

УДК 523.98

КОРОТИРУЮЩИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ДАННЫХ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ И ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2023 г. А. И. Ефимов^{1, *}, В. М. Смирнов¹, И. В. Чашей², А. С. Набатов¹

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 16.06.2022 г.

После доработки 12.09.2022 г.

Принята к публикации 22.09.2022 г.

Приведены результаты двух серий экспериментов радиопросвечивания околосолнечной плазмы сигналами космических аппаратов Mars Express и Venus Express в 2006 г. и Mars Express в 2008 г. Данные радиопросвечивания сравниваются с измерениями концентрации протонов вблизи орбиты Земли на спутнике Wind. Проведенный анализ показывает, что общий характер временной динамики возмущений, наблюдавшихся в двух сериях измерений, носит качественно сходный характер. Последовательность усиленных флуктуаций частоты и концентрации протонов позволяет сделать вывод, что наблюдавшиеся возмущения связаны с коротирующими областями взаимодействия разнотемпературных потоков солнечного ветра.

DOI: 10.31857/S0016794022600405, EDN: ADGCGM

1. ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования околосолнечной плазмы методом радиозондирования сигналами космических аппаратов (КА) обеспечили возможность получения значительного объема информации, относящейся к области формирования и ускорения солнечного ветра. Измерения, выполненные с использованием плазменных приборов, установленных на борту спутников Wind, ACE и др., обеспечили получение систематических данных о параметрах плазмы солнечного ветра вблизи орбиты Земли. Сопоставление двух массивов измерений может быть использовано для изучения связи между событиями, происходящими в окрестности Солнца, и возмущениями в околоземном космическом пространстве.

Первые работы в этом направлении были выполнены в ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и опубликованы в 2019–2021 гг. [Ефимов и др., 2019, 2020, 2021]. В 2006 г. было впервые проведено двухпозиционное радиозондирование солнечного ветра, основанное на одновременном использовании для радиопросвечивания сигналов двух КА, один из которых перемещается по отношению к Солнцу с запада на восток (спутник Венеры Venus Express), а другой (спутник Марса Mars Express) двигался в противоположном направлении [Ефимов и др., 2021]. Такая схема радиозондирования является эффективным сред-

ством изучения возмущений, генерируемых в выделенных областях солнечной короны, вращающихся вместе с Солнцем. В экспериментах измерялись флуктуации частоты просвечивающих радиосигналов, дисперсия флуктуаций частоты пропорциональна дисперсии флуктуаций концентрации и скорости плазмы в окрестности прицельной точки луча [Арманд, 2003]. Целью настоящего сообщения является анализ связей между флуктуационными процессами, происходящими в околосолнечном пространстве, и их отображении в околоземном космическом пространстве на примере двух событий.

2. НАБЛЮДЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В 2006 г.

В 2006 г. возмущение с повышенной турбулентностью было обнаружено впервые 6 октября (день года DOY 279, UT = 16:00, $t = 279.7$) на восточном лимбе при зондировании околосолнечной плазмы сигналами заходившего за Солнце спутника Марса Mars Express. Истечение возмущенных потоков плазмы на восточном лимбе проявилось как в нескольких связанных между собой процессах в околосолнечном пространстве, так и вблизи орбиты Земли. Потоки возмущенной плазмы при пересечении трассы радиозондирования Mars Express–Земля вызывали увеличение флуктуаций частоты радиоволн 6 октября 2006 г. (DOY 279.7). Увеличение флуктуа-

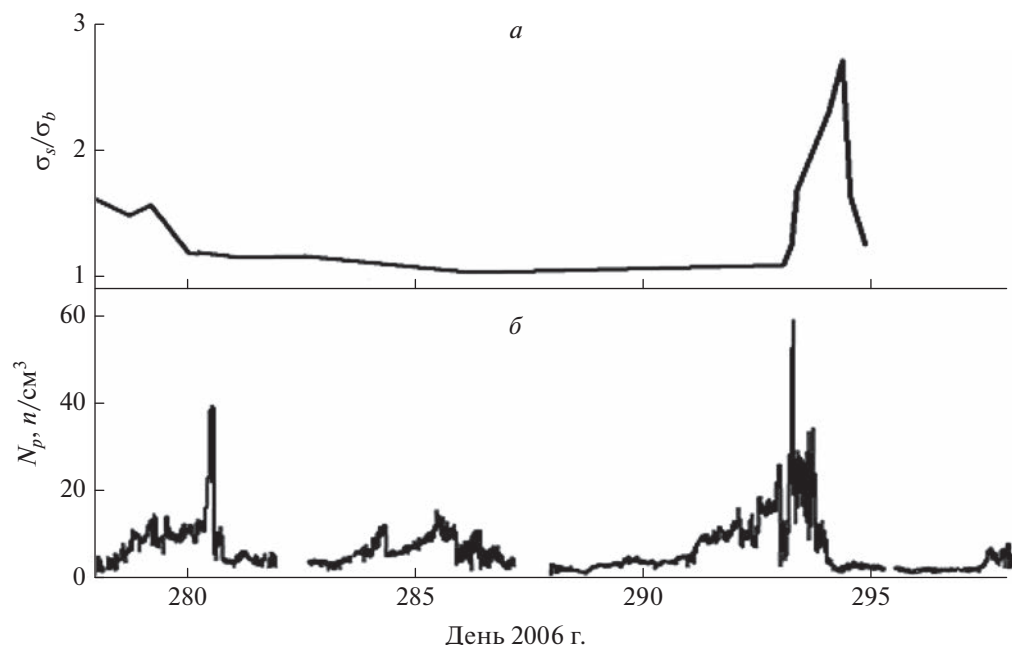


Рис. 1. Вариации частоты сигналов X-диапазона КА MEX и КА VEX при зондировании околосолнечной плазмы (а) и временные зависимости концентрации протонов в околоземной космической плазме по данным ИСЗ Wind (б) в период с 5 по 25 октября 2006 г.

ций частоты σ достигало 2 раз по отношению к невозмущенным условиям σ_b (рис. 1а). При вращении Солнца корональный источник возмущения с восточной стороны переходит на западную сторону Солнца и 21 октября (DOY 294, UT = 00:30, полное время 294.02) эта область оказывается в центре западного лимба, а возмущение наблюдается на минимальном гелиоцентрическом расстоянии $R = 7.54$ радиусов Солнца R_S . В указанный момент времени при зондировании околосолнечной плазмы сигналами другого космического аппарата (спутника Венеры Venus Express), было зарегистрировано сильное увеличение флуктуаций частоты, которое превышало фоновый уровень в 4 раза и более чем в 2 раза превышало флуктуации на восточном лимбе (DOY 279.7). В последнем случае трасса радиозондирования была удалена от Солнца на существенно большее расстояние ($R = 20.3$ радиуса Солнца R_S). Необходимо заметить, что промежуток времени между двумя максимумами флуктуаций частоты зондирующих плазму радиосигналов составляет 14 сут, что близко к половине номинального периода вращения Солнца ($T = 27$ сут).

Из рисунка 1б следует, что фоновое значение концентрации протонов не превышает 4 частиц в кубическом сантиметре (дни года 280–282; 288–290; 294–298). 11 октября 2006 г. (DOY 285, UT = 12:00, $t = 285.5$), т.е. через 5.8 сут после первого наблюдения сильных флуктуаций частоты на восточном лимбе зарегистрировано четырех-

кратное увеличение концентрации протонов N_p . Следует иметь в виду, что флуктуации частоты пропорциональны абсолютному уровню флуктуаций электронной концентрации. Время движения потоков плазмы от места генерации ($t_1 = 279.7$) до орбиты Земли ($t_2 = 285.5$) соответствует скорости $V = 300$ км/с, которая была измерена в это время на борту искусственного спутника Земли (ИСЗ) Wind [Ефимов и др., 2021].

Корональный источник повышенной турбулентности через четверть периода вращения Солнца после первой регистрации 6 октября 2006 г. перемещался к центральному меридиану по отношению к Земле (т.е. вблизи DOY 285.5).

Сжатая область возмущения достигает Земли в интервале DOY's 291–292, т.е. за 2–3 дня до времени регистрации максимума флуктуаций частоты на западном лимбе DOY 294, UT = 00:30. Вторым максимум концентрации заряженных частиц на околоземной орбите соответствует усилению флуктуаций частоты на западном лимбе, а созданный потоками возмущенной плазмы первый максимум концентрации протонов $N_{p \max}$ в DOY 285.5, можно условно назвать предвестником более сильного возмущения, созданного областью повышенной турбулентности 21 октября 2006 г. Время опережения составляет $t_{\text{advance}} = 294 - 285.5 = 8.5$ сут, что близко к четверти периода вращения.

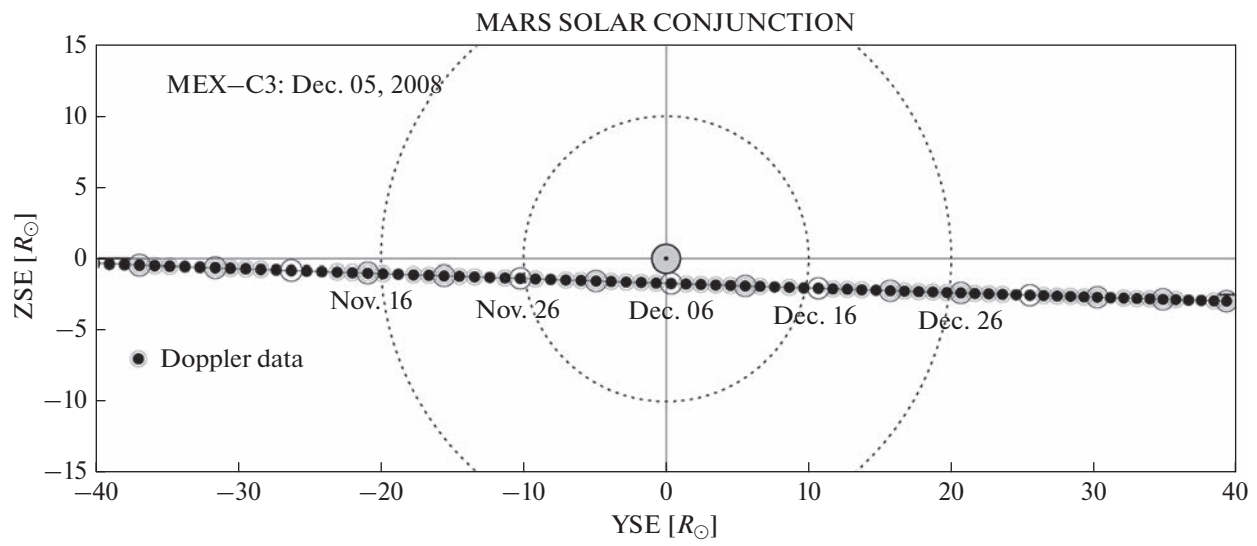


Рис. 2. Траектория движения спутника Марса Mars Express в картинной плоскости в период с 29 октября 2008 г. по 15 января 2009 г.

3. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ
РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ В 2008 г.

Геометрическая картина радиозатменных экспериментов с использованием заходившего за Солнце спутника Марса Mars Express показана на рис. 2, на котором для каждого дня 2008 г. показано положение проекций лучевых линий Космический аппарат-Земля на картинную плоскость для спутника Mars Express. По горизонтальной оси указаны расстояния R от центрального меридиана в единицах солнечного радиуса $R_{\odot}$, по вертикальной оси – расстояния от экваториальной плоскости. Большую часть времени зондировались области, расположенные к югу от экватора.

Общая геометрическая картина экспериментов радиозондирования характеризуется табл. 1, в которой даты проведения экспериментов указаны днями года (day of year, DOY).

Наибольшее приближение лучевой линии к центру Солнца достигалось 5 декабря 2008 г. на участке захода КА за Солнце (восточный лимб), при этом прицельное расстояние R равнялось 2.95 радиусам Солнца $R_{\odot}$. Минимальное расстояние на фазе выхода КА из-за Солнца (западный лимб) достигалось 7 декабря и составляло $2.4R_{\odot}$.

4. НАБЛЮДЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ
В ОКОЛОСОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЕ
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ В 2008 г.

При реализации экспериментов радиозондирования околосолнечной плазмы в 2008 г. область повышенной турбулентности наблюдалось дважды. Первый раз при заходе спутника Марса Mars Express за Солнце, когда зондировались области свехкороны, расположенные к востоку от центра Солнца 29 ноября 2008 г., (UT = 12:00, DOY 335.4). Второй раз – 13 декабря 2008 г. (UT = 00:00, DOY 348), когда область повышенной турбулентности вследствие вращения Солнца через 13.5 сут (половина периода вращения $T = 27$ сут) переместилась на западный лимб, а радиолиния MEX–Земля проходила на малом, $R = 5.6$ солнечных радиусов $R_{\odot}$, расстоянии от центра Солнца. При таком малом удалении трассы распространения зондировавших радиосигналов от области повышенной турбулентности увеличение уровня флуктуаций частоты σ_s/σ_b достигало больших величин по отношению к фоновому значению $q_m = 5.1$ (рис. 3а), в то время как при зондировании восточной области коэффициент усиления частотных флуктуаций был существенно меньше

Таблица 1. Условия радиозондирования околосолнечной плазмы сигналами спутника Марса Mars Express в 2008 г.

Дни 2008 г.		Прицельное расстояние $R/R_{\odot}$	
заход (Ingress)	выход (Egress)	заход (Ingress)	выход (Egress)
306–338	342–384	37.51–2.95	2.40–40.83
1 ноября–3 декабря	7 декабря 2008–18 января 2009		

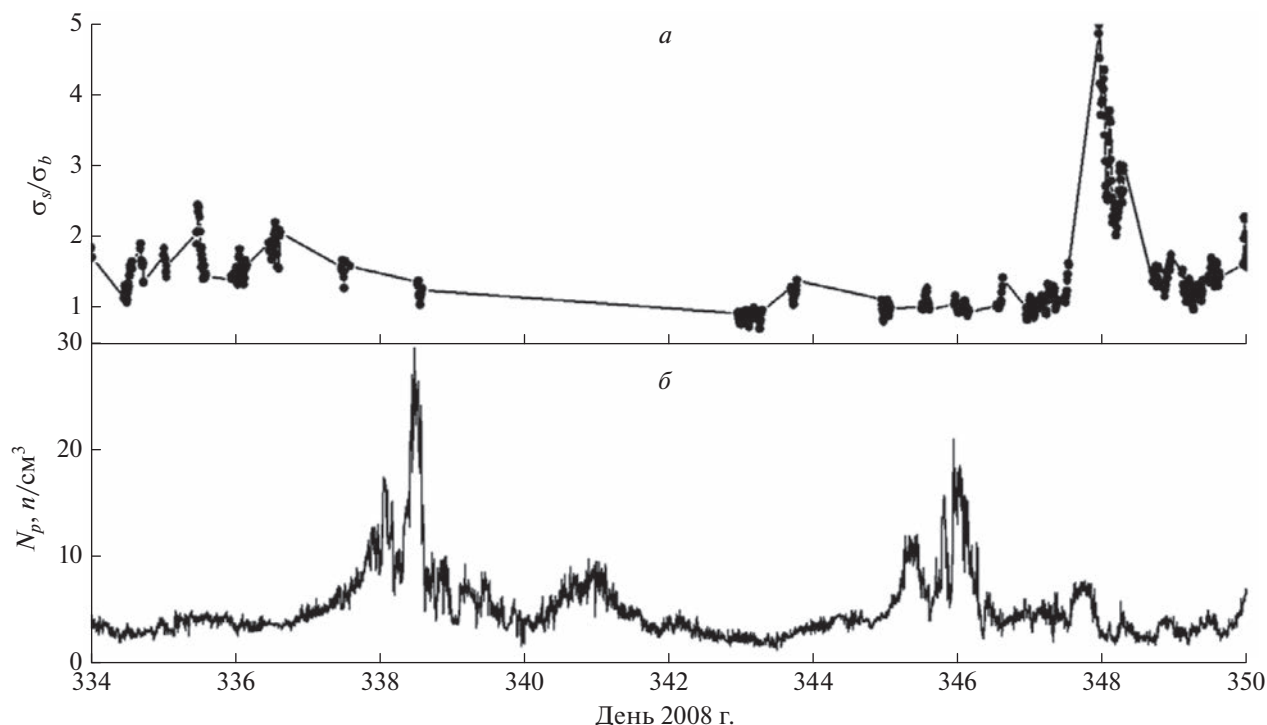


Рис. 3. Вариации частоты σ_f сигналов X-диапазона КА Mars Express при зондировании околосолнечной плазмы (а) и временные зависимости концентрации протонов околосолнечной космической плазмы по данным ИСЗ Wind (б) в период с 29 ноября по 15 декабря 2008 г.

($q_m = 2.5$), так как трасса радиозондирования была удалена от Солнца на существенно большее расстояние от центра Солнца ($R = 12R_s$).

5. ВОЗМУЩЕНИЯ НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В СМЕЖНЫЕ ПЕРИОДЫ

Временные вариации уровня флуктуаций частоты, зарегистрированные при зондировании околосолнечной плазмы сигналами спутника Марса Mars Express, были сопоставлены с материалами измерений концентрации протонов N_p , скорости движения потоков плазмы V и индукции магнитного поля B , выполненных бортовыми приборами спутника Wind в смежные периоды времени.

Рисунок 3б демонстрирует временные зависимости концентрации протонов, зарегистрированных на орбите Земли приборами ИСЗ Wind. Они сформированы под влиянием процессов, происходивших на восточном лимбе Солнца. При распространении потоков возмущенной плазмы по радиальным направлениям от их источника, начиная с DOY 335.4, формируется первый максимум концентрации протонов $N_{p \max 1} \approx 30 \text{ см}^{-3}$ в момент времени $t_3 = 338.5$ (рис. 3б), т.е. спустя 3.1 сут после начала их генерации, что соответ-

ствует скорости движения потоков возмущенной плазмы $V = 500 \text{ км/с}$. Фоновое значение концентрации протонов составляло в среднем 3 частицы в кубическом сантиметре, т.е. в 10 раз меньше, чем максимальная концентрации протонов $N_{p \max 1} \approx 30 \text{ см}^{-3}$.

Второй максимум концентрации протонов наблюдался 11 декабря 2008 г. (DOY 346), и его значение достигало $N_{p \max 2} \approx 20 \text{ см}^{-3}$, т.е. в 7 раз выше, чем фоновое значение. Первый максимум концентрации протонов опережал второй максимум частотных флуктуаций на 9.5 сут. Сдвиг между этими событиями определяется с малыми погрешностями (± 0.2 сут) и может рассматриваться как предвестник второго усиления. Временной сдвиг между повышениями концентрации протонов, как следует из рис. 3б, около 7 сут, что близко к четверти периода вращения Солнца.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Две серии наблюдений, выполненных в 2006 и 2008 гг., обнаруживают сходную картину временной динамики возмущений в солнечном ветре. Сначала возмущение наблюдается по усилению флуктуаций частоты просвечивающих радиосигналов в сверхкороне на восточном лимбе. Затем через время, превосходящее четверть оборота

Солнца, фиксируется значительное повышение концентрации протонов вблизи орбиты Земли. Примерно через четверть оборота в околоземной плазме происходит второе повышение концентрации протонов, а через время, меньшее четверти оборота, на западном лимбе происходит усиление флуктуаций частоты. Такая динамика позволяет сделать вывод, что наблюдавшиеся возмущения обусловлены долгоживущими структурами типа SIR (stream interaction regions), в которых усиления плотности плазмы связаны с областями взаимодействия медленных и быстрых потоков солнечного ветра. Если области SIR существуют в течение двух оборотов, то они носят название CIR (co-rotating interaction regions). Сжатые области SIR/CIR могут вызывать геомагнитные бури, причем их вклад в статистику геоэффективных возмущений в периоды низкой солнечной активности существенно превосходит вклад от распространяющихся возмущений вспышечной природы типа выбросов корональной массы [Ермолаев и др., 2017; Чашей и др., 2021]. Детектирование усиления флуктуаций частоты на восточном лимбе в экспериментах радиопросвечивания может рассматриваться как предвестник прихода SIR/CIR к Земле со временем опережения 7–8 сут. Коррелированный характер вариаций в сверхкороне и околоземной плазме позволяет заключить, что коротящиеся структуры формируются на гелиоцентрических расстояниях менее 10 радиусов Солнца, и что абсолютный уровень флуктуаций концентрации в сжатых областях существенно превышает фоновые значения. Дополнительные данные о справедливости этого утверждения представлены в публикации [Ефимов и др., 2016].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арманд Н.А., Ефимов А.И., Самознаев Л.Н., Бёрд М.К., Эденхофер П., Плеттмайер Д., Вольмут Р. Спектры и кросс-корреляция флуктуаций частоты радиоволн при зондировании околосолнечной плазмы сигналами космических аппаратов // Радиотехника и электроника. Т. 48. № 9. С. 1058–1070. 2003.
- Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю. Зависит ли генерация магнитной бури от типа солнечного ветра? // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 57. № 5. Р. 555–561. 2017.
<https://doi.org/10.7868/S0016794017050169>
- Ефимов А.И., Луканина Л.А., Самознаев Л.Н., Чашей И.В., Бёрд М.К., Петцольд М. Наблюдения коротящихся структур солнечного ветра при радиозондировании сигналами космических аппаратов ROSETTA и MARS EXPRESS // Космич. исслед. Т. 54. № 3. С. 195–203. 2016.
- 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., 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 аэрномия. Т. 61. № 3. С. 275–281. 2021.
- 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.
- Чашей И.В., Лебедева Т.О., Тюльбашев С.А., Субаев И.А. Геоэффективные возмущения в солнечном ветре вблизи минимума солнечной активности по данным двухлетней серии наблюдений межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН // Астрон. журн. Т. 98. № 11. С. 949–968. 2021.