

УДК 523.72

*М. И. Веригин, И. Эксфорд, К. И. Грингауз,
А. Рихтер*

**О ВОЗМОЖНОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ОБНАРУЖЕНИИ
УСКОРЕНИЯ КОМЕТНОЙ ПЛАЗМЫ, СВЯЗАННОГО
С ИЗМЕНЕНИЕМ НАПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ,
ПО ДАННЫМ ПРИБОРА «ПЛАЗМАГ-1» НА КОСМИЧЕСКОМ
АППАРАТЕ «ВЕГА-1»**

Для проведения одновременных измерений солнечного ветра и околокометной плазмы на космических аппаратах «Вега-1» и «Вега-2» в состав комплекса плазменных приборов «Плазмаг-1» было включено две пары широкоугольных датчиков [1, 2]. Каждая пара датчиков состояла из полусферического ионного электростатического анализатора А и ионного цилиндра Фарадея ЦФ. Одна из этих пар была ориентирована на Солнце (датчики АС и СЦФ), другая — по направлению вектора скорости космического аппарата относительно кометы (датчики АК и КЦФ).

На основе измерений, выполненных при помощи этих датчиков, было показано существование околокометной ударной волны на расстояниях $\approx 10^6$ км от ядра, выявлено торможение солнечного ветра вследствие нагружения его кометными ионами перед ударной волной и за ней — в кометошите, обнаружено существование на $\approx 1,6 \cdot 10^5$ км от ядра теоретически не предсказанной границы — кометопазы, выявлена в обтекающем комету потоке ионов область кометной плазмы, где преобладают тяжелые кометные ионы, и определен состав ионов в этой области [3–7].

В частности, было обнаружено, что в области кометной плазмы, между пересечениями кометопазы на входе в эту область и при выходе из нее, АС-анализатор практически не регистрирует ионов, приходящих из солнечного направления. Однако на КА «Вега-1» этот датчик в окрестности наибольшего приближения к ядру кометы зарегистрировал кратковременный (≈ 5 мин) всплеск потоков ионов в диапазоне энергий $E_i \approx 100$ –1000 эВ. В настоящей работе более подробно будут рассмотрены результаты измерений ионного компонента плазмы во время этого всплеска и на основе их сравнения с одновременными измерениями магнитного поля предложено возможное качественное объяснение его происхождения.

Экспериментальные данные. Во время пролета КА «Вега-1» в окрестности кометы Галлея работали только три из упоминавшихся выше четырех датчиков: при помощи АС-анализатора с полем зрения $30 \times 38^\circ$ проводились измерения ионных спектров в диапазоне энергий $50 \div 25\,000$ эВ/О в 60 энергетических интервалах; при помощи СЦФ и КЦФ с угловыми полями зрения $84 \times 84^\circ$ и $25 \times 25^\circ$ соответственно проводились измерения потока ионов, приходящих от Солнца и из направления вектора скорости космического аппарата относительно кометы.

На рис. 1 приведена последовательность усредненных по 5-с интервалам времени энергетических спектров, измеренных АС-анализатором на космическом аппарате «Вега-1» с 07.16 по 07.26 УТ 6.III 1986 г. Пред-

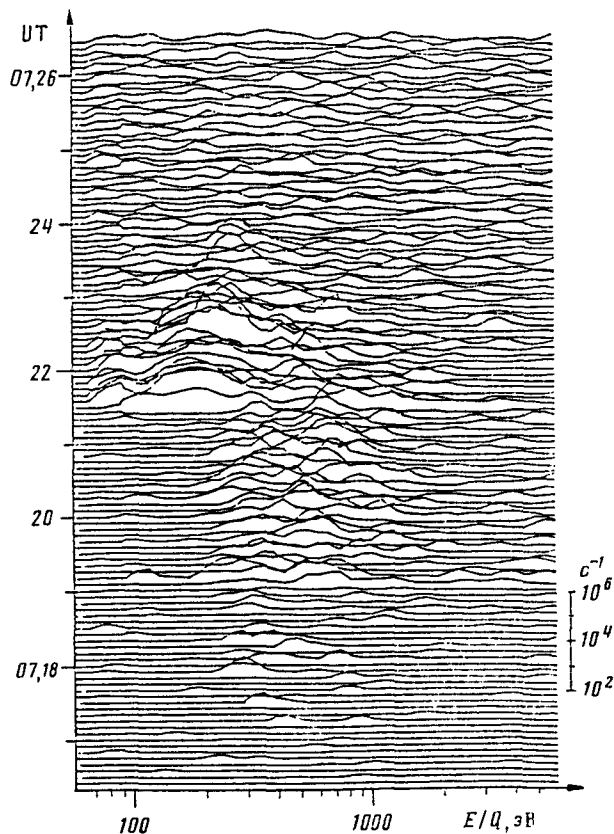


Рис. 1. Последовательность энергетических спектров ионов, наблюдавшихся на КА «Вега-1» 6.III 1986 г. при помощи ориентированного в направлении на Солнце электростатического анализатора, в окрестности точки наибольшего приближения этого космического аппарата к ядру кометы Галлея

ставленные на этом рисунке спектры сглажены методом бегущего среднего по трем соседним энергетическим интервалам. Как видно на рис. 1, в окрестности точки наибольшего приближения КА «Вега-1» к ядру кометы Галлея (07.20.06, $r=8889$ км) $s \approx 07.19$ по 07.24 UT в диапазоне энергий 100–1000 эВ наблюдались потоки ионов, приходящих от Солнца. Область, в которой регистрировались эти потоки, не симметрична относительно точки наибольшего приближения. В $\approx 07.21.30$ UT характерная энергия регистрировавшихся ионов уменьшилась с $E_i \approx 600$ до $E_i \approx 200$ эВ.

Результаты одновременных измерений коллекторного тока I_k СЦФ, усредненного по 1-с интервалам времени при трех различных значениях тормозящего ионы напряжения на анализирующей сетке датчика $U_r = 0,15$ и 3500 В, приведены на рис. 2а–в соответственно. Как видно из показанных на этом рисунке данных, в то время, когда АС наблюдал всплеск ионных потоков, знак I_k при небольших значениях U_r изменился, и его величина увеличилась до $\approx 10^{-9}$ А. В это же время ток СЦФ при $U_r = 3500$ В оставался отрицательным и его характерная величина составляла $(0,5 \div 1) \cdot 10^{-9}$ А. Вычитая первую величину из второй, с учетом эффективной площади СЦФ $\approx 1,6$ см² [2] мы можем оценить поток ионов, приходящих из солнечного направления, как $(5 \div 8) \cdot 10^9$ см⁻²·с⁻¹.

Показания КЦФ (не представленные в этой работе) на протяжении большей части обсуждаемого интервала времени не информативны из-за насыщения усилителя тока этого прибора. Экстраполируя на период ис-

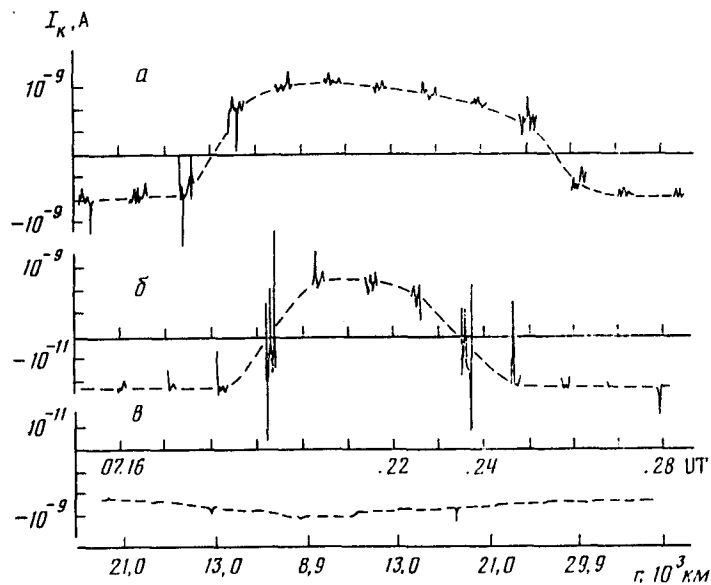


Рис. 2. Коллекторные токи I_k ориентированного на Солнце цилиндра Фарадея при трех значениях тормозящего ионы напряжения $U_r=0$ В (а), 15 В (б) и 3500 В (в), измеренные на КА «Вега-1» 6.III 1986 г. на малых кометодрических расстояниях r

следующего события концентрацию ионов, оцененную по данным КЦФ до и после всплеска ионного потока в АС, концентрацию кометных ионов во время всплеска мы можем оценить как несколько тысяч частиц в см^3 .

Обсуждение

Относительно небольшая продолжительность и асимметрия всплеска ионных потоков в АС и СЦФ относительно точки наибольшего приближения КА «Вега-1» к ядру кометы Галлея дают основания предположить, что это существенно нестационарное и локализованное событие. Первые свидетельства в пользу нестационарной природы распределения магнитного поля в окрестности точки наибольшего приближения КА «Вега-1» были получены на основе измерений магнитного поля на этом космическом аппарате феррозондовым магнитометром МИША [8, 9]. Авторы магнитного эксперимента интерпретировали магнитное поле, наблюдавшееся на КА «Вега-1» в окрестности точки наибольшего приближения, как остаток «старого» межпланетного магнитного поля (ММП), противоположной полярности, обволакивающего комету. За несколько часов до точки наибольшего приближения на КА «Вега-1» наблюдалось изменение знака B_x компоненты ММП, а в его окрестности космический аппарат, по-видимому, еще дважды пересек эту же самую секторную границу, задержанную там кометной плазмой [8, 9].

При взаимодействии магнитных полей противоположных полярностей в области кометной плазмы следует ожидать образования там и характерной для процесса пересоединения геометрии магнитных силовых линий с нейтральной линией X-типа. На рис. 3 в проекции на плоскость X, Y кометной солнечно-эклиптической системы координат (КСЭ) приведены некоторые из векторов магнитного поля в соответствии с работами [8, 9]. На этом же рисунке также показана возможная геометрия магнитного поля, образовавшаяся при прохождении секторной границы ММП (пунктирная линия) через область кометной плазмы. Точками на рис. 3

отмечена область вдоль траектории «Вега-1», где датчики АС и СЦФ прибора «Плазмаг-1» наблюдали потоки ионов из солнечного направления (рис. 1, 2). Как можно видеть из приведенных на рис. 3 данных, эти потоки наблюдались в окрестности пересечения «Вега-1» секторной границы ММП при выходе космического аппарата из области «старого» магнитного поля. Естественно предположить, что наблюдавшиеся ионы были ускорены при пересоединении магнитных силовых линий в окрестности наибольшего приближения секторной границы ММП к ядру кометы Галлея. В таком случае ускоренные ионы будут покидать область, где они образовались с некоторой скоростью V_i вдоль поверхности, разделяющей магнитные поля противоположной направленности. Почему же тогда эти частицы регистрировались датчиками АС и СЦФ при выходе КА «Вега-1»

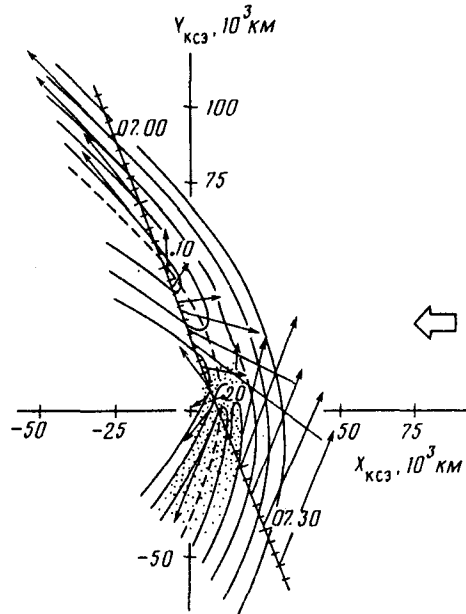


Рис. 3. Возможная геометрия магнитного поля на малых кометодистанциях во время пролета «Вега-1» этой области.

Точками отмечена область, где наблюдался всплеск потока кометных ионов (рис. 1, 2). Стрелка — направление потока обтекающей комету плазмы

из области «старого» магнитного поля (07.18÷07.25 UT) и не регистрировались при входе в нее (07.05÷07.12 UT)?

Ответ на этот вопрос можно получить при анализе векторной диаграммы эксперимента. На рис. 4, а в связанном с космическим аппаратом пространстве скоростей ($V_x \parallel X_{КСЗ}$) показан вектор скорости ионов $V_{КА}$, покоящихся относительно ядра кометы, и поля зрения датчиков АС, СЦФ и КЦФ. На рис. 4, б показано возможное взаимное расположение векторов $V_{КА}$, V_i и $V = V_{КА} + V_i$, где V_i — скорость ускоренных кометных ионов относительно ядра кометы и V — их скорость относительно космического аппарата. Эта диаграмма построена для выхода КА «Вега-1» из области «старого» магнитного поля. При входе в эту область космический аппарат пересекает секторную границу под острым углом и направления векторов $V_{КА}$ и V_i близки. В таком случае и направление скорости ускоренных ионов относительно космического аппарата $V = V_{КА} + V_i$ также будет близко к направлению $V_{КА}$ и всегда будет лежать вне поля зрения датчиков АС и СЦФ (рис. 4). Так как вектор $V_{КА}$ фиксирован по величине ($V_{КА} \approx$

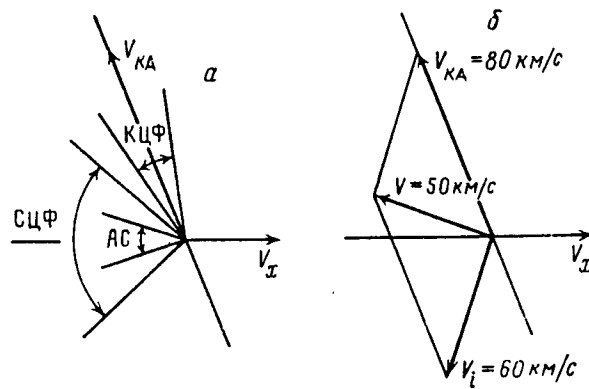


Рис. 4. Возможная векторная диаграмма условий (плазменного эксперимента на КА «Вега-1» в системе координат, связанной с космическим аппаратом V_{KA} — скорость покоящихся относительно ядра ионов; V_i , V — их скорости относительно ядра и космического аппарата соответственно. Только при достаточно больших $V_i \geq 35$ км/с кометные ионы попадут в поле зрения датчиков АС/СЦФ

≈ 80 км/с) и по направлению, из рис. 4 также следует, что скорость ускоренных кометных ионов должна превышать ≈ 35 км/с для того, чтобы эти ионы могли быть зарегистрированы СЦФ/АС датчиком при отлете от ядра.

С другой стороны, из измерений ионного состава в области кометной плазмы [6, 10] мы знаем, что среди кометных ионов преобладают ионы группы воды с массовым числом $16 \div 18$. При скорости относительно КА «Вега-1» ≥ 50 км/с (рис. 4) эти ионы будут наблюдаться АС-анализатором с энергиями $E_i \geq 200$ эВ, что согласуется с представленными на рис. 1 измерениями. Выше по измерениям СЦФ был оценен общий поток ионов как $(5-8) \cdot 10^9$ см $^{-2} \cdot$ с $^{-1}$. С учетом их скорости V относительно КА «Вега-1» мы можем теперь оценить концентрацию ускоренных ионов как $n_i \approx (1 \div 2) \cdot 10^3$ см $^{-3}$. Эта величина по крайней мере качественно согласуется с концентрацией, оцененной по данным КЦФ.

На основе приведенных выше различных, но самосогласующихся измерений мы можем сделать вывод, что всплеск потока ионов, наблюдавшийся на КА «Вега-1» датчиками АС и СЦФ прибора «Плазмаг-1» в окрестности точки наибольшего приближения этого космического аппарата к ядру кометы Галлея, вызван движением кометных ионов группы воды, ускоренных до скорости в несколько десятков километров в секунду. Это ускорение могло быть вызвано пересоединением магнитных полей противоположной полярности, заторможенных кометной плазмой.

В настоящее время еще не полностью ясно — представляют ли ускоренные частицы часть энергичного хвоста функции распределения ионов или связаны с направленным движением плазмы. В последнем предположенной интерпретации плазменных измерений предполагает спорадическое присутствие суперальвовенских скоростей глубоко в области кометной плазмы, в то время как обычно скорость плазмы там доальвовенская и не превышает ≈ 3 км/с [10].

Наконец следует отметить, что по данным телескопа энергичных частиц «Тюнде-М» на борту КА «Вега-1», с ≈ 07.17 по ≈ 07.24 UT наблюдался всплеск потока энергичных ионов с энергиями ≥ 40 кэВ [11]. Для таких частиц $V_i \gg V_{KA}$ и, следовательно, V практически параллельна V_i (рис. 4). В таком случае при вылете КА «Вега-1» из области «старого» магнитного поля вектор V попадет в поле зрения телескопа «Тюнде-М» (регистрирующего ионы из конуса с углом раствора $\pm 25^\circ$, ориентированного перпендикулярно оси $X_{исз}$). Поэтому мы можем заключить, что при

пересоединении магнитных полей противоположной полярности в области кометной плазмы возможно происходит также ускорение кометных ионов до энергий ≥ 40 кэВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gringauz K. I. et al. The Vega Probe Instrument Package for measuring Charged Particles with Energies less than 25 keV // Cometary Exploration III. Budapest: Central Res. Inst. Phys. Press, 1983. P. 333.
2. Gringauz K. I. et al. The Vega Plasmag-1 Experiment: Description and First Results // Field, Particle and Wave Experiments on Cometary Missions. Graz: Austrian Academy of Sciences Publication. 1986. P. 157.
3. Грингауз К. И. и др. Первые прямые измерения плазмы и нейтрального газа у кометы Галлея: Первоначальные результаты с космических аппаратов «Вера» // Письма в «Астрон. журн.». 1986. Т. 12. С. 666.
4. Gringauz K. I. et al. Detection of a New Chemical Boundary at Comet Halley // Geophys. Res. Lett. 1986. V. 13. P. 613.
5. Gringauz K. I. et al. First Results of Plasma and Neutral Gas Measurements from Vega-1/-2 near Comet Halley // Adv. Space Res. 1986. V. 5. № 12. P. 165.
6. Gringauz K. I. et al. Cometary Plasma Region in the Coma of Comet Halley: Vega-2 Measurements // Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. V. 1. 1986. P. 93.
7. Verigin M. I. et al. Characteristic Features of the Cometosheath of Comet Halley: Vega-1 and Vega-2 observations // Exploration of Halley's Comet. ESA SP-250. 1986. V. 1. P. 69.
8. Рудлер В. и др. Наблюдения магнитного поля в коме кометы Галлея // Письма в «Астрон. журн.». 1986. Т. 12. С. 647.
9. Schwingenschuh K. et al. Cometary Boundaries: Vega Observations at Halley // Adv. Space Res. 1986. V. 6. № 1. P. 217.
10. Balsiger H. et al. Ion Composition and Dynamics at Comet Halley // Nature. 1986. V. 321. P. 330.
11. Шомоди А. и др. Первые прямые измерения энергичных частиц вблизи кометы Галлея // Письма в «Астрон. журн.». 1986. Т. 12. С. 659.

Поступила в редакцию
13.VIII.1987