

УДК 523.72

*К. Кечкемети, Т. Кравенс, В. В. Афонин, А. Варга,
К. П. Венцель, М. И. Веригин, Лу Ган, Т. Гомбоши,
К. И. Грингауз, Е. Г. Ерошенко, Э. Кенплер,
И. Н. Клименко, Р. Марсден, А. Нэги, А. П. Ремизов,
В. Ридлер, А. Рихтер, К. Сеге, М. Татральяи,
К. Швингеншу, А. Шомоди, Г. Эрдеш*

ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ КОМЕТНЫХ ИОНОВ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ ПЕРЕД УДАРНОЙ ВОЛНОЙ КОМЕТЫ ГАЛЛЕЯ

В окрестности кометы Галлея из кометного нейтрального газа посредством фотоионизации, ударной ионизации электронами и перезарядки с протонами солнечного ветра непрерывно образуются тяжелые ионы, такие, как O^+ , OH^+ , H_2O^+ и т. п. (см., например, [1]). Эти ионы образуются почти покоящимися в системе координат, связанной с кометой, и сначала ускоряются электрическим полем $E = -1/c[V, \mathbf{V}]$ солнечного ветра, двигаясь по циклоидальным траекториям в направлении $[E, \mathbf{V}]$ (см., например, [2, 3]). Поэтому функция распределения кометных ионов первоначально образует кольцо в пространстве скоростей, движущееся параллельно магнитному полю. Этот пучок ионов очень неустойчив и генерирует альвеновские волны, приводящие на протяжении нескольких гиропериодов к питч-угловому рассеянию кометных ионов и к их почти полной изотропизации в системе координат, связанной с солнечным ветром [4, 5]. Рассеяние ионов на флуктуациях магнитного поля может также привести к их стохастическому ускорению (ускорение Ферми второго рода) [6, 7].

Измерение энергичных частиц в окрестности кометы Галлея проводилось на космических аппаратах «Вега-1» [8, 9] и Джотто [10, 11]. Начиная с $\approx 10^7$ км от ядра кометные ионы наблюдались в диапазонах энергий $96 \div 153$ кэВ («Вега-1») и $78 \div 270$ кэВ (Джотто [12]), т. е. с энергиями, намного превышающими их энергии после первоначального питч-углового рассеяния (≈ 80 кэВ для ионов O^+ при скорости солнечного ветра 500 км/с). Аналогичные измерения были проведены ранее у кометы Джакобини — Циннера на космическом аппарате ICE [13, 14].

В этой статье будут подробно рассмотрены результаты измерений потоков энергичных кометных ионов при помощи прибора «Тюнде-М» на космическом аппарате «Вега-1» до околокометной ударной волны и показано, что для того, чтобы ионы наблюдались «Тюнде-М», они должны быть не только рассеяны по питч-углам, но и ускорены. В свете этих наблюдений обсуждаются возможные механизмы ускорения. В статье также рассмотрена постановка эксперимента, приводятся кометоцентрические профили ионных потоков, измеренных «Тюнде-М», обсуждается их связь с вариациями магнитного поля, и построены функции распределения ионов в системе координат, движущейся с солнечным ветром.

Постановка эксперимента. Проект «Вега» в целом и траектории космических аппаратов описаны в работе [15]. В окрестности кометы траектория КА «Вега-1» проходила приблизительно под углом 111° к оси

Солнце — комета, образуя угол $4,6^\circ$ с плоскостью эклиптики. Телескоп энергичных частиц «Тюнде-М» был ориентирован в плоскости эклиптики перпендикулярно этой оси и регистрировал частицы, приходящие из направления приблизительно противоположного направлению движения космического аппарата. Поле зрения телескопа представляло собой конус с углом раствора $\pm 25^\circ$ (рис. 1), геометрический фактор — $0,25 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$. Поток электронов и потоки ионов с энергиями в несколько МэВ также измерялись прибором, но в настоящей статье эти измерения обсуждаться не будут.

Прибор «Тюнде-М» проводил измерения спектров ионных потоков в диапазонах энергий $40 \div 490 \text{ кэВ}$ с шагом 10 кэВ и $490 \div 630 \text{ кэВ}$ с шагом 20 кэВ (номинальные значения). Эти энергии относятся к энергии выде-

н, А. Варга,
Т. Голбоши,
Женлер,
И. П. Ремизов,
Тральяи,
Рдеи

ИОННЫЕ ПОТОКИ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

...ального газа посред-
...ми и перезарядки с
...тяжелые ионы, та-
...). Эти ионы образу-
...вязанной с кометой.
... $V/c [V, V]$ солнечного
...направлении $[E, V]$
...ния кометных ионов
...ростей, движущееся
...чень неустойчив и ге-
...нжении нескольких
...ионов и к их почти
...ой с солнечным вет-
...ого поля может так-
...ение Ферми второго

...еты Галлея проводи-
...котто [10, 11]. Начи-
...диапазонах энергий
...), т. е. с энергиями,
...льного питч-углового
...ти солнечного ветра
...более у кометы Джа-
...14].

...статы измерений по-
...бора «Тюнде-М» на
...арной волны и пока-
...1», они должны быть
...В свете этих наблю-
...ния. В статье также
...кометоцентрические
...обсуждается их связь
...ции распределения
...м ветром.

...м и траектории кос-
...ности кометы траек-
...д углом 111° к оси

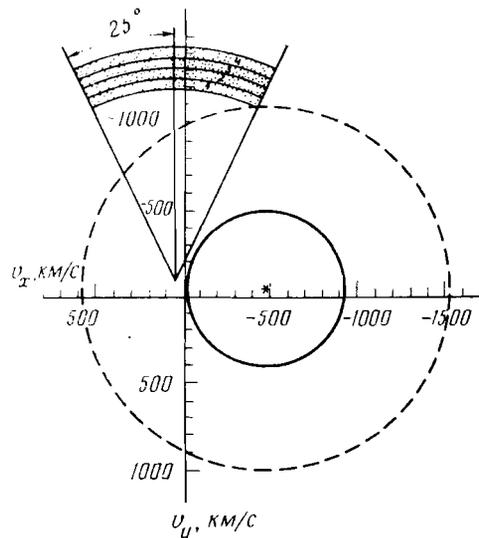


Рис. 1. Поле зрения телескопа «Тюнде-М» и область пространства скоростей V_x, V_y , из которой регистрируются ионы этим прибором в энергетических каналах 1÷4
Звездочка — положение вектора скорости солнечного ветра

ляемой в полупроводниковом детекторе в ионизирующих столкновениях. Соответствующие энергии падающих частиц для протонов несколько выше, чем номинальные и для тяжелых ионов существенно выше номинальных энергий. На различие между действительной энергией частицы и измеренной энергией — дефект амплитуды импульса (ДА) было впервые указано в работе [16]. ДА является серьезной проблемой как для протонов малых энергий, так и для тяжелых ионов.

Таблица 1

Энергетические каналы «Тюнде-М»

№ канала	Номинальная энергия, кэВ	Оцененная энергия ионов O^+ , кэВ
1	43÷50	96÷106
2	50÷64	106÷126
3	64÷74	126÷138
4	74÷85	138÷153

В околокометном пространстве на расстояниях $\geq 10^5$ км от ядра наиболее распространенными являются ионы группы воды O^+ и OH^+ , с меньшей вероятностью можно встретить более тяжелые ионы CO^+ , CO_2^+ , S^+ и др. [17, 18]. Для того чтобы определить действительную энергию попадающих в «Тюнде-М» ионов, была использована следующая процедура. Сначала по таблицам [19] определялась потеря энергии и покрывающем детектор слое Al толщиной 15 мкг/см^2 . После этого ДА в кремниевом детекторе определялся в соответствии с работой [20] для ионов O^+ . С учетом обоих эффектов в табл. 1 приведены номинальные и действительные энергии ионов O^+ для четырех нижних энергетических каналов прибора «Тюнде-М». Скорость этих ионов (в системе координат, связанной со спутником) лежит в диапазоне от 955 км/с для первого канала до 1195 км/с — для четвертого. Погрешность описанной выше процедуры мы оцениваем в $\approx 5\%$ [20]. Аналогичная процедура использовалась в работе [13] для того, чтобы оценить энергии тяжелых ионов в окрестности кометы Джакобини — Циннера по данным прибора EPAS на космическом аппарате ICE.

На рис. 1 в пространстве скоростей относительно ядра кометы (ось V_x направлена к Солнцу, ось V_y лежит в плоскости космического аппарата) показана область, из которой ионы группы воды могут быть зарегистрированы прибором «Тюнде-М» в четырех нижних энергетических каналах 1–4. Вершина конуса поля зрения телескопа совпадает с вектором скорости космического аппарата. Звездочкой на этом рисунке отмечено положение вектора скорости солнечного ветра $\approx 480 \text{ км/с}$.

После пичч-углового рассеяния кометные ионы распределяются по сферической оболочке с центром, совпадающим со скоростью солнечного ветра. Пересечение этой оболочки с плоскостью V_x, V_y показано на рис. 1 сплошной окружностью. Как можно видеть из приведенных на этом рисунке данных, для того, чтобы быть зарегистрированными «Тюнде-М», кометные ионы должны быть ускорены до скорости $\geq 1070 \text{ км/с}$ в системе координат, связанной с солнечным ветром — СВСК (пунктирная окружность на рисунке). Энергия этих ионов в СВСК составляет 101 кэВ , поэтому надо предположить существование некоторых механизмов ускорения кометных ионов от их первоначальной энергии $\approx 20 \text{ кэВ}$ до наблюдаемых энергий $\geq 100 \text{ кэВ}$ в СВСК.

Экспериментальные данные. Зависимость от кометоцентрического расстояния. На рис. 2 в зависимости от кометоцентрического расстояния показаны скорости счета телескопа «Тюнде-М» в четырех нижних энергетических каналах 1–4. Присутствие кометных ионов по данным этого прибора можно было наблюдать, начиная с $r \approx 10^7$ км от ядра. Ионные потоки (скорости счета) в целом возрастали с уменьшением r [8]. Этот рост стал особенно крутым в окрестности фронта околокометной ударной волны. Общий рост ионных потоков сопровождался относительно кратковременными периодическими увеличениями их интенсивности. Обсудим сначала причины общего роста ионных потоков.

Следует ожидать, что концентрация тяжелых кометных ионов в потоке солнечного ветра будет пропорциональна произведению скорости образования их на интегральную концентрацию тяжелых нейтральных молекул (H_2O , OH , O , CO и др.) вдоль линии тока солнечного ветра вверх по потоку от точки, где проводятся измерения. Тогда для потока ионов можно записать

$$\rho V = \rho_0 V_0 + \int M n_n / \tau_i dS, \quad (1)$$

где V — скорость солнечного ветра, ρ — плотность, M — масса захваченных им ионов, n_n — концентрация нейтралов, зависящая от кометоцентрического

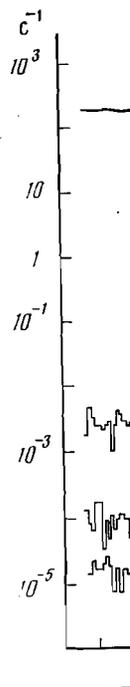


Рис. 2. Зависимость скорости счета телескопа «Тюнде-М» от кометоцентрического расстояния.

кого расстояния от ядра кометы относительно ядра кометы.

Для того чтобы быть зарегистрированными «Тюнде-М», кометные ионы должны быть ускорены до скорости $\geq 1070 \text{ км/с}$ в системе координат, связанной с солнечным ветром — СВСК (пунктирная окружность на рисунке). Энергия этих ионов в СВСК составляет 101 кэВ , поэтому надо предположить существование некоторых механизмов ускорения кометных ионов от их первоначальной энергии $\approx 20 \text{ кэВ}$ до наблюдаемых энергий $\geq 100 \text{ кэВ}$ в СВСК.

Экспериментальные данные. Зависимость от кометоцентрического расстояния. На рис. 2 в зависимости от кометоцентрического расстояния показаны скорости счета телескопа «Тюнде-М» в четырех нижних энергетических каналах 1–4. Присутствие кометных ионов по данным этого прибора можно было наблюдать, начиная с $r \approx 10^7$ км от ядра. Ионные потоки (скорости счета) в целом возрастали с уменьшением r [8]. Этот рост стал особенно крутым в окрестности фронта околокометной ударной волны. Общий рост ионных потоков сопровождался относительно кратковременными периодическими увеличениями их интенсивности. Обсудим сначала причины общего роста ионных потоков.

Следует ожидать, что концентрация тяжелых кометных ионов в потоке солнечного ветра будет пропорциональна произведению скорости образования их на интегральную концентрацию тяжелых нейтральных молекул (H_2O , OH , O , CO и др.) вдоль линии тока солнечного ветра вверх по потоку от точки, где проводятся измерения. Тогда для потока ионов можно записать

где V — скорость солнечного ветра, ρ — плотность, M — масса захваченных им ионов, n_n — концентрация нейтралов, зависящая от кометоцентрического

10^5 км от ядра наиболее O^+ и OH^+ , с меньшей CO^+ , CO_2^+ , S^+ и др. энергию попадающую процедуру. Сна и покрывающем де в кремниевом детек и ионов O^+ . С учетом действительные энергических каналов прибора т, связанной со спутанала до 1195 км/с — едурмы оцениваем ь в работе [13] для тности кометы Джа- космическом аппара-

ядра кометы (ось V_x мического аппарата) туть быть зарегистри ргетических каналах ает с вектором ско- сунке отмечено по-

пределяются по сфе- скоростью солнечного ро, показано на рис. 1 денных на этом ри- анными «Тюнде-М», >1070 км/с в систе- (пунктирная окруж- авляет 101 кэВ, по- механизмов ускоре- 20 кэВ до наблюдае-

кометоцентри- от кометоцентри- а «Тюнде-М» в че- вие кометных ионов ачина с $r \approx 10^7$ км озрастали с умень- стности $r \approx 3 \cdot 10^6$ км, лись в окрестности онных потоков со- ическими увеличе- общего роста ион-

ных ионов в пото- ению скорости об- х нейтральных мо- ечного ветра вверх для потока ионов

(1)

масса захваченных кометоцентричес-

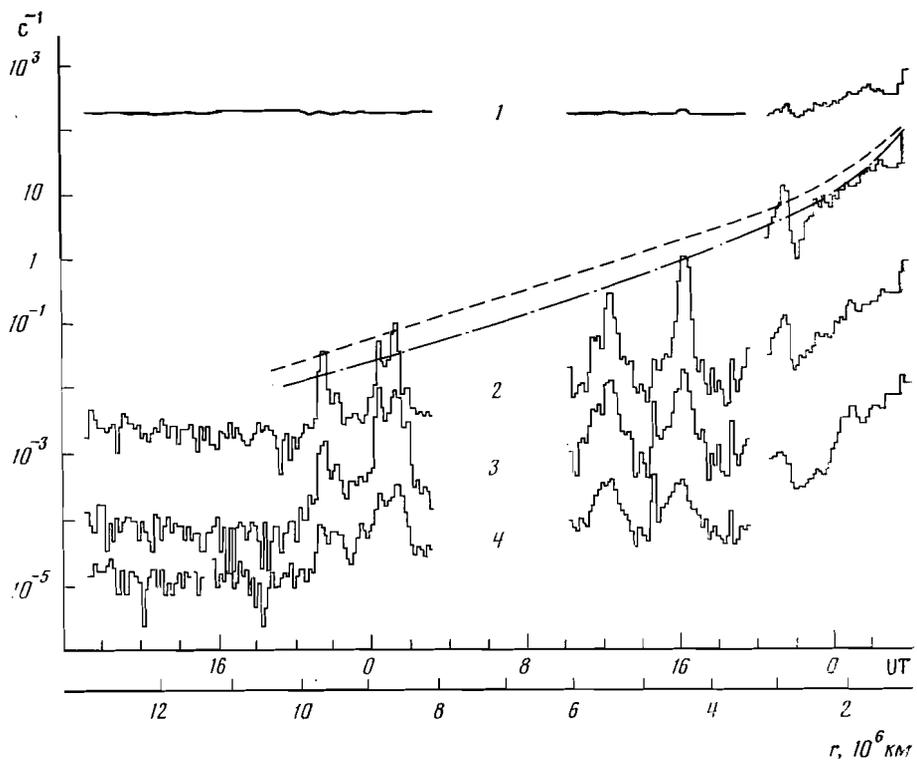


Рис. 2. Зависимость от кометоцентрического расстояния скорости счета телескопа «Тюнде-М» в энергетических каналах $j=1 \div 4$ (умноженные на фактор 10^{4-j})
Фоновая скорость счета в канале 1 $\approx 1,8 \cdot 10^2$ с $^{-1}$

кого расстояния, ρ_0 и V_0 — плотность и скорость невозмущенного солнечного ветра соответственно и τ_i — характерное время жизни нейтралов относительно ионизации.

Для простой r^{-2} -зависимости $n_n(r)$ относительный безразмерный поток ионов $\hat{\rho}\hat{V}-1 = \rho V / \rho_0 V_0 - 1$ (пропорциональный концентрации кометных ионов) вдоль оси Солнце — комета изменяется как $\sim r^{-1}$ [21]. С учетом τ_i , когда $n_n = Q / (4\pi r^2 V_n) \exp(-r/\lambda)$, этот поток можно записать в следующем виде [3]:

$$\hat{\rho}\hat{V}-1 = C(\lambda/r \exp(r/\lambda) - E_1(r/\lambda)), \quad (2)$$

где $V_n \approx 1$ км/с [22] — скорость нейтрального газа, $\lambda = V_n \tau_i = 2 \cdot 10^6$ км [18] — характерный масштаб его ионизации, Q — скорость производства газа кометой, C — константа и E_1 — интегральная показательная функция.

Относительные изменения с кометоцентрическим расстоянием концентрации нейтрального газа и безразмерного потока ионов (2) показаны на рис. 2 соответственно штрихпунктирной и штриховой линиями. Общий ход потока кометных ионов для канала 2 (106 ÷ 126 кэВ согласно табл. 1) сходен с этими зависимостями; изменение потока в более энергичных каналах менее крутое. Кометоцентрические изменения потоков ионов в окрестности кометы Джакобини — Циннера по данным прибора на космическом аппарате ICE [23] аналогичны наблюдавшимся при помощи прибора «Тюнде-М», по крайней мере в среднем.

Корреляции с направлением магнитного поля. Хотя общий ход потока кометных ионов с изменением r может быть частично объяснен радиальной зависимостью скорости их образования, проинтегрированной вдоль линии тока солнечного ветра (в свою очередь тесно свя-

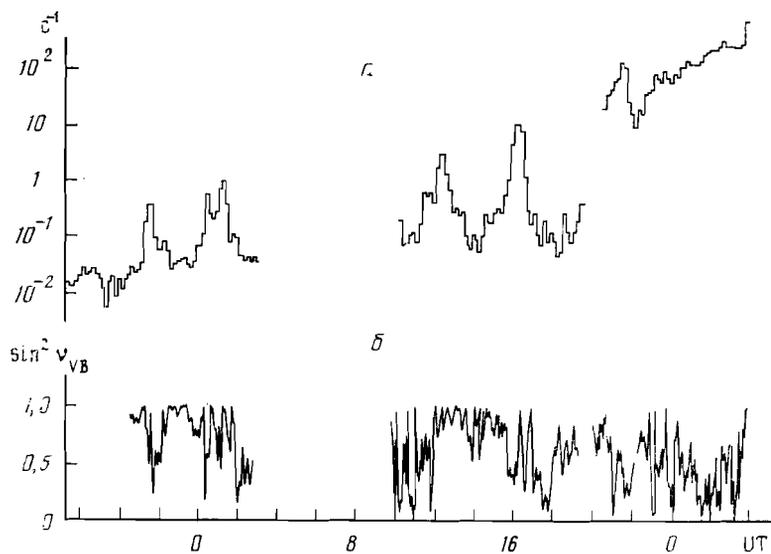


Рис. 3. Зависимость от времени скорости счета кометных ионов в энергетическом канале 2 (а) и величины $\sin^2 \theta_{VB}$ (б), где θ_{VB} — угол между магнитным полем и скоростью солнечного ветра

занной с радиальной зависимостью n_n), это не объясняет большой изменчивости таких потоков. Потоки энергичных ионов около кометы Джакобини — Циннера также испытывали большие флуктуации [13], положительно коррелирующие с максимальной энергией дрейфа этих ионов:

$$E_{\max} = 2 \cdot MV^2 \sin^2 \theta_{VB}, \quad (3)$$

где θ_{VB} — угол между направлениями скорости солнечного ветра и магнитного поля. Большие потоки там измерялись, когда E_{\max} превышала 65 кэВ — порог энергии прибора EPAS для ионов O^+ , при меньших E_{\max} потоки энергичных ионов значительно уменьшались.

Для «Тюнде-М» можно ожидать другую картину корреляции, поскольку этот прибор был ориентирован перпендикулярно оси Солнце — комета (рис. 1), а EPAS регистрировал ионы, двигавшиеся в основном в анти-солнечном направлении. Ионы, наблюдавшиеся «Тюнде-М», не могут быть связаны с $[E, V]$ дрейфом, поскольку, как было показано выше, они предварительно должны быть рассеяны по питч-углам и ускорены.

На рис. 3 одновременно показаны скорости счета кометных ионов прибором «Тюнде-М» во втором энергетическом канале (а) и величина $\sin^2 \theta_{VB}$ (б). Скорость солнечного ветра в период времени, приведенный на рисунке, лежала в пределах $550 \div 420$ км/с, так что $\sin^2 \theta_{VB}$ практически пропорциональна E_{\max} .

Два самых внешних возрастания потоков энергичных ионов — в ≈ 21 UT 4.III и в ≈ 1 UT 5.III антикоррелируют с $\sin^2 \theta_{VB}$, относительно больше ионов регистрировалось, когда направление магнитного поля приближалось к направлению солнечного ветра (рис. 3). Тенденция к антикорреляции с $\sin^2 \theta_{VB}$ имеется и для последующих возрастаний потоков ионов, но там она слабее. Возможно, наблюдавшаяся антикорреляция связана с тем, что уровень турбулентности, рассеивающей вновь образовавшиеся ионы по питч-углам, должен повышаться с уменьшением θ_{VB} [4, 24]. В этом случае следует ожидать также и положительной корреляции потоков энергичных ионов с флуктуациями магнитного поля, однако это возможно только для возрастания потока ионов в ≈ 12 UT и для времени позже ≈ 23 UT 5.III [6].

Круп
гое возмож
выдается
фронта ок
ускорения
возрастани
энергичны
риацией н
потока от
метной уд
жет работа

На рис
магнитных
до фронта
ности $r \approx 4$
ве с учето
щийся со
компонент
«Веги-1» с
на основе
на рис. 4
«Веги-1»
когда кос
поля с фро

Могут
тельные в
и ≈ 21 UT
следующи

Если
фронта уд

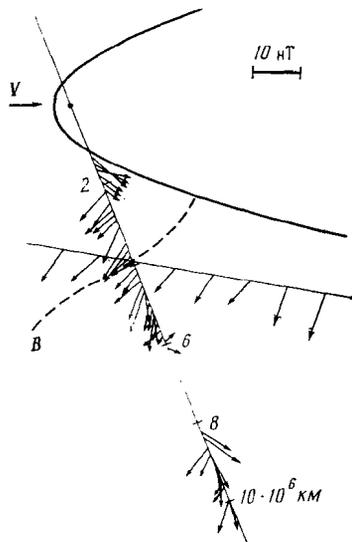


Рис. 4

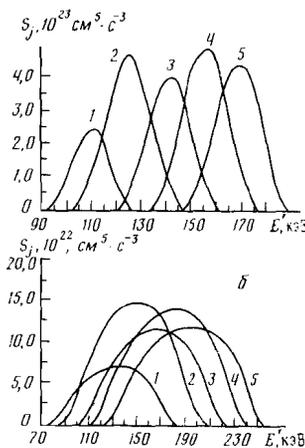


Рис. 5

Рис. 4. Проекция траекторий «Вега-1» на плоскость эклиптики. Векторы вдоль траектории — проекция на эту же плоскость результатов измерений магнитного поля, усредненных по ≈ 30 -мин интервалам времени.

Рис. 5. Функции преобразования $S_j(E')$ телескопа «Тюнде-М» в зависимости от энергии ионов E' в СВСК для энергетических каналов $j=1-5$ при скорости солнечного ветра $V=100$ (а) и $V=480$ км/с (б).

Крупномасштабная структура магнитного поля. Другое возможное объяснение возрастаний потоков энергичных ионов основывается на предположении, что эти ионы образовались в окрестности фронта околокометной ударной волны, где может работать механизм ускорения Ферми 1-го рода [25]. В таком случае место, где наблюдаются возрастания ионных потоков, должно быть связано с местом образования энергичных ионов силовой линией межпланетного магнитного поля. Вариацией на эту же тему является, что за наблюдавшиеся возрастания потока ответственны кометные ионы, ускорившиеся за фронтом околокометной ударной волны в турбулентном кометопите, где эффективно может работать механизм ускорения Ферми 2-го рода.

На рис. 4 в проекции на плоскость эклиптики приведены результаты магнитных измерений вдоль траектории «Вега-1» с 10 млн. км от ядра до фронта околокометной ударной волны (парабола на рис. 4). В окрестности $r \approx 4 \cdot 10^6$ км магнитные измерения также «развернуты» в пространстве с учетом вмерзженности магнитного поля в солнечный ветер, движущийся со скоростью ≈ 480 км/с. Перпендикулярный плоскости эклиптики компонент магнитного поля был мал на протяжении 2 сут до встречи «Веги-1» с кометой. Одна из возможных силовых линий, восстановленная на основе «развертки» магнитных измерений вдоль траектории, показана на рис. 4 штриховой линией. Можно видеть, что при приближении КА «Веги-1» к ядру кометы действительно существовали моменты времени, когда космический аппарат был связан по силовым линиям магнитного поля с фронтом ударной волны.

Могут ли убегающие от фронта энергичные ионы объяснить значительные возрастания ионных потоков, наблюдавшиеся 5.III в ≈ 12 , ≈ 18 и ≈ 21 UT ($r \approx (2+6) \cdot 10^6$ км, рис. 2)? Это возможно, но маловероятно по следующим причинам.

Если ионы, наблюдавшиеся во всплесках, действительно пришли от фронта ударной волны, то они должны бы регистрироваться на протяже-

нии всего периода с ≈ 12 по ≈ 24 UT 5.III, потому что вся область от $r \approx 6 \cdot 10^6$ до $\approx 2 \cdot 10^8$ км, по-видимому, была связана магнитными силовыми линиями с фронтом ударной волны (рис. 4). Однако интенсивные потоки ионов регистрировались только на протяжении части этого периода.

Околокометная ударная волна должна быть очень слабой на столь больших расстояниях от ядра вниз по потоку обтекающей плазмы [26] и не способна образовывать отражением столь энергичные ионы. В любом случае в этот период времени околокометная ударная волна, возможно, была квазипараллельной (но не тогда, когда «Вега-1» ее пересекала (рис. 4)) и, следовательно, турбулентной.

Флуктуации магнитного поля велики даже далеко вверх по потоку от фронта ударной волны [27] и, следовательно, механизм ускорения Ферми 2-го рода должен быть более важен, чем 1-го рода.

Еще менее вероятным представляется возможность, что возрастания потоков ионов на $\approx 10^7$ км от ядра также связаны с существованием фронта околокометной ударной волны.

Функция распределения кометных ионов в системе координат, связанной с солнечным ветром. Телескопы энергичных частиц, такие, как «Тюнде-М», измеряют потоки частиц в различных, заранее определенных энергетических каналах. Однако для сравнения с теоретическими расчетами необходимо знание функции распределения этих частиц $f(\mathbf{X}, \mathbf{V}, t)$ в системе координат, связанной с солнечным ветром (СВСК). Зная f и характеристики прибора, легко вычислить скорость счета телескопа в энергетическом канале j . Обратная процедура — определение f по измеренным C_j — не тривиальна и основывается на ряде предположений. Аналогичный подход использовался в работах [14, 27, 28] для определения f в окрестности кометы Джакобини — Циннера. Поскольку измерения при помощи прибора «Тюнде-М» проводились только в одном направлении, для их преобразования в СВСК использовались одновременные измерения скорости солнечного ветра прибором «Плазмаг-1».

При выполнении преобразований использовались следующие предположения: функция распределения ионов $f(E)$ изотропна в СВСК, по крайней мере в пределах поля зрения прибора; функция распределения ионов по скоростям максвелловская: $f(E) = f_0 \exp(-E/T)$, по крайней мере в относительно узком энергетическом диапазоне, где измерялись ионы.

Пусть $E' = mv'^2/2$ — энергия и v' — скорость иона O^+ в СВСК. Тогда, зная $f(E')$, скорость счета C_j , можно записать в следующем виде:

$$C_j = \int f(v') S_j(v') dv', \quad (4)$$

$$S_j(v') = v'^2 \iint_{\varphi, \vartheta} v K_j(v) A(\vartheta) \sin \vartheta' d\vartheta' d\varphi', \quad (5)$$

где $S_j(v')$ — функция преобразования для канала j ; v и ϑ — скорость и угол с осью прибора иона в системе координат, связанной с космическим аппаратом, определяемые посредством очевидного преобразования с v' , ϑ' , φ' и V . Эффективная площадь прибора $A(\vartheta)$ медленно изменяется от $50,3$ мм² при $\vartheta=0^\circ$ до 39 мм² при $\vartheta=25^\circ$, а затем быстро спадает к нулю при $\vartheta \approx 32^\circ$. Ступенчатая функция $K_j(\vartheta)$ равна нулю всюду, кроме энергетического окна j -го канала, где она равна единице.

На рис. 5 приведены функции преобразования $S_j(E')$ для первых энергетических каналов 1÷5, рассчитанные по выражению (5) при скоростях солнечного ветра $V=100$ км/с (а) и $V=480$ км/с (б). В последнем случае из-за геометрического эффекта эффективная ширина энергетических каналов в СВСК становится довольно большой.

Наибольший вклад в C_j дает менее энергичная часть функции $S_j(E')$, так как $f(E')$ очень быстро уменьшается с ростом энергии. Средняя энер-

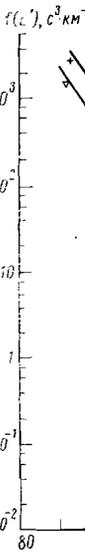


Рис. 6. Вы-

Наклонные
I - 21.28 U
= 11.7 км/с

Рис. 7. Изм-

гия ионов
щем виде

В табл. 2
= 480 км/с
Исход
деления f
разумное
нию (4)

среднеква

чения T^*
= $C_j/C_{0j}(T$

Средняя

№ канала
1
2
3
4

что вся область от
тнитными силовыми
интенсивные потоки
того периода.
нь слабой на столь
ющей плазмы [26]
ые ионы. В любом
я волна, возможно,
-1» ее пересекала

вверх по потоку
еханизм ускорения
да.

ть, что возрастания
ществованием фрон-

е координат, свя-
частиц, такие, как
ранее определенных
ретическими расче-
х частиц $f(X, V, t)$
(СВСК). Зная f и
счета телескопа в
мнение f по измерен-
положений. Анало-
для определения f
ьку измерения при
дном направлении,
ременные измерения

следующие предпо-
а в СВСК, по край-
дия распределения
 E/T , по крайней
не, где измерялись

O^+ в СВСК. Тогда,
дем виде:

$$(4)$$

$$(5)$$

ψ и ϑ — скорость и
ной с космическим
образования с v' ,
енно изменяется от
ро спадает к нулю
всюду, кроме энер-

) для первых энер-
(5) при скоростях
В последнем случае
энергетических ка-

ть функции $S_j(E')$,
гии. Средняя энер-

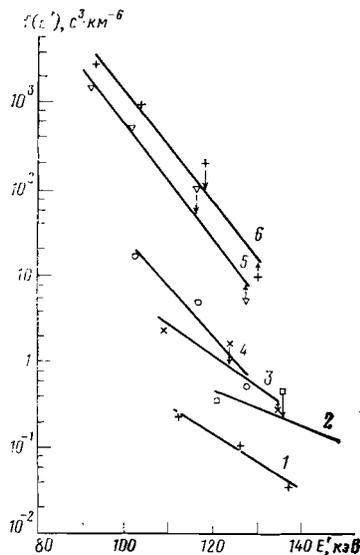


Рис. 6

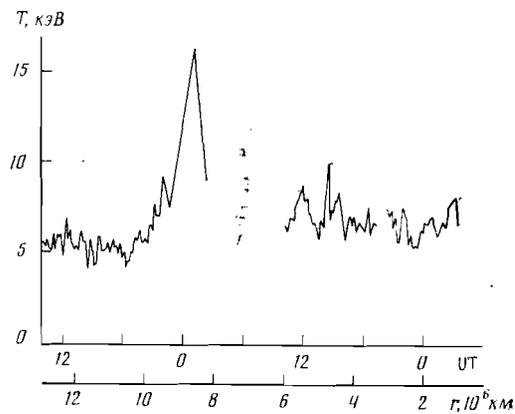


Рис. 7

Рис. 6. Вычисленные по результатам измерений функции распределения ионов $f(E')$ в СВСК

Наклонные прямые — максвелловская аппроксимация спектров, измеренных 4.П.И: 1 — 21.28 UT ($T=13,3$ кэВ); 2 — 5.И.И в 01.18 UT ($T=21,1$ кэВ); 3 — 12.28 UT ($T=11,7$ кэВ); 4 — 16.08 UT ($T=7,3$ кэВ); 5 — 6.П.И в 02.38 UT ($T=6,6$ кэВ); 6 — 03.48 UT ($T=6,9$ кэВ)

Рис. 7. Изменение «температуры» T энергичных ионов в СВСК в зависимости от ко-метоцентрического расстояния r

гия ионов, регистрируемых в канале j , может быть записана в следующем виде:

$$E_j' = \int E' \exp(-E'/T) S_j(v') dv' / \int \exp(-E'/T) S_j(v') dv'. \quad (6)$$

В табл. 2 приведены значения E_j' для некоторых величин T при $V=480$ км/с.

Исходя из измеренных скоростей счета C_j , значения функции распределения f_j при E_j' в СВСК можно определить следующим образом: берем разумное начальное значение T ; вычисляем значения $C_{0j}(T)$ по выражению (4) при $f_0=1$; изменяя T , находим такие значения T^* и f_0^* , чтобы среднее квадратичное отклонение $\sum_j (C_j - f_0^* C_{0j}(T^*)) = \min$; для этого значения T^* находим E_j' по формуле (6); для каждого j вычисляем $f_j = C_j / C_{0j}(T^*)$.

Таблица 2

Средняя энергия в СВСК (E_j' , кэВ) при скорости солнечного ветра 480 км/с для прибора «Тюнде-М»

№ канала	Температура, кэВ					
	5	10	15	20	25	30
1	88,8	97,0	103,3	108,0	111,5	114,2
2	98,1	107,5	114,5	119,7	123,7	126,7
3	112,8	121,6	128,6	134,0	138,1	141,3
4	123,6	132,8	139,9	145,6	150,0	153,5

Эта процедура легко может быть реализована и для другого, не максвелловского вида функции распределения.

На рис. 6 в зависимости от E_j' приведены значения функции распределения ионов f_j в СВСК по данным КА «Вега-1» для шести моментов времени в области до фронта околокометной ударной волны и температуры, оцененные для этих моментов времени. Зависимость температуры, характеризующей функцию распределения кометных ионов, от кометоцентрического расстояния по данным прибора «Тюнде-М» приведена на рис. 7.

Рассмотрим теперь основные (известные) погрешности в описанном выше способе определения функции распределения.

Во всех энергетических каналах была сделана поправка на фон. Это приводит к значительной неопределенности в S_1 . Для других каналов относительная величина фонового сигнала довольно мала в возрастаниях ионного потока. Однако на больших расстояниях от ядра, особенно в периоды времени между возрастаниями, фон все еще остается проблемой.

Определение ширины энергетического канала (посредством предположенной калибровки, с учетом которой нормировались скорости счета), также имеет источник неопределенности, связанный с изменением параметров электроники в полете. Это, вероятно, происходило для канала 3, который, возможно, шире, чем предполагается, как можно видеть на некоторых спектрах (рис. 6).

Наибольший источник погрешности — это дефект амплитуды импульса полупроводникового детектора, т. е. значительная неопределенность в определении действительной энергии тяжелого иона по величине энергии, выделенной в кремниевом детекторе. Как было описано выше, мы использовали результаты работы [20], где эта неопределенность оценивалась как 3%-ная. Из-за отличия наших детекторов мы можем оценить ее как 5%-ную (и почти наверняка меньше, чем 10%-ную). Это соответствует ошибке 5 кэВ в определении энергии иона O^+ при его энергии 100 кэВ, что в свою очередь приводит к оценке крутой функции распределения кометных ионов с точностью до фактора ≈ 2 .

Определенно имеется источник погрешности и в описанной выше процедуре оценки $f(E')$ в СВСК. Это, в частности, неопределенность в выборе функциональной зависимости для $f(E')$. Максвелловская функция использовалась только для удобства, хотя она и вполне разумно описывает измерения. Можно использовать и другие функциональные зависимости, например степенную, для описания быстрого спада $f(E')$ в окрестности ≈ 100 кэВ. В этом случае получаются несколько другие значения E_j' и f_j ; различие в определении $f(E')$ при фиксированной энергии в случае использования максвелловской или степенной функции составляет $\approx 20\%$ при $T \approx 5$ кэВ и $\approx 40\%$ при $T \approx 10$ кэВ.

Изменение $f(E')$ в околокометном пространстве при приближении «Вега-1» к ядру имеет несколько проявлений. Это, во-первых, тенденция к общему росту f с уменьшением r (см. рис. 6 его и обсуждение в терминах скорости счета). Во-вторых, крутизна функции распределения значительно изменяется с кометоцентрическим расстоянием: характерные значения T лежат в пределах $6 \div 8$ кэВ, за исключением области между 8 и 10 млн. км от ядра, где $T \approx 10 \div 20$ кэВ (рис. 7). При $r \lesssim 2,4 \cdot 10^8$ км потоки энергичных ионов быстро возрастают с уменьшением r , тогда как температура увеличивается незначительно. Возможная интерпретация наблюдавшихся спектров будет рассмотрена ниже.

Обсуждение

Измерения энергичных частиц в окрестности кометы Галлея при помощи прибора «Тюнде-М» на космическом аппарате «Вега-1» обнаружили присутствие кометных ионов на расстояниях $r \lesssim 10^7$ км (рис. 2), далеко от околокометной ударной волны. Общий рост потоков ионов при приближении КА «Вега-1» к ядру приблизительно соответствовал ожидаемому рос-

ту при нагружении кометными потоками потока солнечного ветра, однако сопровождался периодическими резкими увеличениями интенсивности потока.

Исследование возможной корреляции потоков энергичных ионов и $\sin^2 \theta_{VB}$ (рис. 3) не дало свидетельств в пользу зависимости величины от E_{\max} (3) в отличие от измерений потоков энергичных ионов при помощи прибора EPAS на космическом аппарате ICE [13]. Возрастания ионных потоков при $r \lesssim 3 \cdot 10^6$ км не коррелировали с $\sin^2 \theta_{VB}$, тогда как два самых внешних пика ионных потоков даже антикоррелировали с $\sin^2 \theta_{VB}$. Возможным объяснением этой антикорреляции является то обстоятельство, что когда угол мал, инкремент нарастания флуктуаций магнитного поля больше и эти флуктуации могут ускорять ионы посредством механизма ускорения Ферми 2-го рода [7]. К сожалению, «Тюнде-М» не дал информации об угловом распределении энергичных ионов; по данным прибора EPONA на КА Джотто очевидно, что их изотропизация не полная [12].

Энергетические спектры ионов в СВСК определялись аппроксимацией максвелловским распределением ионных потоков при энергиях $100 \div 150$ кэВ. Эти данные свидетельствуют, что температуры энергичных ионов в диапазоне кометоцентрических расстояний $(1 \div 2) \cdot 10^6$ км сходны с температурами, определенными в окрестности кометы Джакобини — Циннера [27], хотя значения $f(E')$ у кометы Галлея на порядок выше. В действительности мы не предполагали, что распределение максвелловское, а только считали, что оно быстро спадает в диапазоне энергий $E' \approx 100$ кэВ. Так как при анализе использовалось только четыре спектральные точки в относительно узком энергетическом диапазоне, мы не можем экстраполировать энергетические спектры (рис. 6) на существенно большие или меньшие энергии. Другие функциональные зависимости $f(E')$ подходят к нашим данным не хуже.

Обсудим теперь сам факт обнаружения энергичных кометных ионов на многих миллионах километров от ядра. Удивительной особенностью ионных потоков, измеренных «Тюнде-М», являются их квазипериодические возрастания с периодом ≈ 4 ч. Кроме приведенных на рис. 2 в ≈ 7 UT 5.III был зарегистрирован еще один узкий максимум ионных потоков в энергетических каналах 3 и 4; это возрастание не показано на рис. 2, так как в то время прибор работал в другом режиме работы с большим уровнем фона. Сходная периодичность (≈ 7 ч) видна в результатах измерения кометных протонов прибором IMS на КА Джотто на расстояниях в несколько миллионов километров от ядра кометы Галлея [29].

Наблюдавшаяся квазипериодичность возрастаний ионных потоков на расстояниях $(3 \div 10) \cdot 10^6$ км от ядра, по-видимому, определяется периодичностью пространственного распределения нейтральных атомов, связанной с вращением ядра с периодом ≈ 54 ч [15]. В этом случае нейтралы будут распределены по расширяющимся оболочкам с пространственным периодом, равным произведению скорости их расширения на период вращения ядра. В окрестности точки пересечения космическим аппаратом этих оболочек и могут наблюдаться возрастания потоков энергичных ионов.

Описанная выше модель периодического распределения нейтральных атомов налагает серьезные ограничения на скорость их расширения — ее величина должна быть ≥ 6 км/с, разброс скоростей нейтралов также должен быть незначительным, чтобы не привести к размытию расширяющихся оболочек. Это очень большая скорость для атомов O, она намного превышает скорости расширения нейтрального газа 0,9 км/с, измеренные на «Джотто» во внутренней коме [22], и сравнима с характерной скоростью расширения водородной комы. Однако во внутренней коме могут протекать процессы, приводящие к образованию быстрых атомов кислорода, например при диссоциативной рекомбинации ионов CO^+ могут образовываться атомы C^+ со скоростями ≈ 4 км/с. Протонам для того, чтобы реги-

стрироваться «Тюнде-М» надо увеличить свою энергию в СВСК в ≈ 100 раз, а ионам O^+ только в ≈ 5 раз, однако стохастическое ускорение Ферми в ≈ 16 раз более эффективно для протонов, чем для тяжелых ионов O^+ .

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mendis D. A., Houppis H. L., Marconi M. L.* The Physics of Comets // Fund. Cosmic Phys. 1985. V. 10. P. 1–380.
2. *Cravens T. E., Kozyra J. U., Nagy A. F. et al.* Electron Impact Ionization in the Vicinity of Comets // J. Geophys. Res. 1987. V. 92.
3. *Galeev A. A., Cravens T. E., Gombosi T. I.* Solar Wind Stagnation near Comets // Astrophys J. 1985. V. 289. P. 807–819.
4. *Sagdeev R. Z., Shapiro V. D., Shevchenko V. I., Szegö K.* MHD Turbulence in the Solar Wind-Comet Interaction Region // Geophys. Res. Lett. 1986. V. 13. P. 85–88.
5. *Gary S. P., Hinate S., Madland C. D., Winske D.* The Development of Shell-like Distribution from Newborn Cometary Ions // Geophys. Res. Lett. 1986. V. 13. P. 1364.
6. *Gribov B. E., Kecskeméty K., Sagdeev R. Z. et al.* Stochastic Fermi Acceleration of Ions in the Preshock Region of Halley's Comet // Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986. V. 1. P. 271–275.
7. *Ip W.-H., Axford W. I.* The Acceleration of Particles in the Vicinity of Comets // Planet. and Space Sci. 1986. V. 34. P. 1061–1065.
8. *Шомоди А., Грингауз К. И., Сегё К. и др.* Первые прямые измерения энергичных частиц вблизи кометы Галлея // Письма в «Астрон. журн.». 1986. Т. 12. С. 659.
9. *Kecskeméty K., Cravens T. E., Afonin V. V. et al.* Energetic Pick-up Ions Outside the Comet Halley Bow Shock // Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986. V. 1. P. 109–114.
10. *Mc-Kenna-Lawlor S., Kirsh E., O'Sullivan D. et al.* Energetic Ions in the Environment of Comet Halley // Nature. 1986. V. 321. P. 347–349.
11. *Daly P. W., Kirsh E., Mc-Kenna-Lawlor S. et al.* Comparison of Energetic Ion Measurements at Comets Giacobini – Zinner and Halley // Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986. V. 3. P. 211–220.
12. *Mc-Kenna-Lawlor S., Kirsh E., Thomson A., O'Sullivan D.* Energetic Particles in the Comet Halley Environment // Adv. Space Res. 1986. V. 5. № 12. P. 211–220.
13. *Hynds R. J., Cowley S. W. H., Sanderson T. R. et al.* Observations of Energetic Ions from Comet Giacobini – Zinner // Science. 1986. V. 232. P. 361–365.
14. *Ipavich F. M., Galvin A. B., Gloeckler G. et al.* Comet Giacobini – Zinner: In-situ Observations of Energetic Heavy Ions // Science. 1986. V. 232. P. 366–369.
15. *Саздеев Р. З., Аванесов Г. А., Крювелье П. и др.* Телевизионный эксперимент по наблюдению кометы Галлея с КА «Вега» // Письма в «Астрон. журн.». 1986. Т. 12. С. 593–604.
16. *Keppler E.* A Note on the Complications of the Compton – Getting Effect for Low Energy Charged Particle Measurements in Interplanetary Space // Geophys. Res. Lett. 1977. V. 5. P. 69–72.
17. *Balsiger D. A., Altwegg K., Bühler F. et al.* Ion Comparison and Dynamics at Comet Halley // Nature. 1986. V. 321. P. 330–334.
18. *Грингауз К. И., Гомбоши Т., Ремизов А. П. 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.
19. *Northcliffe L. C., Schilling R. F.* // Nuclear Data Tables. 1970. V. A7. P. 1–233.
20. *Ipavich F. M., Lundgren R. A., Lambird B. A., Gloeckler G.* Measurements of Pulse – height Defect in Au – Si Detectors for H, He, C, N, O, Ne, Ar, Kr from ≈ 2 to 400 keV/nucleon // Nuclear Instr. and Methods. 1978. V. 154. P. 291–294.
21. *Wallis M. K., Ong R. S. B.* Strongly Cooled Ionizing Plasma Flows with Application to Beams // Planet. Space Sci. 1975. V. 23. P. 713–720.
22. *Krankowsky D., Lämmerzahl P., Herrwerth I. et al.* In-situ Gas and Ion Measurements at Comet Halley // Nature. 1986. V. 321. P. 326–329.
23. *Sanderson T. R., Wenzel K. P., Daly P. et al.* The Interaction of Heavy Ions from Comet P/Giacobini – Zinner with the Solar Wind // Geophys. Res. Lett. 1986. V. 13.
24. *Wincke D., Wu C. S., Li Y. Y., et al.* Coupling of Newborn Ions to the Solar Wind by Electromagnetic Instabilities and their Interaction with the Bow Shock // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 2713–2727.
25. *Axford W. I.* Acceleration of Cosmic Rays by Shock Waves // Proc. of 17th International Cosmic Ray Conference at Paris. Service de Docum. du CEN Saclay. 1981. V. 12. P. 155–203.
26. *Wallis M. K., Dryer M.* Decay of the Cometary Bow Shock // Nature. 1987. V. 322.
27. *Ридлер В., Швингеншю К., Ерошенко Е. Г. и др.* Наблюдения магнитного поля в коме кометы Галлея // 1986. Письма в «Астрон. журн.». Т. 12. С. 647–652.
28. *Richardson I. G., Cowley S. W. H., Hynds R. J. et al.* Three-dimensional Energetic Ion Bulk Flow at Comet P/Giacobini – Zinner // Geophys. Res. Lett. 1986. V. 13.
29. *Neugebauer M., Lazarus A. J., Altwegg K. et al.* The Pick-up of Cometary Protons by the Solar Wind // Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986. V. 2. P. 19.

Поступила в редакцию
13.VIII.1987