2. Двухминутные средние односекундных спектров ионов, измеренных в направлении на Солнце на КА «Вега-1» в течение 4-часового сеанса высокоскоростной передачи данных в окрестности кометы Галлея 6 марта 1986 г.

тическое распределение замедляющихся протонов. Эти частицы, вероятно, являются отвернутыми от первоначального направления протонами солнечного ветра (одновременно наблюдающимися и АС-анализатором). В этой области наблюдаются также признаки тяжелых кометных ионов (верхняя часть энергетического диапазона прибора). Как видно из одновременных измерений АС-анализатора (не приведенных на рисунке), примерно на расстоянии 150 000 км от ядра протоны солнечного ветра практически перестают регистрироваться в направлении этого датчика. Ближе к комете, до расстояний 100 000 км, АС-анализатор регистрирует в основном медленные кометные ионы в мантии тяжелых ионов.

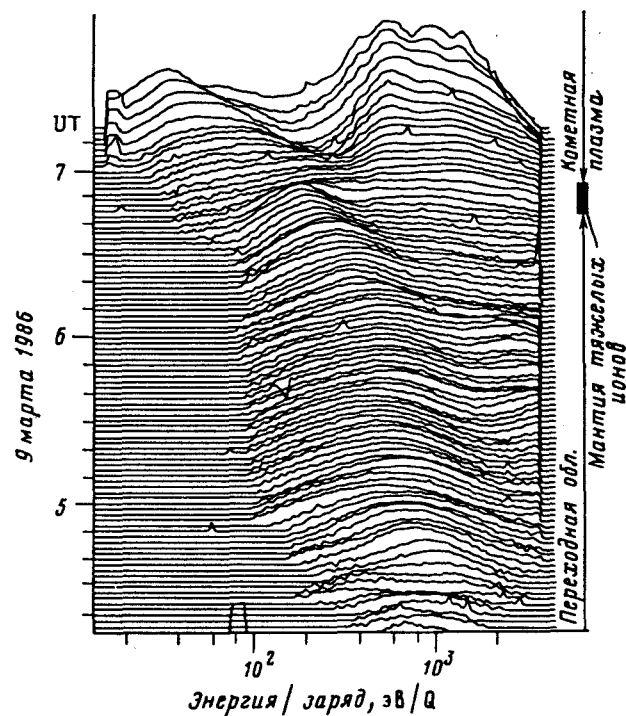


Рис. 3. Двухминутные средние односекундных спектров ионов, измеренных в направлении вектора скорости КА «Вега-2» относительно кометы Галлея 9 марта 1986 г.

На расстоянии около 100 000 км от ядра КА «Вега-2» входил в стоячую или очень медленно движущуюся плазму области кометных ионов, которая характеризуется возрастающими потоками ионов в диапазоне 300—3000 эВ/Q (рис. 3). Эта область неоднородна: в ней наблюдались протяженные стратифицированные зоны с квазирегулярно меняющимися потоками ионов с характерным временем около 10 с, соответствующим характерной протяженности ≈ 800 км вдоль траектории КА. На кометоцентрическом расстоянии 15000 км в области кометных ионов АК регистрировал лишь холодные кометные ионы и оказалось возможным провести их массовый анализ. К сожалению, на более близких расстояниях от ядра плазменные датчики были временно выведены из строя воздействием кометы.

На рис. 4 приводятся несколько последовательных односекундных спектров, зарегистрированных АК-анализатором на расстоянии 15000 км от ядра. Первый уединенный пик на этих спектрах, определенно созданный ионами H^+ , наблюдается приблизительно при энергии 30 эВ, соответствующей скорости протонов относительно космического аппарата $V_R = 76.78$ км/с. Это указывает на то, что кометная плазма относительно холодная и что как тепловая, так и направленная скорости этих ионов гораздо меньше V_R . Пики других

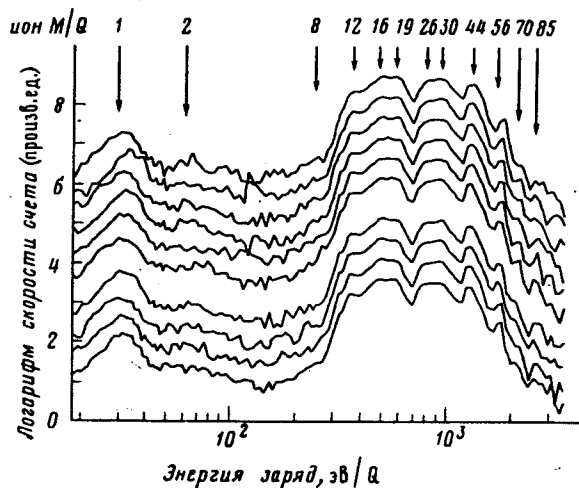


Рис. 4. Односекундные энергетические спектры ионов, измеренные в области околокометной плазмы в направлении вектора относительной скорости КА «Вега-2» на расстоянии 15 000 км от ядра кометы Галлея

ионов соответствуют $E/Q = 30.55 \cdot M$ эВ, где M — массовое число иона. Некоторые значения E/Q при $M = 1, 2, \dots, 85$ отмечены на рис. 4 стрелками. В предположении, что в области кометной плазмы присутствуют преимущественно однозарядные ионы, спектры АК-анализатора могут быть использованы для масс-спектрометрии кометной плазмы.

Ионы H^+ , C^+ , CO_2^+ , Fe^+ можно отождествить с достаточно большой уверенностью на основе данных рис. 4. Максимум при $14 \lesssim M/Q \lesssim 20$ наиболее вероятно обусловлен ионами, происходящими из родительской молекулы H_2O при возможном вкладе CH_4 и NH_3 . Наблюдающиеся два вторичных максимума при $M = 16-17$ и $M = 19$, возможно, соответствуют ионам O^+ , OH^+ и H_3O^+ . Сложнее обстоит дело с максимумом при $24 \lesssim M/Q \lesssim 34$, который может быть образован ионами, происходящими из нескольких родительских молекул, таких, как CO/CO_2 , и других молекул, содержащих N или S. В наиболее интенсивных максимумах на рис. 4 скорости счета каналотрона АК-анализатора достигали $8 \cdot 10^5$ с⁻¹. При таких скоростях счета прибор работал в нелинейном режиме, в котором большие вариации потока могли вызвать лишь незначительные изменения скорости счета. Этот эффект будет учтен в следующих публикациях.

На рис. 5 приведены два типичных спектра электронов: один был получен в области кометной плазмы, а другой измерен 2 сут спустя в межпланетной среде. Главное различие между ними состоит в появлении очень энергичной компоненты (несколько кэВ) электронов. Эти электроны могут служить дополнительным источником ионизации в коме.

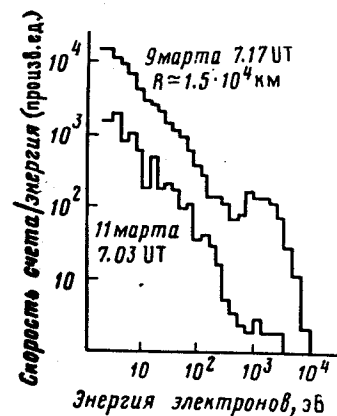


Рис. 5

Рис. 5. Электронные энергетические спектры, измеренные 9 марта на расстоянии 15 000 км от ядра и 2 сут позже в солнечном ветре

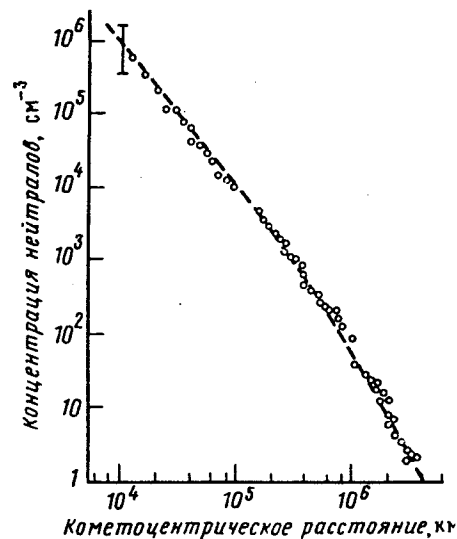


Рис. 6

Рис. 6. Распределение концентрации нейтральных частиц в окрестности кометы Галлея в зависимости от расстояния до ее ядра, оцененное по результатам измерения тока вторичных электронов в ловушке заряженных частиц, ориентированной по вектору относительной скорости КА «Вега-1»

Наконец, на рис. 6 приведены предварительные результаты измерения распределения концентрации нейтралов в зависимости от кометоцентрического расстояния. При оценке значений концентрации нейтралов предполагалось, что выход вторичных электронов при ударах нейтральных частиц со скоростью ≈ 80 км/с составляет ≈ 0.3 . По оценкам, шкала ионизации $\lambda \approx 2 \cdot 10^6$ км, а полная скорость газообразования составляет $1.3 \cdot 10^{30}$ молекул/с в предположении скорости нейтрального газа ≈ 1 км/с. Представленные на рис. 6 данные были получены во время подлета КА «Вега-1» к комете. При отлете от кометы «Веги-1» и на «Вега-2» наблюдалось более сложное распределение плотности нейтрального газа, указывающее на наличие пространственных или временных отклонений от простой зависимости вида r^{-2} . По нашему мнению, неопределенность этих предварительных данных можно оценить фактором 2—3.

Как и ожидалось, обе станции «Вега» пересекли протяженную область ударной волны на расстоянии около 10^6 км от ядра. Эта ударная волна формируется не в результате динамического сжатия солнечного ветра на «жестком препятствии», а создается постоянной массовой нагрузкой солнечного ветра ионами кометного происхождения (Ип и Аксфорд, 1982; Сагдеев и др., 1985; Галеев и др., 1985; Мендис и др., 1985; Сагдеев и др., 1986).

другой стороны, крупномасштабная структура плазмы вниз по потоку от ударной волны оказалась более сложной, чем ожидалось. Было обнаружено, что течение плазмы, нагруженной кометными ионами, динамически контролируется солнечным ветром только в области между ударной волной и «кометопазузой» (наблюдавшейся на расстоянии 100 000 км от ядра), которая разделяет переходную область у кометы, контролируемую солнечным ветром, и мантию тяжелых ионов от области замагниченной (Ридлер и др., 1986) кометной плазмы (см. рис. 1).

Эта область кометной плазмы играет роль препятствия, обтекаемого солнечным ветром, нагруженным тяжелыми ионами. Таким образом, контролируемая кометой область занимает гораздо больший объем, чем ожидалось в ряде теоретических работ (см., например, обзор Мендиса и др., 1985), согласно которым лишь область внутри «контактной поверхности» динамически отделена от солнечного ветра. Относительный вклад магнитного поля и различных компонент плазмы в баланс давлений на кометопазузе будет предметом дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- Галеев и др.* (Galeev A. A., Gravens T. E., Gombosi T. I.). *Astrophys J.*, 1985, v. 289, p. 807.
- Грингауз и др.* (Gringauz K. I., Apathy I., Denshikova L. I., Gombosi T. I., Keppler E., Klimenko I. N., Remizov A. P., Richter A. K., Skuridin G. A., Somogyi A., Szabo L., Szemerey I., Szendro S., Verigin M. I., Vladimirova G. A., Volkov G. I.). *Cometary Exploration III/Ed. Gombosi T. I. Budapest, 1982, p. 333.*
- Грингауз и др.* (Gringauz K. I., Klimenko I. N., Remizov A. P., Verigin M. I., Vladimirova G. A., Apathy I., Szego K., Szemerey I., Szendro S., Tatrai Iyay M., Keppler E., Richter A.). *Field and Wave-Experiments on Cometary Mission/Ed. Schwingsenschuh K. and Riedler W. Graz, 1986, p. 157, 171.*
- Ип и Аксфорд* (Ip W. H., Axford W. I.). *Comets/Ed. Wilkening L. L. (University of Arizona Press. Tucson), 1982, p. 588.*
- Мендис и др.* (Mendis D. A., Houpis H. L. F. and Marconi M. L.). *Fundamentals of Cosmic Physics, 1985, v. 10, p. 1—380.*
- Ридлер В., Швайнгеншу К., Ерошенко Е. Г., Стяжкин В. А. и Рассел К. П.* Письма в Астрон. журн., 1986, т. 12, № 8.
- Сагдеев и др.* (Sagdeev R. Z., Shapiro V. D., Shevchenko V. I., Szego K.). *Preprint KFKI-85-100, Budapest, Hungary, 1985.*
- Сагдеев и др.* (Sagdeev R. Z., Shapiro V. D., Shevchenko V. I., Szego K.). *Geophys. Res. Letters, 1986, v. 13, № 1, p. 85.*

Ин-т космических исследований
АН СССР, Москва

Поступила в редакцию
22 апреля 1986 г.

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

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