

УДК 523.985.7-77

## ХАРАКТЕР МИКРОВОЛНОВОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, НАБЛЮДАЕМОГО НА СТАДИИ ФОРМИРОВАНИЯ И НАЧАЛЬНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ

*О. А. Шейнер, В. М. Фридман*

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

В работе проведено рассмотрение спорадического радиоизлучения, предшествующего регистрации геоэффективных корональных выбросов массы, по данным широкодиапазонных патрульных наблюдений Солнца, охватывающих сантиметровый, дециметровый и метровый диапазоны длин волн, в отдельные периоды XXI–XXIII циклов солнечной активности. Общий объём привлечённого материала составил 339 событий и использует данные радиоастрономической станции НИРФИ «Зимёнки» и Мировой службы Солнца в радиодиапазоне, каталоги корональных выбросов массы, зарегистрированных на приборах SMM и SOHO/LASCO. На основе статистического анализа выявлены закономерности характеристик спорадического микроволнового излучения на двухчасовом интервале до регистрации на коронографах геоэффективных корональных выбросов массы, определяемых как радиопредвестники таких корональных выбросов массы. Установленные закономерности в характеристиках радиопредвестников геоэффективных корональных выбросов массы заключаются в наличии широкополосного сантиметрового-дециметрового радиоизлучения с длительностью более 10 мин на стадии, предшествующей регистрации корональных выбросов на коронографах. Показано, что такие радиопредвестники предшествуют корональным выбросам классов петля, гало и частичное гало, обладающим наибольшей потенциальной геоэффективностью. Проанализированы особенности спорадического радиоизлучения, не удовлетворяющие установленным закономерностям.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследованию солнечных корональных выбросов массы, в том числе по их проявлениям в радиодиапазоне, в последние годы посвящено значительное число работ (см., например, [1–4] и цитированную там литературу). Одним из важных направлений такого изучения является исследование распространения корональных выбросов в межпланетном пространстве, взаимодействия их с атмосферой Земли и возможной геоэффективности указанных явлений, т. е. свойств явлений, позволяющих им быть источниками геомагнитных возмущений. Так, в работах [5–9] приводятся свидетельства влияния корональных выбросов массы на околоземное пространство и параметры, типичные для выбросов, вызывающих геомагнитные бури. Такие корональные выбросы характеризуются высокой скоростью, большим углом раскрытия и тем, что солнечный источник должен находиться близко к центральному меридиану [10].

Можно назвать два механизма влияния корональных выбросов массы на параметры околоземного пространства: 1) влияние ионизирующего (рентгеновского и ультрафиолетового) излучения, сопровождающего корональные выбросы массы, и 2) воздействие крупномасштабными возмущениями в солнечном ветре и ускоренными энергичными солнечными частицами, причём характерный временной интервал между регистрацией выброса и откликом составляет от десятков минут до 1–3 суток [11].

Первый аспект, проявляющийся в реакции ионосферы на корональные выбросы массы, нашёл отражение в исследованиях [12]. Что касается геоэффективных проявлений, наблюдаемых на интервалах до нескольких суток, то основная причина, вызывающая геомагнитные бури, — это

крупномасштабные возмущения, распространяющиеся в солнечном ветре, называемые межпланетными корональными выбросами массы: проявления корональных выбросов в межпланетном пространстве, так называемые «гелиосферные копии» корональных выбросов (см. [13–18])<sup>1</sup>. При этом солнечные источники геомагнитных бурь, обусловленных межпланетными корональными выбросами массы (далее межпланетные выбросы) и рассматриваемых как прямое проявление распространения солнечных корональных выбросов массы, изучены недостаточно. Так, в работах [21, 22] прослежена цепочка: солнечные источники корональных выбросов—межпланетные выбросы— геоэффективные явления для класса сильных геомагнитных бурь, и показано большое разнообразие возможных солнечных источников. В то же время в магнитосфере наблюдается ряд возмущений, обусловленных не столько спорадическими солнечными событиями, сколько собственными явлениями в магнитосфере или реакцией магнитосферы на изменения общего магнитного поля Солнца в области орбиты Земли, например, обусловленные его секторной структурой.

Поэтому для исследования геоэффективности солнечных явлений, как показало проведенное в [19] сравнение опубликованных методов и результатов анализа явлений на Солнце, в межпланетной среде и магнитосфере Земли, необходимо первоначально отбирать явления на Солнце и затем сопоставлять с явлениями на следующем звене цепочки.

В работе [23] с участием авторов данной статьи изучались корреляционные связи наблюдаемых начальных параметров потенциально геоэффективных корональных выбросов массы с характеристиками межпланетных выбросов на основе данных, полученных с космических аппаратов «Wind» и «SOHO». Среди параметров корональных выбросов были выбраны начальная и конечная скорости, ускорение, угловой раскрыт выбросов и центральный позиционный угол события на диске Солнца. Используемыми характеристиками межпланетных выбросов являлись концентрация и скорость протонов солнечного ветра и вертикальная составляющая межпланетного магнитного поля вблизи Земли (компонента межпланетного магнитного поля  $B_z$ ).

Проведенный корреляционный анализ показал, что коэффициенты корреляции угла раскрытия корональных выбросов массы со скоростью солнечного ветра достигают величин  $0,8 \div 0,9$  как для выбросов, имеющих отрицательное ускорение, так и для ускоряющихся выбросов. Это может свидетельствовать о процессах, ведущих к поддержанию скорости коронального выброса в течение всего движения по трассе. Что касается коэффициентов корреляции угла раскрытия с концентрацией солнечного ветра вблизи Земли, то для выбросов, имеющих отрицательное ускорение, их величины незначительны (не превышают 0,13), тогда как для ускоряющихся выбросов характерны высокие значения (до 0,8). При этом замедляющиеся выбросы вещества достаточно быстро расплываются ещё в начале трассы, в то время как более медленные вначале и ускоряющиеся затем выбросы сохраняют свою структуру<sup>2</sup>. Таким образом, можно утверждать, что в межпланетных выбросах, непосредственно воздействующих на магнитосферу Земли, сохраняется информация о солнечных источниках приходящих возмущений.

Это также подтверждается результатами других работ о связи корональных и межпланетных выбросов и модельными исследованиями [25–27]. Сформулированное положение является, на наш взгляд, основанием для утверждения, что процессы, которые предшествуют и сопутствуют формированию корональных выбросов на Солнце и проявляются в характеристиках электромагнит-

<sup>1</sup> Заметим, что вопрос о наиболее геоэффективных межпланетных явлениях активно дискутируется в литературе [19, 20]. Так, авторы [19] настаивают, что таковыми являются магнитные облака и сжатия в области взаимодействия разноразмерных потоков солнечного ветра: около 2/3 всех наблюдаемых магнитных бурь вызываются именно этими явлениями.

<sup>2</sup> Это свидетельствует о разных физических процессах, происходящих во время эволюции межпланетных корональных выбросов [24], о значительном изменении параметров корональных выбросов во время их переноса к Земле, что обусловлено взаимодействием с солнечным ветром [23].

ного излучения, в т. ч. и в радиодиапазоне, отражаются на характеристиках геоэффективности корональных выбросов массы.

Ранее установлено, что значительному числу корональных выбросов массы на стадии их формирования предшествуют на двухчасовом интервале спорадические явления в микроволновом солнечном излучении [28], причём эти спорадические явления широкополосны, т. е. охватывают большую часть исследуемого диапазона длин волн и в большинстве своём имеют длительность более 15 мин [29]. Указанное радиоизлучение является отражением процессов, происходящих на временном интервале формирования и начального распространения корональных выбросов массы в нижних слоях атмосферы Солнца, определяющих физические параметры регистрируемых на коронографе событий (угловой раскрыт, скорость распространения и феноменологический тип выброса) [4], т. е. именно тех параметров, которые влияют на потенциальную геоэффективность корональных выбросов.

Проведённый в [4] анализ даёт основание исследовать явления в радиодиапазоне на стадии формирования корональных выбросов массы с точки зрения установления закономерностей, характерных для корональных выбросов, обладающих высокой потенциальной геоэффективностью.

Следуя [4], в данном исследовании мы используем термин радиопредвестники корональных выбросов массы для описания явлений в радиоизлучении Солнца, предшествующих значительному числу регистраций коронографами корональных выбросов массы.

Согласно определению [30], 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.

Ранее в [31] по аналогии с [30] был введён термин «радиопредвестник мощных микроволновых всплесков», соответствующий временным изменениям компонент спорадического радиоизлучения, присущим значительному числу таких всплесков и предшествующим им на временном интервале до 60 мин. Основанием к вводимому нами термину «радиопредвестники корональных выбросов массы» является также то обстоятельство, что проведённые, в т. ч. и с участием авторов статьи, исследования [28, 29, 32, 33] показали, что абсолютное большинство мощных микроволновых всплесков связано или ассоциируется с событиями корональных выбросов массы.

Задачей данной работы является выявление закономерностей спорадического радиоизлучения, предшествующего регистрации геоэффективных корональных выбросов массы, по данным широкодиапазонных патрульных наблюдений Солнца, охватывающих сантиметровый, дециметровый и метровый диапазоны длин волн.

## 1. ДАННЫЕ И МЕТОДОЛОГИЯ

Для анализа нами использовались оригинальные записи радиоизлучения Солнца, полученные на радиоастрономической станции Службы Солнца в НИРФИ (РАС НИРФИ) «Зимёнки» в 1980, 1984–1988, 1989, 1998 и 1999 годах (частоты наблюдений 9 100; 2 950; 950; 650; 200 и 100 МГц) и данные о радиоизлучении Солнца в 1998 и 2003 годах, зарегистрированные в радиоастрономических обсерваториях, входящих в Мировую службу Солнца (частотный интервал наблюдений от 410 до 15 400 МГц).

Методологические принципы изучения микроволновых предвестников основаны на результатах анализа первичных данных РАС НИРФИ «Зимёнки» за 1980–1988 годы, когда нами были обнаружены спектральные и временные особенности, превышающие порог чувствительности аппаратуры наблюдений, приведённый в [34]. Определение феноменологических типов радиопред-

вестников основано на международной классификации радиовсплесков [35], применяемой в Мировой службе Солнца. При анализе учитывались характеристики радиовсплесков: интенсивность  $I$  и длительность  $T$  спорадической компоненты.

Сведения о корональных выбросах массы были взяты из каталогов корональных выбросов массы, зарегистрированных на спутнике «Solar Maximum Mission» (SMM) (спектрографом-поляриметром) [36] и космическом аппарате SOHO (коронографом белого света LASCO) [37, 38]. Использовалась информация о дне и времени появления коронального выброса массы в поле зрения спектрографа и коронографа, его феноменологическом типе, о ширине выброса в картинной плоскости и о его позиционном угле, его линейной скорости и ускорении.

При отборе материала предусматривался выбор событий, отвечающих критериям изолированных корональных выбросов массы, аналогично [4]. Это связано с тем, что данные радиоастрономической обсерватории «Зимёнки», как и данные Мировой службы Солнца в рассматриваемом диапазоне частот, получены с помощью радиотелескопов без пространственного разрешения. Поэтому необходимо быть уверенными в том, что в течение рассматриваемого интервала времени в поле зрения коронографа регистрируется только один, вполне определённый корональный выброс массы. Тогда изменения в наблюдаемом без пространственного разрешения радиоизлучении будут главным образом соответствовать активности, связанной с формированием рассматриваемого коронального выброса. По этой причине из всех событий, представленных в каталогах [36, 37], отобраны корональные выбросы массы, удовлетворяющие следующему условию: ближайшие по времени выбросы не регистрируются в течение, по крайней мере, 8 часов до и 6 часов после рассматриваемого события. Дополнительно нами учитывались данные о положении рентгеновских и  $H_{\alpha}$ -вспышек на диске Солнца [39] с целью определения по ним возможных источников радиоизлучения предвестников корональных выбросов массы.

Проведённые исследования были направлены на установление закономерностей в появлении спорадического радиоизлучения Солнца и его характеристиках на стадии формирования корональных выбросов массы с точки зрения их геоэффективности.

Геоэффективность солнечных явлений (геоэффективное воздействие на Землю) принято оценивать по степени изменений различных геомагнитных индексов, таких как Ap, Kp, AE и Dst.

Индексы геомагнитной активности Kp и Ap описывают вариации магнитного поля Земли, вызванные нерегулярными причинами: воздействием потока солнечной плазмы (солнечного ветра) на магнитосферу Земли, изменениями внутри магнитосферы и взаимодействием магнитосферы и ионосферы. Планетарный индекс Kp вычисляется как среднее значение индексов, определённых на 13 геомагнитных обсерваториях, расположенных между 44 и 60 градусами северной и южной геомагнитных широт [40]. Индекс Ap определяется в единицах магнитного поля (наноТеслах) и представляет величины Kp, пересчитанные в среднее значение вариации магнитного поля, соответствующее данному Kp-индексу [41].

Интенсивность магнитосферного возмущения оценивается геомагнитными индексами Dst и AE. Высокоширотный индекс AE характеризует интенсивность аврорального тока и является индикатором суббуревой активности [42]. Низкоширотный индекс Dst используется для оценки интенсивности кольцевого тока во время магнитных бурь и является мерой геоэффективности межпланетных возмущений [43, 44].

В данной работе рассматривается характер изменения трёхчасовых значений индекса Kp в течение 1–3 суток после регистрации выбросов на коронографах, как и в [33]. В качестве критерия геоэффективности событий корональных выбросов массы принимался рост последовательных значений индекса Kp на 2 единицы за указанный период. При отсутствии такого роста считалось, что события не являются геоэффективными. Основанием для такого подхода служили полученные ранее результаты оценки геоэффективности корональных выбросов массы по динамике

параметров ионосферы и магнитосферы [12]. Отметим, что выбранный критерий не противоречит оценке степени геоэффективности событий по поведению Dst-индекса. Для полноты описания в качестве критерия геоэффективности корональных выбросов массы рассматривалось и поведение индекса Dst: понижение уровня Dst ( $Dst \leq -30$  нТ) в течение 1–3 дней после регистрации выброса считалось проявлением геоэффективности выбросов.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Общий объём привлечённого материала, использующий данные Службы Солнца в радиодиапазоне, составил 339 событий на различных фазах XXI–XXIII циклов солнечной активности (1980, 1984–1988, 1989, 1998, 1999 и 2003 годов).

### 2.1. Анализ первичных данных РАС НИРФИ «Зимёнки»

На первом этапе исследование проводилось по материалам оригинальных данных наблюдений радиоизлучения Солнца на радиоастрономической станции НИРФИ (РАС НИРФИ) «Зимёнки» (частоты наблюдений 9 100; 2 950; 950; 650; 200 и 100 МГц).

Для анализа были отобраны такие зарегистрированные в периоды работы станции «Зимёнки» корональные выбросы массы, для которых можно было исследовать спорадические явления на двухчасовом интервале, предшествующем регистрации корональных выбросов на коронографах.

За 1980 и 1984–1988 годы таких событий (корональных выбросов массы) было 49. Для них имелись наблюдения радиоизлучения Солнца на РАС НИРФИ «Зимёнки» на двухчасовом интервале, предшествующем регистрации выбросов спектрографом-поляриметром, установленном на спутнике SMM. Рассматривались такие характеристики корональных выбросов массы, как тип морфологического описания и угловая ширина выбросов, а также ожидаемое положение источника коронального выброса на диске Солнца.

Среди различных морфологических типов корональных выбросов массы, зарегистрированных спектрографом-поляриметром SMM, в большинстве случаев (30 событий) наблюдался наиболее развитый и характерный тип выбросов — петля.

Весь указанный массив данных был разделён на два класса: с наблюдаемой геоэффективностью и её отсутствием. Установлено, что уровень геоэффективности в рассматриваемый период характеризовался слабыми геомагнитными бурями  $-30 \text{ нТ} \geq Dst \geq -50 \text{ нТ}$ .

Анализ углового размера корональных выбросов массы показал, что для событий с наблюдаемой геоэффективностью он колеблется от  $40^\circ$  до  $80^\circ$  и в среднем составляет порядка  $70^\circ$ .<sup>3</sup> Угловой размер корональных выбросов типа петля примерно на 20% превышает средний размер корональных выбросов, не нашедших отражение в изменениях индексов Kp и Dst.

Приведём результаты рассмотрения характеристик спорадического радиоизлучения на стадии формирования корональных выбросов с наблюдаемой геоэффективностью и её отсутствием. В табл. 1 приведён список геоэффективных корональных выбросов массы с указанием наличия микроволновых широкополосных предвестников. Здесь под широкополосными предвестниками понимается регистрация спорадического излучения одновременно в большей части сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн, когда ширина спектрального интервала сравнима со средней частотой интервала  $f_{\text{ср}}$ , т. е. удовлетворяет условию  $\Delta f \sim f_{\text{ср}}$  (подробнее см. [4]).

<sup>3</sup> Заметим, что согласно [10] корональные выбросы массы, вызвавшие крупные геомагнитные бури ( $Dst \leq -100$  нТ) и относящиеся к событиям с высокой геоэффективностью, имеют среднюю ширину около  $88^\circ$ .

Таблица 1. Характеристики радиоизлучения, предшествующего геоэффективным корональным выбросам массы (1980, 1984–1988 годы)

№ п/п	Дата	Наличие микроволновых широкополосных предвестников	Длительность микроволновых широкополосных предвестников, мин	Наличие шумовых бурь
1	05.04.1980	+	>20	+
2	11.04.1980	+	>50	+
3	06.05.1980	–	–	+
4	26.06.1980	–	–	+
5	17.07.1980	+	>50	+
6	01.09.1980	+	>50	+
7	14.06.1984	–	–	+
8	24.04.1985	+	>50	+
9	07.02.1986	+	>30	+
10	10.02.1986	+	>50	+
11	07.09.1987	+	>50	+
12	14.01.1988	+	>50	+
13	29.06.1988	+	>20	+
14	08.08.1988	+	>20	+
15	01.11.1988	+	>30	+

Из 49 корональных выбросов массы 15 вызвали слабые геомагнитные бури, четырнадцать из них — это корональные выбросы типа петля. Одно событие, возможно, внесло вклад в изменения геомагнитных индексов, остальные 33 события не оказали такого воздействия.

Для всех пятнадцати случаев регистрации геоэффективных корональных выбросов массы на стадии их формирования наблюдалось спорадическое радиоизлучение: либо широкополосные предвестники во всём микроволновом диапазоне и шумовые бури (12 событий), либо только шумовые бури в метровом диапазоне (3 события). При этом длительность микроволновых предвестников во всех случаях превышает 20 мин.

Сопоставление геоэффективных корональных выбросов массы типа петля с наличием одновременных  $H_{\alpha}$ -вспышек позволило уточнить локализацию и координаты формирования и начального отрыва корональных выбросов массы на поверхности Солнца. В предположении осевой симметрии корональных выбросов массы и геометрическом представлении их распространения получено, что в абсолютном большинстве рассмотренных случаев Земля находится в зоне, охватываемой конусом раскрытия корональных выбросов массы (по данным с коронографов), попадает в сферу его влияния, что может служить свидетельством потенциальной геоэффективности корональных выбросов массы [45]. Отметим, что полученный нами результат по выделению конуса распространения корональных выбросов, охватывающего Землю, подтверждён в более поздних исследованиях [46, 47] связи наблюдаемых параметров геоэффективных корональных выбросов и индексов Dst. Авторы этих работ предлагают ввести новый прогностический параметр геоэффективности выбросов, зависящий от направления распространения коронального выброса массы.

При рассмотрении корональных выбросов массы, не сопровождавшихся существенными изменениями значений индекса Kp (отсутствие геоэффективных проявлений), отмечено наличие шумовых бурь, т. е. интенсивной спорадической компоненты радиоизлучения в метровом диапа-

зоне длин волн, для всех рассматриваемых событий. Широкополосные предвестники корональных выбросов массы наблюдались только для 5 из 33 событий. При этом для двух событий, одно из которых произошло на восточном краю диска, второе представляло собой только фронт с неопределённой скоростью [36], были зарегистрированы широкополосные предвестники корональных выбросов массы с длительностью больше 20 мин. В трёх случаях длительность радиопредвестников была менее 20 мин.

Из 33 корональных выбросов массы, не вызывающих изменений в магнитных индексах, 16 принадлежали к типу петля. Отметим, что в 13 из них положение источников корональных выбросов массы и их угловая ширина были таковы, что Земля находилась вне зоны, охватываемой конусом распространения выбросов, что приводит к отсутствию их геоэффективных проявлений. В трёх случаях отсутствие геоэффективных проявлений связано, скорее всего, с чрезвычайно малой скоростью распространения корональных выбросов (примерно от 55 до 340 км/с).

Таким образом, существует различие в полосе излучения и длительности микроволнового спорадического излучения, предшествующего геоэффективным и негеоэффективным корональным выбросам массы: перед большинством геоэффективных корональных выбросов наблюдаются широкополосные радиопредвестники длительностью более 20 мин, тогда как перед негеоэффективными событиями спорадическое радиоизлучение узкополосно, а его длительность составляет менее 20 мин.

Указанный эффект аналогичен обнаруженному ранее: микроволновые предвестники мощных геоэффективных солнечных вспышек<sup>4</sup>, сопровождающихся потоком протонов на орбите Земли, обладают широкой полосой излучения и существуют на более длительном интервале времени (более 30 мин) по сравнению с микроволновыми предвестниками событий без регистрации на орбите Земли энергичных протонов [31].

Из вышеприведённого анализа следует, что наличие шумовых бурь не является признаком, по которому можно судить о геоэффективности солнечных корональных выбросов массы. Поэтому в дальнейших исследованиях рассматривалось только микроволновое (сантиметровое и дециметровое) спорадическое радиоизлучение Солнца.

Указанное исследование было расширено на данные отдельных событий за 1989, 1998 и 1999 годы с использованием результатов наблюдений радиоизлучения Солнца в РАС НИРФИ «Зимёнки» и дало аналогичные устойчивые результаты рассмотрения характеристик радиопредвестников корональных выбросов массы для всех четырёх независимых массивов данных (1980 и 1984–1988; 1989, 1998 и 1999 годы — всего 213 событий) [49, 50].

## 2.2. Анализ данных Мировой службы Солнца

На основе анализа оригинальных данных РАС НИРФИ «Зимёнки» исследования явлений, предшествующих регистрации корональных выбросов в радиодиапазоне, были продолжены на базе данных Мировой службы Солнца в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн. Методика отбора данных аналогична [4] и первоначально изложена в [49].

Использовался весь комплекс событий за 1998 и 2003 годы, внесённых в созданные нами ранее каталоги явлений солнечной активности в радиоизлучении [51, 52]. Данные о регистрации корональных выбросов массы в указанные периоды получены на приборе другого поколения — коронографе белого света SOHO/LASCO, описание корональных выбросов массы приведено в каталоге [37].

<sup>4</sup> Необходимо подчеркнуть, что большие вспышки в большинстве случаев входят в комплекс явлений солнечной активности, связанных с солнечными корональными выбросами массы [48], наиболее мощными явлениями солнечной активности [1].

Всего рассмотрено 126 корональных выбросов массы (данные за 1998 и 2003 года объединены). Согласно критерию (уменьшение значений индекса Dst ниже уровня  $-30$  нТ в течение 1–3 дней после регистрации коронального выброса считалось проявлением его геоэффективности) 31 событие оказалось геоэффективным, оставшиеся 95 событий не вызвали изменений в индексе Dst.

Из 31 геоэффективного события в 27 случаях радиоизлучение на стадии предвестников корональных выбросов массы удовлетворяло условиям:

- 1) радиоизлучение широкополосно, по крайней мере, в одном из диапазонов, сантиметровом или дециметровом;
- 2) длительность радиопредвестников выбросов превышает 10 мин.

В трёх случаях эти условия не выполнялись из-за эффекта направленности радиоизлучения [53], поскольку активные области, где формировались корональные выбросы, заходили за западный край солнечного диска. Для источников всплесков, находящихся на краю солнечного диска, практически не наблюдается широкополосных (охватывающих сантиметровый-дециметровый диапазоны излучения) предвестников, либо время их существования достигает всего нескольких минут<sup>5</sup>. В одном случае наблюдаемое радиоизлучение исходило не из области формирования корональных выбросов массы (возможные источники радиопредвестников корональных выбросов установлены по данным местоположения рентгеновских и  $H_{\alpha}$ -всплесков на диске Солнца).

Примеры спорадического радиоизлучения, наблюдаемого перед регистрацией геоэффективных корональных выбросов массы, приведены на рис. 1.

Здесь, аналогично [4], временные изменения потока радиоизлучения  $S$  показаны в форме схематических профилей; справа указаны частота наблюдений в МГц 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 [51, 52].

На основе сформулированных условий широкополосности и длительности радиопредвестников корональных выбросов массы были проанализированы свойства радиоизлучения перед остальным массивом корональных выбросов (всего 95 событий), не сопровождавшихся изменениями в геомагнитных индексах.

Установлено 8 случаев, когда вышеуказанные условия выполнялись, но корональные выбросы не дали изменений в индексе Dst. Среди указанных восьми оказалось 5 случаев наблюдений, когда конус распространения корональных выбросов не захватывал Землю, поэтому их проявлений в геомагнитных индексах и не должно было наблюдаться. В трёх оставшихся случаях наблюдавшееся радиоизлучение было связано со вспышечной деятельностью других активных областей, не являвшихся источниками корональных выбросов массы.

Для 87 остальных корональных выбросов массы, не являвшихся геоэффективными, широкополосные предвестники не наблюдались.

Таким образом, на нескольких независимых выборках в различные фазы XXI–XXIII циклов солнечной активности установлено статистическое отличие в характеристиках радиоизлучения активных областей Солнца на стадии формирования в них корональных выбросов массы, проявляющихся или не проявляющихся в дальнейшем в поведении геомагнитных индексов.

---

<sup>5</sup> Ранее также было установлено явление «направленности» предвестников мощных солнечных микроволновых всплесков [41], большинство которых, как позднее было показано [42], реализуется при формировании и начальном распространении корональных выбросов массы.

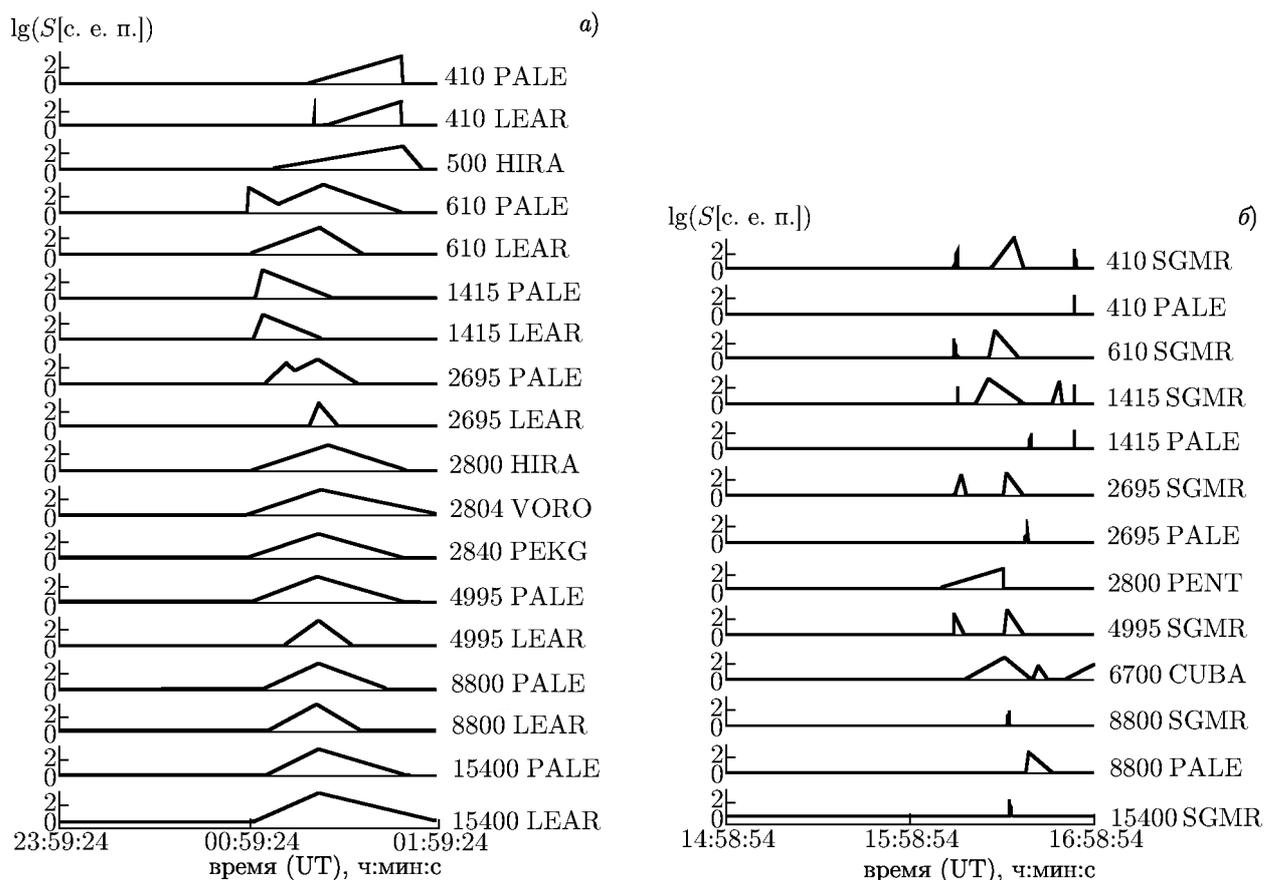


Рис. 1. Схематические временные профили микроволновых предвестников корональных выбросов массы в соответствии с данными Мировой службы Солнца 02–03.11.2003 (а) и 29.04.2008 (б). Правый край горизонтальной оси — момент регистрации выбросов на коронографе LASCO/C2. На вертикальной оси справа обозначены частоты наблюдений в мегагерцах и аббревиатуры названий обсерваторий, слева — наблюдаемые потоки радиоизлучения в логарифмическом масштабе

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматриваемые нами корональные выбросы массы были зарегистрированы двумя различными приборами, расположенными на разных спутниках: спектрографом-поляриметром (был размещён на Solar Maximum Mission) и коронографом белого света LASCO (размещён на SOHO). Обладающие разной чувствительностью коронографы, как детектирующие инструменты, регистрировали выбросы начиная с разных высот солнечной атмосферы до разных расстояний и на разных временных интервалах. Поэтому и описание корональных выбросов, приводимое в каталогах разное, т. к. изменилась морфологическая классификация типов явлений.

Если среди зарегистрированных спектрографом-поляриметром SMM наибольшее внимание привлекает наиболее развитый и характерный тип выбросов — петля и его потенциальная геоэффективность, то в случае регистрации выбросов коронографом SOHO/LASCO наиболее интересными с этой точки зрения оказываются выбросы типа гало и частичное гало [54].

Как показывают многочисленные исследования (см., например, [54] и ссылки там) корональные выбросы массы типа гало — это класс потенциально высоко геоэффективных событий. В зависимости от положения источника зарождения коронального выброса массы и, соответственно,

углового расстояния 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. Рассмотрению характера спорадического радиоизлучения Солнца в периоды, предшествующие регистрации именно этих классов корональных выбросов массы, за 1998 и 2003 годы посвящено отдельное исследование, часть результатов которого изложена в [4, 55].

Всего в рассматриваемый период 1998 и 2003 годов, согласно [51, 52], наблюдался 21 изолированный корональный выброс массы классов гало и частичное гало. Геоэффективными из них были 16 событий, перед 14 выбросами радиоизлучение удовлетворяло сформулированным выше условиям последующей геоэффективности происходящего на Солнце явления. В двух случаях источники корональных выбросов массы класса гало находились за лимбом.

Корональным выбросам массы класса гало на видимой части диска Солнца предшествуют широкополосные предвестники, обладающие особыми свойствами: они возникают практически одновременно во всём диапазоне, постепенная компонента излучения нарастает с последующим уменьшением потока, но не до первоначального уровня, временное поведение в сантиметровом и дециметровом диапазонах излучения подобны.

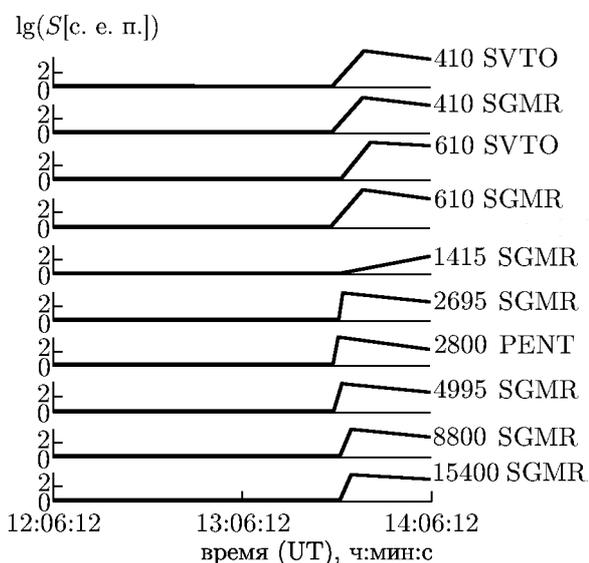


Рис. 2. Схематические временные профили микроволновых предвестников корональных выбросов массы типа гало в соответствии с данными Мировой службы Солнца 02.05.1998. Правый край горизонтальной оси — момент регистрации выбросов на коронографе LASCO/C2. На вертикальной оси справа обозначены наблюдаемые частоты в мегагерцах и аббревиатуры названий обсерваторий, слева — наблюдаемые потоки радиоизлучения в логарифмическом масштабе

излучения плазмы, в первую очередь за счёт нагрева источника коронального выброса. Одновременность возникновения предвестников при этом свидетельствует о высоких скоростях прогрева плазмы в солнечной хромосфере и нижней короне.

Установленный нами высокий процент геоэффективных корональных выбросов массы класса гало близок к опубликованному в [54, 56]. В то же время другими авторами замечено, что доля

Пример динамики потоков радиоизлучения  $S$  на каждой из используемых в наблюдениях частот в форме схематических профилей приведён на рис. 2.

Как видно из приведённого примера (характерного и для всех других, входящих в исследование событий [4, 55]), за 25÷60 мин перед регистрацией выбросов на коронографе во всём спектральном интервале возникает спорадическая компонента радиоизлучения (типа GRF или RF по международной классификации [35]), существующая до момента регистрации коронального выброса массы. Спорадические явления других видов, кроме GRF и RF, предшествующие регистрации выбросов типа гало, внутри двухчасового интервала времени не наблюдаются.

Временная и спектральная динамика таких микроволновых предвестников может свидетельствовать о проявлении в их излучении одновременно процессов формирования выброса и начального распространения глобальной структуры корональных выбросов класса гало. На импульсное излучение с его характерным временем существования, меньшим или равным нескольким минутам, налагается постепенное излучение, связанное, на наш взгляд, с увеличением тепло-

геоэффективных корональных выбросов класса гало, возникших на видимой стороне Солнца, колеблется от менее, чем 40 % до более, чем 80 % [57]. Такое большое расхождение может быть связано или с принципом отбора в исследуемый класс гало (учёт выбросов класса частичное гало [58]), или некорректной идентификацией корональных выбросов массы («гало-СМЕ на лицевой стороне без активности на диске считаются как СМЕ на обратной стороне» [59].) Установленный факт поведения широкополосных микроволновых предвестников в период, предшествующий регистрации корональных выбросов массы типа гало на коронографах, может служить дополнительным условием для корректной идентификации событий на видимой стороне Солнца и стать ещё одним отличительным признаком последующей высокой геоэффективности указанных событий.

В качестве оперативной проверки установленных закономерностей был проведён дополнительный анализ активных событий на Солнце. Для примера рассмотрены две из немногих крупных вспышек одинакового класса в данном цикле 30 июля 2011 года (M9.3) и 4 августа 2011 года (M9.3), последняя из которых была связана с корональным выбросом массы.

Перед вспышкой 30 июля 2011 года на двухчасовом интервале широкополосные предвестники не наблюдались, корональный выброс не был зарегистрирован. Геоэффективное воздействие, обусловленное этой вспышкой, было кратковременным (менее 9 часов) и незначительным ( $Kp_{\max} = 5$ ). Напротив, корональному выбросу массы, произошедшему 4 августа 2011 года на видимой стороне Солнца, предшествовало микроволновое спорадическое излучение в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн с длительностью более 10 мин, что отвечает установленным нами критериям последующей геоэффективности события. Действительно, в поведении  $Kp$ -индекса через 42 часа после регистрации выброса на коронографе LASCO/C2 наблюдались существенные изменения: максимальная величина достигла уровня  $Kp_{\max} = 8$ , а длительность изменений — около суток.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопросы исследования геоэффективности возникающих корональных выбросов массы и их влияния на параметры околоземного пространства предусматривают анализ и учёт типов солнечных корональных выбросов, состава и динамики межпланетных выбросов, их взаимодействия с околоземным пространством и характеристик их геоэффективных проявлений [60].

В работе проведено рассмотрение закономерностей спорадического микроволнового излучения, предшествующего регистрации геоэффективных корональных выбросов массы, по данным широкодиапазонных патрульных наблюдений Солнца в радиодиапазоне, охватывающих сантиметровый, дециметровый и метровый диапазоны длин волн, в отдельные периоды XXI–XXIII циклов солнечной активности.

1) Подтверждено установленное ранее в работе [4] авторов статьи свойство солнечного радиоизлучения, заключающееся в том, что значительному числу корональных выбросов массы на двухчасовом интервале до их регистрации на коронографах предшествует спорадическое радиоизлучение, которое можно определить как радиопредвестники корональных выбросов массы.

2) Установлены на основе статистического рассмотрения закономерности существования радиопредвестников таких корональных выбросов массы, воздействие которых на околоземное пространство проявляется в изменениях геомагнитных индексов ( $Kp$  и  $Dst$ ):

- наличие широкополосного радиоизлучения радиопредвестников корональных выбросов, по крайней мере, в одном из диапазонов: сантиметровом или дециметровом;
- длительность радиопредвестников более 10 мин.

Такие радиопредвестники предшествуют корональным выбросам, обладающим наибольшей потенциальной геоэффективностью, относящимся по классификации, применяемой на различных

коронографях, к классам петля, гало и частичное гало.

3) Подтверждено, что корональным выбросам массы классов гало и частичное гало предшествуют радиопредвестники, охватывающие сантиметровый и дециметровый диапазоны и обладающие особыми свойствами: одновременно возникающей во всём микроволновом диапазоне компонентой излучения с подобным временным поведением на различных частотах микроволнового диапазона с постепенным нарастанием и последующим уменьшением потока.

Подобное свойство временной структуры радиовсплесков отмечалось и ранее, однако не связывалось с последующей регистрацией корональных выбросов массы, тем более, не проводилось исследований по их связи с корональными выбросами массы различных типов.

4) Установлено, что в случаях, когда источник корональных выбросов массы расположен на западном краю солнечного диска или за его лимбом, широкополосные радиопредвестники отсутствуют из-за эффекта направленности излучения, в то время как геоэффективные проявления корональных выбросов класса гало и частичное гало возможны.

В заключение следует подчеркнуть, что учёт явлений в широком спектре электромагнитных волн, включая микроволновое излучение, на стадии формирования и начального распространения корональных выбросов массы, является, на наш взгляд, необходимым этапом комплексного подхода к рассмотрению геоэффективности корональных выбросов и их влияния на параметры околоземного пространства.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 09-02-01078).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schwenn R., Raymond J. C., Alexander D., et al. // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 123. P. 127.
2. Gopalswamy N., Mikic Z., Maia D., et al. // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 123. P. 303.
3. Pick M., Vilmer N. // *Astron. Astrophys. Rev.* 2008. V. 16. P. 1.
4. Шейнер О. А., Фридман В. М. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2010. Т. 53, № 5–6. С. 311.
5. Webb D. F., Jackson B. V., Hick P. // *ASP Conf. Ser.* 1996. V. 95. *Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances.* P. 167.
6. Crooker N. U. // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000. V. 62, No. 12. P. 1071.
7. Ермолаев Ю. И., Ермолаев М. Ю. // *Космические исследования.* 2003. Т. 41, № 6. С. 573.
8. Kaur S., Kumar S. // *29th Int. Cosmic Ray Conf., Pune.* 2005. V. 1. P. 145.
9. Gopalswamy N., Yashiro S., Akiyama S. // *ILWS Workshop 2006, GOA, February 19–24, 2006.* P. 1.
10. Gopalswamy N. // *Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets: Proc. IAU Symp.* No. 264. 2009. P. 119.
11. Gopalswamy N. // *Proc. 2009 Int. Conf. Space Sci. Commun., 26–27 October 2009, Port Dickson, Negeri Sembilan, Malaysia.* P. 5.
12. Sheiner O. A., Fridman V. F., Krupenya N. D., et al. // *ESA Spec. Publ.* 2002. V. 477. *Proc. Second Solar Cycle and Space Weather Euroconference, 24–29 September 2001, Vico Equense, Italy.* P. 479.
13. Gosling J. T., McComas D. J., Phillips J. L., Bame S. J. // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 7831.
14. Tsurutani B. T., Gonzalez W. D. // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1995. V. 57, No. 12. P. 1369.
15. Bothmer V., Schwenn R. // *Ann. Geophys.* 1998. V. 16, No. 1. P. 1.
16. Webb D. F., Cliver E. W., Crooker N. U., et al. // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 7491.
17. Zhang J., Dere K. P., Howard R. A., Bothmer V. // *Astrophys. J.* 2003. V. 582. P. 520.
18. Srivastava N., Venkatakrishnan P. // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. Art. no. A10103.
19. Ермолаев Ю. И., Ермолаев М. Ю. // *Космические исследования.* 2002. Т. 40, № 1. С. 3.

20. Wu C.-C., Lepping R. P. // *Solar Phys.* 2011. V. 269. P. 141.
21. Reinard A. A. // *Astrophys. J.* 2008. V. 682. P. 1289.
22. Zhang J., Richardson I. G., Webb D. F., et al. // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. Art. no. A10102.
23. Бархатов Н. А., Жулина Е. Г., Королёв А. В. и др. // *Солнечно-земная физика.* 2005. Т. 121, № 8. С. 200.
24. Gopalswamy N. // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 124. P. 145.
25. Бархатов Н. А., Зырянова М. С., Иванов К. Г. и др. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2002. Т. 42, № 5. С. 594.
26. Бархатов Н. А., Гольберг К. Ю., Зырянова М. С., Иванов К. Г. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2003. Т. 43, № 1. С. 28.
27. Бархатов Н. А., Жулина Е. Г., Калинина Е. А. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2010. Т. 50, № 3. С. 317.
28. Дурасова М. С., Фридман В. М., Шейнер О. А. // *Солнечно-земная физика: Тр. VII Смпозиума по солнечно-земной физике России и стран СНГ.* Троицк: ИЗМИРАН, 1999. С. 83.
29. Durasova M. S., Fridman V. M., Sheiner O. A. // *ESA Spec. Publ.* 1999. V. 448. Proc. 9th European Meeting on Solar Phys. "Magnetic Fields and Solar Processes", Florence, Italy, 12–18 September 1999. P. 979.
30. Martin S. F. // *Solar Phys.* 1980. V. 68. P. 217.
31. Дурасова М. С., Подстригач Т. С., Фридман В. М., Шейнер О. А. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1996. Т. 39, № 11–12. С. 1425.
32. Dougherty B., Zirin H., Hsu K. // *Astrophys. J.* 2002. V. 577. P. 457.
33. Дурасова М. С., Фридман В. М., Шейнер О. А. // *Тр. научн. конф. стран СНГ и Прибалтики «Активные процессы на Солнце и звездах», Санкт-Петербург, 2002.* С. 199.
34. 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.
35. *Solar-Geophysical Data (explanation of data reports).* 1981. No. 438.  
[ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar\\_data/solar\\_radio/bursts/radio.txt](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar_data/solar_radio/bursts/radio.txt).
36. [http://smm.hao.ucar.edu/smm/smmcp\\_catalog.html](http://smm.hao.ucar.edu/smm/smmcp_catalog.html).
37. [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list).
38. [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/HALO/halo.html](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/HALO/halo.html).
39. <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/solardataservices.html>.
40. [http://www-app3.gfz-potsdam.de/kp\\_index/description.html](http://www-app3.gfz-potsdam.de/kp_index/description.html).
41. [http://www-app3.gfz-potsdam.de/kp\\_index/apdescription.html](http://www-app3.gfz-potsdam.de/kp_index/apdescription.html).
42. Davis T. N., Sugiura M. // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71. P. 785.
43. Sugiura M. // *Ann. Int. Geophys. Year.* New York: Elsevier, 1964. V. 35. P. 945.
44. Burton R. K., McPherron R. L., Russell C. T. // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. P. 4204.
45. Дурасова М. С., Фридман В. М., Шейнер О. А. // *Труды ГАИШ.* 2001. Т. 71. *Физика Солнца и космическая электродинамика.* С. 173.
46. Moon Y.-J., Cho K.-S., Dryer M., et al. // *Astrophys. J.* 2005. V. 624. P. 414.
47. Kim R.-S., Cho K.-S., Kim K.-H., et al. // *Astrophys. J.* 2008. V. 677. P. 1378.
48. Reeves K. K., Moats S. J. // *Astrophys. J.* 2010. V. 712. P. 429.
49. Sheiner O. A., Fridman V. M., Durasova M. S. // *ESA Spec. Publ.* 2002. V. 477. Proc. Second Solar Cycle and Space Weather Euroconference, 24–29 September 2001, Vico Equense, Italy. P. 373.
50. Шейнер О. А., Дурасова М. С. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1994. Т. 37. С. 883.
51. Дурасова М. С., Тихомиров Ю. В., Фридман В. М., Шейнер О. А. *Каталог явлений солнечной активности за 1998 год, предшествующих регистрации КВМ, по данным Мировой службы*

- Солнца в радиодиапазоне: Препринт № 483 НИРФИ. Нижний Новгород, 2003.
52. 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 год: Препринт № 496 НИРФИ. Нижний Новгород, 2004.
  53. Железняков В. В. Радиоизлучение Солнца и планет. М.: Наука, 1964. 560 с.
  54. Gopalswamy N., Yashiro S., Akiyama S. // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. Art. no. A06112.
  55. Фридман В. М., Шейнер О. А., Тихомиров Ю. В. // *Изв. РАН. Сер. Физическая.* 2006. Т. 70, № 10. С. 1487.
  56. Cyr O. C. St., Howard R. A., Sheeley N. R. Jr., et al. // *J. Geophys. Res. A.* 2000. V. 105, No. 8. P. 169.
  57. Yermolaev Yu. I., Yermolaev M. Yu., Zastenker G. N., et al. // *Planet. Space Sci.* 2005. V. 53, No. 1–3. P. 189.
  58. Gopalswamy N. // *Earth, Planets Space.* 2009. V. 61. P. 1.
  59. Ермолаев Ю. И. // *Космические исследования.* 2008. Т. 46, № 6. С. 572.
  60. Rodrigues L., Mierla M., Zhukov A. N., et al. // *Solar Phys.* 2011. V. 270. P. 561.

Поступила в редакцию 5 сентября 2011 г.; принята в печать 28 октября 2011 г.

**THE FEATURES OF MICROWAVE SOLAR RADIATION OBSERVED  
AT THE STAGE OF FORMATION AND INITIAL PROPAGATION  
OF GEOEFFECTIVE CORONAL MASS EJECTIONS**

*O. A. Sheyner and V. M. Fridman*

We consider sporadic radio emission prior to the registration of geoeffective coronal mass ejections, according to the wide-range patrol observations of the sun, which cover the centimeter-, decimeter-, and meter-wave ranges in some periods of XXI–XXIII solar-activity cycles. Total amount of the used information, including the data from the radioastronomical station “Zimenki” of the Radiophysical Research Institute and the World Sun Service in the radiofrequency range and the catalogs of coronal mass ejections recorded by the SMM and SOHO/LASCO devices, was 339 events. On the basis of statistical analysis, the laws of the characteristics of sporadic microwave radiation in the two-hour interval were obtained before coronagraphs recorded geoeffective coronal mass ejections, which were defined as radio precursors of such coronal mass ejections. The revealed laws in the characteristics of the radio precursors of geoeffective coronal mass ejections involve the presence of the broadband centimeter-decimeter radiation lasting over 10 minutes at the stage prior to the coronal ejection registration by coronagraphs. Such radio precursors have been shown to precede the coronal ejections of the loop, halo, and partial halo classes, which have maximum potential geoefficiency. The features of radio emission, which do not meet the established laws, have been analyzed.