

УДК 523.98+551.521:523.9+551.590.21

ЯВЛЕНИЯ В МИКРОВОЛНОВОМ СОЛНЕЧНОМ ИЗЛУЧЕНИИ, НАБЛЮДАЕМЫЕ ВО ВРЕМЯ ОБРАЗОВАНИЯ И НАЧАЛЬНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ

О. А. Шейнер, В. М. Фридман

Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

В статье рассматриваются явления, наблюдаемые в микроволновом излучении Солнца на двухчасовом интервале, предшествующем регистрации коронографом корональных выбросов массы. Используются данные круглосуточных патрульных наблюдений сантиметрового и дециметрового излучения за 1998 и 2003 годы и отдельных событий января 2005 и декабря 2006 годов. Проанализированы временные характеристики явлений и спектральный состав спорадических компонент микроволнового солнечного излучения. Установлена статистическая связь между наблюдаемыми на этом интервале характеристиками спорадического радиоизлучения и параметрами корональных выбросов массы.

ВВЕДЕНИЕ

С момента открытия корональных выбросов массы их изучению была посвящена значительная часть солнечных исследований [1–5]. При этом для понимания процесса зарождения корональных выбросов массы было предложено большое количество моделей и проведено их численное исследование (см., например, [6–9]). Поскольку корональные выбросы массы — это по сути явления, связанные с трансформацией и эволюцией магнитных полей в солнечной атмосфере, очевидно, что магнитные поля на поверхности Солнца играют важную роль в образовании корональных выбросов, удержании плазмы и накоплении в них свободной энергии. Действительно, одними из характерных проявлений образования корональных выбросов массы являются изменения структуры магнитного поля в фотосфере и эволюция волокон (протуберанцев), проявляющиеся в различных диапазонах электромагнитного излучения (см. [10–13]).

В то же время остаются недостаточно изученными явления, происходящие на стадии формирования и начального распространения корональных выбросов массы, проявляющиеся в переходном слое солнечной атмосферы — хромосфере и нижней короне, где генерируется радиоизлучение сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн [14]. Очевидно, что анализ микроволнового излучения, формируемого в нижних слоях солнечной атмосферы, может служить эффективным методом исследования процессов образования и начального распространения корональных выбросов массы. При этом эволюция характеристик микроволнового излучения в широком диапазоне длин волн отражает развитие активности по высоте солнечной атмосферы. Такого типа активность регистрируется, например, в наблюдениях радиоизлучения метрового и дециметрового диапазонов длин волн и типична во время распространения корональных выбросов массы [15–17].

Ранее считалось, что солнечные вспышки являются наиболее характерным проявлением мощного энерговыведения на Солнце, поэтому основное внимание в исследованиях развития активности уделялось предвспышечным явлениям. В настоящее время становится понятным, что именно корональные выбросы массы являются глобальным явлением солнечной активности, вызывающим перестройку всей структуры атмосферы Солнца и выделение избыточной части магнитной энергии [18, 19]. Корональные выбросы массы и вспышки — два типа явлений мощного энерговыведения, различающиеся с точки зрения как локализации источника (зарождения), так и

масштаба явления, формы выделения энергии, но со сходными величинами выделяемой энергии ($10^{28} \div 10^{32}$ эрг) и временными масштабами (от минут до нескольких часов). Эти явления связаны между собой, но, скорее, можно говорить об их ассоциативной, чем жёсткой, связи (см. работы [20, 21] и ссылки в них). Развитые ранее методы изучения отчётливых радиоявлений, предшествующих мощным солнечным вспышкам [22], позволяют подобным же образом исследовать микроволновые явления, наблюдаемые перед корональными выбросами массы.

Здесь необходимо пояснить терминологию, которой мы пользуемся.

С точки зрения практического прогнозирования под предвестником понимается прогностический параметр, выявленный со статистической достоверностью и используемый в алгоритме количественного прогноза. Согласно определению [23] предвестниками (precursors) часто называют группу явлений солнечной активности, происходящих на интервалах времени, более длинных, чем импульсная (flash) фаза, но более коротких, чем процесс эволюции активной области, и представляющих собой непрерывные изменения, переходящие во вспышку. Их относят к категории отчётливых (distinct) событий. Мы в данном исследовании используем термин «предвестник» для описания явлений в радиоизлучении Солнца, предшествующих регистрации коронографами корональных выбросов массы и способных играть роль прогностического параметра после соответствующего статистического анализа.

В [24] было впервые заявлено о существовании спорадического микроволнового излучения (сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн) перед регистрацией корональных выбросов массы. Наиболее характерный интервал времени между наблюдаемыми в течение 1989 года радиопредвестниками в обсерватории «Зимёнки» и регистрацией корональных выбросов массы на коронографе/поляриметре SMM составил $20 \div 60$ мин.

Статистический анализ данных наблюдений радиоизлучения Солнца в обсерватории «Зимёнки» за 1980 и 1984–1989 годы на двухчасовом интервале перед регистрацией коронографом SMM корональных выбросов массы показал, что наиболее часто такие предвестники наблюдаются именно в 60-минутном интервале перед регистрацией выбросов [25]. Эти выводы согласуются с оценкой времени распространения корональных выбросов массы от поверхности Солнца до расстояния, равного приблизительно двум солнечным радиусам (поле зрения коронографа; см., например, [6]). Анализ спорадического радиоизлучения перед мощными энерговыделениями проводился как в случаях, когда корональные выбросы массы ассоциировались со вспышками, так и при наличии только мощных вспышек. Обнаружено, что микроволновые предвестники более часто (приблизительно в 4 раза) наблюдаются перед мощными радиовсплесками, сопровождающими корональные выбросы массы [26, 27], чем перед радиовсплесками, связанными только со вспышечными явлениями.

Анализ микроволновых явлений, предшествующих регистрации коронального выброса массы 19 октября 2001 года [28], показал, что их можно рассматривать в качестве предвестников выброса. Комплексный анализ коронального выброса проводился на основе данных радиоспектрографа (в диапазоне $25 \div 270$ МГц) и радиометров (в диапазоне $169 \div 9140$ МГц) ИЗМИРАН и НИРФИ, наблюдений на космическом аппарате SOHO (на телескопе EIT в линии $195 \text{ \AA}$ и коронографе белого света LASCO), а также H_{α} -гелиограмм обсерватории Канзелхохе (Kanzelhöhe, Австрия). Рассматриваемому событию предшествовало компактное (с размером порядка нескольких угловых минут) повышение яркости в линии $195 \text{ \AA}$. Проявлением этой активности стали слабые импульсные всплески дециметрового излучения на частотах 900 и 600 МГц, а также группа радиовсплесков III-го типа, которая охватывала весь диапазон спектрографа от 270 до 25 МГц. За этим последовало формирование (выброс) небольшого транзитного H_{α} -волокну, локализация которого совпадала с основной областью увеличения яркости в ультрафиолетовом диапазоне, далее область уярчения увеличилась в размерах, а H_{α} -волокно перестало быть видимым. Корональ-

ный выброс массы имел вид яркого, чётко очерченного, компактного (угловые размеры $15^\circ \div 20^\circ$) выброса, распространяющегося в короне с необычно низкой скоростью $V \sim 240$ км/с, а локализация по позиционному углу, форма и угловые размеры этого выброса хорошо соответствовали петлеобразной структуре, которая была видна на разностной гелиограмме в линии $195 \text{ \AA}$ над яркой областью эрупции.

Перед событиями, когда корональные выбросы массы и вспышки связаны, наблюдаются изменения спектрального состава микроволнового излучения, причём форма спектра этих изменений отражает нестационарные процессы в активной области [29]. Характерные временные интервалы изменений варьируются от секунд до десятков минут, что свойственно временам развития плазменной неустойчивости, пересоединения магнитных структур и энергосвободения [30]. Эти явления ассоциируются с формированием и первоначальным распространением корональных выбросов массы [31].

В настоящем исследовании основное внимание сосредоточено на изучении связи между характеристиками явлений в микроволновом диапазоне и наблюдаемыми параметрами корональных выбросов массы на двухчасовом временном интервале, непосредственно предшествующем регистрации рассматриваемых корональных выбросов массы ¹.

Анализ основан на радиоданных, полученных путём мониторинга явлений солнечной активности в радиоастрономических обсерваториях, входящих в Мировую службу Солнца.

1. ДАННЫЕ И МЕТОДОЛОГИЯ

Методологические принципы изучения микроволновых предвестников основаны на анализе первичных данных радиоастрономической обсерватории ФГНУ НИРФИ «Зимёнки» за 1980–1989 годы: обнаружен ряд спектральных и временных особенностей, превышающих порог чувствительности аппаратуры наблюдений, приведённый в [35].

Для более удобного понимания феноменологических свойств радиопредвестников корональных выбросов массы использовалась международная классификация радиовсплесков, приведённая в [36]. В статистическое исследование были включены данные всей Мировой службы Солнца в частотном интервале от 410 до $15\,400$ МГц.

Важно заметить, что сеть солнечных обсерваторий (в Сагаморе Хилл (Sagamore Hill), Лермонте (Learmonth), Сан Вито (San Vito) и Зимёнках) и частотный диапазон каждой обсерватории обеспечивают непрерывные данные в течение 24 часов (с перекрытием интервалов наблюдения между обсерваториями). Набор частот наблюдения позволяет провести исследование особенностей излучения как в дециметровом, так и в сантиметровом диапазонах длин волн. При анализе учитывались феноменологические типы радиовсплесков и их характеристики: интенсивность I и длительность T спорадической компоненты.

Информация о корональных выбросах массы была взята из каталога SOHO/LASCO [37]. В статистических исследованиях использовались день и время первого появления коронального выброса массы в поле зрения коронографа LASCO/C2, ширина выброса в картинной плоскости, угол раскрытия W и линейная скорость V .

¹ Заметим здесь, что явления в радиодиапазоне, предшествующие мощному энергосвободению, наблюдаются в течение различных временных интервалов: от нескольких дней (что типично для эволюции активной области в целом) до нескольких часов и десятков минут. Эти явления можно рассматривать как проявления волновых и колебательных процессов в атмосфере Солнца [32, 33]. Например, исследование эволюции интенсивности радиоизлучения в сантиметровом диапазоне длин волн показало, что перед регистрацией корональных выбросов массы во время экстремальных событий в январе 2005 года обнаруживается рост амплитуды долгопериодных (период $T > 20$ мин) пульсаций интенсивности [34].

Поскольку в проведённом исследовании ключевую роль играет время появления выбросов в поле зрения коронографа, необходимо иметь в виду следующие факты.

В соответствии с общепринятым мнением корональные выбросы массы приводятся в движение силой Лоренца вследствие наличия или динамического формирования магнитного жгута, т.е. корональные выбросы массы начинают распространяться с нижних слоёв солнечной атмосферы [5]. Коронограф LASCO/C2 регистрирует явления, попадающие в его поле зрения, на расстояниях примерно от 1,5 до 6 солнечных радиусов в картинной плоскости. Очевидно, интервал времени между формированием коронального выброса массы и его появлением в области регистрации зависит от параметров источника выброса, таких, как положение источника на диске, ширина коронального выброса, его размер и скорость как на высотах солнечной атмосферы, видимых коронографом LASCO/C2, так и на меньших высотах.

Например, корональные выбросы массы, возникающие близко к лимбу (как узкие, так и широкие), будут распространяться к полю зрения коронографа LASCO/C2 за время, зависящее, в первую очередь, от начальной скорости выброса. Однако корональные выбросы, возникающие близко к центру солнечного диска, имеют основную составляющую скорости распространения, перпендикулярную картинной плоскости. Поэтому для того, чтобы они наблюдались коронографом, необходимо дополнительное время для заполнения корональным выбросом поля затемняющего диска, а это приводит к существенной временной задержке регистрации корональных выбросов массы, причём величина такой задержки зависит и от начальных скоростей распространения корональных выбросов, и от их углового раскрытия.

Выбор интервалов исследования был обусловлен несколькими причинами. Во-первых, необходимо, чтобы корональные выбросы массы происходили часто. В то же время они должны быть разнесены во времени с тем, чтобы можно было говорить о сопровождающих их явлениях в радиодиапазоне как связанных именно с данным событием. Во-вторых, необходимо рассмотреть вопрос о специфике микроволнового излучения перед корональными выбросами массы на восходящей и нисходящей ветви солнечного цикла. Всем этим условиям удовлетворяют данные 1998 и 2003 годов [37]. Рассматривались также так называемые экстремальные солнечные события января 2005 и декабря 2006 годов, вошедшие в периоды специальных наблюдений Солнца.

Данные радиоастрономической обсерватории «Зимёнки», как и данные всей Мировой службы Солнца в рассматриваемом диапазоне частот, получены с помощью радиотелескопов с широкой диаграммой направленности — без пространственного разрешения. Для того, чтобы исследовать явления в радиоизлучении, предшествующие первому появлению в поле зрения коронографа вполне определённого коронального выброса массы, необходимо быть уверенным, что никакие другие корональные выбросы массы в течение рассматриваемого интервала времени не наблюдаются. Тогда изменения в наблюдаемом без пространственного разрешения радиоизлучении будут главным образом соответствовать активности, связанной с формированием рассматриваемого коронального выброса массы.

По этой причине из всех событий, представленных в каталоге [37], были выбраны изолированные корональные выбросы массы, удовлетворяющие следующему условию: ближайшие по времени корональные выбросы массы не регистрируются в течение, по крайней мере, 8 часов до и 6 часов после рассматриваемого события. Выбор такого временного интервала был подтверждён результатами работы [38], авторы которой проанализировали число радиособытий в зависимости от разности между временем первой регистрации коронарного выброса массы на коронографе (нулевой момент времени) и началом радиособытия за период с 1996 по 2000 год. В [38] показано, что распределение имеет 3 пика на временном интервале от 10 часов до и 10 часов после нулевого момента времени: первый пик лежит в интервале от 4 до 2 часов до нулевого момента, второй (наибольший) — в интервале с длительностью 2 часа до нулевого момента, третий — в интервале

от 4 до 6 часов после нулевого момента ².

Проводимое исследование направлено на поиск изменений в спорадическом радиоизлучении внутри двухчасового окна перед регистрацией корональных выбросов массы на коронографе.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Иллюстрация поведения потока радиоизлучения перед регистрацией коронального выброса массы на коронографе LASCO/C2 приведена на рис. 1. Данные получены путём патрульных наблюдений в обсерватории «Зимёнки» 17 января 2005 года. На рис. 1 видно, что, по крайней мере, за час до регистрации выброса наблюдаются небольшие события, а именно простые импульсные всплески (тип C) и постепенные одновременные подъёмы на нескольких частотах (тип R), медленные подъёмы и спады (типы RF и GRF) или серии всплесков (тип SER). Большинство этих событий широкополосны, поскольку наблюдаются на всех анализируемых частотах.

Результаты, представленные ниже, касаются статистического анализа спорадического радиоизлучения, зарегистрированного всей мировой сетью солнечных обсерваторий в течение 1998 и 2003 годов, на двухчасовом интервале перед регистрацией корональных выбросов массы на коронографе LASCO/C2.

Общее число изолированных событий в статистической выборке составило 295 (113 было зарегистрировано в 1998 году, 182 — в 2003 году). Установлено, что явления в микроволновом излучении предшествовали 68 корональным выбросам массы в 1998 году и 58 — в 2003 году. Описания этих событий включены в каталоги [40, 41]. Отметим, что при этом не найдено каких-либо значительных различий в характеристиках и динамике спорадического радиоизлучения перед регистрацией корональных выбросов массы на восходящей (1998 год) и нисходящей (2003 год) ветвях солнечного цикла [42].

Сравнение числа событий корональных выбросов массы и предшествующих явлений в микроволновом излучении показывает, что перед регистрацией изолированных выбросов на коронографе LASCO/C2 спорадическое радиоизлучение наблюдается приблизительно в 60 % случаев в 1998 году и в 30 % — в 2003 году. В то же время ранее при анализе спорадического радиоизлучения перед корональными выбросами массы, зарегистрированными коронографом SMM (данные 1984–1989 годов), обнаружено, что радиопредвестники наблюдаются перед 80 % выбросов [43]. Возможной причиной, объясняющей такое расхождение, может быть соотношение энергии корональных выбросов массы и чувствительности коронографа как детектирующего инструмента. Действительно, столь высокий в процентном соотношении уровень числа корональных выбросов массы с наличием предшествующего микроволнового спорадического излучения в 1984–1989 годах может найти объяснение в том, что многочисленные слабые (небольшие) корональные выбросы не были зарегистрированы менее чувствительным коронографом SMM, т. к. оказывались ниже порога чувствительности (либо инструментального, либо субъективного).

Эффект направленности радиоизлучения из локальных источников на Солнце [14] может привести к уменьшению уровня микроволнового излучения источников, расположенных близко к краю солнечного диска. Наконец, формирование и распространение корональных выбросов массы на обратной стороне Солнца вообще не позволяет регистрировать радиоизлучение источника формирования.

Анализ корональных выбросов массы на видимой стороне диска, не сопровождаемых явлениями в радиодиапазоне, показал, что в большинстве случаев это скоростные события с малым угловым размером (их средняя скорость составила около 700 км/с, а средняя угловая ширина

² Длительность последнего временного интервала соотносится с данными о времени восстановления характеристик структуры активной области после прохождения корональных выбросов массы [39].

событий менее 40°). Этот результат хорошо согласуется с выводами [44] о ширине корональных выбросов массы, не сопровождающихся излучением всплесков II-го типа.

Изолированные корональные выбросы массы, перед регистрацией которых наблюдались события в микроволновом радиоизлучении, были проанализированы для выяснения их связи со вспышками. В нашей выборке изолированных корональных выбросов массы с предшествующими событиями в микроволновом излучении зарегистрировано 12 выбросов, сопровождавшихся рентгеновскими вспышками, в 1998 году и 11 — в 2003 году. В соответствии с каталогом вспышек [45] большинство из них относятся к М-классу. Этот результат не противоречит работам [46, 47], согласно которым примерно 40 % вспышек класса М наблюдаются без регистрации корональных выбросов массы, в то же время все корональные выбросы массы, ассоциированные со вспышками Х-класса, были зарегистрированы коронографом LASCO. Поскольку ранее мы не нашли каких-либо заметных различий между поведением спорадического радиоизлучения перед корональными выбросами массы, ассоциированными со вспышками и не связанными с ними [48], дальнейшие статистические исследования проводились для всего массива данных.

Проиллюстрируем характерные признаки радиопредвестников в зависимости от физических параметров корональных выбросов массы (их угловой ширины и скорости распространения).

Для более детального исследования поведения радиопредвестников в сантиметровом и деци-

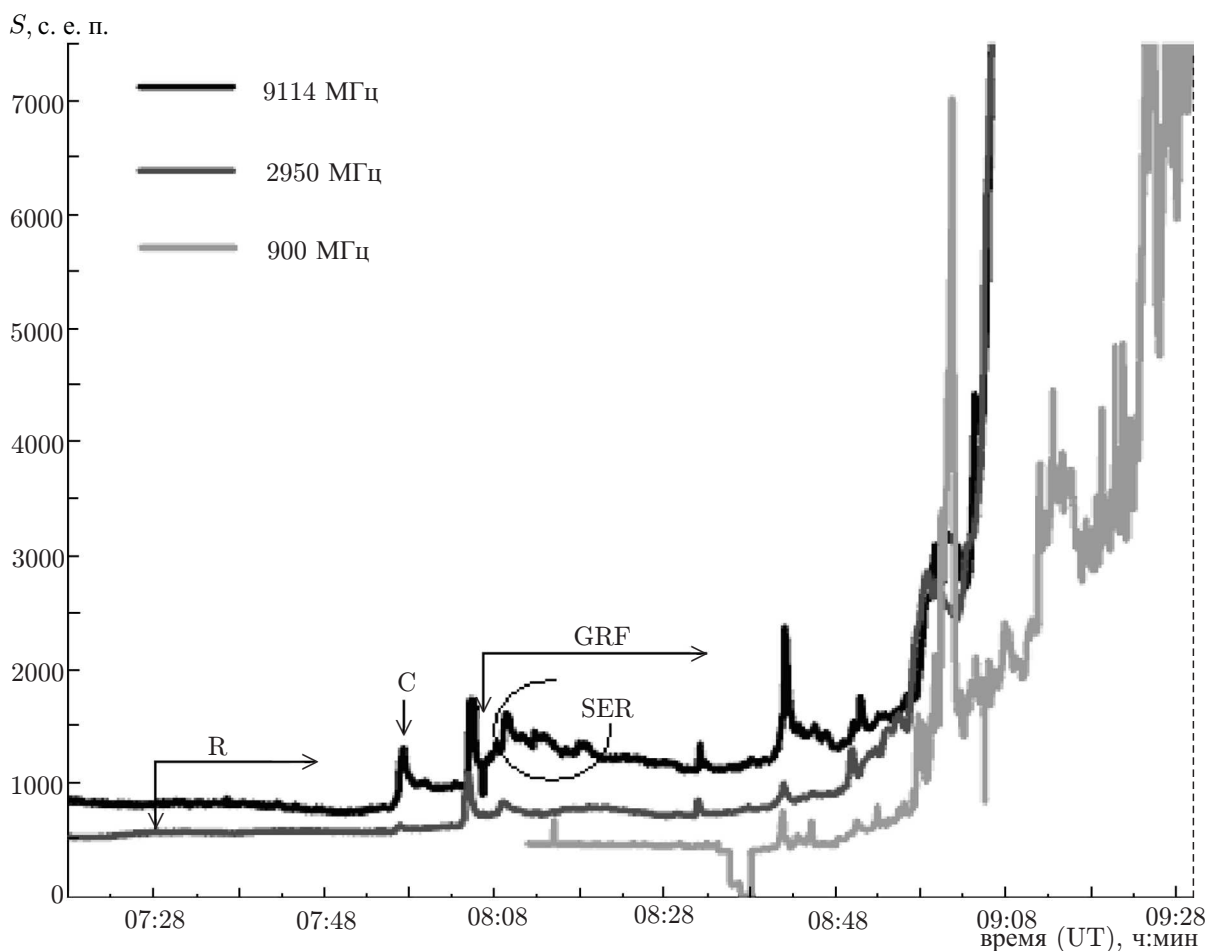


Рис. 1. Пример временного профиля потока солнечного радиоизлучения перед регистрацией коронального выброса массы на коронографе (данные радиообсерватории «Зимёнки» от 17.01.2005). Вертикальная пунктирная линия справа отмечает время первой регистрации коронального выброса массы (09:30:05 UT) на коронографе LASCO/C2

метровом диапазоне длин волн набор частот наблюдения (от 410 до 15 400 МГц) был разделён на 4 спектральных интервала, отличающихся приблизительно на 10 % от средней частоты наблюдений f_{mean} (400, 500÷600, 900 и 1 400 МГц в дециметровом диапазоне, 2 600÷3 000, 4 500÷5 000, 8 800÷9 500 и 15 000 МГц — в сантиметровом диапазоне длин волн). Пусть N — число спектральных интервалов каждого диапазона, в которых для каждого коронального выброса массы наблюдаются микроволновые предвестники. Радиосо-бытию, зарегистрированному разными обсерваториями в пределах одного выбранного спектрального диапазона, присваивается $N = 1$. Число спектральных интервалов $N \geq 3$ означает наличие предвестников в большей части сантиметрового (дециметрового) диапазонов длин волн. Такие предвестники считаются широкополосными (ширина интервала $\Delta f \sim f_{\text{mean}}$). Предвестники с числом спектральных интервалов меньше 3 ($N < 3$) считаются узкополосными ($\Delta f \ll f_{\text{mean}}$).

Ниже показаны результаты анализа зависимости числа спектральных интервалов, в которых наблюдаются радиопредвестники, от скорости (рис. 2) и угла раскрыва (рис. 3) последующих корональных выбросов массы (для примера приведены данные за 2003 год).

Распределение числа наблюдений N спорадического радиоизлучения на различных частотах от скорости корональных выбросов массы V (рис. 2) показывает, что перед выбросами со скоростями $V \geq 1500$ км/с наблюдаются широкополосные предвестники и в сантиметровом, и в дециметровом диапазонах длин волн.

Из рис. 3 видно, что перед корональными выбросами массы с угловым раскрывом, равным или больше 150° ($W \geq 150^\circ$) микроволновые предвестники широкополосны (ширина $W = 360^\circ$ соответствует событиям типа гало, т. е. таким выбросам, у которых наблюдается свечение вокруг затмевающего диска коронографа), причём распределения числа предвестников в сантиметровом и дециметровом диапазонах подобны.

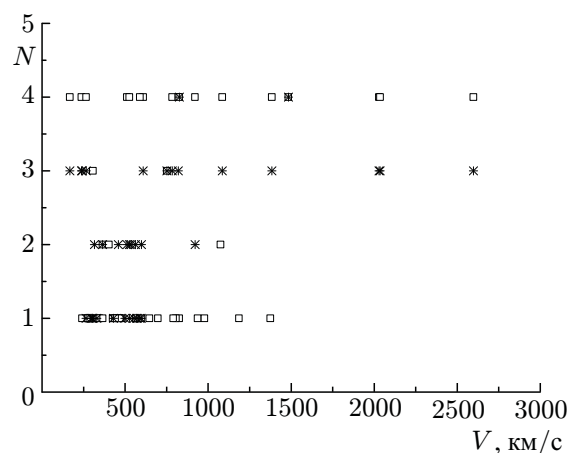


Рис. 2. Число спектральных интервалов в сантиметровом (□) и дециметровом (*) диапазонах, в которых наблюдаются микроволновые предвестники корональных выбросов массы, в зависимости от их скорости

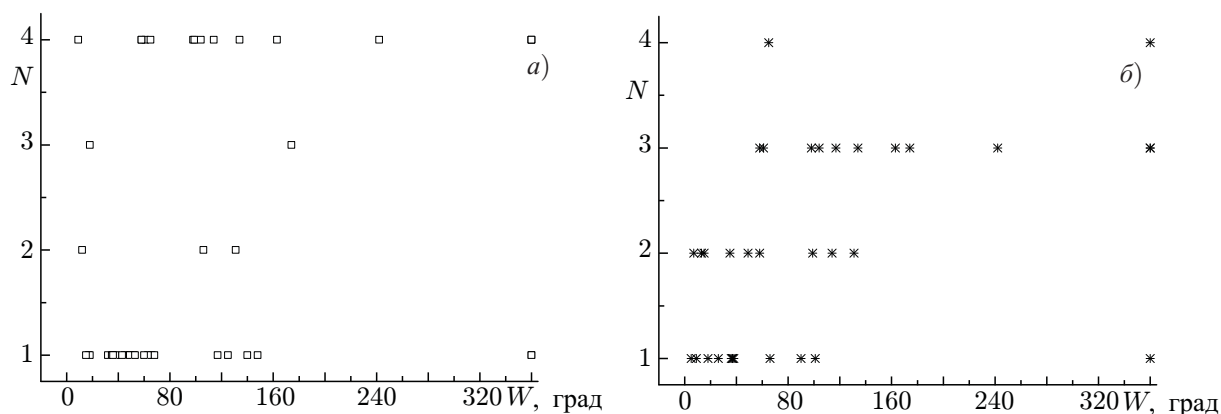


Рис. 3. Число спектральных интервалов в сантиметровом (а) и дециметровом (б) диапазонах, в которых наблюдаются микроволновые предвестники корональных выбросов массы, в зависимости от их угла раскрыва

Рассмотрим более подробно широкополосные предвестники за весь рассматриваемый период и во всём спектральном диапазоне (предвестники корональных выбросов массы типа гало выделены в отдельную категорию и рассмотрены ниже). Как отмечалось, микроволновые предвестники имеют импульсную (с длительностью менее $(4 \div 6) \cdot 10^2$ с) и постепенную (с длительностью более $6 \cdot 10^2$ с) компоненты. Анализ событий показывает, что импульсные широкополосные предвестники

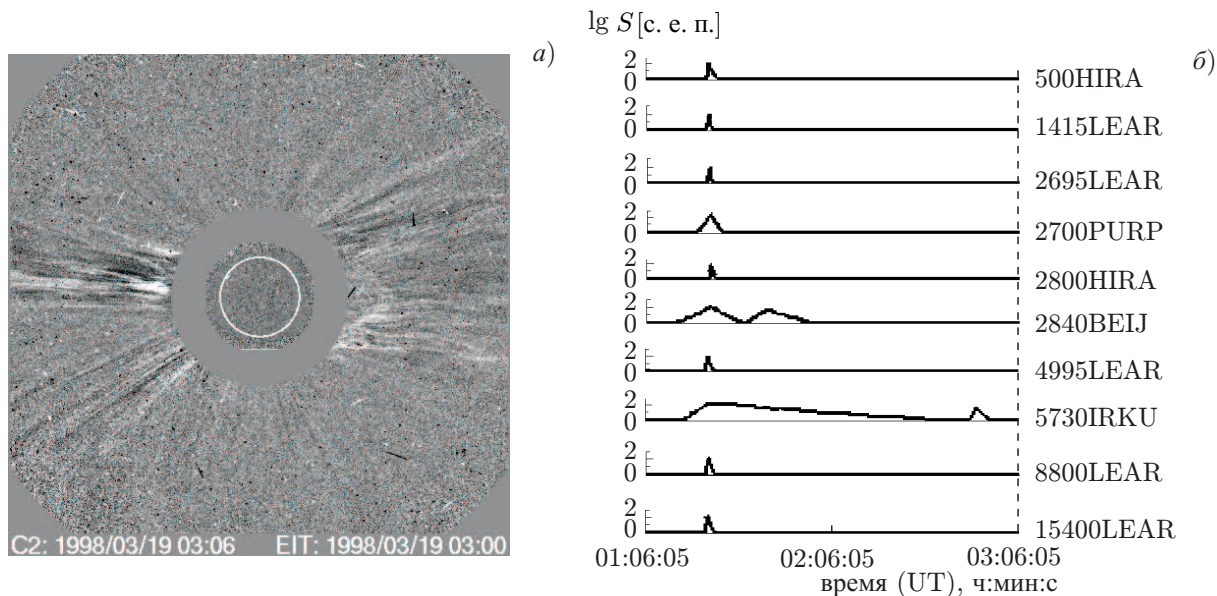


Рис. 4. Пример коронального выброса массы, зарегистрированного на LASCO/C2 19.03.1998 (a) и импульсного широкополосного предвестника перед ним (б)

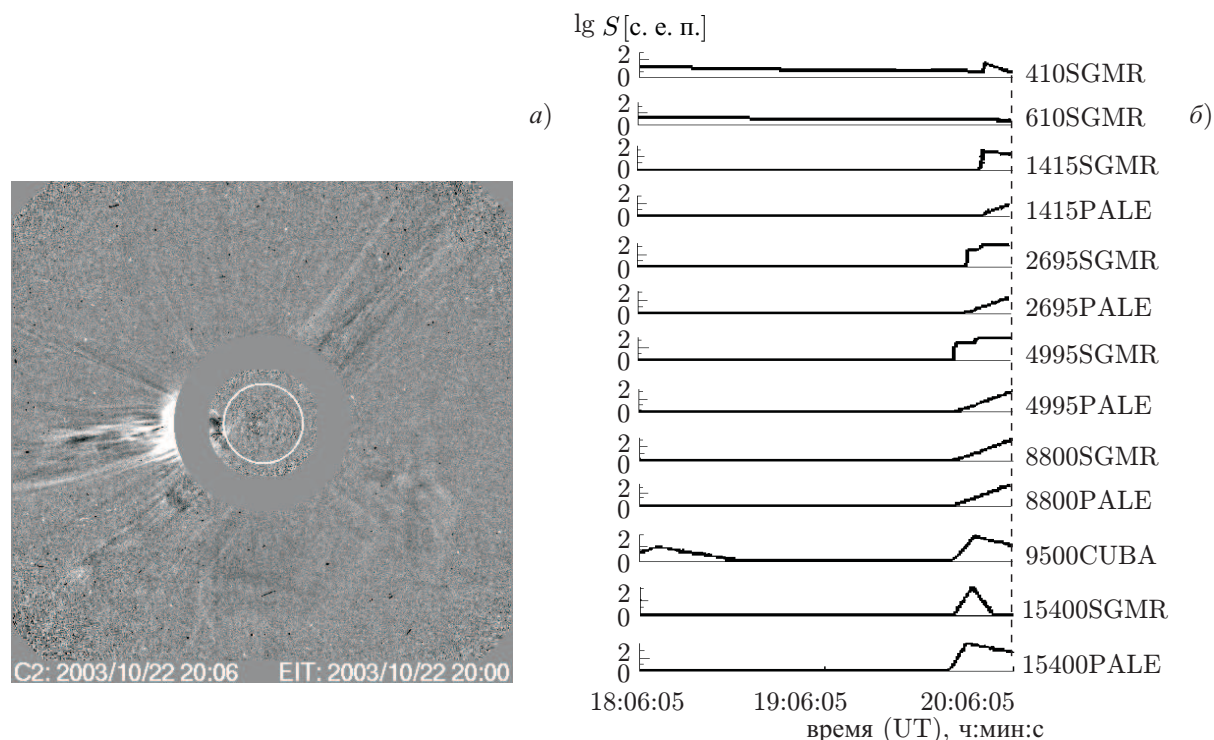


Рис. 5. Пример коронального выброса массы, зарегистрированного на LASCO/C2 22.10.2003 (a) и широкополосного предвестника с постепенной компонентой перед ним (б)

ки (рис. 4б) характерны для корональных выбросов массы, обладающих узкой направленностью ($W \leq 60^\circ$) и малыми начальными скоростями (рис. 4а). Предвестники с постепенной компонентой (рис. 5б) в основном предшествуют корональным выбросам массы с большим углом раскрытия ($W \geq 60^\circ$) и большими скоростями (рис. 5а).

На рис. 4б и 5б временные изменения потока радиоизлучения S показаны в форме схематических профилей; справа указаны частота наблюдений в мегагерцах и аббревиатура соответствующей обсерватории (данные радиоизлучения Мировой службы Солнца), слева — величины потоков в логарифмическом масштабе. Правая граница горизонтальной оси соответствует моменту регистрации выбросов на коронографе LASCO/C2. Подробное описание способа визуального представления данных приведено в каталогах [40, 41].

На рис. 6 показана зависимость заблаговременности начала широкополосных предвестников Δt от скорости последующих корональных выбросов массы V . Отметим тенденцию разделения времён существования предвестников: постепенные широкополосные предвестники наблюдаются не более, чем за 40 минут до момента регистрации выброса, а импульсные широкополосные предвестники — на интервале от 40 до 120 минут до момента регистрации.

Для анализа процессов формирования и начального распространения корональных выбросов массы в нижних слоях солнечной атмосферы представляется более важным анализ характеристик именно импульсного излучения с его характерным временем существования, меньшим или равным нескольким минутам, свойственным процессам магнитного пересоединения, плазменной неустойчивости и первичного энерговыделения, т. е. периоду формирования выброса. В пользу этого утверждения говорят и результаты различных исследований, согласно которым корональные выбросы массы сильно нагреваются значительно позже момента их отрыва [49–52]. По-видимому, постепенная компонента микроволновых предвестников отражает именно этот нагрев.

На рис. 7 показан пример зависимости заблаговременности возникновения импульсной компоненты микроволновых предвестников корональных выбросов массы $t_{\text{имп}}$ от их угловой ширины W по данным за 1998 год для сантиметрового (рис. 7а) и дециметрового (рис. 7б) диапазонов длин волн (события гало также исключены из рассмотрения). Как видно из рис. 7, наблюдаемое распределение в диапазоне углов от 10° до 150° , в котором сосредоточено большинство событий, имеет максимум как в сантиметровом, так и в дециметровом диапазонах длин волн. При этом максимум распределения дециметровой компоненты предвестников расположен ближе к $W = 50^\circ$, для сантиметровой компоненты он менее выражен и несколько сдвинут в область $W = 50^\circ \div 70^\circ$. Важно также отметить в среднем значительно большую длительность сантиметровой компоненты излучения по сравнению с дециметровой компонентой. Это свойство можно рассматривать как не прямой аргумент в пользу формирования корональных выбросов массы на низких высотах солнечной атмосферы, где генерируется сантиметровое излучение. В дециметровом излучении отражается процесс распространения корональных выбросов массы через более высокие слои солнечной атмосферы.

Заметим, однако, что среди рассматриваемых событий (выбросов) есть такие, перед которыми регистрируется только дециметровая компонента радиоизлучения (таких в нашем статисти-

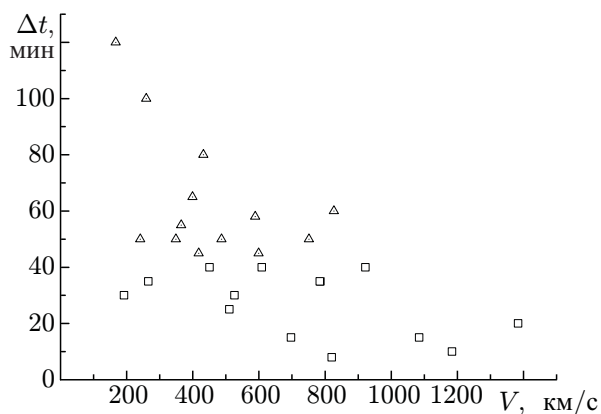


Рис. 6. Распределение заблаговременности Δt широкополосных импульсных (Δ) и постепенных ($\square$) предвестников от скорости V последующих корональных выбросов массы

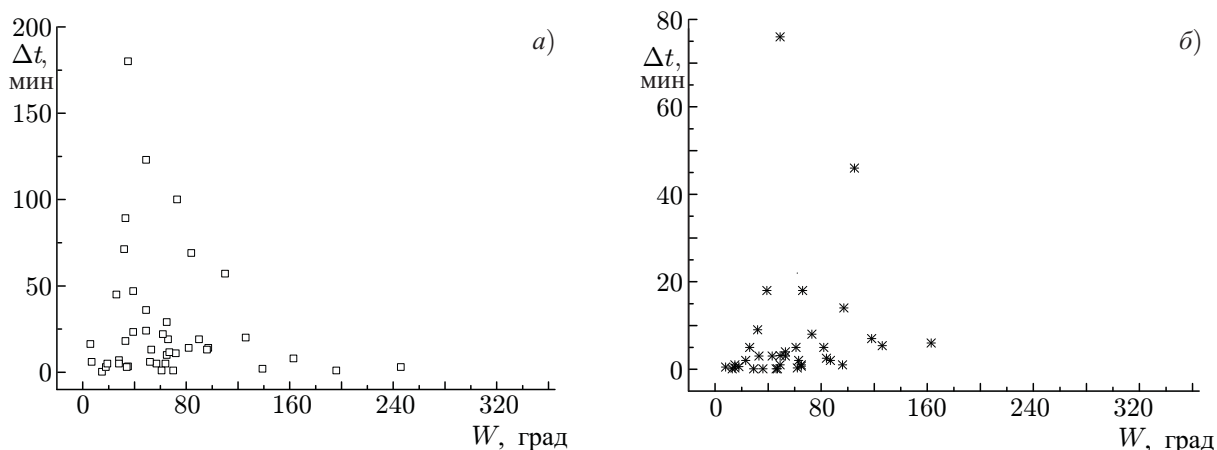


Рис. 7. Распределение заблаговременности Δt появления импульсных микроволновых предвестников от ширины W корональных выбросов массы по данным за 1998 год для сантиметрового (а) и дециметрового (б) диапазонов длин волн

стическом наборе немного). Этот факт может означать, что такие корональные выбросы массы формируются на больших высотах или в менее плотных областях.

Таким образом, можно говорить о существовании двух типов корональных выбросов массы: первые, составляющие большинство, формируются вблизи поверхности Солнца, а вторые — на высотах несколько тысяч километров от поверхности.

Подтверждением этому являются результаты анализа связи характеристик микроволновых предвестников с преобладающей дециметровой компонентой и параметров последующих корональных выбросов массы. Если дециметровые предвестники таких корональных выбросов носят импульсный характер, то сами корональные выбросы массы имеют угловую ширину, не превышающую 180° (события 1998 года приведены на рис. 8), причём значительное большинство из них имеет небольшой угол раскрытия ($W < 75^\circ$). Более того, наблюдается увеличение максимальной интенсивности предвестника с ростом угловой ширины корональных выбросов массы. Этот факт иллюстрирует врезка на рис. 8, на которой показано распределение большинства событий.

Немаловажно и то обстоятельство, что, как следует из анализа распределения таких корональных выбросов массы по скоростям, все они имеют низкую начальную скорость распространения ($V < 600$ км/с).

Как известно, коронограф LASCO — это набор трёх коронографов-телескопов, размещённых на космическом аппарате SOHO: C1, C2 и C3. Каждый из них регистрирует корональные выбросы массы на различных расстояниях от поверхности Солнца: C1 — от $1,1$ до 3 радиусов Солнца $R_\odot$, C2 — от $1,5R_\odot$ до $6R_\odot$, C3 — от $3,5R_\odot$ до $30R_\odot$.

Поскольку наблюдения на коронографе LASCO/C1 наиболее близки по высоте к наблюдениям в микроволновом диапазоне (высоты $1,01 \div 1,07R_\odot$), то естественно проследить связь регистрируемых событий в радиодиапазоне и на LASCO/C1. Наблюдения на коронографе C1 закончились в июне 1998 года из-за поломки телескопа, поэтому сопоставление проводилось для января–июня 1998 года. Удалось проследить развитие корональных выбросов массы в 18 случаях совпадения периодов наблюдений на коронографах C1, C2 и в радиодиапазоне. В абсолютном большинстве случаев (в 15 из 18) время возникновения микроволновых предвестников опережает или совпадает со временем регистрации коронального выброса массы на C1. При этом приводимое в каталоге [37] расчётное время отрыва указанных корональных выбросов массы от поверхности Солнца с использованием данных коронографа C2 практически совпадает с временем начала импульсных широкополосных микроволновых предвестников, подобных по временному профилю.

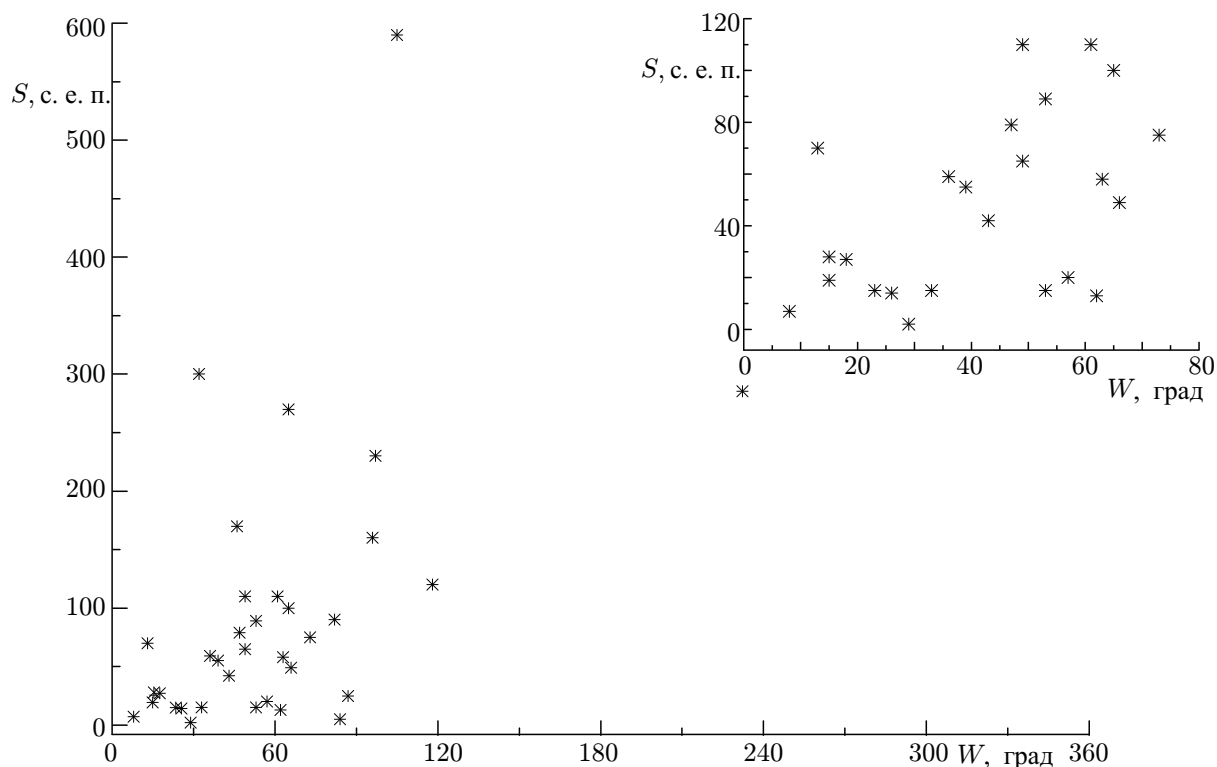


Рис. 8. Зависимость максимального потока дециметровой компоненты импульсных предвестников от угловой ширины корональных выбросов массы по данным за 1998 год

В то же время имеется один случай (событие 05–06.05.1998), когда, наряду с указанными предвестниками, примерно за 30 минут до расчётного времени отрыва коронального выброса массы наблюдалась совокупность более коротких импульсных широкополосных всплесков меньшей интенсивности. Это излучение также является предвестником и либо связано с формированием данного коронального выброса массы, либо может характеризовать отрыв другого, более раннего коронального выброса массы, не зарегистрированного на коронографе C2. Дополнительно проведено сопоставление указанных событий с динамикой интенсивности рентгеновского излучения. С точностью до временного разрешения данных установлено, что никаких изменений в уровне рентгеновского излучения не наблюдается в двух случаях, а в 7 случаях небольшое повышение уровня рентгеновского излучения по времени совпадает с возникновением микроволновых предвестников, предшествующих регистрации корональных выбросов массы на LASCO/C1.

Для более подробного анализа соотношения времён предполагаемого отрыва корональных выбросов и появления микроволновых предвестников проведено сопоставление для всех остальных изолированных корональных выбросов массы за 1998 год. Установлено, что расчётное время отрыва (с точностью до 1 минуты) совпадает с появлением широкополосных импульсных предвестников ещё для 13 событий.

Таким образом, на наш взгляд, возможен экспериментальный метод определения времени отрыва корональных выбросов массы по радиоданным, связанный с наличием широкополосных импульсных предвестников. Такой метод является потенциально более точным, поскольку отражает процессы, происходящие на высотах отрыва корональных выбросов массы, тогда как расчётное время, приведённое в каталоге [37], определяется с помощью линейной или квадратичной аппроксимаций данных коронографов LASCO/C2 и LASCO/C3, соответствующих большему расстоянию от поверхности Солнца. Такие оценки в основном правомерны для событий, происходящих на лимбе.

В вышеприведённом анализе широкополосных предвестников корональные выбросы типа гало не рассматривались. Однако события типа гало — это класс событий с потенциально высокой геоэффективностью, поэтому важно рассмотреть динамику их микроволновых предвестников отдельно. В проведённых исследованиях используется классификация корональных выбросов массы, принятая в каталоге SOHO LASCO CME, где основным параметром выброса типа гало является его ширина, составляющая около 360° в картинной плоскости, поскольку свечение наблюдается вокруг всего затмевающего диска коронографа. При этом понятно, что пространственная ширина даже мощных корональных выбросов может составлять не более 180° . В зависимости от положения источника зарождения коронального выброса массы, т.е. от угла между центральной осью коронального выброса и направлением наблюдений коронографа, корональные выбросы с угловым размером более 100° могут полностью заполнить поле зрения коронографа и квалифицироваться как гало или частичное гало (см., например, [53]).

Из-за принципов отбора данных регистрации корональных выбросов массы (изолированность выбросов) рассматриваемая статистика выбросов типа гало невелика — 4 события в 1998 году, 3 события в 2003 года, 2 события в январе 2005 года и 2 события в декабре 2006 года. Все эти события высокоскоростные, возникшие на видимой части солнечного диска (детальное описание микроволновых предвестников корональных выбросов типа гало за 1998 и 2003 годы см. в [54]).

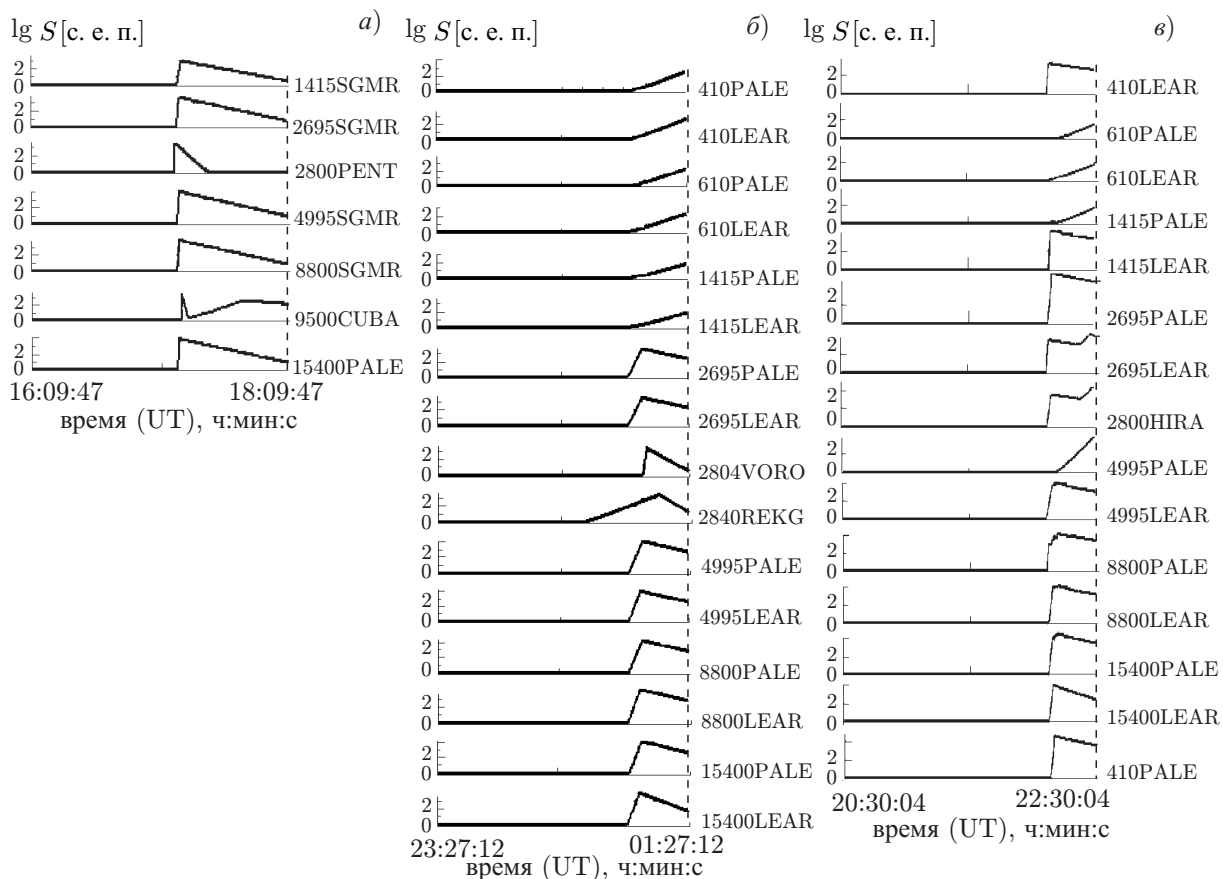


Рис. 9. Схематические временные профили потока излучения микроволновых предвестников корональных выбросов массы типа гало в соответствии с данными Мировой службы Солнца. Правый край оси абсцисс соответствует моменту регистрации выбросов на коронографе LASCO/C2; на правой оси ординат отложены наблюдаемые частоты и аббревиатуры названий обсерваторий, на левой оси ординат — наблюдаемые потоки радиоизлучения в логарифмическом масштабе для 18.12.1998 (а), 29.05.2003 (б) и 14.12.2006 (в)

Таким корональным выбросам предшествуют широкополосные предвестники с постепенной компонентой излучения с подобным временным поведением в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн. На рис. 9 показаны временные изменения потока радиоизлучения S для трёх событий на каждой из используемых в наблюдениях частот в форме схематических профилей.

Спорадическая компонента радиоизлучения (типа GRF или R) появляется за 25÷60 минут перед регистрацией выбросов на коронографе, причём практически одновременно во всём спектральном интервале. Максимум интенсивности предвестников быстрее достигается на более высоких частотах (очевидно, в более низких слоях солнечной атмосферы). Последующее снижение интенсивности излучения происходит более плавно на низких частотах. Следует подчеркнуть, что интенсивность спорадической компоненты радиоизлучения не достигает первоначального уровня вплоть до момента регистрации корональных выбросов массы на коронографе. Более того, спорадические явления других видов, кроме GRF и R, предшествующие регистрации выбросов типа гало в течение двухчасового интервала времени, не наблюдаются.

Дополнительным свидетельством отражения в микроволновом излучении процессов формирования корональных выбросов массы типа гало может служить результат сопоставления расчётного момента времени отрыва выброса от поверхности Солнца, приведённого в каталоге [37] (рис. 10б) и отмеченного стрелкой на рис. 10а, с экспериментальным временем возникновения радиопредвестников.

Как видно из рис. 10, постепенные радиопредвестники корональных выбросов массы типа гало наблюдаются более чем за 10 минут до расчётного момента отрыва выброса от поверхности Солнца. Этот факт свидетельствует о существовании постепенной компоненты микроволновых предвестников уже на стадии формирования корональных выбросов массы типа гало.

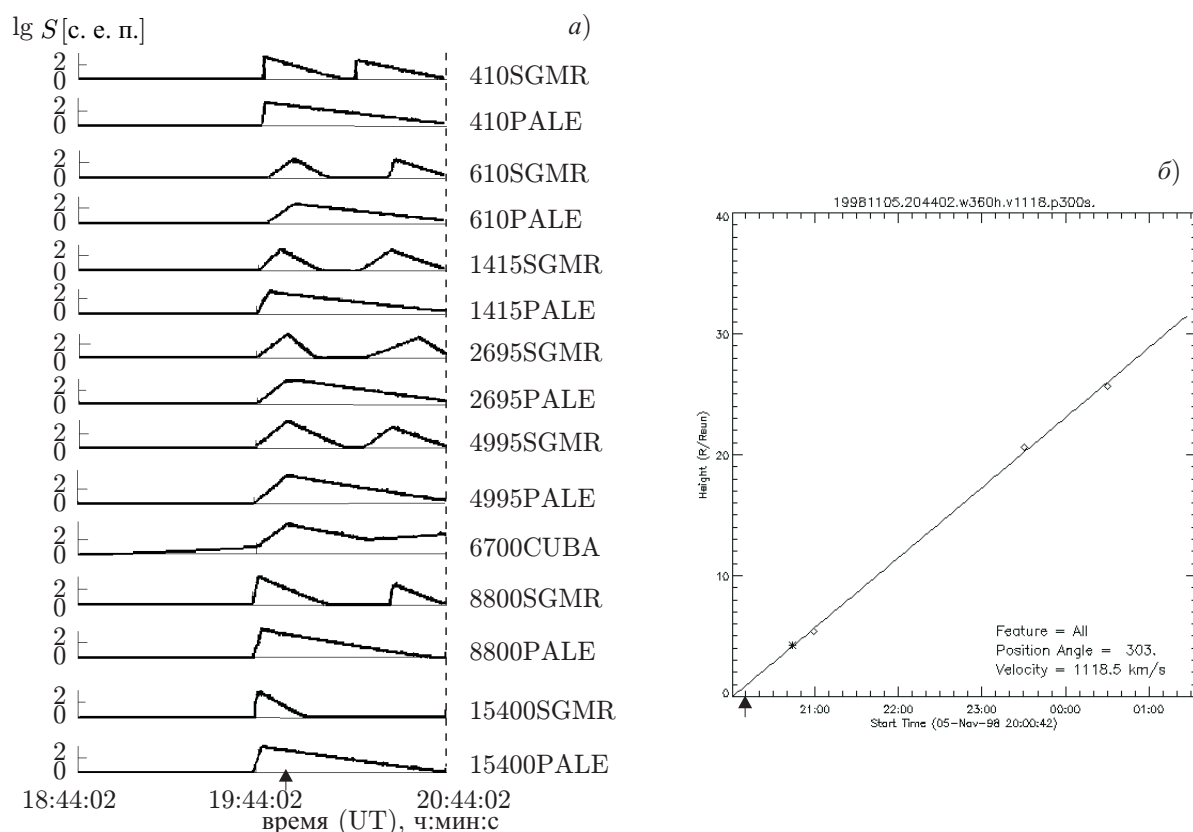


Рис. 10. Сопоставление расчётного момента времени выброса от поверхности Солнца (б) с экспериментальным временем возникновения радиопредвестников (а)

4. ДИСКУССИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, представленные выше, показывают, что на продолжительном временном интервале наблюдается спорадическое радиоизлучение, предшествующее регистрации корональных выбросов массы на коронографе LASCO космического аппарата SOHO.

Основные выводы проведенного исследования заключаются в установлении характерных особенностей микроволнового радиоизлучения на стадии формирования и начального распространения корональных выбросов массы в нижних слоях солнечной атмосферы. При этом важно подчеркнуть, что наблюдающиеся в спорадическом радиоизлучении явления (микроволновые предвестники) свойственны процессам, связанным именно с корональными выбросами массы.

Установлены следующие основные закономерности.

1) На выбранном для исследований временном интервале до регистрации корональных выбросов на коронографе LASCO/C2 (не более 120 минут) в значительном числе случаев (до 60 %) наблюдаются микроволновые предвестники различных типов (в соответствии с международной классификацией радиовсплесков), которые могут содержать как импульсную, так и постепенную компоненты излучения или их сочетание.

Среднее время начального распространения корональных выбросов массы до расстояния $2R_{\odot}$ в картинной плоскости коронографа составляет около 30 мин [6]. В то же время спорадические явления в микроволновом радиоизлучении наблюдаются на двухчасовом интервале. Это превышает время распространения корональных выбросов с малыми начальными скоростями, даже если их источники расположены вблизи края солнечного диска. Менее двух часов составляет и время распространения корональных выбросов со средними и высокими скоростями, источники которых расположены вблизи центра диска, когда велики углы между траекторией коронального выброса и её проекцией на картинную плоскость. На наш взгляд, это означает, что микроволновые предвестники являются не только отражением начального распространения корональных выбросов массы, но также могут служить индикаторами процессов их формирования.

2) Установлены соотношения между характеристиками микроволновых предвестников и наблюдаемыми параметрами последующих корональных выбросов массы.

2.1) Существует статистическая зависимость между спектральными характеристиками предвестников и угловым раскрытием, а также начальной скоростью последующих корональных выбросов массы, возникающих на видимой части солнечного диска.

Микроволновые предвестники корональных выбросов массы наблюдаются во всём сантиметровом и дециметровом диапазоне длин волн перед корональными выбросами с угловой шириной, равной или превышающей 150° ($W \geq 150^{\circ}$).

Перед высокоскоростными выбросами ($V > 1500$ км/с) всегда наблюдаются широкополосные предвестники в обоих диапазонах длин волн.

Узконаправленные ($W \leq 60^{\circ}$) корональные выбросы массы с малыми начальными скоростями ($V \sim 200$ км/с) характеризуются импульсными широкополосными предвестниками.

Широкополосные предвестники с постепенной компонентой предшествуют в основном корональным выбросам массы с большим углом раскрытия ($W \geq 60^{\circ}$) и большими скоростями ($V \geq 1000$ км/с).

Для предвестников с преобладающей дециметровой компонентой излучения (как и в случаях наличия только этой компоненты) последующие корональные выбросы массы имеют угловую ширину, не превышающую 180° , причём значительное большинство из них имеет небольшой угол раскрытия ($W < 75^{\circ}$). Наблюдается увеличение максимальной интенсивности предвестника с ростом угловой ширины корональных выбросов массы, в последующем зарегистрированных на

коронографе ³.

Превалирующая дециметровая компонента предвестников корональных выбросов массы свидетельствует о невысокой начальной скорости выбросов ($V < 600$ км/с).

2.2) Отмечается чёткое разделение времён существования предвестников: постепенные широкополосные предвестники наблюдаются в течение менее чем 40 минут до момента регистрации выброса, тогда как импульсные широкополосные предвестники — на существенно больших временных интервалах (от 40 до 120 минут до регистрации выброса).

2.3) Наблюдается максимум в зависимости интервала времени возникновения импульсной компоненты сантиметровых и дециметровых предвестников корональных выбросов массы от углового размера последних. При этом в среднем длительность сантиметровой компоненты излучения предвестников значительно выше длительности дециметровой компоненты.

Совокупность указанных свойств позволяет сделать два вывода. Во-первых, большинство корональных выбросов массы формируется на поверхности Солнца и вблизи неё, где происходят основные процессы трансформации и эволюции магнитных полей и где в нижних слоях солнечной атмосферы генерируется сантиметровое излучение предвестников. В то же время формирование некоторых корональных выбросов происходит в более высоких слоях атмосферы Солнца, свидетельством чему является наличие превалирующей дециметровой компоненты излучения. Такие корональные выбросы в силу иных условий формирования обладают невысокой мощностью, невысокими начальными скоростями и, как правило, небольшими углами раскрытия.

3) Установлено, что импульсные широкополосные предвестники, охватывающие весь сантиметровый и дециметровый диапазоны длин волн, могут служить индикаторами момента отрыва коронального выброса массы от поверхности Солнца.

4) Обнаружено, что перед корональными выбросами типа гало, возникшими на видимой стороне солнечного диска, наблюдаются постепенные широкополосные микроволновые предвестники, которые появляются во всём диапазоне частот на временном интервале от 60 до 20 мин до регистрации корональных выбросов массы на коронографе; микроволновые предвестники (типов GRF или R) демонстрируют быстрое увеличение интенсивности с последующим плавным её уменьшением, которое не завершается с началом регистрации выброса на LACSO/C2.

Временная и спектральная динамика таких предвестников свидетельствует о наличии теплового механизма излучения в радиодиапазоне и, скорее всего, связана с общим изменением физических параметров плазмы в областях начального распространения корональных выбросов. В то же время остаётся необъяснимым тот факт, что для корональных выбросов типа гало (в отличие от других типов выбросов) на двухчасовом интервале, предшествующем их регистрации, не наблюдается каких-либо проявлений спорадического радиоизлучения вплоть до появления указанных постепенных широкополосных микроволновых предвестников.

Таким образом, на временном интервале формирования и начального распространения корональных выбросов массы в нижних слоях атмосферы Солнца, примыкающих к его поверхности, происходят процессы, определяющие физические параметры регистрируемых на коронографе событий (угловой раскрыт, скорость распространения и феноменологический тип выброса). Отражением этих процессов являются спорадические явления в микроволновом излучении, которые можно рассматривать как предвестники корональных выбросов массы.

В заключение отметим, что представленные результаты получены главным образом с использованием данных рутинных наблюдений обсерваторий, принадлежащих Мировой службе Солнца. Этот факт, с нашей точки зрения, свидетельствует о неиспользованных ранее возможностях применения данных мировой сети службы Солнца в радиодиапазоне для получения информации об

³ В то же время необходимо заметить, что такие явления, как правило, имеют размытые профили и небольшую мощность, что вносит некоторую неопределённость в оценку их углового размера.

условиях формирования и начального распространения корональных выбросов массы в нижних слоях солнечной атмосферы, недоступных для наблюдения на коронографах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gosling J. T., Hildner E., MacQueen R. M., et al. // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 4581.
2. Rust D. M. // Space Sci. Rev. 1983. V. 34. P. 21.
3. Sheeley N. R., Jr., Howard R. A., Koomen M. J., et al. // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 163.
4. Schwenn R. // Space Sci. Rev. 1986. V. 44. P. 139.
5. Gopalswamy N., Mikic Z., Maia D., et al. // Space Sci. Rev. 2006. V. 123. P. 303.
6. Dere K. P., Brueckner G. E., Howard R. A., et al. // Solar Phys. 1997. V. 175. P. 601.
7. Zhang J., Wang J., Liu Y. // Astron. Astrophys. 2000. V. 361. P. 759.
8. Chen P. F., Shibata K. // Astrophys. J. 2000. V. 545. P. 524.
9. Forbes T. G., Linker J. A., Chen J., et al. // Space Sci. Rev. 2006. V. 123. P. 251.
10. Ugarte-Urra I., Warren H. P., Winebarger A. R. // Astrophys. J. 2007. V. 662. P. 1293.
11. Chifor C., Mason H. E., Tripathi D., et al. // Astron. Astrophys. 2006. V. 458. P. 965.
12. Simnett G. M., Harrison R. A. // Solar Phys. 1985. V. 99. P. 291.
13. Xingming B., Zhang H., Lin J., et al. // Adv. Space Res. 2007. V. 39. P. 1847.
14. Железняков В. В. Радиоизлучение Солнца и планет. М.: Наука, 1964. 560 с.
15. Gopalswamy N., Kundu M. R. // Lecture Notes in Physics. 1995. V. 444. Coronal magnetic energy releases. P. 223.
16. Maia D. J. F., Gama R., Mercier C., et al. // Astrophys. J. 2007. V. 660. P. 874.
17. Pohjolainen S., van Driel-Gesztelyi L., Culhane J. L., et al. // Solar Phys. 2007. V. 244. P. 167.
18. Ишков В. Н. // Астрон. вестн. 2006. Т. 40, № 2. С. 134.
19. Schwenn R., Raymond J. C., Alexander D., et al. // Space Sci. Rev. 2006. V. 123. P. 127.
20. Wang Y., Zhang J. // Astrophys. J. 2007. V. 665. P. 1428.
21. Pick M., Vilmer N. // Astron Astrophys. Rev. 2008. V. 16. P. 1.
22. Дурасова М. С., Подстригач Т. С., Фридман В. М., Шейнер О. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, № 11–12. С. 1425.
23. Martin S. F. // Solar Phys. 1980. V. 68. P. 217.
24. Sheiner O. A., Durasova M. S. // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37. С. 883.
25. Durasova M. S., Fridman V. M., Sheiner O. A. // ESA Sci. Prod. 1999. V. 448. Proc. 9th European Meeting on Solar Phys., “Magnetic Fields and Solar Processes”, Florence, Italy, 12–18 September 1999. P. 979.
26. Дурасова М. С., Фридман В. М., Шейнер О. А. // Солнечно-земная физика: Тр. VII симпозиума по солнечно-земной физике России и стран СНГ, Троицк, 1999, ИЗМИРАН. С. 83.
27. Дурасова М. С., Фридман В. М., Шейнер О. А. // Тр. научн. конф. стран СНГ и Прибалтики «Активные процессы на Солнце и звёздах», Санкт-Петербург, 1–6 июля 2002 г. Санкт-Петербург: НИИРФ СПбГУ. С. 199.
28. Гнездилов А. А., Горгуца Р. В., Соболев Д. Е. и др. // Тр. научн. конф. стран СНГ и Прибалтики «Активные процессы на Солнце и звёздах», Санкт-Петербург, 1–6 июля 2002 г. Санкт-Петербург: НИИРФ СПбГУ. С. 24.
29. Фридман В. М., Шейнер О. А. // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12. Т. 1. С. 79.
30. Dubey G., van der Holst B., Poedts S. // J. Astrophys. Astr. 2006. V. 27. P. 159.
31. Reeves K. K., Moats S. J. // Astrophys. J. 2010. V. 712. P. 429.
32. Кобрин М. М. // Phys. Solariterr. 1976. No. 2. P. 3.
33. Sheiner O. A., Fridman V. M. // Coronal and Stellar Mass Ejections: Proc. IAU Symp. No. 226. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. P. 235.

34. Durasova M. S., Fridman V. M., Sheiner O. A., et al. // Proc. 2nd Int. Symp. SEE-2005, Nor Amberd, Armenia (26–30 September 2005). Yerevan, 2006. P. 51.
35. Гребенюк А. Б., Дурасова М. С., Жерноклетов А. М. и др. Методика установления однородности многолетнего ряда патрульных измерений потоков микроволнового излучения Солнца: Препринт № 431 НИРФИ. Нижний Новгород, 1997.
36. Solar-Geophysical Data (explanation of data reports). 1981. No. 438.
ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar_data/solar_radio/bursts/radio.txt
37. Yashiro S., Gopalswamy N., Michalek G., et al. // J. Geophys. Res. A. 2004. V. 109. Art. no. 07105.
38. Дурасова М. С., Тихомиров Ю. В., Фридман В. М. // Актуальные проблемы физики солнечной и звёздной активности. Конф. стран СНГ и Прибалтики, Нижний Новгород, 2–7 июня 2003 г. Т. 1. С. 176.
39. Черток И. М. // Астрон. журн. 1993. Т. 70. С. 165.
40. Дурасова М. С., Тихомиров Ю. В., Фридман В. М., Шейнер О. А. Каталог явлений солнечной активности за 1998 г., предшествующих регистрации КВМ, по данным Мировой службы Солнца в радиодиапазоне: Препринт № 483 НИРФИ. Нижний Новгород, 2003.
41. Дурасова М. С., Тихомиров Ю. В., Фридман В. М., Шейнер О. А. Каталог явлений солнечной активности, предшествующих регистрации КВМ, по данным Мировой службы Солнца в радиодиапазоне за 2003 г.: Препринт № 496 НИРФИ. Нижний Новгород, 2004.
42. Дурасова М. С., Тихомиров Ю. В., Фридман В. М., Шейнер О. А. // Солнечно-земная физика. 2005. Вып. 8. С. 30.
43. Sheiner O. A., Fridman V. M., Durasova M. S. // ESA Sci. Prod. 2002. V. 477. Proc. “SOLSPA: The Second Solar Cycle and Space Weather Euroconference”, Vico Equense, Italy, 24–29 September. P. 373.
44. Michalek G., Gopalswamy N., Xie H. // Solar Phys. 2007. V. 246. P. 409.
45. The Catalog of Solar Flare Events with X-ray Class M1-X > 17.5".
(http://www.wdcb.ru/stp/data/FL_XXIII/)
46. Andrews M. D. // Solar Phys. 2003. V. 218. P. 261.
47. Yashiro S., Gopalswamy N., Akiyama S., et al. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. Art. no. A12S05.
48. Дурасова М. С., Фридман В. М., Шейнер О. А. // Достижения и проблемы солнечной радиоастрономии. Тр. научн. конф. 6–9 окт. 1998 г. С.-Петербург: НИИРФ СПбГУ. С. 65.
49. Akmal A., Raymond J. C., Vourlidas A., et al. // Astrophys. J. 2001. V. 553. P. 922.
50. Ciaravella A., Raymond J. C., Reale F., et al. // Astrophys. J. 2001. V. 557. P. 351
51. Bemporad A., Raymond J. C., Poletto G., Romoli M. // Astrophys. J. 2007. V. 655. P. 576.
52. Lee J.-Y., Raymond J. C., Ko Y.-K., Kim K. S. // Astrophys. J. 2009. V. 692. P. 1271.
53. Manoharan P. K. // Solar Phys. 2006. V. 235. P. 345.
54. Фридман В. М., Шейнер О. А., Тихомиров Ю. В. // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2006. Т. 70, № 10. С. 1487.

Поступила в редакцию 12 мая 2010 г.; принята в печать 26 июня 2010 г.

SOLAR MICROWAVE EMISSION PHENOMENA OBSERVED DURING THE FORMATION AND INITIAL PROPAGATION OF CORONAL MASS EJECTIONS

O. A. Sheyner and V. M. Fridman

We consider the phenomena observed in the microwave radiation emitted by the Sun during a two-hour period, which precedes the moment when the coronagraph registers coronal mass ejections. The data of 24-hour patrol observations of centimeter-wave and decimeter-wave radiation in 1998 and 2003

O. A. Шейнер, В. М. Фридман

327

are used, as well as the data about individual events in January 2005 and December 2006. Temporal characteristics of the phenomena and the spectral composition of sporadic components of the solar microwave radiation are analyzed. The statistical connection between the characteristics of sporadic radio waves, which are observed within the above-said interval, and the parameters of coronal mass ejections has been found.