

УДК 523.98

НАБЛЮДЕНИЕ ВОЗМУЩЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУКТУР В ОКРЕСТНОСТИ СОЛНЦА И ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ МЕТОДАМИ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ И ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2020 г. А. И. Ефимов^{1, *}, Л. А. Луканина¹, И. В. Чашей², С. Ф. Коломиец¹,
М. К. Бёрд^{3, 4}, М. Петцольд⁴

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

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

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

⁴Институт исследования окружающей среды Кёльнского университета, Кёльн, Германия

*efimov@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 28.02.2020 г.

После доработки 27.03.2020 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

Эксперимент по радиозондированию околосолнечной плазмы сигналами космического аппарата *Mars Express* в 2013 г. был осуществлен в период с 4.III. по 31.V. Исследуемой характеристикой являлась частота сигналов сантиметрового, дециметрового диапазонов и дифференциальная частота. Зафиксирован ряд событий, когда интенсивность флуктуаций частоты зондирующих плазму сигналов в несколько раз превышала фоновые значения. Как показал анализ наблюдений солнечной активности, таких как усиление потока рентгеновского излучения и данные коронографа *SOHO LASC0*, это объясняется прохождением через трассу радиосвязи КА с Землей возмущенных плазменных потоков, генерируемых в короне Солнца. Проведено сопоставление данных радиопросвечивания с результатами измерений параметров околоземной плазмы с помощью КА *Wind* в смежные периоды времени. В результате анализа данных о протонной концентрации выяснилось, что вблизи Земли также наблюдались резкие возрастания как средних значений, так и флуктуаций этой характеристики. Временное запаздывание между событиями, наблюдавшимися в околосолнечной и околоземной плазме, показывает, что причиной возмущений является повышенная активность одной и той же корональной области, вращающейся вместе с Солнцем.

DOI: 10.31857/S0023420620060047

1. ВВЕДЕНИЕ

Метод радиозондирования является эффективным средством изучения солнечного ветра в областях его формирования и ускорения. Наиболее информативными с точки зрения получения сведений о солнечном ветре являются частотные флуктуации [1–3], которые имеют ряд преимуществ по сравнению с фазовыми и амплитудными измерениями [4]. Продолжительная серия экспериментов по радиозондированию околосолнечной плазмы сигналами космического аппарата *Mars Express* в 2013 г. позволила получить данные о флуктуациях частоты для низких и средних гелиоширот и для гелиоцентрических расстояний от 2.1 до 38.2 радиусов Солнца R_s . В работе [5] получены радиальные зависимости интенсивности флуктуаций частоты для измерений, выполненных в эксперименте с КА *Mars Express* в 2013 г. Установлено, что интенсивность флуктуаций частоты возрастает с уменьшением гелио-

центрического расстояния по закону, близкому к степенному. При этом на фоне регулярного тренда можно наблюдать резкие возрастания флуктуаций. В настоящей работе проведен детальный анализ событий, когда значения интенсивности частотных флуктуаций существенно превышали фоновые значения, типичные для измерений в 2013 г.

Начиная с 1995 г., в окрестности Земли ведутся наблюдения околоземной плазмы с помощью КА *Wind*, *GOES*, *SOHO*. Специальное оборудование, установленное на борту этих аппаратов, позволяет получать сведения о таких характеристиках как протонная концентрация, магнитная индукция, скорость солнечного ветра и др. Также на борту КА *SOHO* находится коронограф, с помощью которого ведутся оптические наблюдения за Солнцем. В данной работе проведен анализ средних значений и интенсивности флуктуаций протонной концентрации по данным КА *Wind*.

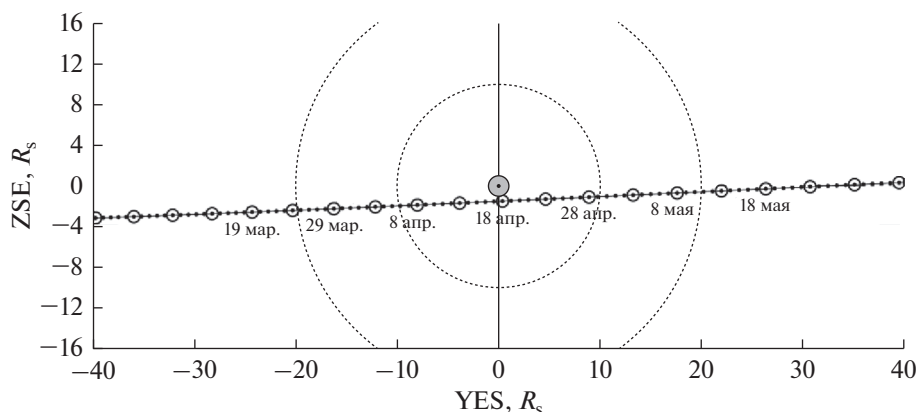


Рис. 1. Расстояние до трассы радиосвязи при проведении экспериментов по корональному радиозондированию с использованием КА *Mars Express* в 2013 г. [5].

Результаты наблюдений методами радиозондирования флуктуаций частоты сопоставляются с наблюдениями короны Солнца и околоземной плазмы.

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В 2013 г. была выполнена продолжительная серия экспериментов по радиозондированию околосолнечной плазмы сигналами европейского космического аппарата *Mars Express* (с 4.III.2013 г. по 31.V.2013 г.).

Внутренние области солнечного ветра просвечивались когерентными сигналами S -диапазона (длина волны $\lambda_1 = 13.1$ см) и X -диапазона (длина волны $\lambda_2 = 3.6$ см). Прицельные расстояния радиолуча изменялись в пределах от 36.8 до $2.4 R_s$ при заходе космических аппаратов за Солнце (восточный лимб) и от 2.1 до $38.2 R_s$ при выходе из-за Солнца (западный лимб).

Положение трассы радиосвязи с КА *Mars Express* относительно Солнца в картинной плоскости (относительно наблюдателя с Земли) показано на рис. 1.

В результате эксперимента по радиозондированию получены записи флуктуаций частоты с дискретностью 1 с. Исследуемыми характеристиками зондирующих радиоволн являлись интенсивность и форма временных спектров флуктуаций частоты и амплитуды S - и X -диапазонов, а также дифференциальной частоты этих сигналов.

КА *Wind* функционирует с 1994 г. по настоящее время и находится в точке Лагранжа $L1$ в системе Солнце–Земля. Усредненные за 60 с данные о протонной концентрации с 1995 г. находятся в открытом доступе (https://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov/ftp-browser/wind_3dp_1m.html). Авторами выполнен спектральный анализ и получены данные об интенсивности флуктуаций протонной концентрации в окрестности Земли для временного проме-

жутка, когда был осуществлен эксперимент по радиозондированию.

Временные вариации уровня флуктуаций частоты сравнивались с изменениями средних значений протонной концентрации и их флуктуациями. Идентификация индивидуальных событий производилась на основе сопоставления интенсивности флуктуаций частоты радиоволн во внешней короне Солнца с вариациями параметров плазмы в околоземном пространстве, аналогичный подход был реализован в работах [5, 6].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

По данным экспериментов радиозондирования с использованием КА *Mars Express*, выполненных в 2013 г., получены радиальные зависимости интенсивности флуктуаций частоты для S - и X -диапазонов волн и определено, что радиальное уменьшение средней интенсивности может быть аппроксимировано степенной функцией [5]. При этом для гелиоцентрических расстояний меньше $6 R_s$ влияние шумов солнечного происхождения на распространение радиоволн имеет минимальный уровень для X -диапазона. Поэтому далее анализируются именно эти данные. На рис. 2 представлена временная зависимость интенсивности флуктуаций частоты X -диапазона. Видно, что на фоне плавных радиальных зависимостей были зарегистрированы значительные локальные повышения флуктуаций частоты зондирующих радиосигналов. Причинами возмущений такого рода могут быть вращающиеся вместе с Солнцем (коротирующие) структуры солнечного ветра [6], а также выбросы корональной массы.

Для определения фоновых значений интенсивности флуктуаций для 2013 г. была проведена аппроксимация минимальных значений этой характеристики. Результаты представлены на рис. 3, где изображенная в линейном масштабе сплошная

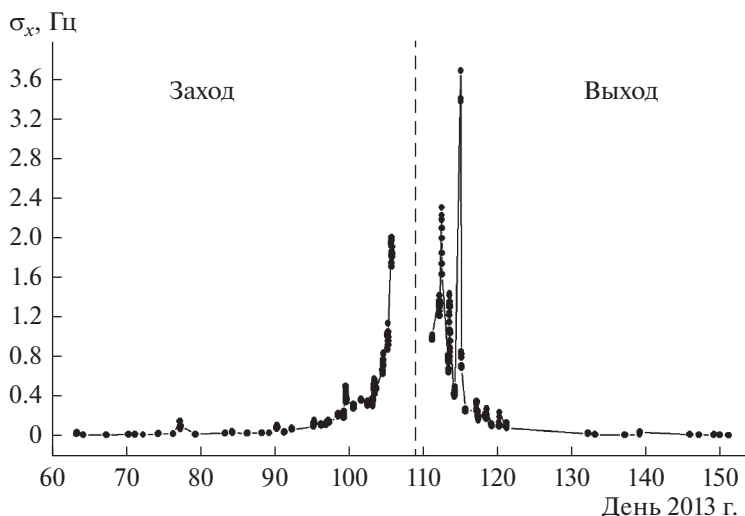


Рис. 2. Временная зависимость интенсивности флуктуаций частоты X-диапазона по данным радиозондирования сигналами КА *Mars Express* с 4.III.2013 г. по 31.V.2013 г. Пунктирной линией показан переход от фазы захода КА за Солнце к фазе выхода из-за него.

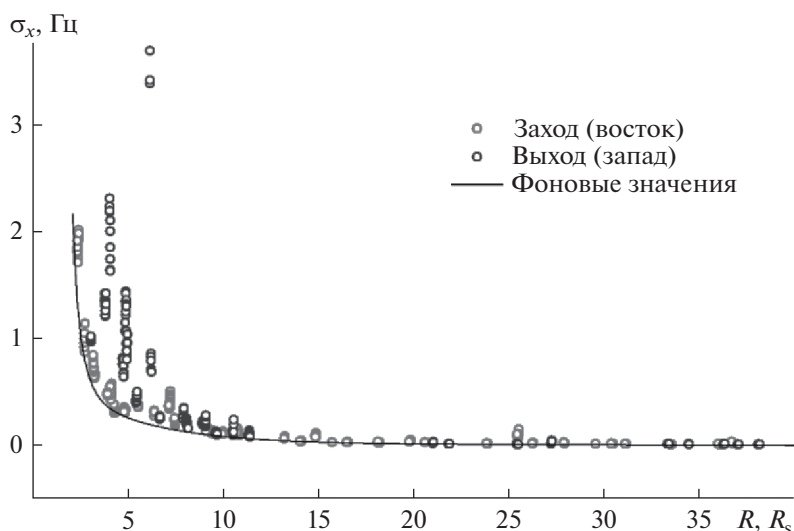


Рис. 3. Радиальная зависимость интенсивности флуктуаций частоты X-диапазона по данным КА *Mars Express* с 4.III.2013 г. по 31.V.2013 г.

кривая соответствует нижней огибающей, найденной аппроксимацией полиномом четвертой степени.

Сведения обо всех событиях, когда флуктуации частоты значительно превышали фоновые значения, внесены в табл. 1. Из представленных данных видно, что уже в первый день измерений было зарегистрировано сильное увеличение флуктуаций частоты, когда зондировались области сверхкороны, расположенные к востоку от центра Солнца и к северу от экваториальной плоскости.

Авторами был проведен анализ событий, предшествовавших усилению флуктуаций на трассе

радиосвязи 4.III.2013 г. По данным коронографа *SOHO LASCOS C2* получены снимки коронального выброса массы (CME – Coronal Mass Ejection), которые были взяты из каталога CME [8]. На рис. 4а видны возмущенные потоки плазмы, направленные в сторону трассы радиосвязи КА-Земля, проходящей к востоку от Солнца. В каталоге также содержатся сведения о скорости движения CME и его удаленности от Солнца (рис. 4б, 4в), по которым был идентифицирован выброс, ответственный за повышенный уровень флуктуаций на трассе радиосвязи. Интерполируя данные рис. 4б, можно рассчитать примерное местонахождение

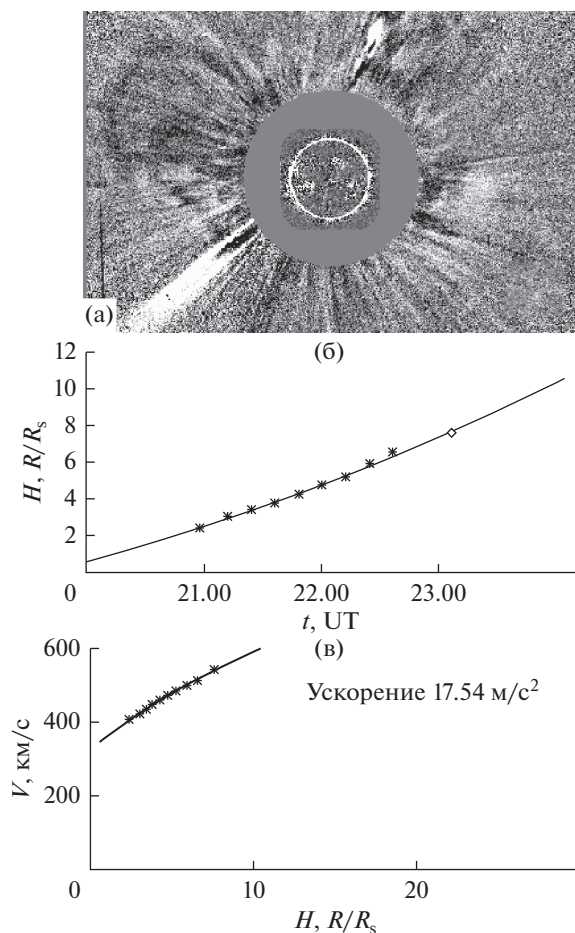


Рис. 4. Иллюстрация СМЕ по данным коронографа *SOHO LASCO C2* (а), временная зависимость радиального расстояния центральной части СМЕ (б) и ее скорость (в) по данным наблюдений 3.ИИ.2013 г. и 4.ИИ.2013 г.

СМЕ для времени $T_s = 63.376$ сут, когда зафиксировано увеличение флуктуаций частоты на трассе радиосвязи, расстояние до которой составляло $36.7 R_s$. Учитывая деформацию и рассеяние облака, можно утверждать, что причиной повышенных значений флуктуаций частоты на трассе КА-Земля является корональный выброс, зарегистрированный на расстоянии около $2 R_s$ от центра Солнца 3.ИИ.2013 г. в 20.57 UT. Из представленных данных получена средняя скорость движения коронального выброса $\langle V \rangle = 562.5$ км/с на гелиоцентрических расстояниях от 11 до $36.7 R_s$.

На рис. 5 представлены временные зависимости характеристик космической плазмы в окрестности Земли: протонная концентрация (рис. 5а), дисперсия флуктуаций протонной концентрации (рис. 5б) и скорость солнечного ветра (рис. 5в). Резкое увеличение средних значений протонной концентрации (в 4 раза) отмечено 15.ИИ. (DOY 074). Это событие объясняется тем, что спустя 7 дней (четверть периода вращения Солнца) после СМЕ 3 марта, 10.ИИ., область повышенной активности довернулась на 90 градусов, при этом в сторону Земли произошел выброс корональной массы, достигший спутника *Wind* примерно через 5 сут.

На рис. 6 представлена иллюстрация перемещения возмущенной области солнечной короны за четверть периода вращения Солнца.

Сопоставив данные о скорости СМЕ и уверенную корреляцию флуктуаций частоты на трассе радиосвязи с характеристиками околоземной плазмы, можно утверждать, что возмущения, наблюдавшиеся около Солнца и вблизи орбиты

Таблица 1. Наблюдения повышенного уровня флуктуаций частоты X -диапазона на трассе радиосвязи КА *Mars Express*—Земля в период с 4.ИИ.2013 г. по 31.V.2013 г.

| DOY | Дата | Фоновые значения интенсивности флуктуаций частоты σ_x , Гц | Значения интенсивности флуктуаций частоты для максимумов σ_{max} , Гц | Время в долях суток t_s , дни | Прицельное расстояние R , R_s | Превышение фоновых значений, разы |
|-----------------------|-------|---|--|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Заход КА за Солнце | | | | | | |
| 063 | 4.ИИ | 0.007 | 0.0344 | 63.39478 | 36.702 | 4.9 |
| 077 | 18.ИИ | 0.014 | 0.15 | 77.29392 | 25.543 | 10.7 |
| 090 | 31.ИИ | 0.041 | 0.11 | 90.35921 | 14.914 | 2.7 |
| 095 | 5.IV | 0.072 | 0.16 | 95.35342 | 10.813 | 2.2 |
| 099 | 9.IV | 0.15 | 0.50 | 99.62817 | 7.292 | 3.3 |
| 103 | 13.IV | 0.33 | 0.578 | 103.45417 | 4.200 | 1.8 |
| 105 | 15.IV | 1.23 | 2.01 | 105.79337 | 2.458 | 1.6 |
| Выход КА из-за Солнца | | | | | | |
| 112 | 22.IV | 0.35 | 2.31 | 112.56969 | 4.095 | 6.6 |
| 113 | 23.IV | 0.27 | 1.44 | 113.61988 | 4.942 | 5.3 |
| 115 | 25.IV | 0.25 | 3.69 | 115.14848 | 6.205 | 14.8 |
| 117 | 27.IV | 0.19 | 0.35 | 117.27773 | 7.992 | 1.8 |
| 118 | 28.IV | 0.10 | 0.28 | 118.64088 | 9.151 | 2.8 |
| 120 | 30.IV | 0.075 | 0.24 | 120.34791 | 10.608 | 3.2 |
| 139 | 19.V | 0.008 | 0.044 | 139.29163 | 27.279 | 5.5 |

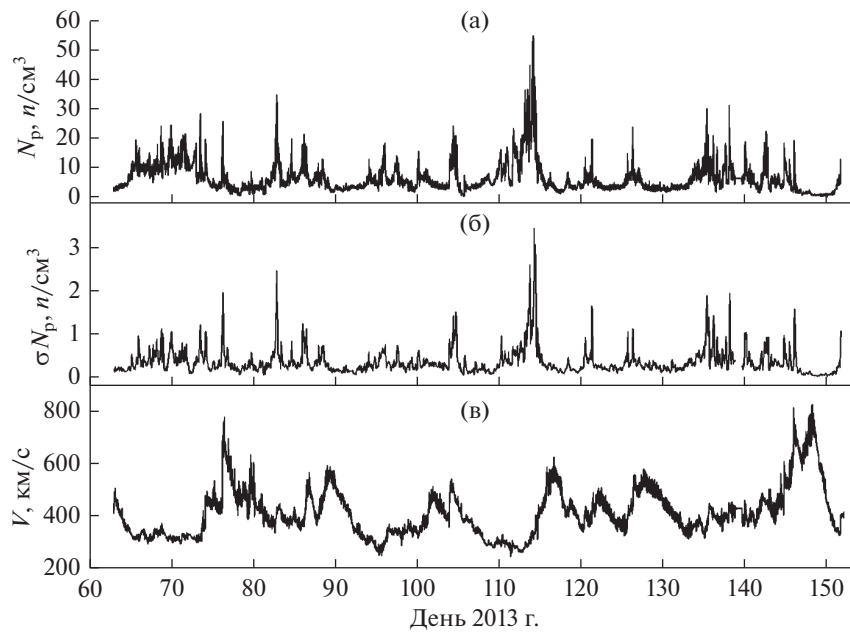


Рис. 5. Временная зависимость характеристик солнечного ветра в околоземном пространстве по данным КА *Wind* с 4.III.2013 г. по 31.V.2013 г.

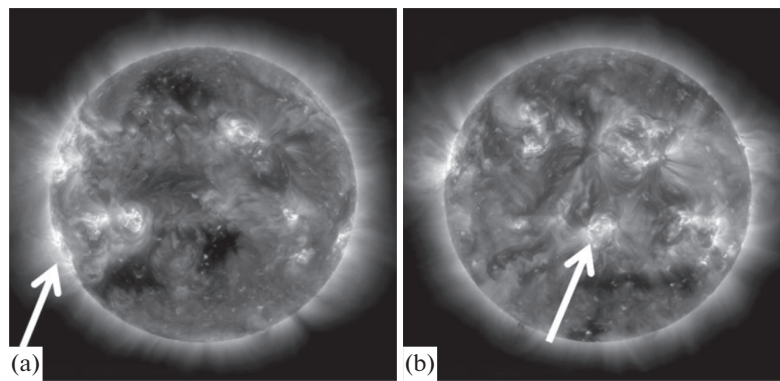


Рис. 6. Снимки Солнца 4.III.2013 г. (а) и 10.III.2013 г. (б) по данным Обсерватории солнечной динамики (SDO).

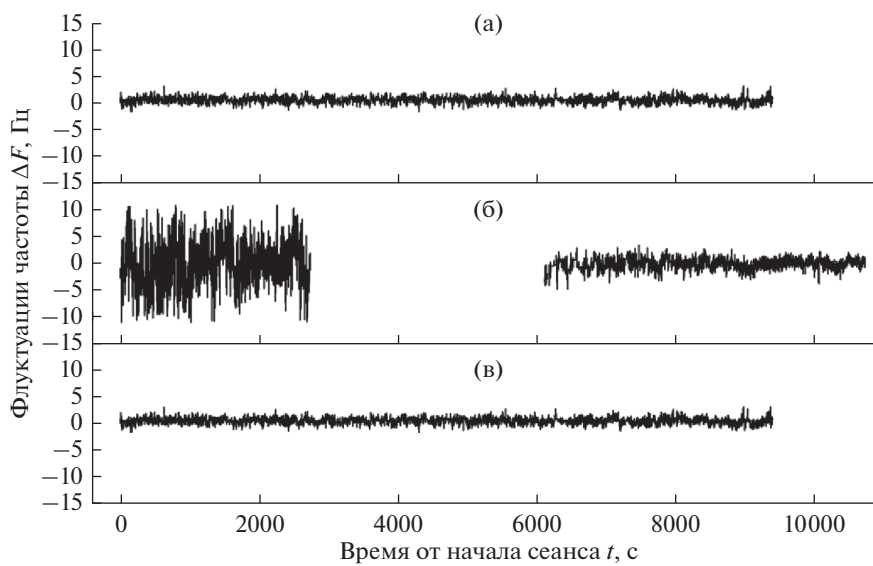


Рис. 7. Записи флуктуаций частоты сигналов КА *Mars Express* для 24.IV. и 25.IV.2013 г.

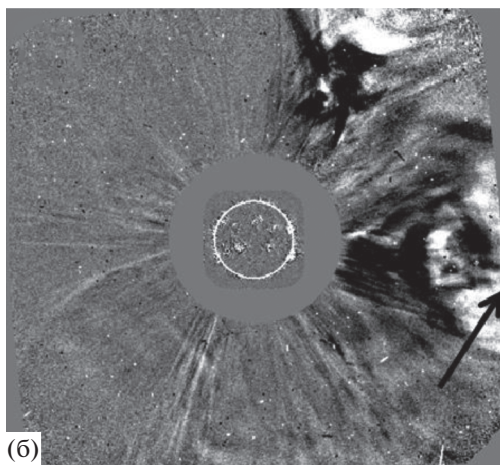
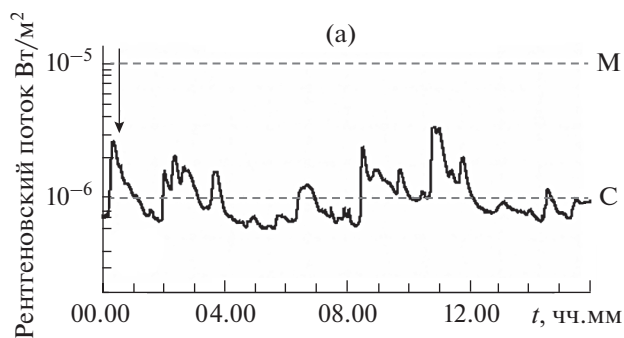


Рис. 8. Вспышка класса C2.6 по данным КА *GOES-15* (а) и СМЕ по данным коронографа *SOHO LASCO C2* (б) 25.IV.2013 г.

Земли, связаны с одной и той же активной областью в солнечной короне.

Самое яркое событие, когда интенсивность флуктуаций частоты на трассе радиосвязи увеличилась почти на полтора порядка, было отмечено при выходе КА *Mars Express* из-за Солнца на западном лимбе. На рис. 7 показаны временные зависимости флуктуаций частоты X -диапазона для спокойного солнечного ветра (24.IV.2013 г. – DOY 114 – рис. 7а) и возмущенных потоков (рис. 7б), когда интенсивность флуктуаций увеличилась на полтора порядка по сравнению с фоновыми значениями (измерения 03.16..04.02 UT 25.IV.2013 г. – DOY 115). Спустя 50 мин интенсивность флуктуаций снижается, но остается повышенной (в 3 раза). В тот же день с 18.00 до 19.35 UT 25.IV.2013 г. интенсивность флуктуаций частоты соответствуют спокойному солнечному ветру (рис. 7в).

На рис. 8 показаны события, ставшие причиной такого сильного возрастания интенсивности флуктуаций частоты на трассе радиосвязи 25.IV.2013 г. В 00.12 UT на Солнце произошла вспышка, которая была зарегистрирована КА *GOES-15*, по данным коронографа *SOHO LASCO C2* в оптическом диапазоне в 00.48 виден выброс корональной массы в сторону лучевой линии, а в

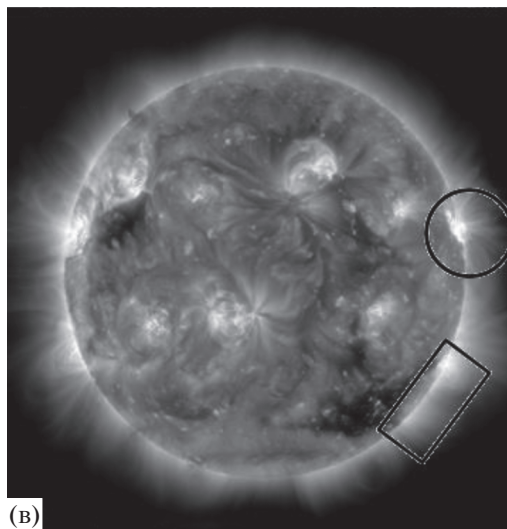
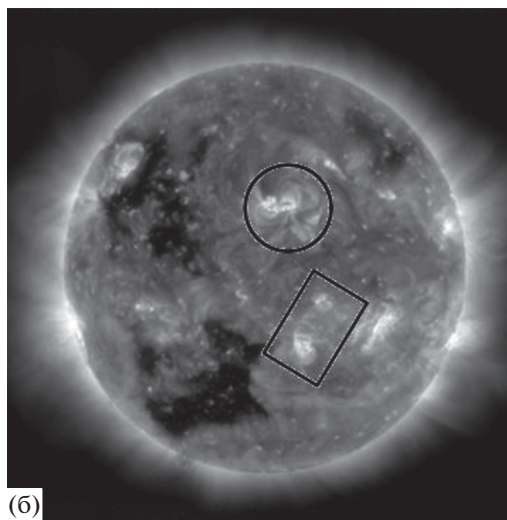
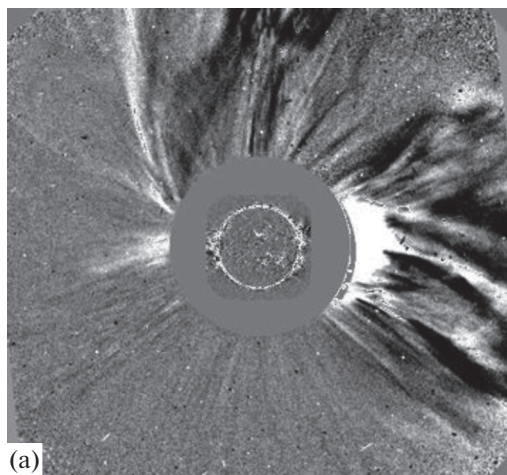


Рис. 9. СМЕ по данным коронографа *SOHO LASCO C2* 20.IV.2013 г. (а) и снимки короны Солнца по данным SDO 20.IV.2013 г. (б) и 25.IV.2013 г. (в).

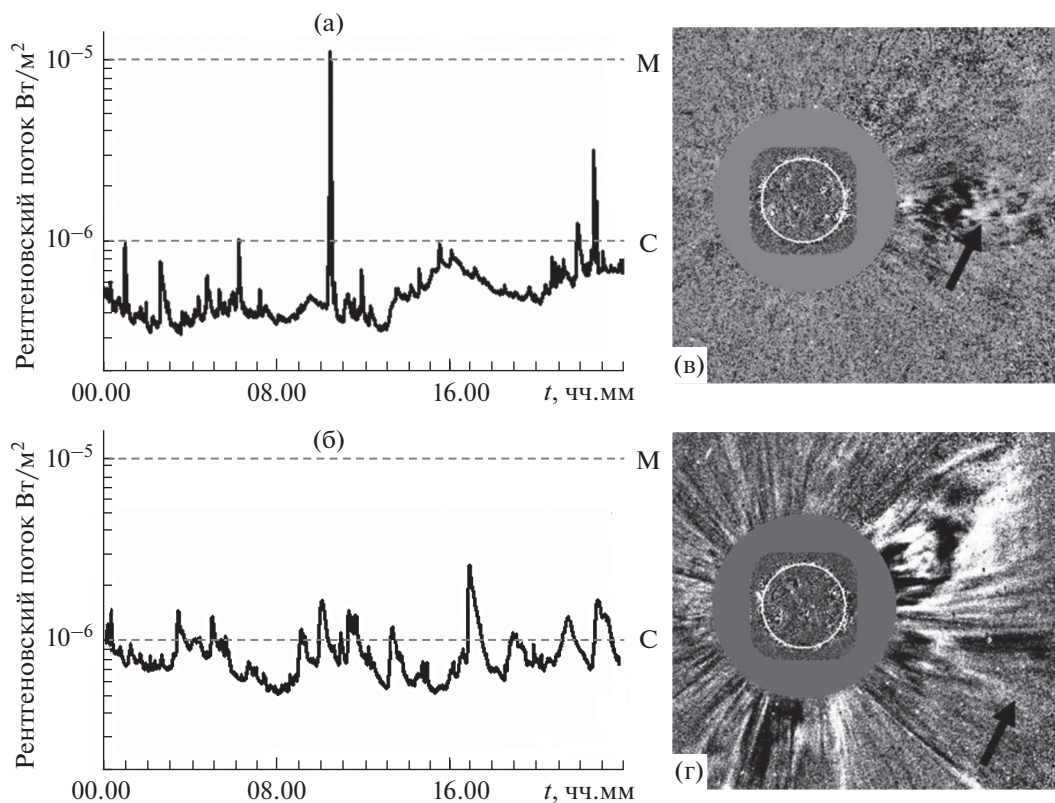


Рис. 10. Иллюстрация вспышек в рентгеновском диапазоне и CME 22.IV.2013 г. (а, в) и 24.IV.2013 г. (б, г).

03.12 CME достигает трассы КА-Земля. При этом в 00.36 в сторону трассы радиосвязи виден еще один выброс, перемещавшийся с большей скоростью, его влияние могло также повлиять на увеличение уровня флуктуаций.

Начиная с 20.IV.2013 г., ежедневно наблюдались солнечные вспышки класса С и М из одной и той же области короны. На рис. 9б, 9в эта область отмечена кругами. Прямоугольниками отмечены области, из которых практически в одно и то же время происходят выбросы корональной массы, направленные на трассу. Такая особенность обусловлена, по-видимому, тем, что указанные области являются частями общей магнитной структуры арочного вида, а нестационарные процессы происходят несимметричным образом.

Области располагались на видимой с Земли стороне Солнца примерно с 16 апреля (DOY 106), и можно видеть возрастание средних значений и дисперсии протонной концентрации в околоземной плазме примерно через 4–5 сут. Эти значения достигают максимума 24.IV.2013 г. (DOY 114), возрастающая более чем на порядок (CME 20.IV.2013 г. на рис. 9а). Спустя 5 дней эти же области переместились на западную сторону (рис. 9в), когда наблюдались сильные возмущения флуктуаций частоты радиоволн 25.IV.2013 г.

Ранее, 22.IV.2013 г. (DOY 112) и 24.IV.2013 г. (DOY 114) также наблюдались повышенные уровни флуктуаций частоты на трассе радиосвязи КА-Земля. На рис. 10 представлены наблюдения вспышек в рентгеновском диапазоне (рис. 10а, 10б) и выбросов корональной массы в оптическом диапазоне (рис. 10в, 10г) из одной и той же области, что и выброс 25.IV.2013 г. Положение трассы в картинной плоскости на момент прохождения CME показано стрелками. Отметим, что выбросы направлены в сторону Земли, и эффекты наблюдаются и на Земле, и на трассе радиосвязи. Запоздывание по времени измерений у Земли составляет примерно двое суток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прохождение через трассу радиосвязи возмущенных плазменных структур вызывает заметное возрастание интенсивности флуктуаций частоты сигналов по сравнению с фоновыми значениями. В период проведения экспериментов радиозондирования околосолнечной плазмы с помощью КА *Mars Express* в 2013 г. было зафиксировано 5 событий, когда флуктуации усиливались более чем в 5 раз. Также отмечены 2 наблюдения, когда интенсивность флуктуаций возрастала почти на порядок. Совместный анализ данных радиопросвечивания достаточной длительности и около-

земных измерений, выполненных с помощью КА *Wind*, позволяет проследить серию выбросов вспышечного происхождения, возникающих в одной и той же активной области короны. Вследствие вращения Солнца выбросы наблюдаются сначала на восточном лимбе, затем в околоземном пространстве и после этого на западном лимбе. Временное запаздывание между возмущениями в околоземном солнечном ветре и на восточном лимбе оказывается систематически больше, чем между возмущениями на орбите Земли и на западном лимбе, что подтверждает их связь с одной и той же активной магнитной структурой в короне.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Woo R.* Radial dependence of solar wind properties deduced from Helios 1/2 and Pioneer 10/11 radio scattering observations // *Astrophys J.* 1978. V. 219. P. 727–739.
2. *Ефимов А.И., Чашей И.В., Берд М.К. и др.* Турбулентность во внутреннем солнечном ветре по измерениям флуктуаций частоты радиосигналов космических аппаратов GALILEO и ULYSSES // *Астрономический журнал.* 2005. Т. 49. № 6. С. 544–554.
3. *Bird M.K., Chashei I.V., Efimov A.I. et al.* Outer scale of coronal turbulence near the Sun // *Advances in Space Research.* 2002. V. 30. № 3. P. 447–452.
4. *Яковлев О.И.* Космическая радиофизика. М: РФФИ, 1998.
5. *Ефимов А.И., Луканина Л.А., Чашей И.В. и др.* Квазипериодические осцилляции субмиллигерцового диапазона в околосолнечной плазме по данным когерентного радиопросвечивания // *Космич. исслед.* 2018. Т. 56. № 1. С. 6–16. (*Cosmic Research.* P. 1–10)
6. *Ефимов А.И., Луканина Л.А., Смирнов В.М. и др.* Возмущенные потоки во внутреннем солнечном ветре и вблизи орбиты Земли // *Космич. исслед.* 2019. Т. 57. № 6. С. 440–450. (*Cosmic Research.* P. 423–433)
7. *Ефимов А.И., Луканина Л.А., Самознаев Л.Н. и др.* Наблюдения коротящих структур солнечного ветра при радиозондировании сигналами космических аппаратов *Rosetta* и *Mars Express* // *Космич. исслед.* 2016. Т. 54. № 3. С. 195–203. (*Cosmic Research.* P. 185–193).
8. *SOHO LASCO CME CATALOG* [Электронный ресурс]: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2010_10/univ2010_10.html.