

УДК 523.98

## КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПО ДАННЫМ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ С КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА MARS EXPRESS И ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ WIND

© 2023 г. А. И. Ефимов<sup>1, \*</sup>, В. М. Смирнов<sup>1</sup>, И. В. Чашей<sup>2</sup>, А. С. Набатов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН (ФирЭ РАН), Фрязино, Россия

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва, Россия

\*e-mail: efimov@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 18.11.2022 г.

После доработки 11.01.2023 г.

Принята к публикации 26.01.2023 г.

Представлены результаты экспериментов радиопросвечивания околосолнечной плазмы сигналами спутника Марса Mars Express. В области гелиоцентрических расстояний прицельной точки лучевой линии 8–13 солнечных радиусов измерялись флуктуации частоты просвечивающих радиосигналов. В ходе проведения экспериментов как на восточном, так и на западном лимбах зафиксированы резкие усиления дисперсии флуктуаций частоты. В измерениях вблизи орбиты Земли на космическом аппарате Wind в смежные периоды с запаздыванием на 5–17 сут регистрировались увеличения концентрации протонов и напряженности магнитного поля, которые в 7–15 раз превышают фоновые значения. Сравнение между данными, относящимися к внутреннему и околоземному солнечному ветру, позволяет сделать вывод, что наблюдавшиеся возмущения связаны с одной и той же вращающейся с Солнцем областью солнечной короны.

DOI: 10.31857/S0016794022600661, EDN: POETYS

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [Ефимов и др., 2019, 2020, 2021] обнаружено, что крупномасштабные возмущения приводят к усилению флуктуаций частоты зондирующих околосолнечную плазму радиоволн. После этого через промежуток времени, превышающий четверть периода вращения Солнца, фиксируется значительное увеличение концентрации заряженных частиц вблизи орбиты Земли и еще через четверть оборота регистрируется увеличение флуктуаций при прохождении радиоволн через область, расположенную к западу от Солнца. Такая последовательность событий обусловлена коротящими крупномасштабными возмущениями, формирующимися при взаимодействии медленных и быстрых потоков солнечного ветра.

Цель настоящей работы, которая является продолжением работ [Ефимов и др., 2019, 2020, 2021], состояла в исследовании крупномасштабных возмущений, наблюдавшихся во внутреннем солнечном ветре и в околоземной плазме в период с 18 августа по 22 октября 2004 г. Также исследуемыми характеристиками зондирующих радио-

волн являлись вариации интенсивности (средне-квадратичное отклонение) и формы временных спектров флуктуаций частоты S- и X-диапазонов.

### 2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ОКОЛОСОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ В 2004 г.

В течение 2004 г. были выполнены продолжительные эксперименты по радиозондированию околосолнечной плазмы дециметровыми (S-диапазон, длина волны  $\lambda_1 = 13.1$  см) и сантиметровыми (X-диапазон, длина волны  $\lambda_2 = 3.56$  см) сигналами спутника Mars Express. Геометрическая картина радиозондирования иллюстрируется рис. 1, на котором для каждого дня 2004 г. показано положение проекций лучевых линий КА–Земля на картинную плоскость для космического аппарата Mars Express. По горизонтальной оси указаны расстояния от центрального меридиана в единицах солнечного радиуса  $R_s$ , по вертикальной оси – расстояния от экваториальной плоскости. В течение всего времени с 18 августа по 22 октября 2004 г. зондировались области, расположенные к северу от экватора.

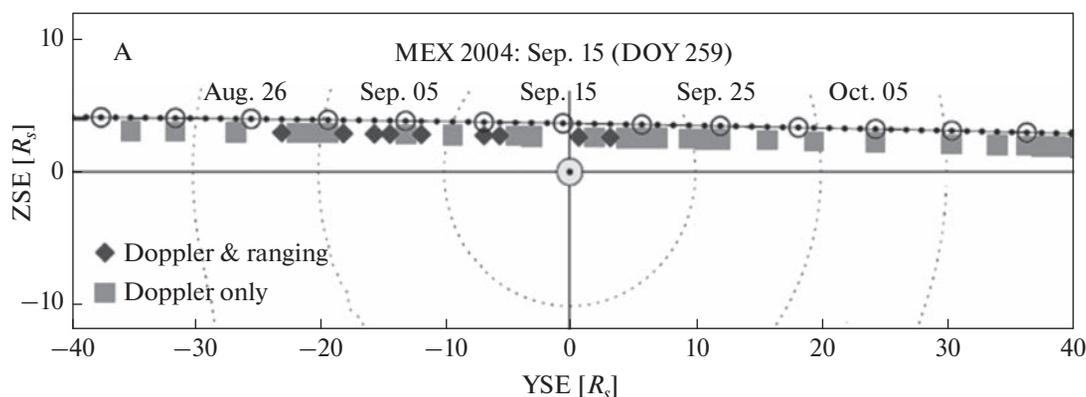


Рис. 1. Геометрия верхнего соединения, как видно с Земли в солнечной эклиптической системе координат [Pätzold et al., 2012].

Геометрические факторы экспериментов радиозондирования представлены в табл. 1, в которой даты проведения экспериментов указаны еще и в виде дней года. Наибольшее приближение лучевой линии к центру Солнца достигалось 15 сентября 2004 г. (DOY 259) и составляло  $3.6R_s$  на участке захода космического аппарата за Солнце и 16 сентября 2004 г. (DOY 260), когда прицельное расстояние  $R$  составляло  $3.85R_s$ .

Исследуемыми характеристиками зондирующих радиоволн являлись интенсивность (среднеквадратичное отклонение) и форма временных спектров флуктуаций частоты S- и X-диапазонов, а также дифференциальной частоты.

### 3. НАБЛЮДЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В ОКОЛОСОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЕ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

При реализации предварительной обработки радиоданных, полученных в экспериментах зондирования околосолнечной плазмы сигналами спутника Марса Mars Express, перемещавшегося

за Солнцем, использовались два алгоритма, дополнявших друг друга.

Первый алгоритм применялся для определения радиальных зависимостей интенсивности флуктуаций частоты S-диапазона ( $\lambda_1 = 13.1$  см) и X-диапазона ( $\lambda_2 = 3.56$  см). На рис. 2 приводятся результаты обработки флуктуаций частоты, полученные на фазе захода КА Mars Express за диск Солнца и выходе из-за него [Ефимов и др., 2013]. Темными кружками показаны среднеквадратичные значения флуктуаций частоты дециметрового диапазона  $\sigma_S$ , полыми кружками — аналогичные характеристики для сантиметрового диапазона  $\sigma_X$ . Уменьшение среднеквадратичных значений флуктуаций частоты сигналов S- и X-диапазонов с увеличением прицельного расстояния  $R$  может быть аппроксимировано степенными функциями вида

$$\sigma_f = A_i (R/R_s)^{-m_i}, \quad (1)$$

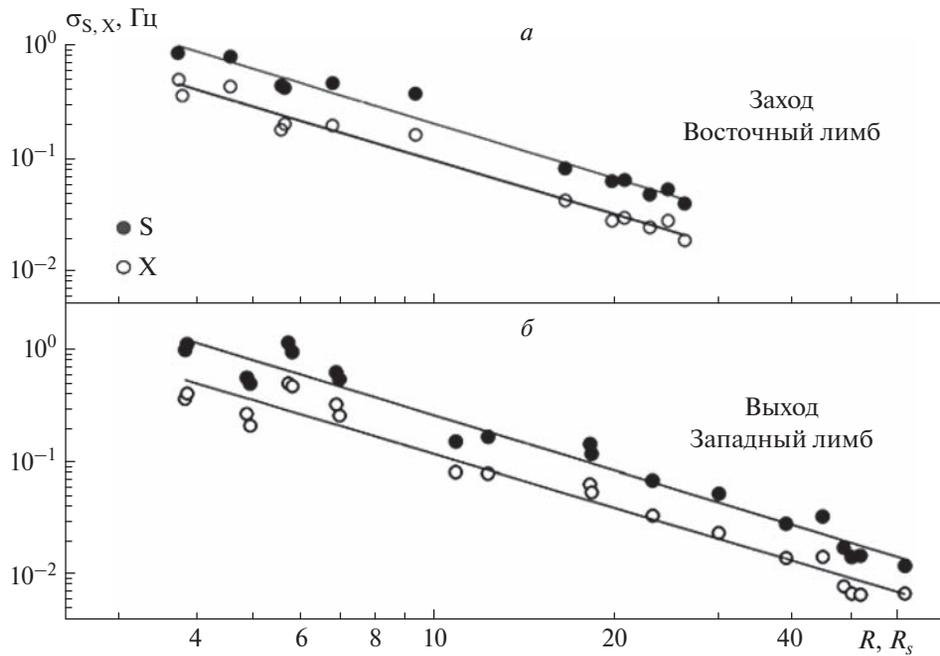
где  $m$  — показатель степени функции;  
 $i$  — S- или X-диапазон;  
 $R$  — прицельное расстояние радиолуча;  
 $R_s = 0.697 \times 10^6$  км — радиус Солнца.

$$\begin{aligned} A_{S \text{ in}} &= 16.836 \text{ Гц} & m_{S \text{ in}} &= 1.90 \\ A_{X \text{ in}} &= 7.202 \text{ Гц} & m_{X \text{ in}} &= 1.87 \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{на участке захода КА за Солнце,} \\ \text{на участке выхода КА из-за Солнца.} \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} A_{S \text{ egr}} &= 20.712 \text{ Гц} & m_{S \text{ egr}} &= 1.91 \\ A_{X \text{ egr}} &= 8.340 \text{ Гц} & m_{X \text{ egr}} &= 1.86 \end{aligned}$$

Таблица 1. Условия радиозондирования околосолнечной плазмы сигналами спутника Марса Mars Express в 2004 г.

Дни 2004 г.		Прицельное расстояние $R/R_s$	
заход (Ingress)	выход (Egress)	заход (Ingress)	выход (Egress)
231–259 18 августа–15 сентября	260–296 16 сентября–22 октября	32.20–3.60	3.85–46.74



**Рис. 2.** Радиальные зависимости среднеквадратичных значений флуктуаций частоты сигналов S- и X-диапазонов по данным экспериментов радиозондирования с КА Mars Express в 2004 г. [Ефимов и др., 2013]. (а) – 18 августа–15 сентября 2004 г.; (б) – 17 сентября–22 октября 2004 г.

Показатели степени  $m_S$ ,  $m_X$  близки друг к другу, что свидетельствует о том, что корональные структуры на обеих сторонах Солнца подобны и стабильны в период с 18 августа по 22 октября 2004 г.

Второй алгоритм использовался для поиска временных изменений уровня флуктуаций дифференциальной частоты  $\sigma_D$ , которая является комбинацией частот S- и X-диапазонов и целиком зависит от характеристик плазмы, через которую распространяются радиоволны [Pätzold et al., 2012]. Изучаемыми характеристиками в этом случае были уровень флуктуаций дифференциальной частоты  $\sigma_D$  и вариации интегральной электронной концентрации  $\Delta N_i$  плазмы вдоль трассы радиозондирования на участках захода КА Mars Express за Солнце (восточный лимб) и при выходе из-за Солнца (западный лимб). Среднеквадратичные значения дифференциальной частоты  $\sigma_D$ , взятые из публикации [Pätzold et al., 2012], представлены в табл. 2 и на рис. 3 в виде зависимостей  $\sigma_D$  от прицельного расстояния радиолуча  $R$ , выраженного в единицах солнечного радиуса  $R_s$ . Штриховые прямые на рис. 3 являются расчетными зависимостями  $\sigma(R/R_s)$ , следующими из соотношения (1) для флуктуаций частоты дециметровых (S-диапазон) радиоволн. Значения  $\sigma_S$  даны в табл. 3 для прицельных расстояний  $R/R_s = 4; 10; 20; 30; 40$  для фазы захода космического аппарата за Солнце ( $\sigma_{S\text{in}}$ ) и для фазы выхода ( $\sigma_{S\text{egr}}$ ). Измеряемые статистические парамет-

ры флуктуаций частоты пропорциональны среднеквадратичным флуктуациям концентрации плазмы и скорости солнечного ветра вблизи прицельной точки луча зрения.

Анализ представленных данных позволяет сделать следующие выводы.

В большинстве случаев значения  $\sigma_D$  могут быть определены приблизительно на основе радиальных зависимостей, полученных при анализе вариаций частоты в дециметровом диапазоне волн (1). Исключение составляют случаи, когда отклонения от средних зависимостей  $\sigma_S(R)$  превышают ошибки измерений. Такие случаи необходимо подвергнуть дополнительному анализу. На участке захода космического аппарата за Солнце (восточный лимб) таким событием следует считать наблюдение резкого, почти на порядок, возрастания интенсивности флуктуаций дифференциальной частоты при прохождении лучевой линии на расстоянии  $R = 13R_s$  от центра Солнца. На участке выхода космического аппарата из-за диска Солнца (западный лимб) при удалении лучевой линии на расстояние  $R = 8.5R_s$  от его центра, когда уровень флуктуаций превышает ожидаемое значение более чем в 7 раз. Другое событие, зарегистрированное на западном лимбе, может быть расположено на таком же расстоянии, как на восточном  $R = 13.1R_s$ , но имеет меньшую амплитуду: превышение измеренного значения над ожидаемым составляет  $\sim 2.5$  раза.

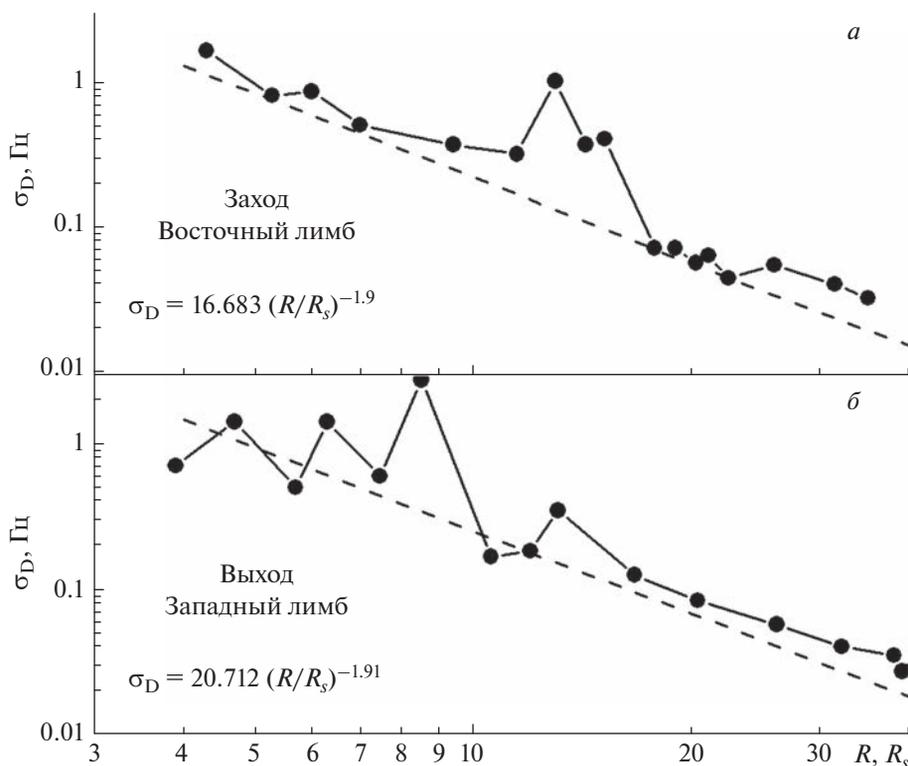
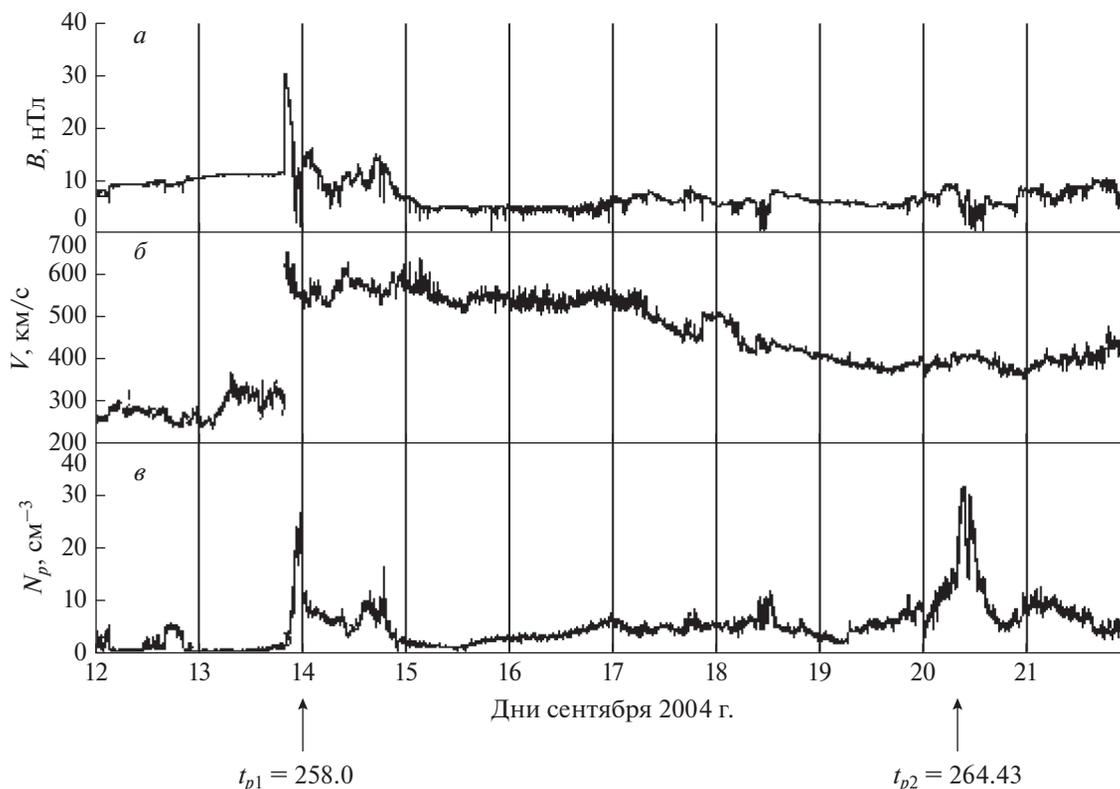


Рис. 3. Зависимости дисперсии флуктуаций дифференциальной частоты от прицельного расстояния радиолуча при зондировании восточной области (а) и западной области (б) свехкороны [Pätzold et al., 2012].

Таблица 2. Флуктуации приведенной разности частот (дифференциальной частоты) спутника Mars Express при радиозондировании околосолнечной плазмы в 2004 г.

Восточный лимб $\sigma_D = 16.683 (R/R_s)^{-1.90}$				Западный лимб $\sigma_D = 20.712 (R/R_s)^{-1.91}$			
дата 2004 г.	DOY 2004 г.	$R/R_s$	$\sigma_f$ , Гц	дата 2004 г.	DOY 2004 г.	$\sigma_f$ , Гц	$R/R_s$
19.8 авг.	231.8	35.0	0.032	15.0 сент.	259.0	0.706	3.9
21.7 авг.	234.7	31.5	0.04	17.5 сент.	261.5	1.42	4.7
26.0 авг.	239.0	26.0	0.054	19.0 сент.	263.0	0.5	5.7
29.0 авг.	242.0	22.5	0.044	19.6 сент.	263.6	1.42	6.3
30.2 авг.	243.2	21.1	0.063	20.6 сент.	264.6	0.6	7.45
30.8 авг.	243.8	20.3	0.056	21.6 сент.	265.6	2.75	8.5
31.0 авг.	244.9	19.0	0.071	23.0 сент.	267.0	0.167	10.6
01.8 сент.	245.8	17.8	0.071	24.2 сент.	268.2	0.183	12.0
04.0 сент.	248.0	15.2	0.4	25.2 сент.	269.2	0.348	13.1
04.7 сент.	248.7	14.3	0.365	28.2 сент.	272.2	0.125	16.7
05.8 сент.	249.8	13.0	1.0	01.3 окт.	275.3	0.083	20.4
07.0 сент.	251.0	11.5	0.315	06.2 окт.	280.2	0.057	26.2
08.8 сент.	252.8	9.4	0.365	11.2 окт.	285.2	0.04	32.2
10.7 сент.	252.8	7.0	0.5	16.3 окт.	290.3	0.035	38.0
11.4 сент.	255.7	6.0	0.85	17.1 окт.	291.1	0.027	39.0
12.0 сент.	256.0	5.3	0.795				
13.6 сент.	257.6	4.3	1.62				



**Рис. 4.** Зависимости индукции магнитного поля  $B$  (рис. 4а), скорости движения потоков плазмы  $V$  (рис. 4б) и концентрации протонов  $N_p$  (рис. 4в) на орбите Земли по данным КА Wind в период с 12 по 21 сентября 2004 г. (DOY 256–265).

Очевидно, эти три события связаны с проявлением специфической структуры сверхкороны Солнца.

#### 4. НАБЛЮДЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ВБЛИЗИ ОРБИТЫ ЗЕМЛИ В ПЕРИОД ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ОКОЛОСОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ

На рис. 4 представлены материалы измерений характеристик плазмы вблизи орбиты Земли в момент времени, смещенный относительно радиозатменных наблюдений на интервал, равный времени движения потоков плазмы солнечного ветра от Солнца до КА Wind.

Первое событие на орбите Земли было зарегистрировано 14 сентября 2004 г. (DOY 258) и характеризовалось значительным увеличением

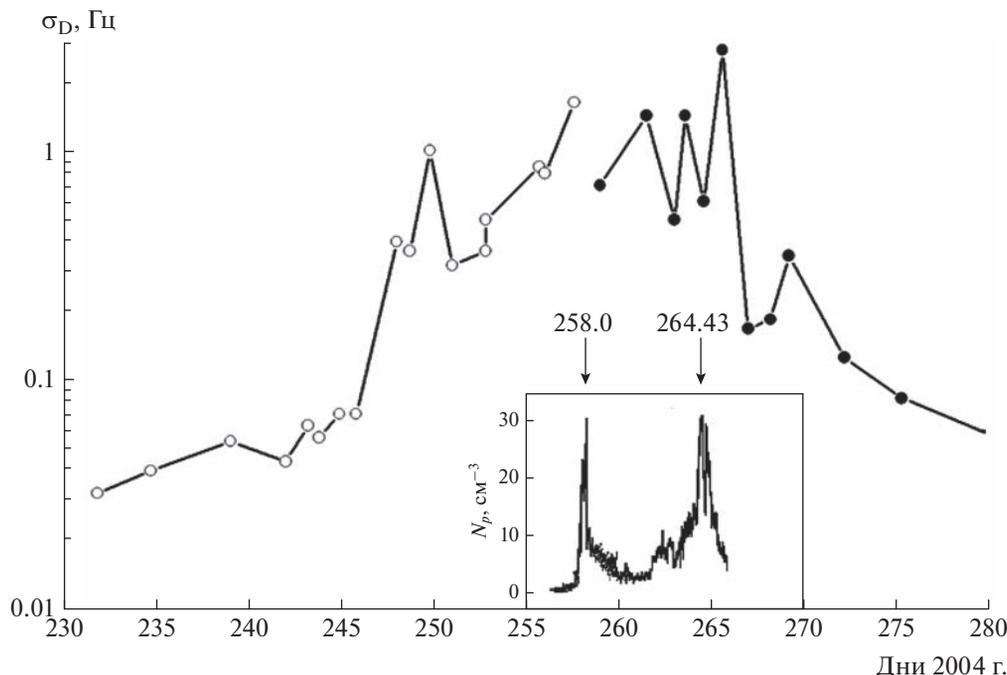
индукции магнитного поля  $B$  приблизительно в 6 раз по сравнению с фоновым значением  $B_{\phi} \approx 5$  нТл (рис. 4а) и таким же возрастанием концентрации протонов  $N_p$  (рис. 4в). В этот же промежуток времени наблюдались увеличения скорости движения потоков плазмы  $V$  — сначала от 240 до 300 км/с, а затем от 300 до 600 км/с (рис. 4б).

Второе событие зафиксировано 20 сентября 2004 г. (DOY 264.43) и заключалось в шестикратном увеличении концентрации протонов. Другие характеристики плазмы (магнитного поля  $B$  и скорости движения потоков плазмы  $V$ ) существенно не изменились.

Таблица 1 позволяет воспроизвести временную динамику событий, происходивших при реализации экспериментов радиозондирования околосолнечной плазмы сигналами спутника Mars Express в период с 28 августа по 22 сентября 2004 г.,

**Таблица 3.** Расчетные значения интенсивности флуктуаций частоты радиосигналов дециметрового диапазона при зондировании околосолнечной плазмы в августе—октябре 2004 г.

Прицельное расстояние, $R/R_s$	4	10	20	30	40
$\sigma_{S \text{ in}}$ , Гц	1.27	0.22	0.055	0.0855	0.0150
$\sigma_{S \text{ egr}}$ , Гц	1.46	0.25	0.068	0.0310	0.0180



**Рис. 5.** Дисперсия флуктуаций дифференциальной частоты  $\sigma_D$  сигналов КА Mars Express при зондировании плазмы на восточном лимбе (светлые кружки) и на западном лимбе (темные кружки).

и явления на орбите Земли в смежные промежутки времени, зарегистрированные приборами КА Wind. Графическая картина этих связанных между собой процессов представлена на рис. 5. По горизонтальной оси указаны дни 2004 г., по вертикальной оси — наблюдавшиеся в эти даты среднеквадратичные значения  $\sigma_D$  флуктуаций дифференциальной частоты зондировавших солнечный ветер сигналов спутника Mars Express. По этой же оси указаны времена наблюдений резкого увеличения концентрации протонов на орбите Земли  $t_{p1} = 258.0$  и  $t_{p2} = 264.43$ . Представленные материалы дают возможность проследить последовательность событий вблизи Солнца и в окрестности Земли.

При заходе спутника Mars Express за Солнце радиосигналы зондировали области сверхкороны, расположенные к востоку от центра Солнца с 19 августа (DOY 231.84) до 13 сентября (DOY 257.6) 2004 г. Максимум флуктуаций дифференциальной частоты  $\sigma_{D \max} = 1.00$  Гц был зарегистрирован 5 сентября 2004 г. точное время  $t_{p1} = 249.8$ . Следующее событие — резкое увеличение концентрации протонов — было зарегистрировано 14 сентября 2004 г. (DOY 258). Третье событие также наблюдалось у Земли — вторично концентрация протонов увеличилась в шесть раз ( $N_{p2} = 25 \text{ см}^{-3}$ ). Точное время второго максимума 20 сентября 2004 г. ( $t_{p2} = 264.43$ ) отличается от времени первого максимума на 6.43 сут, что близ-

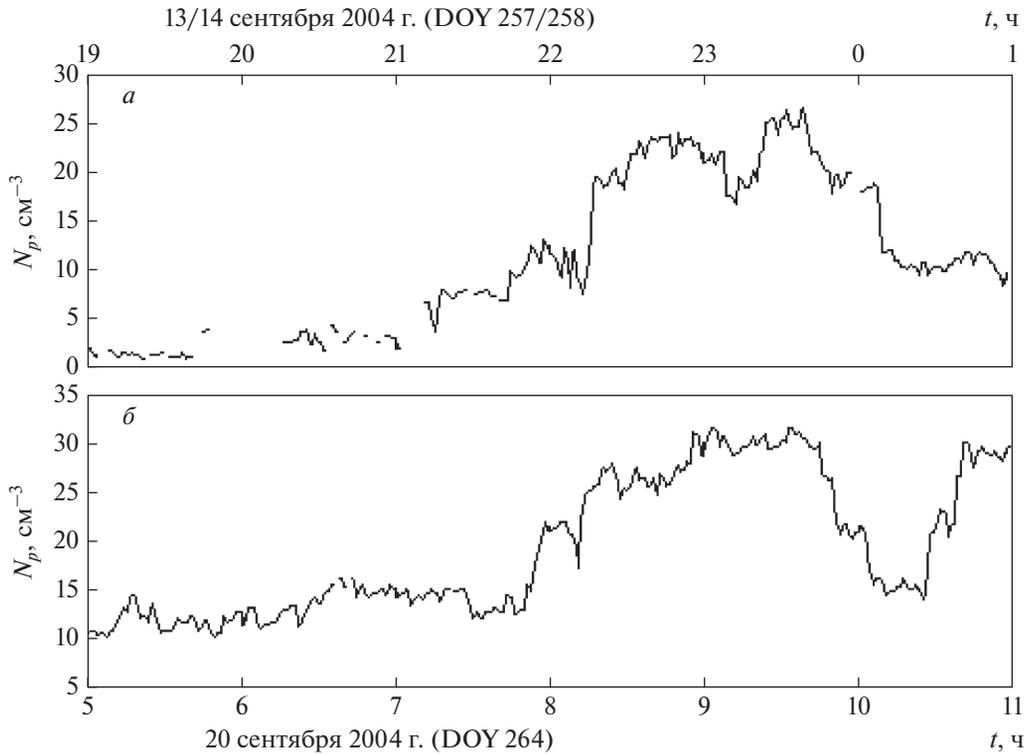
ко к величине, равной четверти периода вращения Солнца ( $T = 27$  сут).

После выхода космического аппарата Mars Express из-за диска Солнца радиосигналы зондировали области сверхкороны, расположенные к западу от центра Солнца. При удалении радиолинии от центра Солнца на расстояние  $R = 8.35$  радиусов Солнца  $R_s$  т.е. UT = 15:00 (DOY 265.625) было зарегистрировано многократное увеличение флуктуаций дифференциальной частоты зондировавших околосолнечную плазму радиоволн. Это событие произошло спустя 15.8 сут после генерации возмущения на восточном лимбе Солнца (5 сентября 2004 г., DOY 249.8) и через сутки (264.43) после второго максимума концентрации протонов вблизи орбиты Земли.

## 5. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВОЗМУЩЕНИЙ

### *Восточный лимб—Околосолнечная плазма—Западный лимб*

Из табл. 1, рис. 3 и 5 следует, что 5 сентября 2004 г. UT = 14:00 (полное время  $t = 249.8$ ) при заходе за Солнце спутника Mars Express на восточном лимбе было зарегистрировано восьмикратное увеличение интенсивности флуктуаций дифференциальной частоты. Это событие ассоциировалось с увеличением концентрации электронов в области сверхкороны, удаленной от центра Солнца на расстояние  $R = 13R_s$ . Долгоживущие



**Рис. 6.** Одноминутные значения концентрации протонов  $N_p$  вблизи орбиты Земли по данным КА Wind в период проведения экспериментов радиозондирования околосолнечной плазмы сигналами КА Mars Express в 2004 г. (а) DOY 257/258 (13/14 сентября) 2004 г., UT = 19:00–02:00. (б) DOY 264 (20 сентября) 2004 г., UT = 05:00–12:00.

возмущения с повышенным уровнем турбулентности вращаются с периодом  $\sim T = 27$  сут. При этом скорость плазмы направлена радиально.

Если возмущение наблюдалось на восточном лимбе в момент времени  $t_0$ , то соответствующее возмущение от той же области, переместившейся к центральному меридиану, достигает орбиты Земли в момент времени

$$t_0 + T/4 + \tau_2 = t_2,$$

где второе и третье слагаемые соответствуют повороту от востока до центрального меридиана и распространению от Солнца до Земли со средней скоростью  $V_2$ . Это событие проявляется во втором повышении концентрации протонов до величины

$$N_{p \max 2} = 30 \text{ см}^{-3}.$$

При этом первое усиление концентрации плазмы на рис. 4, DOY 258.0, связано с областью короны Солнца, которая опережает второй максимум примерно на четверть периода и находилась вблизи центрального меридиана около DOY 255. Два события, по всей видимости, ассоциируются с разными возмущенными потоками (секторная структура), поскольку они могут быть связаны с одним и тем же крупномасштабным возмущени-

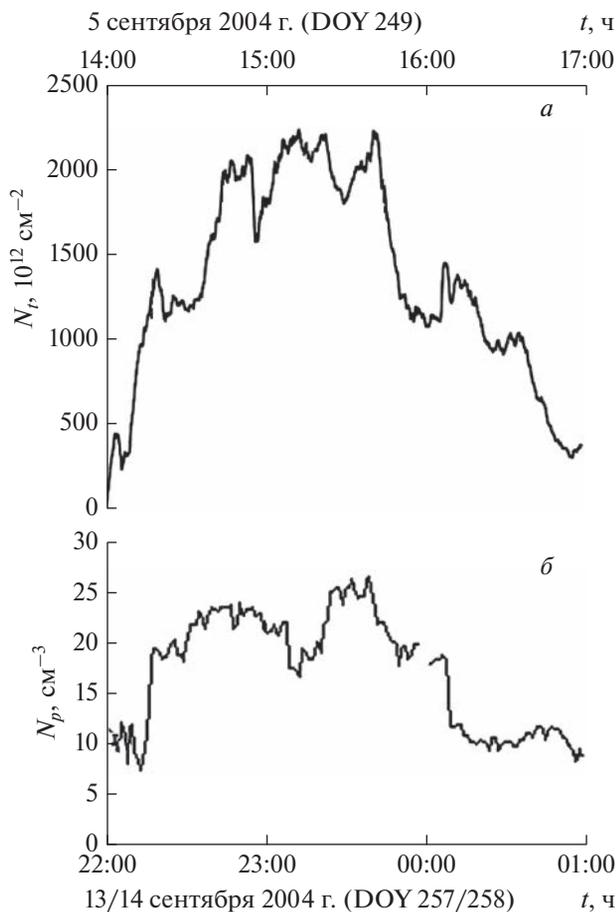
ем только при условии, что его протяженность по долготе превышает  $90^\circ$ .

Наблюдавшаяся на восточном лимбе область повышенной концентрации за счет вращения Солнца достигает западного лимба в момент времени

$$t_3 = t_0 + T/2,$$

что в данных радиопросвечивания проявилось в сильных флуктуациях дифференциальной частоты зондирующих сверхкорону Солнца на расстоянии  $R = 8.5R_s$  радиосигналов спутника Mars Express.

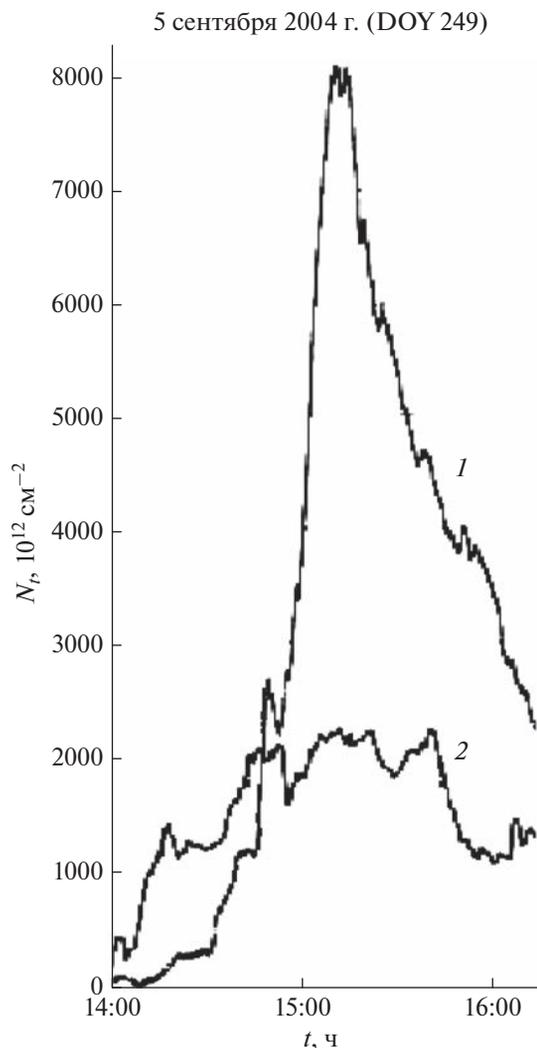
На рис. 6 представлены одноминутные значения концентрации протонов на орбите Земли, полученные в двух интервалах измерений на борту КА Wind, выполненные в период с 12 сентября по 21 сентября 2004 г. (DOY 258–264). Именно в этих интервалах, примыкающих к периоду проведения экспериментов радиозондирования околосолнечной плазмы, были зарегистрированы самые высокие значения концентрации протонов  $N_{p \max 1} = 25 \text{ см}^{-3}$  и  $N_{p \max 2} = 30 \text{ см}^{-3}$ . Первый интервал измерений начинался 13 сентября 2004 г., UT 19:00, DOY 257 и завершился 14 сентября 2004 г., UT – 02:00, DOY 258 [Ефимов и др., 2019, рис. 6а].



**Рис. 7.** (а) – Изменения интегральной электронной концентрации  $N_r$  при радиозондировании 5 сентября 2004 г. (DOY 249, UT 14:00–17:00) расположенной к востоку от центра Солнца сверхкороны на прицельном расстоянии  $R = 13R_s$  [Pätzold et al., 2012]. (б) – Изменения концентрации протонов  $N_p$  на орбите Земли по данным КА Wind 13 и 14 сентября 2004 г. (DOY 257/258, UT 22:00–01:00).

Видно, что повышенные значения  $N_p$  были измерены в интервале UT = 21:40–00:20, т.е. в течение  $\Delta t_1 = 2$  ч 40 мин. Максимальное значение  $N_{p \max 1}$  превосходило фоновое значение  $N_{01} = 5$  частиц в  $\text{cm}^3$  в 5 раз. Аналогичные значения для второго интервала измерений 20 сентября 2004 г. составляли UT = 08:00–11:00,  $\Delta t_2 = 3$  ч 00 мин,  $N_{p \max 2}/N_{02} = 30/10 = 3$ . Из рис. 6 видно, что временные профили концентрации для двух разнесенных на четверть периода возмущений оказываются качественно сходными.

На рис. 7 представлены результаты сопоставления измерений в 2004 г., выполненных в двух разнесенных в пространстве на большое расстояние ( $\sim 1$  а.е.) областях гелиосферы. На рис. 7а показаны изменения интегральной электронной концентрации при радиозондировании около-солнечной плазмы сигналами заходившего за



**Рис. 8.** Изменения интегральной электронной концентрации  $N_r$  при радиозондировании сверхкороны на западном лимбе при удалении  $8.5R_s$  (1) и на восточном лимбе на удалении  $13R_s$  от центра Солнца (2).

Солнце спутника Марса Mars Express 5 сентября 2004 г. (DOY 249, UT 14:00–17:00).

В это время линия радиосвязи со спутником Марса проходила через расположенные к востоку от Солнца области сверхкороны на прицельном расстоянии  $R = 13R_s$  [Pätzold et al., 2012]. По горизонтали указано время проведения эксперимента и регистрации частоты, по вертикальной оси – одноминутные значения интегральной электронной концентрации в единицах  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Изучаемая характеристика  $N_r$  за время измерений  $\Delta t_N = 3$  ч изменяется в пределах от 20–50 единиц (фоновое значение  $N_{r0}$ ) до значений  $\approx 2200$ –2500.

На рис. 7б показаны одноминутные значения концентрации протонов  $N_p$  на орбите Земли, измеренные на борту КА Wind 13 и 14 сентября 2004 г.

(DOY 257/258, UT 22:00–01:00). Максимальное значение  $N_{p \max} = 25 \text{ см}^{-3}$  достигается 13 сентября 2004 г. UT 23:40 и совпадает с аналогичным максимумом  $N_{t \max}$ , но зарегистрированным раньше – 5 сентября 2004 г. (DOY 249, UT 15:40).

Из рис. 7 следует, что процессы, происходящие в окрестности Солнца и на орбите Земли, подобны друг другу, но сдвинуты по времени. Действительно, и интегральная электронная концентрация  $N_t$ , и плотность протонов на орбите Земли отличаются от фоновых значений лишь в ограниченном интервале времени наблюдений, который составляет около трех часов. Превышение максимальных значений над соответствующими фоновыми уровнями  $N_{t \max}$  и  $N_{p \max}$  в  $\sim 3.5$  раза. Время запаздывания событий на орбите Земли по сравнению с явлениями у Солнца составляет 8 сут 8 ч, так что скорость трансляции процессов из одной области гелиосферы в другую  $V = 210 \text{ км/с}$ .

Таким образом, подтвержден полученный ранее результат [Ефимов и др., 2021] о том, что при детектировании усиления флуктуаций частоты на восточном лимбе в экспериментах радиопросвечивания может рассматриваться как предвестник прихода к Земле структур типа SIR/CIR со временем опережения 7.8 сут.

На рис. 8 представлены результаты сопоставления событий, происходивших в 2004 г. в областях сверхкороны, расположенных к востоку от центра Солнца на гелиоцентрическом расстоянии  $13R_s$  и к западу от центра на более близком расстоянии, равном  $8.5R_s$ . Можно утверждать, что и в этом случае длительность возмущений составляет в обоих случаях около трех часов, а максимум интегральной электронной концентрации  $N_{t \max}$  сильно возрастает при уменьшении расстояния от центра Солнца от  $2.2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  при  $R = 13R_s$  до  $8 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  при  $R = 8.5R_s$ . Это объясняется различием концентраций заряженных частиц в 4 раза.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возмущения во внутреннем солнечном ветре могут быть детектированы при непрерывном радиозондировании солнечного ветра сигналами движущихся за Солнцем радиостанций естественного или искусственного происхождения. Эффективность исследования возрастает при использовании монохроматических источников зондирования, обладающих высокой стабильностью по частоте и интенсивности. В экспериментах 2004 г. исследуемыми характеристиками являлись частота зондирующих околосолнечную плазму сигналов двигавшегося за Солнцем спут-

ника Марса Mars Express и концентрация протонов вблизи орбиты Земли, измеренная бортовыми приборами KA Wind. Регистрация на участке захода производилась регулярно с 19 августа по 13 сентября 2004 г. (DOY 231–257) при уменьшении прицельного расстояния  $R$  от  $35R_s$  до  $4.3R_s$ . В этом интервале изменения прицельного расстояния интенсивность флуктуаций дифференциальной частоты описывается степенной функцией (1). Усиления концентрации плазмы вблизи орбиты Земли происходят после усиления флуктуаций частоты на восточном лимбе. Возмущения на западном лимбе могут фиксироваться после их регистрации у орбиты Земли. При этом время запаздывания в обоих случаях составляет около четверти периода вращения Солнца.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны М. Бёрду и М. Петцольду за предоставленные данные экспериментов радиопросвечивания.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ефимов А.И., Луканина Л.А., Смирнов В.М., Чашей И.В., Бёрд М.К., Петцольд М. Возмущенные потоки во внутреннем солнечном ветре и вблизи орбиты Земли // Космич. исслед. Т. 57. № 6. С. 440–450. 2019.
- Ефимов А.И., Луканина Л.А., Чашей И.В., Коломиец С.Ф., Бёрд М.К., Петцольд М. Наблюдение возмущенных плазменных структур в окрестности Солнца и околоземном пространстве методами радиозондирования и локальных измерений // Космич. исслед. Т. 58. № 6. С. 495–502. 2020.
- Ефимов А.И., Луканина Л.А., Смирнов В.М., Чашей И.В., Бёрд М.К., Петцольд М. Детектирование области повышенной турбулентности сверхкороны Солнца с использованием спутников *Venus-Express* и *Mars-Express* // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 3. С. 275–281. 2021.
- Ефимов А.И., Луканина Л.А., Рудаиш В.К., Самознаев Л.Н., Чашей И.В., Бёрд М.К., Петцольд М. Частотные флуктуации когерентных сигналов космических аппаратов, наблюдавшиеся при двухчастотном радиозондировании околосолнечной плазмы в 2004–2008 г. // Космич. исслед. Т. 51. № 1. С. 17–27. 2013.
- Pätzold M., Hahn M., Tellmann S., Häusler B., Bird M.K., Tyler G.L., Asmar S.W., Tsurutani B.T. Coronal density structures and CMEs: Superior solar conjunctions of *Mars Express*, *Venus Express*, and *Rosetta*: 2004, 2006, and 2008 // Solar Phys. V. 279. P. 127–152. 2012.