

УДК: 523.985.7-77

РАДИОПРЕДВЕСТНИКИ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ФЕВРАЛЕ – МАРТЕ 2023 ГОДА

© 2024 г. О. А. Шейнер*, В. М. Фридман

Научно-исследовательский радиофизический институт

Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

**e-mail: rfj@nirfi.unn.ru*

Поступила в редакцию 15.08.2023 г.

После доработки 13.11.2023 г.

Принята к публикации 20.11.2023 г.

На основе анализа данных за февраль – март 2023 г. рассмотрены результаты исследований связи между возникновением спорадического микроволнового излучения, предшествующего явлениям корональных выбросов массы, и этими явлениями с целью разработки методов краткосрочного прогнозирования корональных выбросов массы по радиоданным.

DOI: 10.31857/S0023420624020027, EDN: kzparw

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы уделяется большое внимание изучению корональных выбросов массы (КВМ) – наиболее важных солнечных явлений, основного движущего фактора космической погоды [1]. В процессах и явлениях, происходящих в солнечной атмосфере, магнитное поле и его вариации играют решающую роль, в том числе и в формировании КВМ. Изучение КВМ важно как с точки зрения понимания фундаментальных солнечных процессов, так и с прикладной – выяснения их воздействия и оценки влияния на параметры и динамику «космической погоды».

Мощное излучение в широком диапазоне электромагнитных волн, генерация ускоренных заряженных частиц, формирование ударных волн в межпланетном пространстве, характерные для КВМ, вызывают возмущения в магнитосфере и ионосфере Земли, приводящие к нарушениям функционирования различных систем (ориентации, связи), оказывают влияние на ионосферу, погодообразующие процессы и на здоровье людей [2–5]. Таким образом, возникает проблема изучения связи характеристик и динамики явлений КВМ на Солнце с их проявлениями в околоземном пространстве. Очевидна при этом важность прогноза явлений КВМ с возможной заблаговременностью, повышающей эффективность оценки состояния и развития характеристик околоземной среды, обусловленных факторами «космической

погоды». Возможности прогноза начала и временных профилей событий, вызванных солнечной активностью, включая вспышки солнечного рентгеновского излучения и КВМ, имеют решающее значение для информационного обеспечения профильных служб, объявления alertных периодов, принятия решений и, соответственно, смягчения потенциального воздействия КВМ.

Большинство современных опубликованных работ по прогнозированию КВМ относится к проблеме определения возможной геоэффективности КВМ [6], тогда как алгоритмов прогнозирования факта КВМ довольно мало [7–10]. При этом в качестве прогностических признаков событий используются, как правило, магнитограммы, карты распределения фотосферных магнитных полей, их изменения или машинные алгоритмы на основе статистических связей событий КВМ и элементов магнитных структур.

Нет единого мнения о том, что представляет собой предэруптивная стадия взрывного высвобождения магнитной энергии, вызывающая КВМ, какие физические процессы ответственны за образование КВМ [11–13]. В то же время известно, что наиболее энергичные КВМ формируются вблизи активных областей (АО) в нижней короне, поэтому структура и динамика коронального магнитного поля являются ключом к пониманию процессов, управляющих формированием и извержением КВМ. Но нет возможности мониторинга коронального магнитного поля, и, как известно, измерить его трудно [14].

Именно здесь радионаблюдения помогут заполнить пробел в знаниях либо как индикаторы накопления энергии и дисбаланса в АО, либо как предвестники надвигающегося извержения.

Радиоизлучение генерируется во всей солнечной атмосфере, от хромосферы до межпланетного пространства, посредством множества плазменных процессов, в основном при наличии магнитного поля, горячими, сильно ионизованными газами внешней атмосферы Солнца. Эти разреженные газы, практически прозрачные для видимого света, оказываются непрозрачными для радиоизлучения с определенными длинами волн. Хромосфера, которая имеет достаточно высокую концентрацию электронов и температуру $T \approx 10^4$ К, прозрачна только для сантиметровых волн. Дециметровые и метровые волны могут прийти только из лежащей выше более разреженной и горячей короны Солнца с температурой $T \approx 1\text{--}2 \cdot 10^6$ К [15–19]. Даже слабо ускоренные электроны с энергией в несколько килоэлектронвольт могут излучать заметное радиоизлучение, что делает такие наблюдения чувствительным показателем даже слабых энергетических процессов. Следовательно, их обнаружение в области последующего извержения может быть предвестником активности. Эта предпосылка, а также данные моделей о том, что предэруптивная конфигурация магнитного поля развивается по мере того, как система движется к потере равновесия, стали стимулом для попытки идентифицировать радиопредвестники КВМ.

Так, ни одно из исследований связи между КВМ и шумовыми бурями I типа [20, 21] не предоставило убедительных доказательств: «Кажется, что эти два явления каким-то образом взаимосвязаны, но детали взаимосвязи (физические, временные и/или пространственные) до сих пор неясны» [20]. Исследование радиоизлучения III типа [22] показало, что оно, как правило, происходит в непосредственной временной близости (около минут) к импульсной фазе вспышки и имеет мало значения в качестве предвестника [23, 24]. Восходящий континуум, впервые предложенный в качестве предвестника в работе [25], обнаружен также за 30 мин до крупного извержения 28 октября 2003 г. [26]. Особенности были зарегистрированы только в дециметровом диапазоне, на высоте нескольких 10^5 км над поверхностью, и поэтому могут быть признаками системы восходящего потока перед извержением.

При разработке краткосрочных прогнозов мощных солнечных вспышек [27, 31] была

показана эффективность использования микроволнового излучения Солнца, как индикатора дисбаланса в АО за 1–2 дня до возникновения вспышек с использованием данных как с высоким пространственным разрешением [28], так и без него [27, 29–31]. Предвестники, предшествующие импульсной фазе всплеска, в виде спорадических последовательных повышений уровня излучения были зарегистрированы в радиодиапазоне на 6 фиксированных частотах: 9100, 2950, 950, 650, 200 и 100 МГц, — и эти данные расширены на более чем два 11-летних цикла солнечной активности (1970–1994 гг.) [32]. Регистрация предвестников такого типа находит подтверждение и в более поздних (2002, 2015 г.) наблюдениях с высоким пространственным разрешением [33].

Первые работы по выявлению микроволновых (сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн) предвестников КВМ относятся к радионаблюдениям на станции Службы Солнца в радиодиапазоне НИРФИ «Зимёнки» [34]. В результате исследований с использованием данных, охватывающих 21–23-й циклы солнечной активности, установлены соотношения между спорадической компонентой микроволнового излучения на стадии, предшествующей КВМ, и их параметрами [35, 36]. Отметим, что представленные результаты получены с использованием данных рутинных наблюдений обсерваторий без пространственного разрешения, принадлежащих Мировой службе Солнца.

ДАННЫЕ И МЕТОД

На основе анализа временных и спектральных данных микроволнового солнечного излучения в широком диапазоне частот (от сотен до 15000 МГц) в период, предшествующий явлению КВМ, создан способ краткосрочного прогноза времени регистрации КВМ на коронографе [37]. Способ включает операции, обусловленные процессами, охватывающими на начальном этапе значительную часть Солнца, с их последующей локализацией в центрах непосредственного формирования КВМ и их отражением в солнечном микроволновом радиоизлучении.

Предлагаемый способ, как метод, основанный на эмпирических данных, представляет собой классическую комбинацию методов прогнозирования: точечного, когда указывается, наступит событие или нет, и вероятностного, поскольку определяется временной интервал регистрации события. По структуре метод основан на схеме

идентификации, наиболее простым вариантом которой является синоптическая диаграмма, когда по предыстории обучающая выборка определяет совокупность характеристик, которые чаще всего предшествовали прогнозируемому событию, что позволяет нам предсказать событие в определенном интервале времени [38].

Полная реализация способа предусматривает схему, использующую связанные процедуры: наличие и рост амплитуды долгопериодных ($T > 20$ мин) пульсаций микроволнового излучения за 2–3 сут. до события; наличие устойчивых узкополосных (шириной до 1 МГц) особенностей радиоизлучения за 5–8 ч до события и регистрацию на интервале за 2 ч до события широкополосных микроволновых предвестников (далее радиопредвестников) в виде подобного поведения спорадической компоненты радиоизлучения на различных частотах. Последняя — совокупность всплесковых явлений со взрывным ростом (от долей до десятков секунд). Характерной особенностью является также отсутствие всплесков на протяжении 1–1.5 ч до возникновения предвестников [36]. В дальнейшем исследования показали, что можно сократить интервал 5–8 ч до 3 ч без ущерба для применения в прогнозировании третьей части схемы указанного способа.

Повышенная солнечная активность и значительное число событий KBM, зарегистрированных в феврале — марте 2023 г., позволили продолжить изучение связи между событиями KBM и характеристиками явлений в микроволновом диапазоне на 2-часовом временном интервале, непосредственно предшествующем регистрации KBM; а также провести исследование возможностей и повышения эффективности указанного выше способа краткосрочного прогноза времени регистрации KBM коронографом, основанного на анализе временных и спектральных данных микроволнового солнечного излучения в широком диапазоне частот.

Важно отметить, что высокий уровень солнечной активности в 2023 г. не позволяет использовать в проведенных исследованиях полную схему ранее разработанного способа краткосрочного прогноза времени регистрации KBM по радиоданным без пространственного разрешения. Это обусловлено невозможностью отделения радиоизлучения областей Солнца, связанных с формированием KBM, от радиоизлучения других АО Солнца. Таким образом, в работе при исследованиях применена та часть способа прогноза, которая связана с микроволновыми предвестниками для изолированных событий KBM,

поэтому можно говорить только о сверхкраткосрочном прогнозе явления KBM.

Информация о регистрации KBM доступна в каталоге CACTus (<http://sidc.be/cactus>). Данные о KBM вносятся в каталог автоматически с использованием наблюдений LASCO C2/C3. Для анализа использовались день и время первого появления KBM в поле зрения коронографа LASCO/C2, позиционный угол pa , угловая ширина da и медианная скорость выброса, указанные в каталоге CACTus. Эти параметры были использованы при выявлении предполагаемого места извержения KBM, направления его распространения и мощности. Для уточнения факта выброса и его местоположения использовались разностные изображения Солнца, приведенные в каталоге SOHO LASCO CME CATALOG (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).

Магнитограммы Солнца по данным SDO/HMI (stanford.edu; HMI Image and Movie Browser) так же, как и изображение Солнца в рентгеновских лучах (solarmonitor.org), использовались нами для идентификации расположения источника KBM.

Методологические принципы изучения микроволновых предвестников так же, как и в работах [35, 36], основаны на анализе данных Мировой службы Солнца (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/>) с использованием международной классификации радиовсплесков, приведенной в каталоге [39]. В указанный период исследования были доступны данные солнечных обсерваторий Learmonth, Sagamore Hill, Palehua, San Vito.

Данные Мировой службы Солнца в рассматриваемом диапазоне частот, получены с помощью радиотелескопов с широкой диаграммой направленности — без высокого пространственного разрешения. При исследовании явлений в радиоизлучении, предшествующих первому появлению в поле зрения коронографа конкретного KBM, необходимо быть уверенным, что никакие другие KBM в течение рассматриваемого интервала времени не наблюдаются. Исходя из этого из всех событий, приведенных в каталоге за февраль — март 2023 г., были выбраны такие выделенные события KBM, перед которыми на протяжении по крайней мере 3 ч не наблюдалось других событий KBM или мощных всплесковых явлений.

Выбор временного интервала исследования радиоизлучения (2 ч) подтверждается результатами работы [40], авторы которой проанализировали число радиособытий в зависимости от разности

между временем первой регистрации КВМ на коронографе (нулевой момент времени) и началом радиособытия за период 1996–2000 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По данным Каталога LASCO SOHO в феврале 2023 г. зарегистрировано 130 КВМ, в марте 2023 г. — 186 КВМ различной мощности и направленности. Для исследований с учетом условий использования указанного выше метода обработки данных (изолированность в пределах 3 ч до регистрации события) выделено 86 уединенных КВМ в феврале 2023 г. и 97 КВМ в марте 2023 г.

Совместный анализ магнитограмм Солнца (по данным SDO/HMI), изображений КВМ (по данным каталогов CACTus и SOHO LASCO) и солнечного радиоизлучения (по данным Мировой службы Солнца) установил, что для более чем 36% отобранных для анализа изолированных КВМ в феврале и около 30% КВМ марте за 2 ч до регистрации КВМ отмечены спорадические явления

в солнечном радиоизлучении, которые можно характеризовать как радиопредвестники КВМ.

Стоит отметить, что в части из анализируемых событий предполагаемый источник КВМ находился за пределами видимого солнечного диска. Таким образом, процент событий КВМ, связанных с источниками на видимой стороне диска Солнца и в которых наблюдаются микроволновые предвестники, значительно больше, чем указан выше. Уточнение местоположения изолированных КВМ говорит о том, что, по нашим представлениям, в феврале 2023 г. 51 КВМ (из 86) произошли за лимбом, а в марте — 61 КВМ (из 97). Тогда почти 90% КВМ в феврале и 70% КВМ в марте предшествует радиоизлучение в широком диапазоне длин волн. Увеличение числа залимбовых событий КВМ в марте по отношению к февралю может свидетельствовать об увеличении общего уровня активности.

На рис. 1–4 приведены характерные примеры КВМ и их радиопредвестников. Временные изменения потока радиоизлучения S показаны

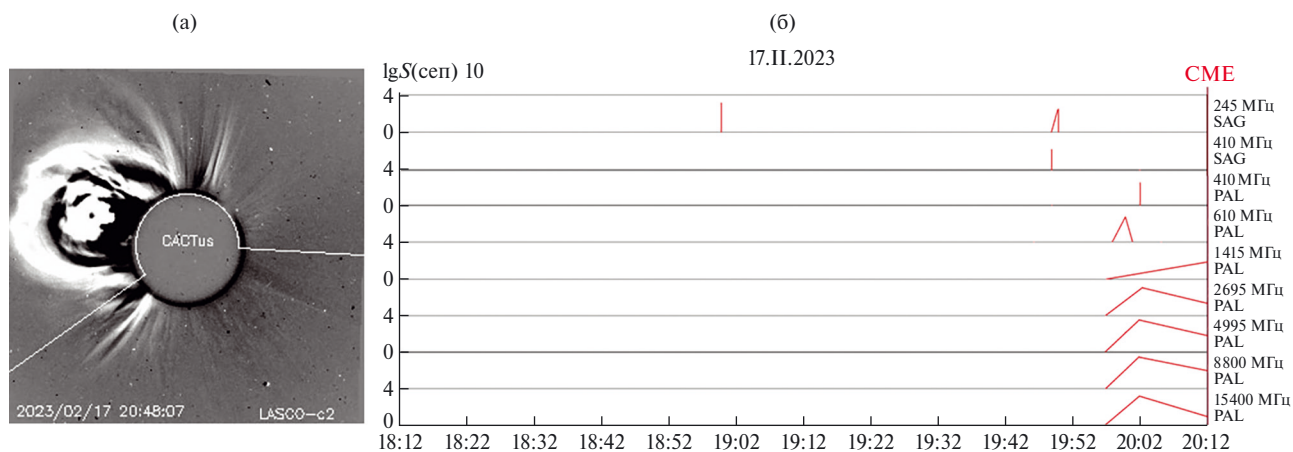


Рис. 1. Пример КВМ, зарегистрированного CACTus (LASCO/C2) 17.11.2023 в 20:12 UT (а), и его радиопредвестников (б).

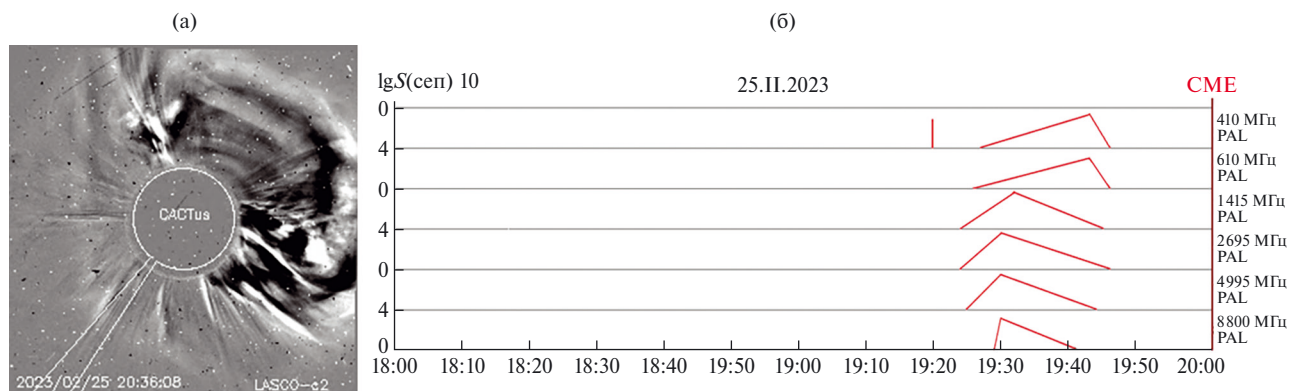


Рис. 2. То же, что рис. 1, 25.11.2023 в 20:00 UT.

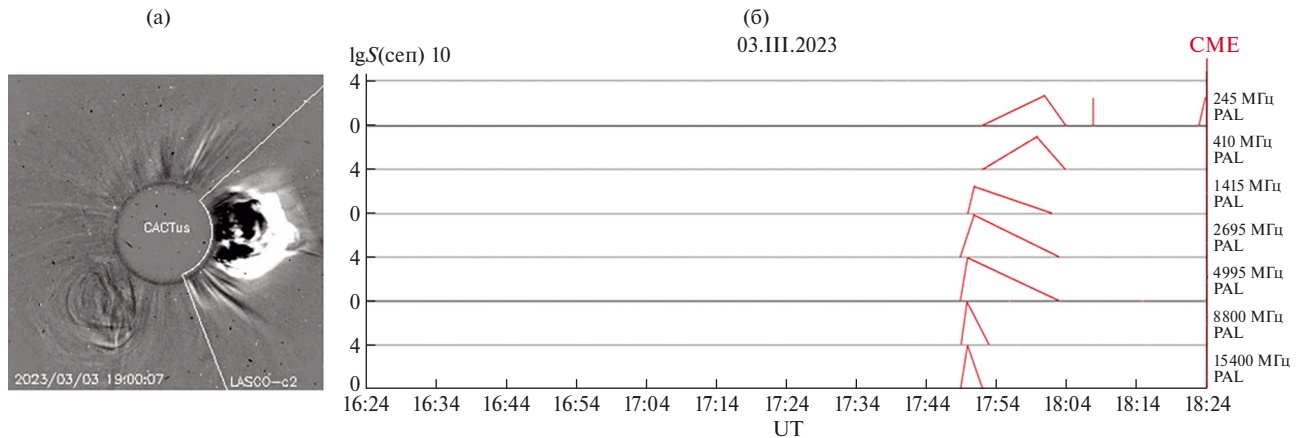


Рис. 3. То же, что рис. 1, 03.III.2023 в 18:24 UT.

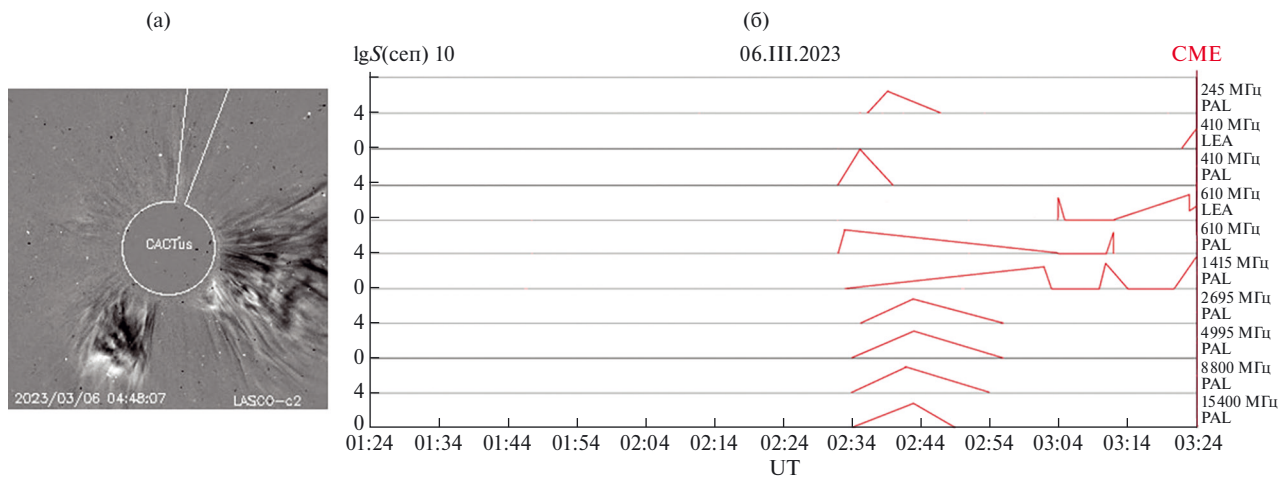


Рис. 4. То же, что рис. 1, 06.III.2023 в 03:24 UT.

в форме схематических профилей: справа указаны частоты наблюдений в мегагерцах и аббревиатуры соответствующих обсерваторий (данные радиоизлучения Мировой службы Солнца), слева — величины потоков, выраженные в сеп (10^{-22} Вт/м² Гц, в логарифмическом масштабе — $\lg(S(\text{сеп}) 10$). Правая граница горизонтальной оси соответствует моменту регистрации КВМ на коронографе LASCO/C2. Данный масштаб по оси ординат для потока радиоизлучения выбран в связи с большим диапазоном наблюдаемых величин зарегистрированных событий, нулевой уровень потока на каждой частоте сдвинут на 4 единицы относительно соседних частот.

Примеры КВМ на рис. 1–4 показаны как разностные изображения солнечной короны, полученные в белом свете с помощью коронографа LASCO/C2 (<http://sidc.be/cactus>). Белым цветом на изображении отмечены границы зарегистрированных КВМ. КВМ видны как яркие выбросы.

КВМ (20:12 UT, LASCO/C2) 17.II.2023 (рис. 1а) связан с АО 3229, расположенной на восточном краю диска Солнца. Рентгеновская вспышка X2.2 и зарегистрированное радиоизлучение ассоциируется также с указанной АО. Наблюдаемое в широком диапазоне частот радиоизлучение (рис. 1б) отражает процесс начального распространения КВМ в нижних слоях атмосферы Солнца в соответствии с ранее разработанной концепцией разработанного способа прогноза КВМ [37].

На рис. 2 приведены данные наблюдений 25.II.2023. КВМ типа Гало (20:00 UT, LASCO/C2) ассоциируется с той же АО 3229, расположенной уже на западном краю диска Солнца. Радиопредвестники КВМ, зарегистрированные в виде подобных всплесков, возникают примерно за 40 мин до регистрации КВМ на коронографе и также в соответствии с физической концепцией способа [37] свидетельствуют о процессах формирования КВМ.

Примеры отдельных событий марта 2023 г. приведены на рис. 3 и 4.

КВМ 03.III.2023 (рис. 3а) связан с АО 3234, расположенной на западном лимбе, там же произошла мощная вспышка (X2.1). Радиопредвестники КВМ (рис. 3б) наблюдаются на 7 частотах микроволнового диапазона. Отметим, начало радиоизлучения регистрируется одновременно на 4 частотах (15400, 8800, 4995 и 2695 МГц), которые генерируются на разных высотах атмосферы Солнца, что может свидетельствовать о месте и размере процесса формирования КВМ.

В событии КВМ 06.III.2023 в 03:24 UT (рис. 4а) за 1 ч до регистрации КВМ также наблюдается группа радиопредвестников, охватывающих широкий диапазон частот радиоизлучения (рис. 4б).

Таким образом, в тех случаях, когда источник КВМ находится на видимой стороне диска Солнца, регистрируется широкополосное спорадическое радиоизлучение (радиопредвестники КВМ) на интервале формирования и начального распространения КВМ.

Очевидно, что, когда источник КВМ находится на обратной стороне диска Солнца, радиопредвестники не регистрируются.

В то же время, поскольку радиоизлучение Солнца из центров активности, с которыми, как правило, связаны источники вспышек и КВМ, формируется на всей совокупности высот фотосферы, хромосферы и короны Солнца, существуют возможности обнаружения радиоизлучения спорадической компоненты в более низкочастотной области спектра в наблюдениях за АО в периоды их нахождения за восточным и западным краями солнечного диска. Что также может найти применение в способе краткосрочного прогноза КВМ по радиоизлучению.

На рис. 5 и 6 приведены примеры залимбовых КВМ и наблюдаемого радиоизлучения в феврале 2023 г.

КВМ (рис. 5а) зарегистрирован 20.II.2023 в 09:48 UT. Источник КВМ находится за восточной частью лимба, АО хорошо видна на следующий день (рис. 5б). Спорадическое радиоизлучение в виде шумовых бурь метрового диапазона отмечено за 1 ч до регистрации КВМ (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>).

На рис. 6а показан КВМ, зарегистрированный 10.II.2023 в 09:24 UT. Радиоизлучение в виде импульсных всплесков на $f = 245$ МГц (рис. 6г) отмечено в интервале 2 ч до регистрации КВМ. Скорее всего, КВМ выходит из области, расположенной

на самом краю солнечного диска, что подтверждается картой распределения магнитных полей (рис. 6б) и изображением данной области Солнца в рентгеновских лучах (рис. 6в) (solarmonitor.org).

Особый интерес вызывают события марта 2023 г., когда было зарегистрировано внезапное повышение уровня геомагнитной активности без увеличения вспышечной активности Солнца. Рассмотрим несколько примеров.

Событию КВМ 22.III.2023 в 18:48 UT (рис. 7а) предшествовало спорадическое радиоизлучение в диапазоне до 180 МГц и радиопредвестники в низкочастотной части спектра (245 МГц) за 2 ч до регистрации события (рис. 7в) (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>). Расположение АО на карте магнитных полей на Солнце (рис. 7б) и наличие радиопредвестников можно расценивать как свидетельство существования источника КВМ в области, находящейся в соответствии с развиваемыми представлениями на невидимой части диска Солнца.

На рис. 8а показан КВМ 24.III.2023 в 17:00 UT. Источник КВМ проецируется на область, рядом с развивающейся группой (рис. 8б) (XRT20230324_170258.3 – Hinode SDC Europe (uiop.noaa.gov/pub/warehouse)). По данным радиослужбы Солнца (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>) в низкочастотной части спектра двумя станциями было зарегистрировано импульсное радиоизлучение с временем существования, характерным для микроволновых предвестников КВМ (рис. 8в).

Второе событие КВМ 24.III.2023 в 21:48 UT (рис. 9а) проецируется на западную часть диска Солнца. Поскольку согласно карте магнитных полей (рис. 9б) в этой части Солнца нет АО, и в этот период не регистрируется нестационарное микроволновое излучение, то это служит свидетельством возникновения события КВМ далеко на обратной стороне Солнца.

Причисление КВМ 20 марта в 02:41 UT к геоэффективным (по данным каталогов МКВМ) является, с нашей точки зрения, ошибочным: выброс распространялся из-за восточного лимба и не мог привести к сильной магнитной буре. КВМ 20 марта в 14:42 UT произошел на обратной стороне Солнца, поэтому, естественно, радиоизлучение, как предшествующее КВМ, так и его сопровождающее, не может быть зарегистрировано на Земле. В наших исследованиях, основанных на данных, охватывающих 23–25-й 11-летние циклы солнечной активности, были единичные случаи, когда не наблюдались радиопредвестники событий КВМ типа Гало. Когда такие исследования проводились для источников КВМ на видимой части диска

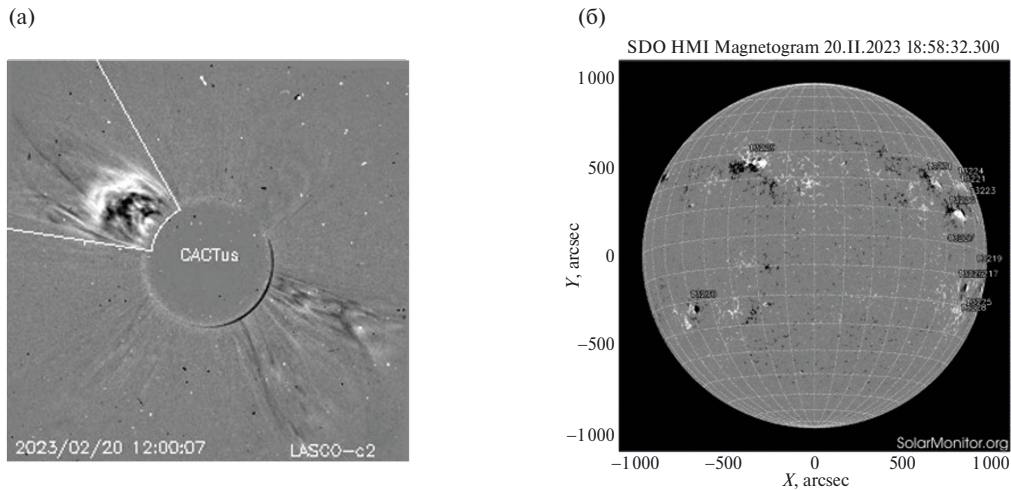


Рис. 5. Пример КВМ, зарегистрированного CACTus (LASCO/C2) 20.II.2023 в 09:48 UT (а), и магнитограмма Солнца по данным SDO HMI на этот день (б).

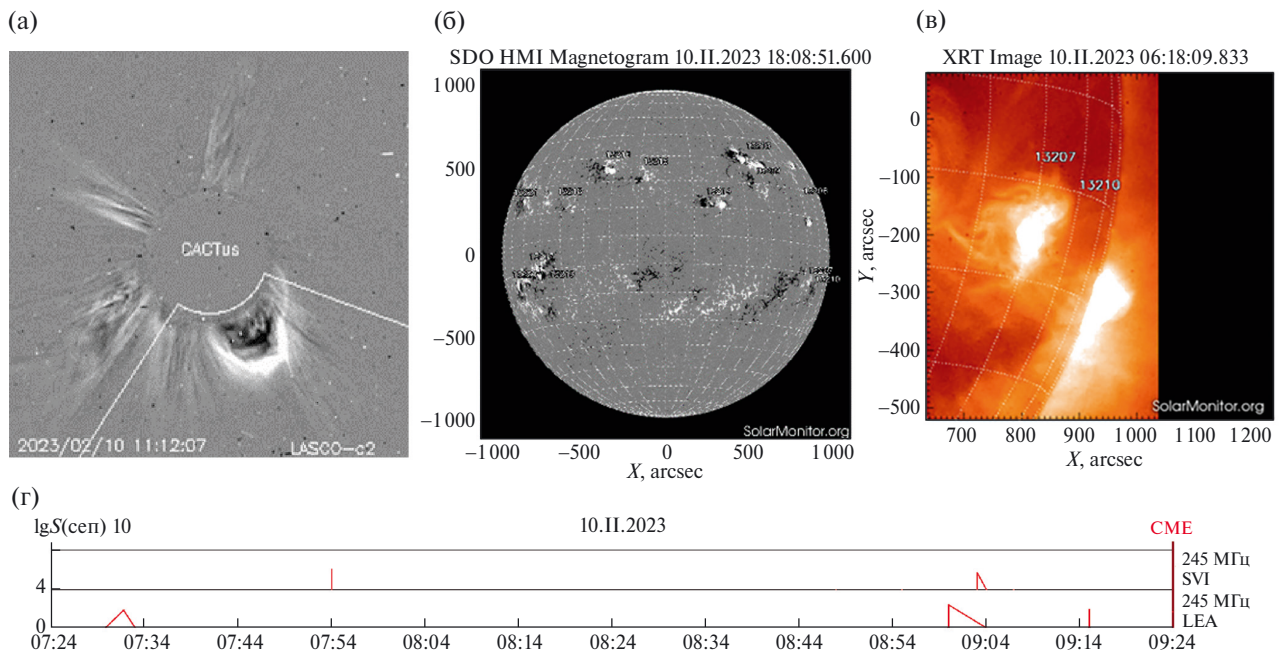


Рис. 6. То же, что рис. 5, 10.II.2023 в 09:24 UT, изображение области Солнца в рентгеновских лучах (в) и радиопредвестники КВМ (г).

Солнца, в абсолютном большинстве случаев для этого типа событий наблюдаются одновременное возникновение, быстрый рост и подобная форма радиопредвестников во всем диапазоне анализируемого частотного диапазона [36] (в этом случае показателен рис. 2 для источника КВМ типа Гало на видимой части диска Солнца). Данное событие обладает особенностями, которые выделяют его из остального ранее рассматриваемого множества КВМ типа Гало. Такая особенность, очевидно, связана с положением источника КВМ в наиболее удаленной части невидимого диска Солнца, т.е. когда

предлагаемые в статье возможности дополнительного сверхкраткосрочного прогнозирования событий КВМ не могут быть реализованы.

Таким образом, можно утверждать, что проведенные результаты исследований свидетельствуют об эффективности рассмотренного способа краткосрочного прогнозирования времени регистрации КВМ по широкополосным данным солнечного радиоизлучения и возможности расширения применения указанного способа для событий вне видимого диска Солнца.

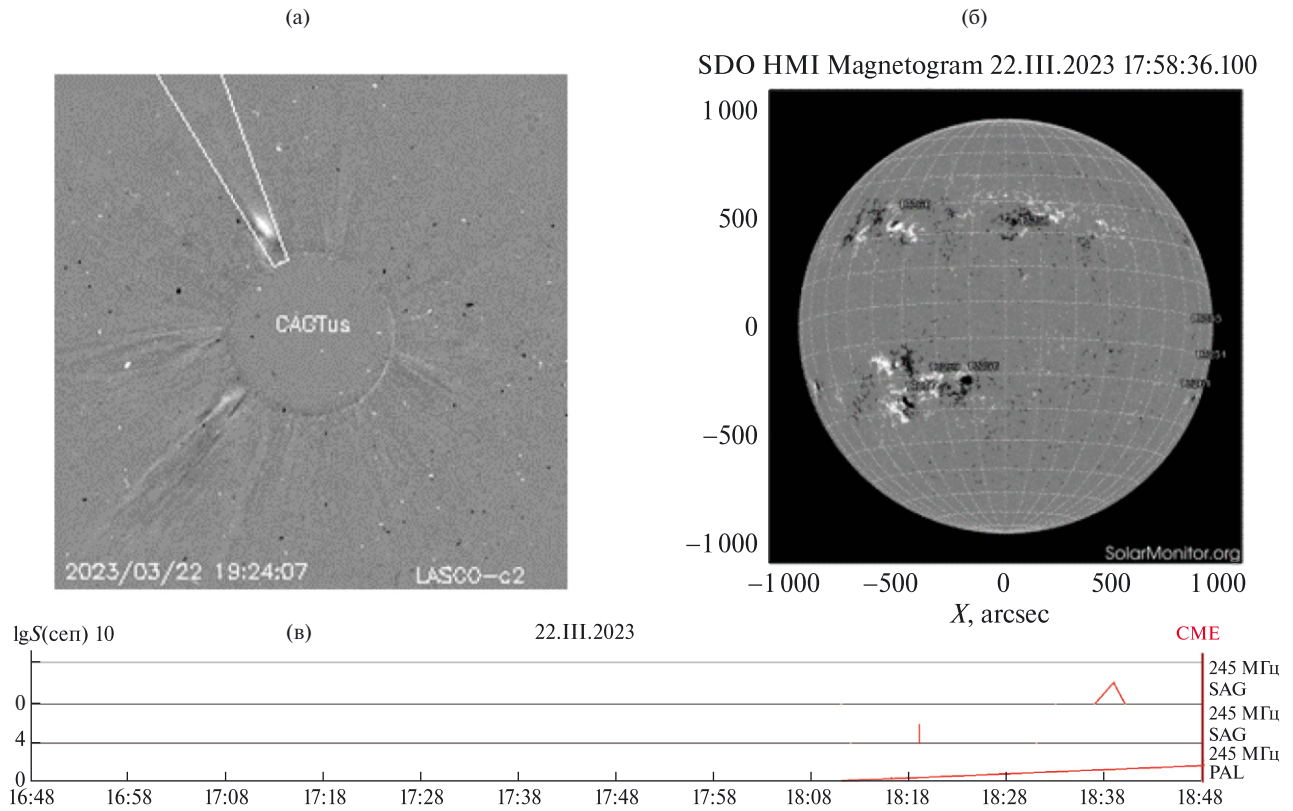


Рис. 7. Пример КВМ, зарегистрированного CACTus (LASCO/C2) 22.III.2023 в 18:48 UT (а), магнитограмма Солнца по данным SDO HMI на этот день (б) и радиопредвестники КВМ (в).

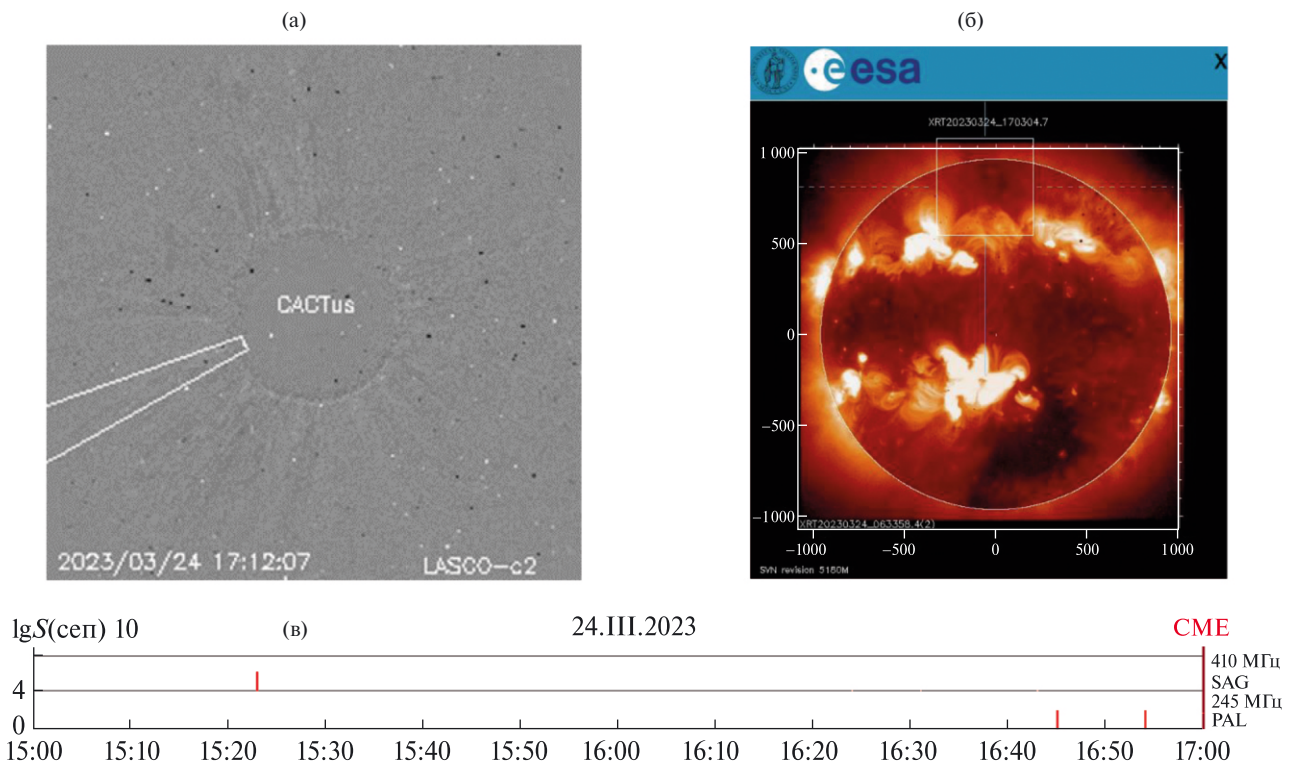


Рис. 8. Пример КВМ, зарегистрированного CACTus (LASCO/C2) 24.III.2023 в 17:00 UT (а), изображение области Солнца в рентгеновских лучах (б) и радиопредвестники КВМ (в).

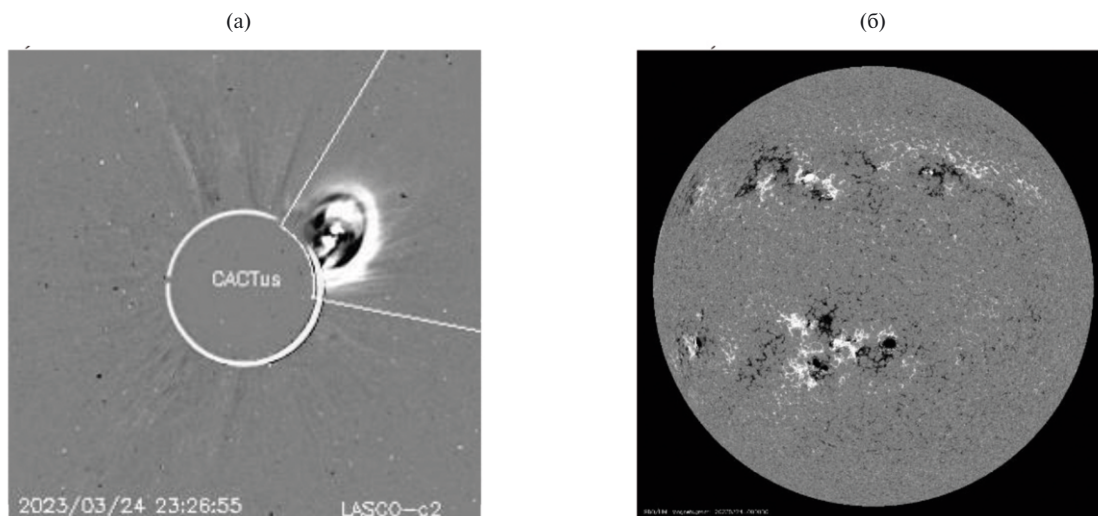


Рис. 9. То же, что рис. 5, 24.III.2023 в 21:48 UT.

Следует отметить, что с введением в строй солнечных радиоинтерферометров дециметрового и метрового диапазонов с высоким пространственным разрешением [41, 42] можно ожидать повышение эффективности применения развиваемого в данной работе метода прогноза КВМ с использованием радиоданных. Это обусловлено двумя факторами. Первый — повышение возможного числа прогнозируемых событий за счет исключения необходимого для применения метода условия о 3-часовом временном интервале между анализируемыми событиями, т.е. исключения условия изолируемости событий, — это количественный фактор. Второй — повышение вероятности прогноза вследствие однозначной привязки к АО, являющимися источниками КВМ и радиопредвестников КВМ в низкочастотной области спектра радиоизлучения, — это качественный фактор.

ВЫВОДЫ

Рассмотрен непрерывный ряд значительного массива данных, связанных с событиями КВМ, зарегистрированными в феврале — марте 2023 г. на восходящей фазе 25-го 11-летнего цикла солнечной активности, который позволил продолжить изучение связи между событиями КВМ и характеристиками явлений в микроволновом диапазоне на 2-часовом временном интервале, непосредственно предшествующем регистрации КВМ.

По совокупности событий рассмотренного периода подтверждены основные положения предложенного ранее способа краткосрочного прогноза времени регистрации коронографом находящихся на видимой части диска Солнца КВМ,

основанного на анализе временных и спектральных данных спорадического широкополосного микроволнового солнечного излучения, являющегося радиопредвестником КВМ, со станций Службы Солнца, не обладающих высоким пространственным разрешением.

Предложены и продемонстрированы возможности расширения применения указанного способа прогноза для источников КВМ, расположенных на краю солнечного диска или за ним. Расширение применения способа базируется на возможности наблюдений радиоизлучения АО, связанных с источниками КВМ, в периоды их нахождения за восточным и западным краями солнечного диска, в низкочастотной части спектра радиоизлучения, формируемого в более высоких слоях солнечной хромосферы и нижней короны.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены по проекту FSWR-2023-0038 в рамках базовой части государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gopalswamy N.* The Sun and space weather // *Atmosphere*. 2022. V. 13. Iss. 11. Art.ID. 1781. <https://doi.org/10.3390/atmos13111781>

2. *Pulkkinen A., Bernabeu E., Thomson A. et al.* Geomagnetically induced currents: Science, engineering, and applications readiness // *Space Weather*. 2017. V. 15. Iss. 7. P. 828–856. <https://doi.org/10.1002/2016SW001501>
3. *Kutiev I., Tsagouri I., Perrone L. et al.* Solar activity impact on the Earth's upper atmosphere // *J. Space Weather Space Clim.* 2013. V. 3. Iss. A06. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013028>
4. *Tsagouri I., Galkin I., Asikainen T.* Long-term changes in space weather effects on the Earth's ionosphere // *Advances in Space Research*. 2017. V. 59. Iss. 1. P. 351–365. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.10.004>
5. *Бреус Т.К., Бингу В.Н., Петрукович А.А.* Магнитный фактор солнечно-земных связей и его влияние на человека: физические проблемы и перспективы // *Успехи физических наук*. 2016. Т. 186. № 5. С. 568–576. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2015.12.037693>
6. *Vourlidas A.* Improving the Medium-Term Forecasting of Space Weather: A Big Picture Review From a Solar Observer's Perspective // *Front. Astron. Space Sci.* 2021. V. 8. Art.ID. 651527. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.651527>
7. *Falconer D.A., Moore R.I., Gary G.A.* Magnetogram measures of total nonpotentiality for prediction of solar coronal mass ejections from active regions of any degree of magnetic complexity // *Astroph. J.* 2008. V. 689. P. 1433–1442. <https://doi.org/10.1086/591045>
8. *Qahwaji R., Colak T., Al-Omari M. et al.* Automated Prediction of CMEs Using Machine Learning of CME – Flare Associations // *Solar Phys.* 2008. V. 248. Iss. 2. P. 471–483. <https://doi.org/10.1007/s11207-007-9108-1>
9. *Al-Omari M., Qahwaji R., Colak T. et al.* Machine Learning-Based Investigation of the Associations between CMEs and Filaments // *Solar Phys.* 2010. V. 262. Iss. 2. P. 511–539. <https://doi.org/10.1007/s11207-010-9516-5>
10. *Baker D., van Driel-Gesztelyi L., Green L.M.* Forecasting a CME by Spectroscopic Precursor? // *Solar Phys.* 2012. V. 276. P. 219–239. <https://doi.org/10.1007/s11207-011-9893-4>
11. *Chen P.F.* Coronal mass ejections: Models and their observational basis // *Living Rev. Solar Phys.* 2011. V. 8. Iss. 1. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2011-1>
12. *Schmieder B., Aulanier G.* What are the physical mechanisms of eruptions and CMEs? // *Adv. Space Res.* 2011. V. 49. Iss. 11. P. 1598–1606. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.10.023>
13. *Green L.M., Török T., Vršnak B. et al.* The origin, early evolution and predictability of solar eruptions // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. Iss. 1. Art.ID. 46. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0462-5>
14. *Casini R., White S.M., Judge P.G.* Magnetic diagnostics of the solar corona: synthesizing optical and radio techniques // *Space Sci. Rev.* 2017. V. 210. P. 145–181. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0400-6>
15. *Железняков В.В.* Радиоизлучение Солнца и планет. М.: Наука, 1964. 560 с.
16. *Злотник Е.Я.* К теории медленно меняющейся компоненты солнечного радиоизлучения I // *Астрономический журнал*. 1968. Т. 45. № 2. С. 310–320.
17. *Злотник Е.Я.* К теории медленно меняющейся компоненты солнечного радиоизлучения II // *Астрономический журнал*. 1968. Т. 45. № 3. С. 585–596.
18. *Kuroda N., Fleishman G.D., Gary D.E. et al.* Evolution of Flare-Accelerated Electrons Quantified by Spatially Resolved Analysis // *Front. Astron. Space Sci.* 2020. V. 7. Art.ID. 22. <https://doi.org/10.3389/fspas.2020.00022>
19. *Nindos A.* Incoherent Solar Radio Emission // *Front. Astron. Space Sci.* 2020. V. 7. Art.ID. 57. <https://doi.org/10.3389/fspas.2020.00057>
20. *Vourlidas A.* Radio observations of coronal mass ejection // *Solar and Space Weather Radiophysics: Current Status and Future Developments*. Eds. D.E. Gary and C.U. Keller (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers). 2004. V. 314. P. 223–242. https://doi.org/10.1007/1-4020-2814-8_11
21. *Vourlidas A., Carley E.P., Vilmer N.* Radio observations of coronal mass ejections: space weather aspects // *Front. Astron. Space Sci.* 2020. V. 7. Art.ID. 43. <https://doi.org/10.3389/fspas.2020.00043>
22. *Carley E.P., Vilmer N., Vourlidas A.* Radio Observations of Coronal Mass Ejection Initiation and Development in the Low Solar Corona // *Front. Astron. Space Sci.* 2020. V. 7. Art.ID. 551558. <https://doi.org/10.3389/fspas.2020.551558>
23. *Pohjolainen S., Vilmer N., Khan J.I. et al.* Early signatures of large-scale field line opening. Multi-wavelength analysis of features connected with a “halo” CME event // *Astron. Astrophys.* 2005. V. 434. P. 329–341. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041378>
24. *Aurass H., Holman G., Braune S. et al.* Radio evidence for breakout reconnection in solar eruptive events // *Astron. Astrophys.* 2013. V. 555. Iss. A40. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321111>
25. *Aurass H., Vourlidas A., Andrews M.D. et al.* Nonthermal radio signatures of coronal disturbances with and without coronal mass ejections // *Astrophys. J.* 1999. V. 511. P. 451–465. <https://doi.org/10.1086/306653>
26. *Pick M., Malherbe J.-M., Kerdraon A. et al.* On the Disk H α and radio observations of the 2003 October 28 flare and coronal mass ejection event // *Astrophys. J. Lett.* 2005. V. 631. Art.ID. L97. <https://doi.org/10.1086/497137>
27. *Кобрин М.М., Семенова С.В., Пахомов В.В. и др.* Результаты исследований эффекта возрастания

- долгопериодных пульсаций сантиметрового радиоизлучения Солнца перед мощными вспышками // АЦ. 1981. № 1201. С. 1–3.
28. Авдюшин С.И., Богомолов А.Ф., Борисова Е.А. и др. О связи вспышечной активности Солнца с характеристиками радиоизлучения локальных источников на нем // Докл. АН СССР. 1985. Т. 283. № 1. С. 67–70.
29. Liu Y., Zheng L. Solar microwave radiation flux and the short-term prediction of proton events // Proc. Solar-Terrestrial Prediction-V (STPW'96). Japan. January 23–27, 1996. Tokyo: RCW, 1997. P. 196–199.
30. Li X.-C., Kang L.-Sh. Evidence for a strong correlation of solar proton events with solar radio bursts // Chin. J. Astron. Astrophys. 2005. V. 5. Iss. 1. P. 110–116.
31. Патент № 2009136134/28 Российская Федерация. Способ краткосрочного прогноза мощных солнечных вспышек. Оpubл. 27.05.2011 Бюл. № 15 / Снегирев С.Д., Фридман В.М., Шейнер О.А.
32. Дурасова М.С., Подстригач Т.С., Фридман В.М. и др. Исследование предвспышечных ситуаций по спектральным данным потоков радиоизлучения Солнца за 1970–1994 гг. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 1996. Т. 39. № 11–12. С. 1425–1435.
33. Wang H., Liu Ch., Ahn K. et al. High-resolution observations of flare precursors in the low solar atmosphere // Nature Astronomy. 2017. V. 1. Art.ID. 0085. <https://doi.org/10.1038/s41550-017-0085>
34. Sheiner O.A., Durasova M.S. Solar microwave precursors and Coronal Mass Ejection: possible connection // Radiophys. Quantum Electron. 1994. V. 37. Iss. 7. P. 575–578. <https://doi.org/10.1007/BF01046806>
35. Шейнер О.А., Фридман В.М. Явления в микроволновом солнечном излучении, наблюдаемые во время образования и начального распространения корональных выбросов массы // Известия Вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53. № 5–6. С. 311–328.
36. Шейнер О.А., Фридман В.М. Характер микроволнового солнечного излучения, наблюдаемого на стадии формирования и начального распространения геоэффективных корональных выбросов массы // Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54. № 10. С. 727–740.
37. Патент № 2630535 Российская Федерация. Способ краткосрочного прогноза времени регистрации явления коронального выброса массы (КВМ): заявл. № 2016100808 от 12.01.2016; опубл. 11.09.2017 / Фридман В.М., Шейнер О.А.
38. Ванник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. М.: Наука, 1979. 448 с.
39. Solar-Geophysical Data (explanation of data reports). 1981. Suppl. Iss. 438. <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solardata/solarradio/bursts/radio.txt>
40. Дурасова М.С., Тихомиров Ю.В., Фридман В.М. О распределении частоты возникновения микроволновых радиовсплесков в периоды, связанные с существованием корональных выбросов массы // Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности. Конф. стран СНГ и Прибалтики. Нижний Новгород, 2–7 июня 2003 г.: Сб. докл. в двух томах. Т. 1. С. 136–139.
41. Yan J., Wu J., Wu L. et al. A super radio camera with a one-kilometre lens // Nature Astronomy. 2023. V. 7. Art.ID. 750. <https://doi.org/10.1038/s41550-023-01932-y>
42. Алтынцева А. Сибирский Радиогелиограф: мноволновый мониторинг в диапазоне 3–12 ГГц в феврале – марте 2023 г. // Тезисы докл. Конф. «Проблемы космофизики» имени М.И. Панасюка.