

УДК 523.98

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ОБЛАСТИ ПОВЫШЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ СВЕРХКОРОНЫ СОЛНЦА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВ VENUS EXPRESS И MARS EXPRESS

© 2021 г. А. И. Ефимов^{1, *}, Л. А. Луканина¹, В. М. Смирнов¹,
И. В. Чашей², М. К. Бёрд^{3, 4}, М. Петцольд⁴

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

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

³Институт астрономии им. Аргеландера Боннского университета, г. Бонн, Германия

⁴Институт исследования окружающей среды Кёльнского университета, г. Кёльн, Германия

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

Поступила в редакцию 18.08.2020 г.

После доработки 31.08.2020 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

Проведенные в период с 6 октября по 6 декабря 2006 г. эксперименты по радиозондированию околосолнечной плазмы сигналами космических аппаратов Venus Express и Mars Express позволили получить данные о флуктуациях частоты радиосигналов для западного и восточного лимбов солнечной короны. В результате обработки данных измерений получены сведения об интенсивности частотных флуктуаций, которые обусловлены влиянием движущейся турбулентной плазмы. На фоне плавной радиальной зависимости отмечены сильные возрастания интенсивности флуктуаций частоты, которые могут быть объяснены прохождением через трассу радиосвязи сжатой части коротирующего возмущения. Временное запаздывание этих событий свидетельствует о связи высокого уровня флуктуаций частоты зондирующих плазму радиосигналов с одной и той же областью солнечной короны.

DOI: 10.31857/S0016794021030044

1. ВВЕДЕНИЕ

Многолетние исследования околосолнечной плазмы методом радиозондирования сигналами космических аппаратов (КА) обеспечили получение огромного объема информации, относящейся к областям формирования и ускорения солнечного ветра. Значительный прогресс в решении фундаментальных проблем физики солнечного ветра был достигнут в последние годы благодаря обеспечению проникновения радиосигналов на расстояния, примыкающие к солнечной короне.

В ноябре 2009 г. были выполнены эксперименты радиозондирования с использованием американского спутника Меркурия Messenger. Специфика экспериментов состоит в том, что космический аппарат полностью затмевается Солнцем, так что лучевая линия КА–Земля проходит в короне. При выполнении указанных экспериментов регистрация зондирующих сигналов проводилась до очень малых значений прицельного расстояния луча (Solar Offset Distances) R , составлявших 1.04 радиуса Солнца R_s относительно центра Солнца. При обработке проблема за-

ключалась в достоверности отождествления зарегистрированной информации с истинными характеристиками радиосигналов. Например, при малых прицельных расстояниях ширина спектральной линии зондирующих радиосигналов сантиметрового (3.56 см) диапазона увеличивалась до значений, превышающих десятки герц, и определение центра тяжести спектральной линии как значения частоты могло сопровождаться большими погрешностями. Поэтому к настоящему времени достоверные значения частоты зондированных сигналов были определены до прицельных расстояний, превышающих 1.38 радиуса фотосферы [Wexler et al., 2019]. По-видимому, необходимо разрабатывать специфические методики для определения характеристик зондирующих околосолнечную плазму сигналов для малых (меньше 1.3 солнечного радиуса) прицельных расстояний.

В период с 6 июня по 25 июня 2011 г. японский космический аппарат Akatsuki, двигаясь по гелиоцентрической орбите, заходил за Солнце, как это наблюдалось в наземных пунктах слежения за

Таблица 1. Условия радиозондирования околосолнечной плазмы сигналами КА VEX и MEX

Космический аппарат	Дни 2006 г.		Прицельное расстояние R/R_s	
	заход (Ingress)	выход (Egress)	заход (Ingress)	выход (Egress)
VEX	281–299 (8–26 октября)	304–340 (31 окт.–6 дек.)	18.95–4.11	4.95–36.14
MEX	279–291 (6–18 октября)	296–326 (23 окт.–22 нояб.)	20.23–6.43	3.20–35.07

космическими аппаратами [Ando et al., 2015]. При этом линия радиосвязи КА–Земля приближалась к Солнцу с западной стороны, так что 25 июня 2011 г. расстояние между радиолинией и центром Солнца (прицельное расстояние) составило 1.52 радиуса Солнца. После 25 июня 2011 г. КА стал удаляться от Солнца (фаза выхода), и 8 июля 2011 г. прицельное расстояние R составило 12.2 радиуса Солнца. В период между 6 июня и 8 июля 2011 г. было выполнено 16 экспериментов по радиозондированию солнечного ветра сигналами КА Akatsuki, во время которых регистрировалась частота зондирующих сигналов сантиметрового диапазона. Как и в случае с КА Messenger, длина волны составляла $\lambda = 3.56$ см.

В работах [Wexler et al., 2019; Ando et al., 2015] основное внимание было уделено радиальным профилям дисперсии флуктуаций частоты просвечивающих сигналов. Однако, как показано в работе [Ефимов и др., 2019], в экспериментах достаточно большой длительности на фоне плавной зависимости возможна регистрация повторяющихся усилений флуктуаций частоты, связанных с одной и той же долгоживущей областью в короне.

В настоящей работе с целью детектирования повторяющихся возмущений проведен анализ данных радиопросвечивания околосолнечной плазмы сантиметровыми сигналами двух европейских космических аппаратов спутника Венеры Venus Express (VEX) и спутника Марса Mars Express (MEX), которые функционировали в период с 6 октября по 4 декабря 2006 г. и обеспечили получение информации о процессах, происходивших во внутреннем солнечном ветре на гелиоцентрических расстояниях от 3.2 до 36 солнечных радиусов. Проведено сравнение с данными локальных измерений на спутнике Wind, которое показывает, что аналогичные возмущения параметров плазмы могут регистрироваться и в околосолнечной плазме солнечного ветра.

2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ В 2006 г.

В течение 2006 г. были выполнены продолжительные серии экспериментов по радиозондиро-

ванию околосолнечной плазмы дециметровыми и сантиметровыми сигналами спутника Венеры Venus Express и спутника Марса Mars Express. Особенность экспериментов 2006 г. состоит в том, что измерения характеристик зондирующих радиоволн производились в один и тот же период времени – с 8 октября по 22 ноября 2006 г., но движение лучевой линии, соединяющей спутник VEX и наземный пункт, происходило в этот период с запада на восток, в то время как радиолиния MEX–Земля перемещалась с восточной стороны на западную. Эта ситуация иллюстрируется рис. 1, на котором для каждого дня 2006 г. показано положение проекций лучевых линий КА–Земля на картинную плоскость для КА VEX (рис. 1а) и MEX (рис. 1б). По горизонтальной оси указаны расстояния от центрального меридиана в единицах солнечного радиуса R_s , по вертикальной оси – расстояния от экваториальной плоскости. Большую часть времени в обоих случаях зондировались области, расположенные к северу 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 VEX–Земля к центру Солнца достигалось 26 октября 2006 г. (DOY 299), при этом прицельное расстояние R равнялось 4.11 R_s . Аналогичное значение для лучевой линии MEX–Земля достигалось 23 октября (DOY 296) и составляло 3.2 R_s .

Исследуемыми характеристиками зондирующих радиоволн являлись интенсивность (среднеквадратичное отклонение) и форма временных спектров флуктуаций частоты X-диапазона. Временные вариации флуктуаций частоты сопоставляются с материалами измерений концентрации протонов N_p , скорости движения потоков плазмы V и индукции магнитного поля B бортовыми приборами спутников Земли Wind и ACE в смежные периоды времени.

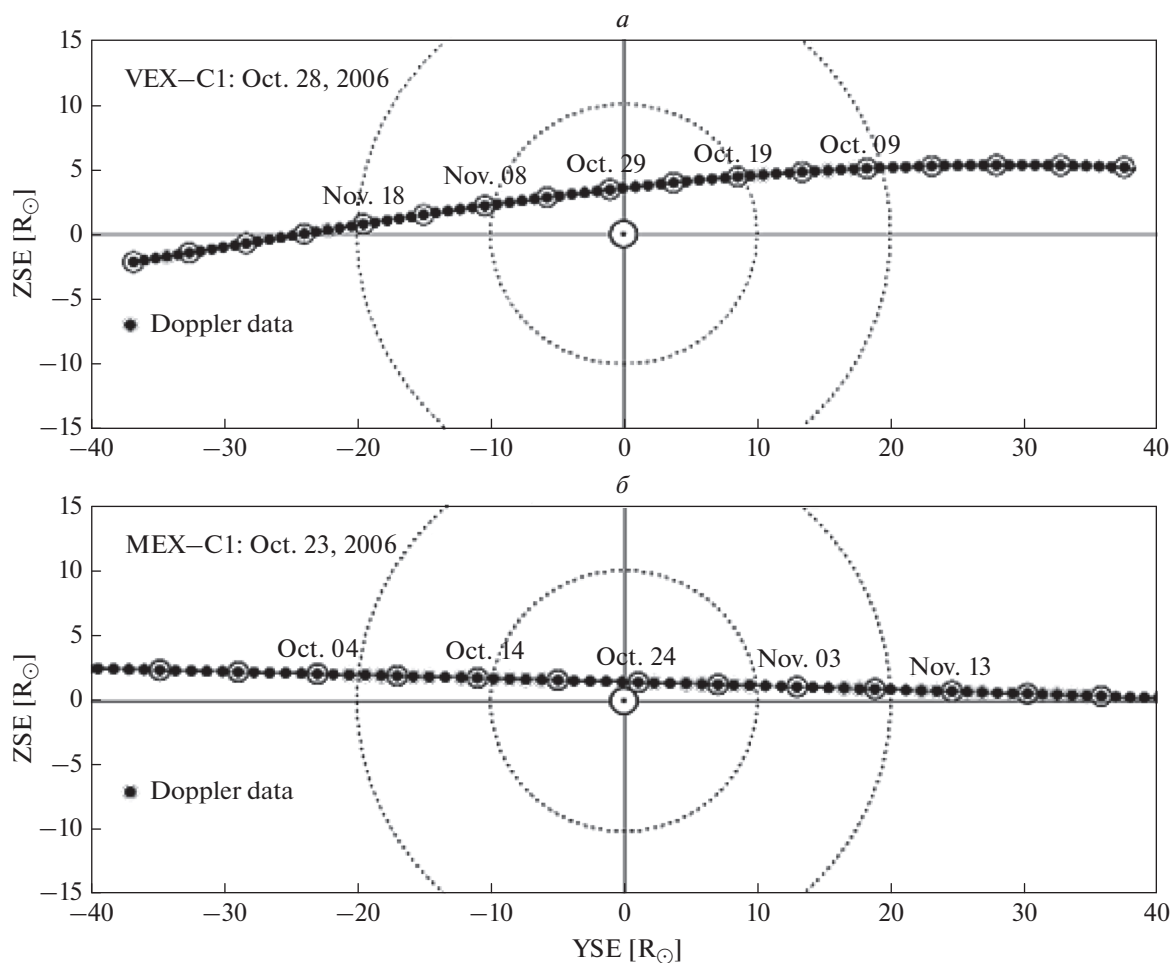


Рис. 1. Траектории движения спутников Venus Express (а) и Mars Express (б) в картинной плоскости.

3. НАБЛЮДЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В ОКОЛОСОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЕ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

При обработке материалов измерений характеристик зондирующих околосолнечную плазму радиосигналов КА Venus Express и Mars Express в 2006 г. на фоне плавных зависимостей характеристик радиоволн были зарегистрированы значительные локальные повышения флуктуаций уровня частоты и амплитуды. Причинами возмущений такого рода могли быть вращающиеся вместе с Солнцем структуры солнечного ветра [Ефимов и др., 2019].

На рисунке 2 представлена зависимость интенсивности флуктуаций частоты сантиметровых сигналов спутника MEX от прицельного расстояния. Видно, что повышенные флуктуации частоты регистрируются 6 октября 2006 г. (DOY 279), а также 8 и 9 октября (DOY 281–282). Это означает, что угловой размер области повышенных флуктуаций составляет $\sim 0.6^\circ$.

За счет вращения Солнца область повышенной турбулентности, вызвавшая сильные флуктуации частоты сигналов КА MEX на восточной стороне, переместилась на западную сторону и заняла сектор, соответствующий прицельным расстояниям между 9.5 и 7.7 радиусами Солнца. Связанные с этой же областью короны потоки плазмы вызвали возмущения сигналов космического аппарата Venus Express, линия радиосвязи с которым захватывала зону повышенной турбулентности. На рисунке 3 представлена временная зависимость интенсивности флуктуаций частоты X-диапазона сигналов КА Venus Express при зондировании областей сверхкороны, расположенных к западу от центра Солнца и от источника возмущенных потоков плазмы, прицельное расстояние R в день наблюдений (DOY 294) составляло $7.7 R_s$. Обработка данных флуктуаций частоты осуществлялась следующим образом: массив разбивался на участки по 2048 с, начало каждого последующего участка сдвигалось на 512 с относительно начала предыдущего. На горизонталь-

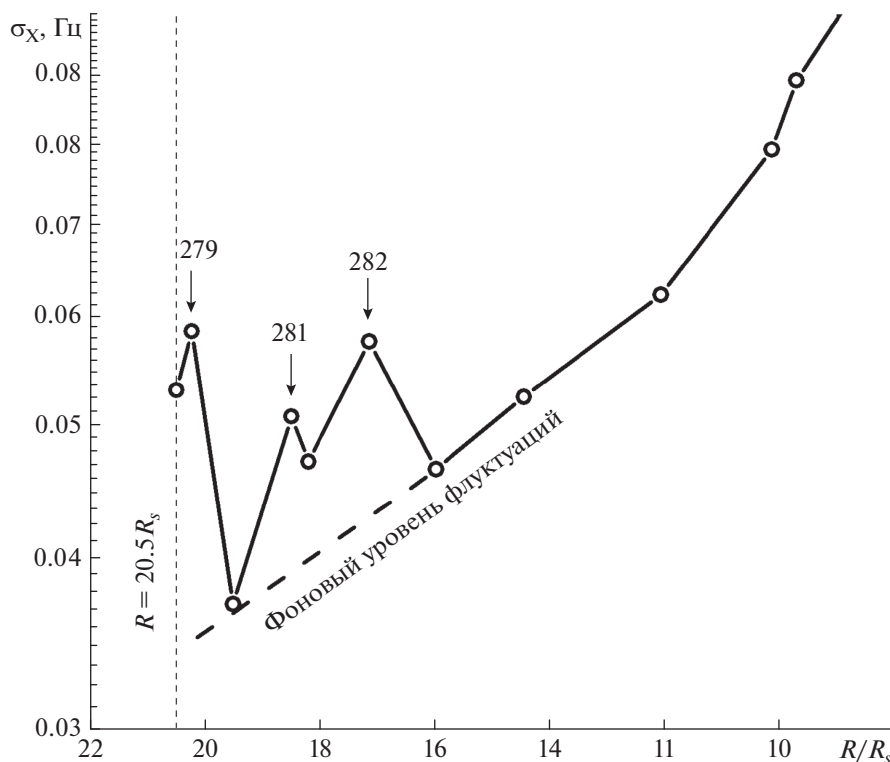


Рис. 2. Радиальная зависимость интенсивности флуктуаций частоты сигналов X-диапазона КА Mars Express при зондировании восточных областей солнечной короны.

ной оси рис. 3 указаны номера этих участков. Максимум флуктуаций $\sigma_x = 0.2$ Гц был зарегистрирован 21 октября 2006 г. DOY 294, 00:30 UT,

т.е. спустя приблизительно половину периода вращения Солнца ($T_0 = 27$ сут) после регистрации максимума σ_x на восточной стороне (DOY 279).

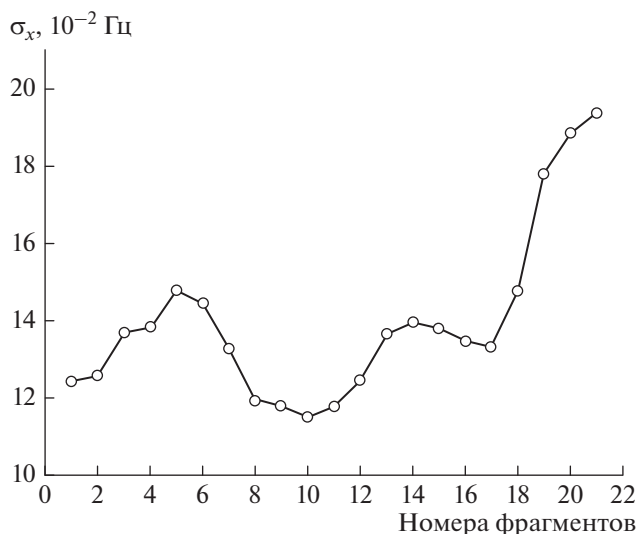


Рис. 3. Вариации частоты сигналов X-диапазона КА Venus Express при зондировании области, расположенной к западу от Солнца на прицельном расстоянии луча $R = (7.54-7.73) R_s$.

Область повышенной турбулентности перемещается с западной на восточную сторону после DOY 299, в это же время восточная область солнечной короны зондируется радиосигналами спутника Venus Express. В интервале с 3 ноября 2006 г. (DOY 307, 21:29 UT) по 4 ноября (DOY 308, 00:02 UT) наблюдается возрастание интенсивности флуктуаций частоты (рис. 4), интервал между регистрациями максимумов флуктуаций на западной и восточной сторонах составляет $308.0 - 294.0 \approx 14$ сут, что близко к половине периода вращения Солнца. Кроме того, эта дата отличается от даты первой регистрации повышенных флуктуаций на $308.0 - 279.7 \approx 28.3$ дня, что свидетельствует об одной и той же причине происхождения высокого уровня флуктуаций частоты зондирующей плазмы радиосигналов. Дополнительным доказательством является наличие в обоих случаях квазигармонических осцилляций с приблизительно одинаковыми периодами на близких гелиоцентрических расстояниях. Периодичность 27 сут показывает, что наблюдаемые усиления флуктуаций частоты обусловлены долгоживущей коротящей структурой: областью взаимодействия потоков с разными скоростями.

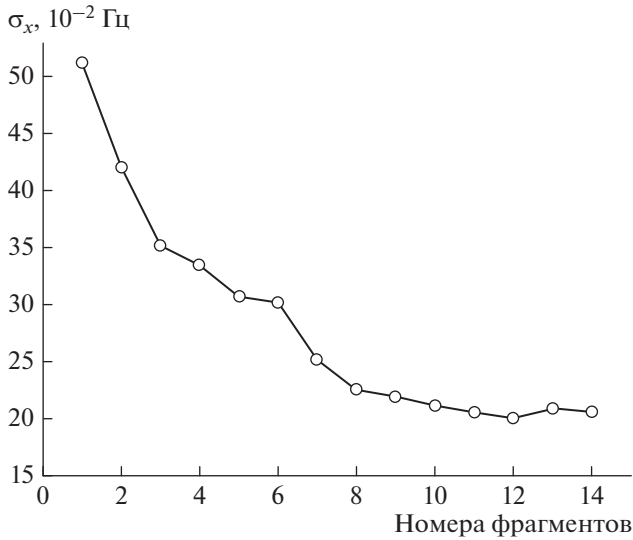


Рис. 4. Вариации частоты сигналов X-диапазона КА Venus Express при зондировании области, расположенной к востоку от центра Солнца на прицельном расстоянии $R = (7.25-7.34) R_S$.

4. ВОЗМУЩЕНИЯ НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Ниже временные вариации флуктуаций частоты сопоставляются с материалами измерений концентрации протонов N_p , скорости движения потоков плазмы V и индукции магнитного поля B бортовыми приборами ИСЗ Wind в смежные периоды времени. Данные этих измерений приведены на рис. 5.

Увеличение частотных флуктуаций зондирующих околосолнечную плазму радиосигналов наблюдалось 6 октября 2006 г. (DOY 279, 16:00 UT, восточный лимб) и 21 октября 2006 г. (DOY 294, 00:30 UT, западный лимб).

При вращении Солнца корональный источник области повышенной турбулентности, зарегистрированной впервые 6 октября 2006 г. (восточный лимб), переместился к центральному меридиану по отношению к Земле через $\Delta t_1 = 27/4 \approx 7$ сут, т.е. вблизи DOY 286. Сжатая область короткого возмущения достигнет Земли через некоторое время Δt_2 после прохождения корональным основанием центрального меридиана.

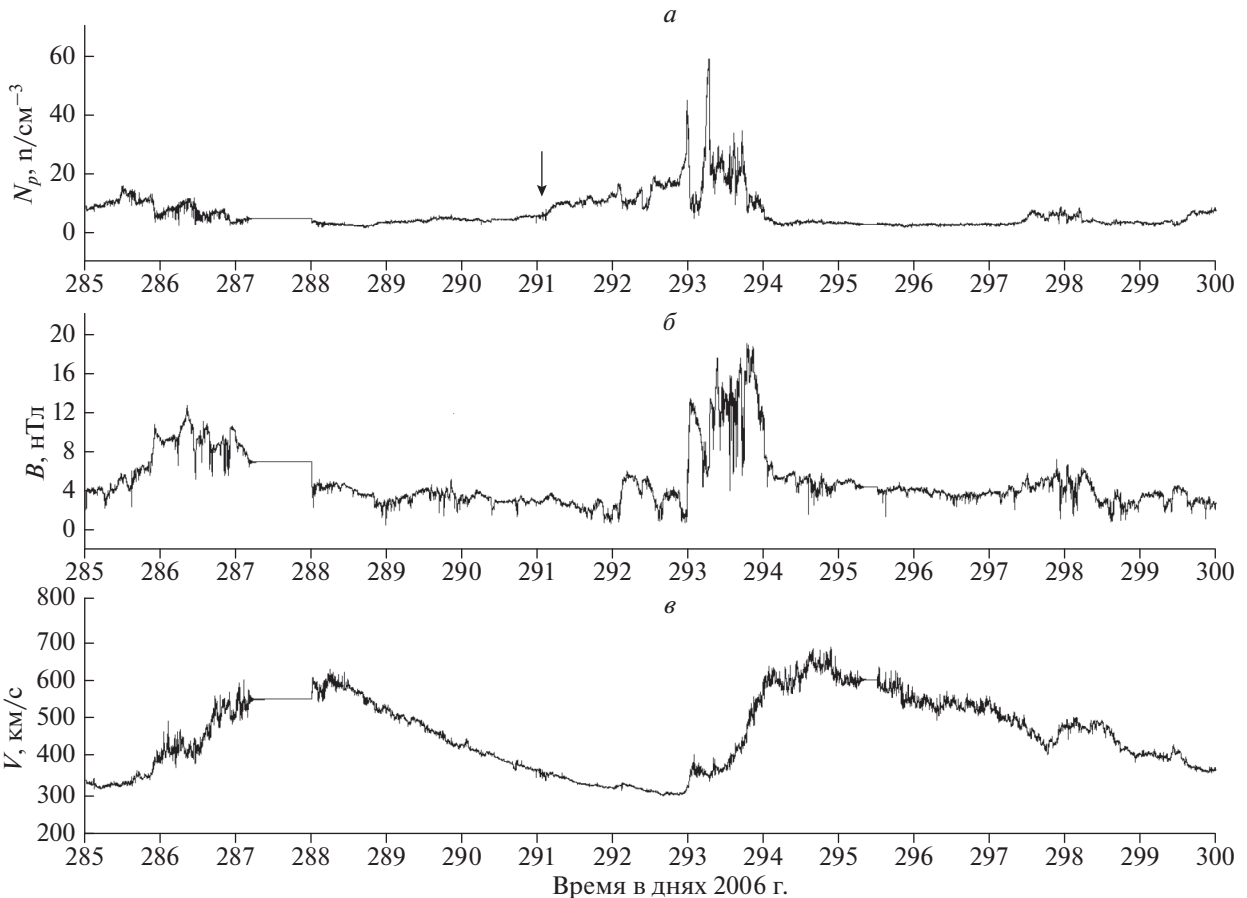


Рис. 5. Временные зависимости характеристик околоземной космической плазмы по данным КА Wind. (а) — концентрация протонов; (б) — индукция магнитного поля; (в) — скорость плазмы (2006, DOY 285–300).

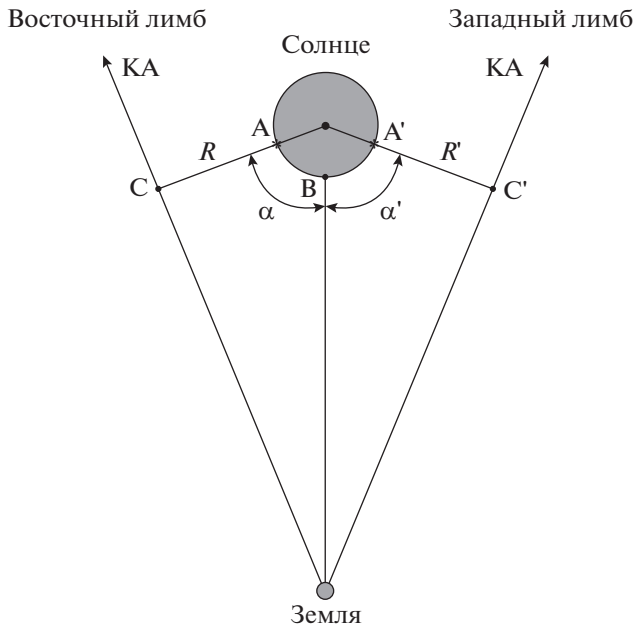


Рис. 6. Схема радиозондирования околосолнечной плазмы сигналами космических аппаратов при наличии вращающейся с Солнцем области повышенной турбулентности (т. А).

Как видно из рис. 5а, заметное увеличение концентрации протонов начинается в DOY 291, откуда следует оценка $\Delta t_2 \approx 5$ сут.

На рисунке 6 представлена схема реализации экспериментов радиозондирования околосолнечной плазмы. Точками А, А' обозначено положение коронального основания возмущенных областей, вызвавших усиления флуктуаций частоты, точка В расположена на центральном меридиане, для поворота от А к В и от В к А' требуется время Δt_1 . При этом интервал времени между усилениями флуктуаций частоты радиосигналов и концентрации околоземной плазмы составляет $\Delta t_E = \Delta t_1 + \Delta t_2$ при зондировании восточных областей. Для рассматриваемого события $\Delta t_2 \approx 5$ сут. Если зондируются западные области, то усиление флуктуаций частоты происходит на $\Delta t_W = \Delta t_1 - \Delta t_2$ позже усиления концентрации, так как усиление концентрации происходит на Δt_2 раньше попадания коронального основания возмущенного потока на центральный меридиан. Для найденных выше значений Δt_1 и Δt_2 величина Δt_W составляет $\Delta t_W \approx 2$ сут, что достаточно хорошо согласуется со временем регистрации усиления флуктуаций частоты в DOY 294 на западном лимбе. Отметим, что временному интервалу $\Delta t_2 \approx 5$ сут соответствует поворот Солнца на угол $\sim 70^\circ$.

Примем, что коротирующая структура связана со взаимодействием потоков, имеющих скорости V_1 и V_2 , $V_1 < V_2$. Тогда положение границы области

взаимодействия вблизи орбиты Земли определяется из условия

$$R_0 (V_1^{-1} - V_2^{-1}) = \Delta t_2, \quad (1)$$

где $R_0 = 1$ а. е. При найденном выше значении $\Delta t_2 \approx 5$ сут находим из (1) возможные оценки скоростей потоков: $V_1 \approx 250$ км/с и $V_2 \approx 800$ км/с. В целом с учетом недостаточной точности определения величины Δt_2 оценки скоростей представляются разумными, хотя скорость V_1 , возможно, несколько занижена, а значение V_2 завышено.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известны два основных типа крупномасштабных структур в плазме солнечного ветра: распространяющиеся (радиальные сильно нестационарные) возмущения, связанные со вспышками в короне, и коротирующие (азимутальные долгоживущие) возмущения. В работе [Ефимов и др., 2019] было показано, что в экспериментах радиопросвечивания могут наблюдаться усиления флуктуаций частоты, связанные с распространяющимися из активных областей солнечной короны выбросами плазмы. Серии измерений достаточной длительности позволили зафиксировать события, когда выбросы во внешней короне сопровождались возмущениями в околоземной плазме, вызванными выбросами из тех же активных областей. Проведенный выше анализ показывает, что эксперименты радиопросвечивания позволяют фиксировать возмущения другого типа: долгоживущие коротирующие области взаимодействия потоков солнечного ветра, имеющие разные скорости. При этом сначала наблюдается усиление частотных флуктуаций в восточных областях внешней короны, затем происходят возмущения в околоземной плазме и после этого регистрируются усиления флуктуаций частоты в западных областях короны. Интервал времени между возмущениями на восточном лимбе и околоземной плазме оказывается заметно больше интервала между возмущением в околоземной плазме и западным лимбом, а соотношение между величинами этих интервалов согласуется с 27-дневным периодом вращения Солнца. Таким образом, в данных радиопросвечивания находят проявление крупномасштабные возмущения обоих типов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0030-2019-0008.

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.
- *Ando H., Shiota D., Imamura T., Tokumaru M., Asai A., Isobe H., Pätzold M., Häusler B., Nakamura M.* Internal structure of a coronal mass ejection revealed by Akatsuki radio occultation observations // *J. Geophys. Res.* V. 120. P. 5318–5328. 2015.
- *David B. Wexler, Joseph V. Hollweg, Anatoli I. Efimov, Liudmila A. Lukanina, Anthea J. Coster, Juha Vierinen, Elizabeth A. Jensen.* Spacecraft radio frequency fluctuations in the solar corona: A MESSENGER–HELIOS composite study // *Astrophys. J.* 871:202 (13pp). 2019. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf6a8>