

СОЛНЕЧНЫЕ ФОТОСФЕРНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ, КОРОНАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ МАССЫ И РАДИОВСПЛЕСКИ II ТИПА В 23 И 24 ЦИКЛАХ

© 2022 г. И. А. Биленко*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

*E-mail: bilenko@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 16.08.2021 г.

После доработки 16.05.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

Рассмотрены события радиовсплесков II типа (РВII) в декаметровом и гектометровом диапазонах от 1 до 16 МГц и зависимости параметров сопутствующих корональных выбросов массы (КВМ) от фоновых характеристик плазмы и значений межпланетного магнитного поля (ММП) в областях начала регистрации каждого радиовсплеска в 23 и 24 циклах солнечной активности. ММП рассчитывалось по данным крупномасштабных фотосферных магнитных полей на расстояниях регистрации РВII. Результаты свидетельствуют, что число РВII, средние значения параметров плазмы и ММП изменяются в виде отдельных импульсов в обоих циклах и характер их изменения отличается в 23 и 24 циклах. Различия в параметрах плазмы, ММП и КВМ могли стать причиной снижения числа РВII в 24 цикле. Большинство РВII в 23 и 24 циклах, и основное снижение их числа в 24 цикле, наблюдаются для выбросов с альвеновскими числами Маха 1–2.9. Наибольшее число РВII в 23 цикле соответствует значениям ММП 0–30 мТ, а в 24 – 30–50 мТ. Основное снижение числа РВII в 24 цикле произошло за счет событий, наблюдавшихся при ММП 0–30 мТ. Значительная часть регистрируемых, в основном, в периоды максимума солнечной активности КВМ с генерацией РВII, составляющая 61 (18.05%) в 23 цикле, и 31 (17.22%) в 24 цикле, имеют альвеновские числа Маха меньше единицы. Возможно, что в этих событиях реализуется иной, не плазменный, механизм генерации РВII.

Ключевые слова: Солнце, физика Солнца, солнечная активность, вспышки и подобные явления, радиовсплески

DOI: 10.31857/S0004629922080011

1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным представлениям радиовсплески II типа (РВII) в декаметровом и гектометровом (decametric/hectometric, ДН) диапазонах генерируются в результате ряда последовательности сложных процессов в магнитогидродинамических (МГД) ударных волнах. Большинство РВII связаны с корональными выбросами массы (КВМ) [1, 2, 4, 35]. Впервые интерпретация генерации РВII на фронтах ударных волн была предложена и исследована в работах [5–7]. В дальнейшем она была развита в работах [8–10] и рассмотрена в приложении к ряду конкретных наблюдений РВII и КВМ (см., напр., [1, 11–13]). Считается, что при ускорении электронов на МГД волнах генерируются плазменные (ленгмюровские) волны и затем часть энергии плазменных волн конвертируется в радиоизлучение вблизи локальной плазменной частоты и/или ее гармоники [10, 14–16]. При этом генерация

плазменных волн возможна, если скорость дрейфа электронов выше тепловой скорости, что в обычном потоке частиц не происходит. Пикельнер и Гинзбург [17] впервые предложили учесть магнитное поле при интерпретации генерации РВII на фронте бесстолкновительной ударной волны, распространяющейся почти перпендикулярно магнитному полю. В ударной волне электроны, в присутствии магнитного поля, дрейфуют относительно ионов в плоскости фронта. При достаточно больших магнитных числах Маха их скорость становится много больше тепловой скорости, и в этом случае возможны генерация плазменных волн и их последующая трансформация в радиоизлучение на частотах, близких к электронной плазменной частоте или ее второй гармонике. Было показано, что модель генерации радиоизлучения поперечной бесстолкновительной ударной волной достаточно хорошо объясняет многие наблюдаемые параметры всплесков II типа [18]. В дальнейшем этот подход был развит в

работах [10, 19–21]. Также возможен механизм генерации быстрых электронов в ударных МГД волнах, распространяющихся вдоль магнитного поля солнечной короны, который может приводить к генерации РВП [18, 22].

Из исследований КВМ, сопровождающихся РВП, следует, что сами по себе параметры КВМ или их сочетание не являются определяющими факторами для генерации РВП, поскольку для генерации РВП необходимы некие специфические условия. Зайцев [23] и Фомичев [19] показали, что наблюдаемые характеристики РВП зависят и от параметров солнечной короны, и от параметров ударных волн. На количество и параметры РВП, и РВП КВМ большое влияние оказывают крупномасштабные магнитные поля Солнца и их структурные изменения [24, 25].

Одним из условий генерации РВП является превышение скорости КВМ локальной альвеновской скорости (V_a). Однако магнитное поле и, соответственно, V_a растут не плавно от минимума активности к максимуму, а изменяются в виде отдельных импульсов [26]. Это приводит к тому, что на разных фазах солнечного цикла при понижении магнитного поля, а следовательно, и V_a даже слабые низкоскоростные КВМ могут превысить V_a и условия могут стать благоприятными для генерации РВП. В то же время при высоких значениях V_a даже мощные высокоскоростные КВМ в максимуме солнечной активности могут оказаться ниже V_a и РВП генерироваться не будут [26].

Важным параметром для условий генерации РВП является величина альвеновского числа Маха (M_a). В разных исследованиях были найдены значения M_a для отдельных событий. Так, для события 18 августа 2004 г. M_a было найдено равным 1.4–1.5 на расстоянии 1.6–2.1 R_s [27]. Для события 13 июня 2010 г. $M_a \approx 3.7–5$ для расстояний 1.2–1.5 R_s [28]. Maguire и др. [29] для события 2 сентября 2017 г. получили значения M_a в диапазоне 1.4–2.4 на расстоянии $\sim 1.6 R_s$. Mann и др. [9] определили значения M_a для квазипараллельных фронтов равным 1.2–1.3, а для квазиперпендикулярных – 1.5–2.8. Следует отметить, что режим модели Пикельнера-Гинцбурга [17] может реализоваться при $1 < M_a < 1.6$ [30]. Для случая генерации РВП в МГД ударных волнах, распространяющихся вдоль магнитного поля, $1 < M_a < 1.5$ [22].

Но несмотря на большое число работ, посвященных формированию КВМ, ударных волн и генерации РВП, в настоящее время остаются до конца неясными как происхождение КВМ, так и РВП, и их зависимости от солнечной активности. Наблюдения отдельных событий и теоретические модели показывают возможность генерации РВП

при самых разных условиях: РВП могут генерироваться на ударных волнах, формирующихся на фронте КВМ [12, 16, 31–33], как впереди, так и позади фронта ударной волны [34], на флангах КВМ [35–37]. Зоны ускорения электронов могут иметь множественные источники [38]. В процессе излучения локализация РВП может изменяться [39]. Ряд РВП генерируются при взаимодействии двух КВМ или КВМ со струйером [31, 40]. Однако из огромного числа наблюдающихся КВМ только очень небольшая часть сопровождаются РВП. Так, с 1977 по 2017 г. наблюдалось 28998 КВМ, и только 518 КВМ сопровождались РВП, что составляет около 1%.

Целью данной работы является анализ изменений напряженности магнитного поля и параметров плазмы в областях начала генерации/регистратии каждого РВП, и рассмотрение зависимости числа РВП и параметров сопутствующих РВП КВМ от величины магнитного поля и параметров плазмы в 23 и 24 циклах.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Исследуются изменения числа и параметров РВП КВМ и РВП в декаметровом и гектометровом диапазонах от 1 до 16 МГц в 23 и 24 циклах солнечной активности (1997–2017 гг.), что соответствует Кэррингтоновским оборотам (КО) 1918–2199. Использован каталог ДН РВП¹ (см. [41]). Данный каталог является наиболее полным перечнем ДН РВП в 23 и 24 циклах. В этом каталоге для каждого РВП указаны дата, время и частоты начала и окончания регистрации каждого радиовсплеска, данные о локализации и классе сопутствующей вспышки, номер активной области по NOAA, время начала регистрации, позиционный угол, скорость и угол раствора в картинной плоскости сопутствующего КВМ. В интерактивном режиме доступны динамические изображения КВМ и соответствующего РВП. В дополнение к данным этого каталога значения ускорения, массы и кинетической энергии были взяты из каталога КВМ CDAW [42]. В каталоге CDAW в интерактивном режиме доступны табличные данные измерений скорости, угла раствора и ускорения, а также значения высот наблюдений и времени измерений для каждого КВМ. Следует отметить, что значения позиционного угла, скорости и угла раствора КВМ в картинной плоскости являются измеренными величинами. Тогда как значения массы и кинетической энергии являются расчетными и, соответственно, наименее надежно определенными параметрами КВМ [43, 44].

¹ http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html

Параметры солнечного ветра на орбите Земли получены из базы данных NASA/GSFC's OMNI через OMNIWeb [45].

Расчет магнитного поля в области генерации каждого РВП производился на основе формулы, предложенной в работе [46]. Значение магнитного поля определялось как суперпозиция фотосферного полярного и не полярного магнитных полей Солнца на расстоянии регистрации каждого РВП. К не полярным магнитным полям относятся фотосферные магнитные поля на широтах от 55° южной широты до 55° северной широты. Для расчета напряженности не полярного магнитного поля использованы данные синоптических карт наблюдаемого крупномасштабного фотосферного магнитного поля Солнца обсерватории WSO (Wilcox Solar Observatory) [47, 48] на этих широтах. Данные по полярным магнитным полям получены из ежедневных наблюдений на обсерватории WSO магнитных полей выше 55° широты в северном и южном полушариях с апертурой $3'$, усредненных за 10 дней и отфильтрованных низкочастотным фильтром 20 нГц.

3. ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ В ОБЛАСТЯХ НАЧАЛА РЕГИСТРАЦИИ РВП

Всего, согласно каталогу [41], в 23 цикле наблюдалось 338 РВП КВМ, а в 24 – 180. Изменение суммарного числа наблюдаемых РВП в каждом Кэррингтоновском обороте (КО) в 23 и 24 циклах солнечной активности представлено на рис. 1а. Из рис. 1 видно, что средние значения числа РВП и всех рассматриваемых параметров плазмы (сплошные линии на графиках рис. 1а–f) изменяются не плавно от минимума активности к максимуму, а в виде чередующихся возрастных и понижений их значений, т.е. в виде ряда последовательных импульсов. На рис. 1 стрелками показаны отдельные пики (импульсы) для каждого параметра. Для разных параметров плазмы (n , h , V , V_a , M_a) амплитуды и положение отдельных импульсов могут отличаться. При этом видны различия в изменении частотности РВП в 23 и 24 циклах. В 23 цикле максимальное число РВП в КО наблюдалось на всех фазах цикла приблизительно на одном уровне, а в 24 цикле число РВП постепенно растет на фазе роста, затем наблюдаются резкое понижение с последующим ростом и формированием второго пика и последующее снижение на фазе спада солнечной активности.

Значение наблюдаемой частоты начала регистрации каждого РВП позволяет напрямую определить величину плотности плазмы в области его генерации, так как основная частота плазменного излучения связана с электронной плотностью соотношением:

$$F_p = 8.978\sqrt{n_e}, \quad (1)$$

где F_p [kHz] – частота начала регистрации РВП, n_e [cm $^{-3}$] – электронная плотность плазмы. Это соотношение дает возможность рассчитать электронную плотность для измеренных частот начала регистрации РВП для каждого отдельного события (рис. 1б).

Значения плотности (n_e) начала регистрации/генерации РВП позволяют рассчитать расстояние для момента начала регистрации каждого события (рис. 1с). Для этого, как правило, используются различные модели радиального распределения плотности плазмы, так как характер изменения плотности плазмы на разных расстояниях от Солнца при разных фазах солнечной активности не известен. В данной работе вычисленные расстояния на момент начала регистрации каждого РВП при известной плотности плазмы (1) производилось на основе модели радиального распределения плотности с расстоянием [49]:

$$n_e(r) = 3.3 \times 10^5 r^{-2} + 4.1 \times 10^6 r^{-4} + 8.0 \times 10^7 r^{-6} \text{ [cm}^{-3}\text{]}. \quad (2)$$

При расчетах использовались ежедневные значения n_e на орбите Земли с учетом времени, необходимого для прохождения солнечного ветра от Солнца до Земли (4 дня). Коэффициенты в уравнении (2) умножались на n_e (1 AU)/7.2 [49]. Это дает возможность получать радиальные распределения плотности для разных моментов солнечной активности. Следует отметить, что частоты регистрации РВП ограничены предельными частотами 14 МГц для Wind/WAVES и 16 МГц для STEREO. Соответственно, для всех РВП, регистрируемых на этих частотах, 154 для данных Wind/WAVES в 23 цикле и 63 РВП по данным STEREO, начиная с 2006 г., расчетная плотность и другие параметры плазмы будут считаться параметрами начала их генерации, хотя некоторые из этих событий могли генерироваться при других параметрах плазмы на меньших расстояниях от Солнца.

Зная расстояние начала генерации/регистрации каждого РВП, можно рассчитать значение фонового магнитного поля на этом расстоянии (рис. 1d). Регулярные измерения магнитного поля на разных расстояниях от Солнца в течение циклов солнечной активности в настоящее время не проводятся. Для подобных расчетов используются различные модели. В данной работе использована модель, основанная на фактически наблюдаемых крупномасштабных полярных и не полярных фотосферных магнитных полях, являющихся видимым проявлением тороидального

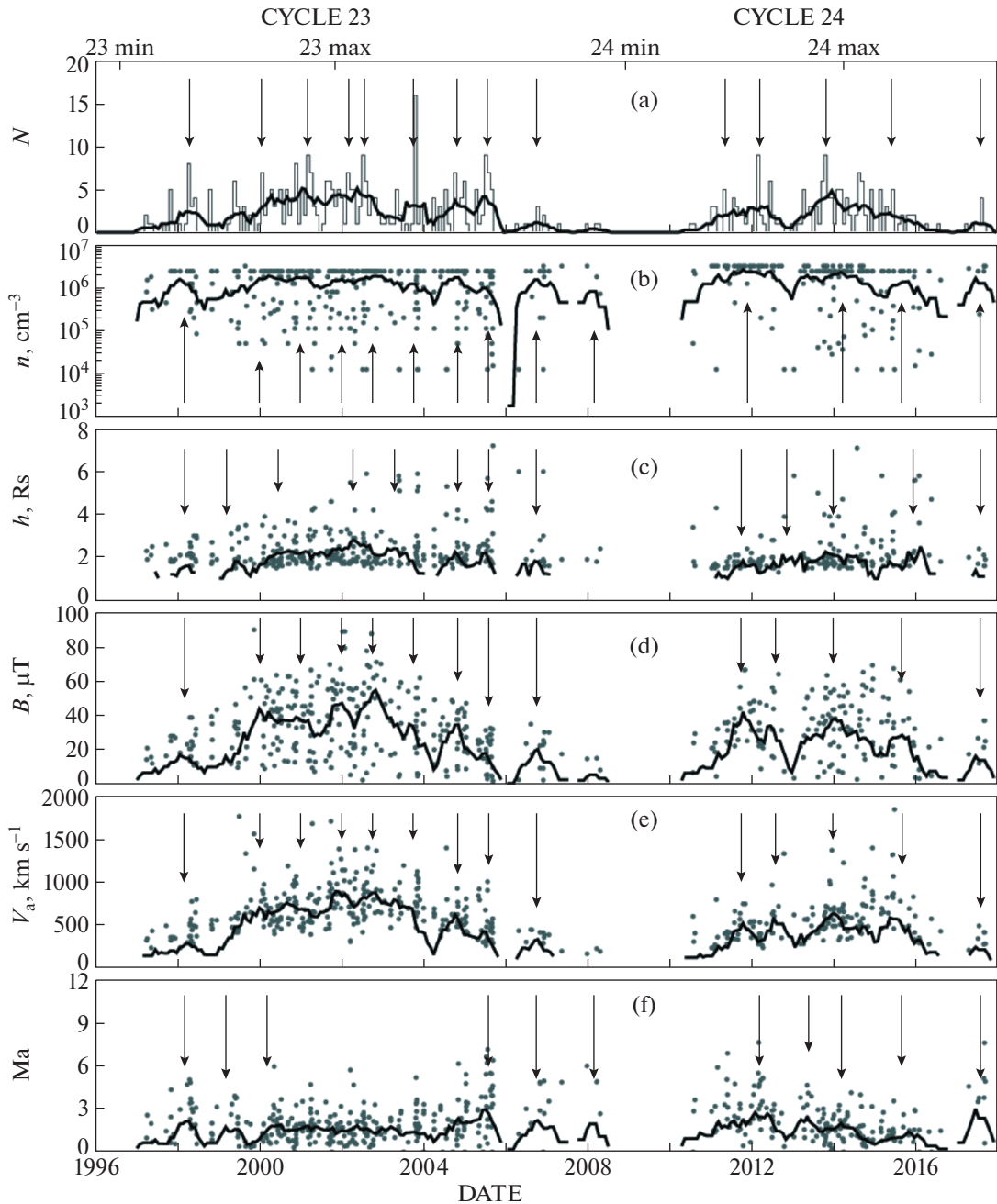


Рис. 1. Изменение числа РВП и параметров плазмы на высотах начала регистрации каждого РВП в 23 и 24 циклах в зависимости от времени: (а) суммарного числа РВП в КО N ; (б) плотности n ; (в) высоты регистрации h ; (д) значения магнитного поля B ; (е) альвеновской скорости V_a ; (ф) альвеновского числа Маха M_a . Каждая точка соответствует конкретному событию РВП. Тонкие линии на графике (а) усредненные за КО значения, толстые линии на всех графиках, усредненные за 7 КО. Моменты максимума и минимума обоих циклов отмечены на верхней панели рисунка. Стрелками показаны отдельные пики (импульсы) для каждого параметра.

и полоидального компонентом глобального магнитного поля Солнца [46]:

$$B(t, r) = \left(\frac{B_{\text{phot}+}(t) + B_{\text{phot}-}(t)}{2} + \frac{B_{\text{pol}}(t)}{2} \right) \left(\frac{1}{r} \right)^2, \quad (3)$$

где $B_{\text{phot}-}$ и $B_{\text{phot}+}$ — средние значения модулей напряженности положительного и отрицательного крупномасштабного не полярного (от -55° до $+55^\circ$) фотосферного магнитного поля за каждый КО, B_{pol} — средняя величина суммы полярных по-

лей (выше 55° широты в северном и южном полушариях Солнца), r – расстояние, t – временной масштаб усреднения (1 КО). Поскольку наиболее полные данные по крупномасштабным фотосферным магнитным полям имеются на временных масштабах за КО, а по полярным полям за десять и более дней, то значения магнитного поля рассчитываются только как средние значения за КО. Достоинством данной формулы является то, что она дает возможность вычислять не только радиальное распределение магнитных полей с расстоянием, но и учитывает изменения магнитного поля на фотосфере в ходе цикла солнечной активности. Формула дает хорошее согласие со значениями магнитного поля, измеренного различными спутниками, разными методами, на разных расстояниях и на разных фазах солнечной активности (см. [46], рис. 3 и 4 и табл. 1 и 2).

Для генерации ударных волн скорость КВМ должна превышать локальную альвеновскую скорость. При этом на фронте или на флангах ударной волны создаются условия для генерации РВП [27, 50, 51]. По полученным значениям плотности плазмы (1) и магнитного поля (2) была рассчитана V_a для каждого события на расстоянии начала его регистрации (рис. 1e):

$$V_a = 2.18 \times 10^6 (B/\sqrt{n}) \text{ [km/s]}, \quad (4)$$

где B [Гс] – величина магнитного поля, рассчитанная по формуле (3), а n [см $^{-3}$] – электронная плотность плазмы, рассчитанная по формуле (1).

На рис. 1f показаны величины M_a для каждого события, рассчитанные как

$$M_a = V_{\text{сме}}/V_a, \quad (5)$$

где $V_{\text{сме}}$ – скорость конкретного РВП КВМ, рассчитанная для расстояния начала регистрации данного РВП при условии сохранения КВМ постоянного ускорения. За начальное расстояние при расчете скорости принималась последняя высота регистрации КВМ по данным каталога CDAW. Учитывалось также, что КВМ распространяются в потоке фонового солнечного ветра. Полагая фоновую скорость солнечного ветра равной скорости медленного солнечного ветра (V_{sw}), ее значение определялось по формуле, предложенной Sheeley и др. ([52]):

$$(V_{\text{sw}})^2 = 1.75 \times 10^5 (1 - \exp(-(R - 4.5)/15.2)), \quad (6)$$

где R – это расстояние, выраженное в радиусах Солнца. Эта формула дает значения скорости фонового медленного солнечного ветра в минимуме солнечной активности. В данной работе это соотношение используется для получения собственно скорости КВМ, т.е. из наблюдаемой скорости КВМ вычитается значение фоновой скорости солнечного ветра.

Из рис. 1 следует, что число событий растет с ростом магнитного поля. При этом возрастают V_a и среднее расстояние начала формирования РВП. Наибольшие расстояния начала генерации РВП наблюдаются на фазах максимума и спада в обоих циклах. Среднее значение M_a остается приблизительно на одном уровне в максимумах обоих циклов. Ход изменения среднего значения суммарного числа РВП в КО повторяет циклические изменения среднего за КО магнитного поля. Следует отметить, что в 23 цикле фотосферные магнитные поля высокой напряженности наблюдались продолжительное время на фазах роста, максимума и спада в течение 120 КО с 1930 по 2050 КО, тогда как в 24 цикле поля высокой напряженности наблюдались в течение 70 КО с 2110 по 2180 КО [53]. Соответственно, одной из причин снижения числа РВП в 24 цикле может быть уменьшение времени существования фотосферных магнитных полей высокой напряженности.

В 24 цикле изменились параметры корональной плазмы. Понизились значения и коронального магнитного поля, и плотности корональной плазмы. Это может служить объяснением того, что ДН РВП наблюдались на более низких высотах в 24 цикле (рис. 1c). Возможно, что причиной снижения числа регистрируемых ДН РВП стало то, что так как РВП в 24 цикле генерируются на более низких высотах в атмосфере Солнца, то ряд РВП метрового диапазона не получили продолжения в ДН диапазоне.

На рис. 2 показаны гистограммы числа РВП с шагом по магнитному полю 5 μT (рис. 2a1, a2) и зависимости параметров плазмы в областях начала регистрации РВП в зависимости от величины фонового магнитного поля B для каждого РВП. В каждом цикле выделяются три группы в зависимости от B : $0 \mu\text{T} < B < 30 \mu\text{T}$, $30 \mu\text{T} < B < 50 \mu\text{T}$, $B > 50 \mu\text{T}$. В 23 цикле число РВП в каждой группе равно 159 (47.04%), 103 (30.47%) и 76 (22.49%), а в 24 цикле – 67 (37.22%), 75 (41.67%) и 38 (21.11%). События, соответствующие каждой из этих групп, отмечены соответственно ромбиками, крестиками и кружками на рис. 2 и всех последующих графиках. На рис. 2 (и рис. 4 ниже) тонкими вертикальными линиями отмечены границы этих групп на всех графиках. Наибольшее число событий в 23 цикле соответствует первой группе (159), а в 24 – второй (75). Максимальные, минимальные и средние значения рассматриваемых параметров для каждой группы в 23 и 24 циклах представлены в табл. 1. Из рис. 2 и табл. 1 следует, что события первой группы наблюдаются на наибольших расстояниях при меньших плотностях и значениях магнитного поля. Для них наблюдается наибольший разброс V_a и M_a . События второй группы наблюдаются на меньших расстояниях, при больших значениях плотности плазмы, с

Таблица 1. Максимальные, минимальные и средние значения параметров плазмы в областях начала регистрации РВП в 23 и 24 циклах

| Параметр | Period 1 | | | Period 2 | | | Period 3 | | |
|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Min | Max | Mean | Min | Max | Mean | Min | Max | Mean |
| Cycle 23 | | | | | | | | | |
| $n, \text{см}^{-3}$ | 1.23×10^4 | 3.17×10^6 | 7.36×10^5 | 2.51×10^5 | 2.43×10^6 | 2.04×10^6 | 6.08×10^5 | 3.18×10^6 | 2.30×10^6 |
| r, R_s | 1.70 | 8.60 | 3.0 | 1.50 | 2.50 | 1.90 | 1.40 | 2.10 | 1.76 |
| $B, \mu\text{T}$ | 1.78 | 28.94 | 17.57 | 30.11 | 49.69 | 39.24 | 50.07 | 89.93 | 60.06 |
| $V_a, \text{км/с}$ | 165.41 | 1767.69 | 658.18 | 386.30 | 1400.41 | 587.63 | 630.44 | 1564.44 | 803.62 |
| M_a | 0.31 | 7.20 | 2.20 | 0.59 | 6.17 | 2.43 | 0.31 | 3.69 | 1.55 |
| Cycle 24 | | | | | | | | | |
| $n, \text{см}^{-3}$ | 1.24×10^4 | 3.17×10^6 | 1.18×10^6 | 3.75×10^5 | 3.18×10^6 | 2.65×10^6 | 2.43×10^6 | 3.18×10^6 | 2.77×10^6 |
| r, R_s | 1.50 | 7.10 | 2.88 | 1.30 | 2.3 | 1.80 | 1.30 | 1.9 | 1.61 |
| $B, \mu\text{T}$ | 2.70 | 29.33 | 17.32 | 30.05 | 49.87 | 37.56 | 50.08 | 69.24 | 56.36 |
| $V_a, \text{км/с}$ | 193.24 | 1848.62 | 572.18 | 337.25 | 1068.06 | 477.83 | 562.06 | 888.07 | 682.52 |
| M_a | 0.25 | 5.51 | 2.20 | 0.61 | 7.64 | 2.51 | 0.36 | 4.67 | 1.81 |

меньшим разбросом V_a и максимальными значениями M_a в 24 цикле. Третьей группе соответствуют события на предельной частоте регистрации РВП на расстояниях 1.4–2.1 (1.3–1.9) R_s в 23 (24) циклах с максимальными значениями магнитного поля, плотности и V_a . В 24 цикле расстояния регистрации РВП ниже и, соответственно, выше плотность для всех групп РВП. Средние значения V_a в 24 цикле ниже, а средние величины M_a выше для всех групп РВП.

Сопоставление числа событий в 23 и 24 циклах показывает, что основное снижение числа РВП в 24 цикле произошло за счет событий, соответствующих первой группе со 159 в 23 цикле к 67 в 24 цикле, т.е. событий, начинающихся на больших расстояниях, в областях с меньшей плотностью и величиной магнитного поля. Число событий, соответствующее второму периоду, уменьшилось со 103 до 75, а для третьей группы с 76 до 38 в 23 и 24 циклах соответственно.

На рис. 3 приведены зависимости суммарного числа РВП в КО и параметров плазмы от величины M_a . В плазменной модели, предложенной Пикельнером и Гинцбургом [17], условия генерации РВП могут реализоваться при $1 < M_a < 1.6$ [30]. Сюда же относятся и события для случая генерации РВП в МГД ударных волнах, распространяющихся вдоль магнитного поля $1 < M_a < 1.5$ [22]. При $1.6 < M_a < 2.9$ возбуждается ионно-звуковая турбулентность [54]. Значения для всех параметров плазмы, соответствующих интервалу $1 < M_a < 1.6$, отмечены светло-серым цветом, а $1.6 < M_a < 2.9$ – темно-серым цветом. Из рис. 3 следует, что основное число событий РВП соот-

ветствует, примерно, $1 < M_a < 2.9$ в обоих циклах со значениями плотности и магнитного поля в широком диапазоне. Наблюдается дополнительный пик в области $4.5 < M_a < 5.5$ в 23 и 24 циклах.

С ростом M_a значения плотности повышаются (рис. 3b1, 3b2), что соответствует уменьшению расстояния (h , рис. 3c1, c2) от Солнца. Наибольшие плотности соответствуют величинам начала регистрации на пределе чувствительности проборов Wind/WAVES и STEREO. Значения B (рис. 3d1, d2) и V_a (рис. 3e1, e2) снижаются. Резкий рост числа РВП на гистограммах в обоих циклах соответствует $1 < M_a < 1.5$. По-видимому, для разных КВМ, входящих в этот диапазон, реализуются различные механизмы генерации РВП. Этим значениям M_a соответствуют РВП, генерируемые ударными волнами, распространяющимися поперек магнитного поля в модели Пикельнера и Гинцбурга [17], и случаи генерации РВП, соответствующие условию Мэн и др. [9] для квазипараллельных фронтов. Часть РВП может быть связана с ударными волнами, движущимися вдоль магнитного поля, где реализуется механизм генерации РВП, предложенный в работе [22]. Следует заметить, что относительная скорость движения электронов и ионов при таком механизме много меньше тепловой скорости электронов и, следовательно, обычная бунемановская неустойчивость, имеющая место при перпендикулярных ударных волнах, не реализуется. Вместо этого развивается модифицированная бунемановская неустойчивость. В настоящее время неясно, какая модель (с поперечными или продольными по отношению к невозмущенному магнитному полю ударными волнами) является

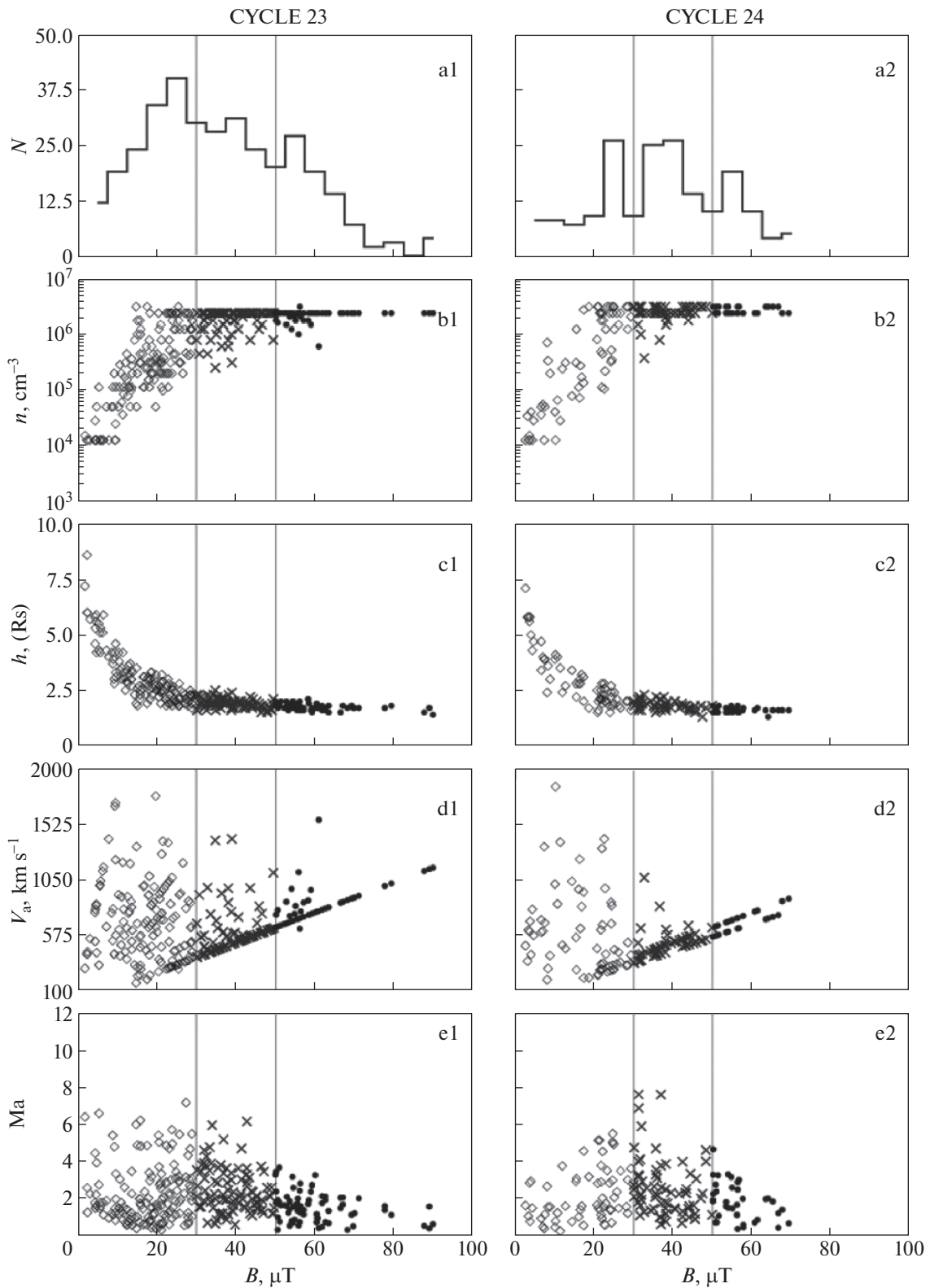


Рис. 2. Зависимости параметров плазмы в областях начала регистрации каждого РВП от величины магнитного поля в 23 и 24 циклах: (a1, a2) гистограммы числа РВП N ; (b1, b2) плотности плазмы n ; (c1, c2) высоты регистрации h ; (d1, d2) альевенговской скорости V_a ; (e1, e2) альевенговских чисел Маха M_a . Тонкими вертикальными линиями отмечены границы трех групп в зависимости от B : $0 \mu\text{T} < B < 30 \mu\text{T}$, $30 \mu\text{T} < B < 50 \mu\text{T}$, $B > 50 \mu\text{T}$.

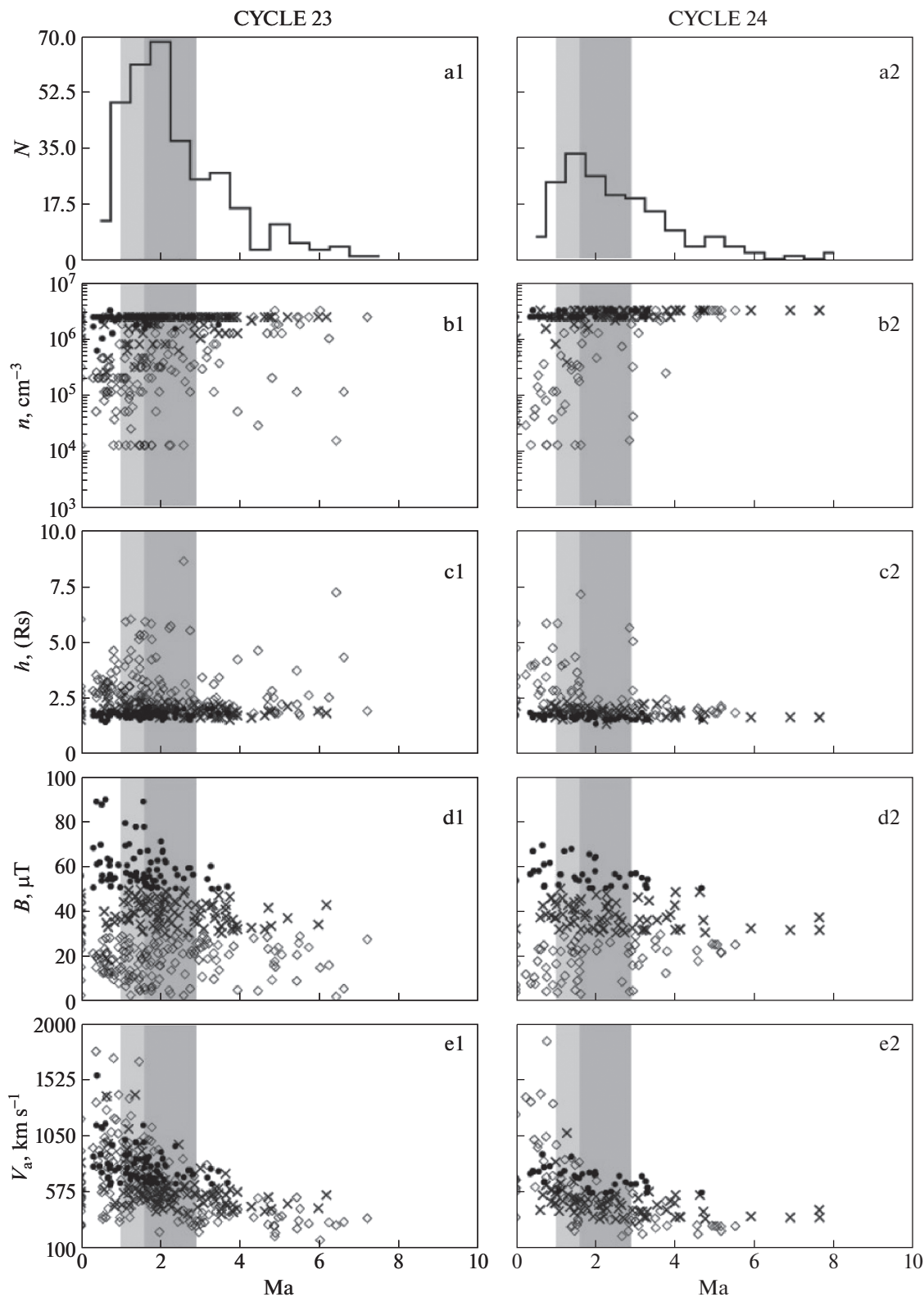


Рис. 3. Зависимости параметров плазмы в областях начала регистрации каждого РВП от величины альвеновского числа Маха (M_a) в 23 и 24 циклах: (a1, a2) гистограммы числа РВП N ; (b1, b2) плотности плазмы n ; (c1, c2) высоты регистрации h ; (d1, d2) магнитного поля B ; (e1, e2) альвеновской скорости V_a . Значения для всех параметров плазмы, соответствующих интервалу $1 < M_a < 1.6$, отмечены светло-серым цветом, а $1.6 < M_a < 2.9$ — темно-серым цветом.

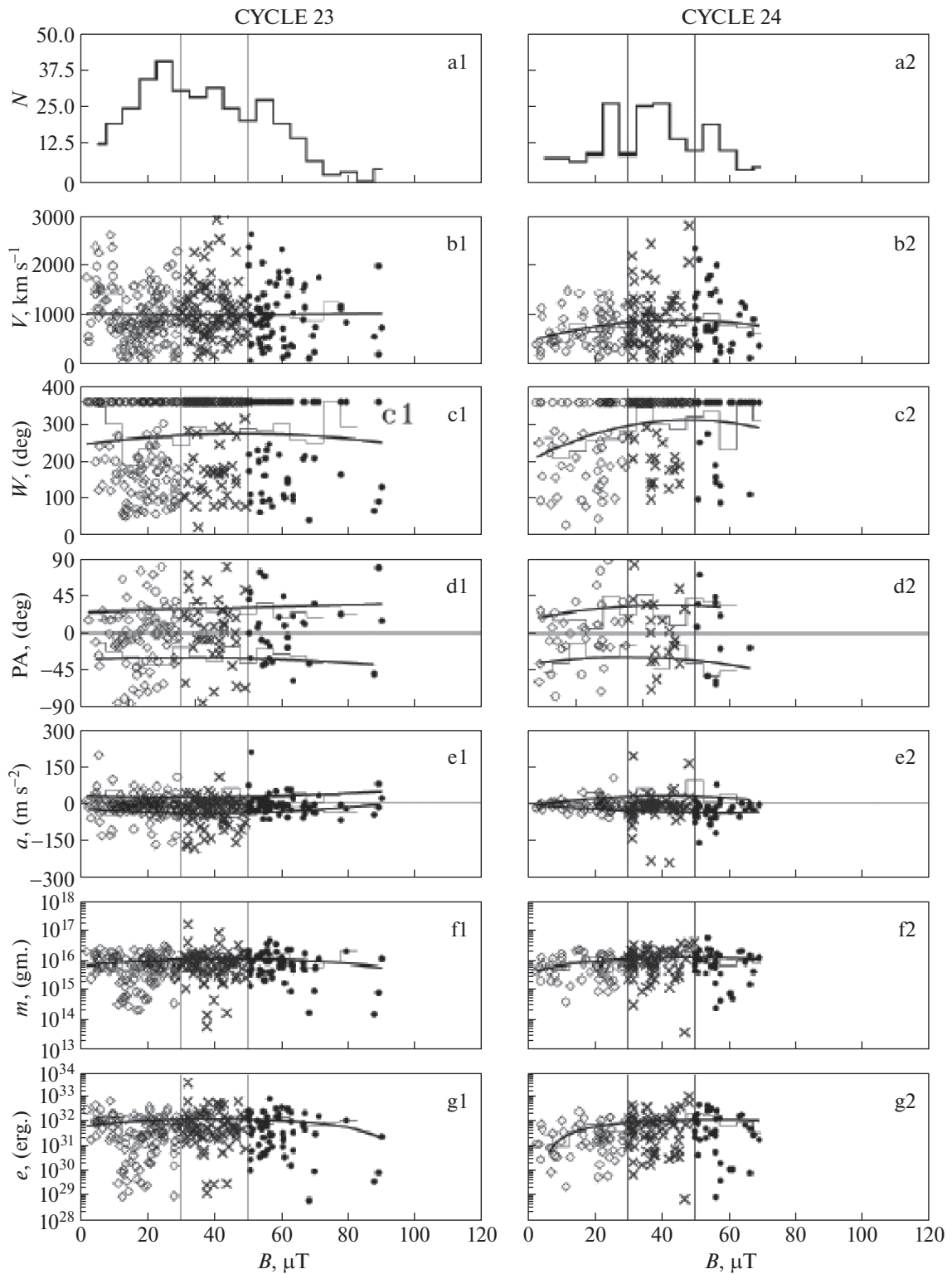


Рис. 4. Зависимости параметров РВП КВМ от магнитного поля в 23 (a1–g1) и 24 (a2–g2) циклах: (a1, a2) гистограммы числа РВП КВМ N ; (b1, b2) скоростей РВП КВМ V ; (c1, c2) угла раствора W ; (d1, d2) локализации PA ; (e1, e2) ускорения a ; (f1, f2) массы и (g1, g2) кинетической энергии. Тонкие линии представляют собой гистограммы, а толстые – аппроксимации полиномами второй степени каждой зависимости. Тонкими вертикальными линиями отмечены границы трех групп в зависимости от B : $0 \mu\text{T} < B < 30 \mu\text{T}$, $30 \mu\text{T} < B < 50 \mu\text{T}$, $B > 50 \mu\text{T}$.

преобладающей для генерации РВП. В обоих случаях M_a , начиная с которого возникает радиоизлучение, приблизительно одинаково и составляет 1.25–1.3.

Всего в диапазоне $1 < M_a < 1.6$ находится 76 (22.49%) РВП в 23 цикле и 42 (23.33%) в 24 цикле. При общем снижении числа РВП в этом диапазоне в 24 цикле относительное значение числа РВП выше, чем в 23. В диапазоне $1.6 < M_a < 2.9$ находится 111 (32.84%) РВП в 23 цикле и 51 (28.33%) в 24 цикле. Основное снижение числа РВП в 24 цикле наблюдается именно для значений $1 < M_a < 2.9$ со 187 в 23 цикле к 93 в 24 цикле. В этой же зоне находятся почти все события, соответствующие сильным магнитным полям (третьей группе по B). При этом в 24 цикле в интервале $1.6 < M_a < 2.9$ значительно снижено число событий с начальными плотностями плазмы менее 10^6 см^{-3} , фоновым магнитным полем менее $20 \mu\text{T}$, начинающихся на высотах более $2.5 R_s$. Число событий с $M_a > 2.9$ изменяется с 31 (9.17%) в 23 к 49 (27.22%) в 24 циклах, т.е. их относительное число в 24 цикле примерно в 3 раза больше, чем в 23. Этим величинам M_a соответствуют события первой и второй групп по магнитному полю с наименьшими значениями расстояний, высокими значениями плотности плазмы, V_a ниже $\approx 800 \text{ км/с}$. Наблюдается большое число РВП с $M_a \leq 1$: 61 событие (18.05%) в 23 цикле и 31 (17.22%) в 24 цикле. Относительно общего числа событий для каждого цикла число РВП КВМ с $M_a \leq 1$ остается примерно одинаковым. Эти события регистрируются на высотах $1.4\text{--}4.6 R_s$ ($1.5\text{--}5.8 R_s$) в 23 (24) циклах при значениях n_e , B и V_a в широком диапазоне.

4. ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ РВП КВМ ОТ ВЕЛИЧИНЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, АЛЬВЕНОВСКОЙ СКОРОСТИ И АЛЬВЕНОВСКОГО ЧИСЛА МАХА В ОБЛАСТИ НАЧАЛА РЕГИСТРАЦИИ КАЖДОГО СОБЫТИЯ В 23 И 24 ЦИКЛАХ

Зависимости параметров РВП КВМ от величины B , V_a и M_a на момент начала регистрации каждого РВП в 23 и 24 циклах приведены на рис. 4–6. Для каждого параметра дополнительно показаны гистограммы его величины (тонкие линии) и аппроксимации полиномами второй степени (толстые линии), которые демонстрируют общие тренды для каждой зависимости. Для параметра PA (локализация КВМ по широте) показаны только события, не относящиеся к типу HALO.

На рис. 4 приведены гистограммы суммарного числа РВП КВМ в КО с шагом $5 \mu\text{T}$ и зависимости параметров РВП КВМ от B . Как и на рис. 2, выделены три группы в зависимости числа РВП КВМ от B . Из рис. 4 следует, что в первой группе, в которой наблюдается наибольшее снижение числа РВП в 24 цикле, снизилась средняя скорость РВП КВМ, резко уменьшилось число и высокоскоростных, и низкоскоростных событий. КВМ с $V_{\text{све}} > 1500 \text{ км/с}$ полностью отсутствуют в 24 цикле (рис. 4b1, b2), уменьшилось число РВП КВМ типа HALO с 74 до 27 (рис. 4c1, c2), уменьшилось число высокоширотных событий (рис. 4d1, d2) и понизились значения ускорений РВП КВМ (рис. 4e1, e2). Средние масса и энергия РВП КВМ остались примерно на одном уровне (рис. 4f1, f2, g1, g2). РВП КВМ с наибольшими скоростями, углами раствора, массой и энергией соответствуют второй группе. В третьей группе зависимости скорости, ускорения, массы и энергии от B отличаются в 23 и 24 циклах. В 23 цикле среднее значение скорости РВП КВМ остается на одном уровне, ускорения растут, а массы и энергии снижаются, а в 24 цикле средние значения скорости и ускорения снижаются, а массы и энергии остаются, приблизительно, на одном уровне.

На рис. 5 показаны гистограммы суммарного числа РВП КВМ в КО с шагом 50 км/с и зависимости их параметров от величины V_a в 23 и 24 циклах. Так как магнитное поле в 24 цикле значительно ниже, чем в 23, то и верхний предел значений V_a для большинства событий в 24 цикле смещен в сторону более низких величин. Однако резкий рост числа РВП начинается примерно одинаково, с $V_a \approx 250 \text{ км/с}$ в обоих циклах. Из рис. 5 следует, что в обоих циклах распределения числа событий имеют широкие максимумы с рядом отдельных пиков. В 23 цикле наблюдается один более высокий максимум числа РВП КВМ при $V_a \approx 600 \text{ км/с}$, а также два дополнительных максимума при $V_a \approx 450 \text{ км/с}$ и $V_a \approx 800 \text{ км/с}$. В 24 цикле главный максимум соответствует $V_a \approx 500 \text{ км/с}$, а более низкий пик $V_a \approx 750 \text{ км/с}$. Общие тренды для каждого из параметров РВП КВМ приблизительно одинаковы и в 23, и в 24 циклах. В области V_a от 500 до 1000 км/с и в 23, и в 24 циклах находятся РВП КВМ из третьей группы зависимости от магнитного поля, т.е. РВП КВМ с максимальными значениями магнитного поля для данного цикла.

На рис. 6 представлены гистограммы суммарного числа РВП КВМ в КО с шагом 0.5 и зависимости параметров РВП КВМ от значений M_a . Аналогично обозначениям на рис. 3, значения параметров КВМ, соответствующих интервалам $1 < M_a < 1.6$, отмечены светло-серым цветом, а

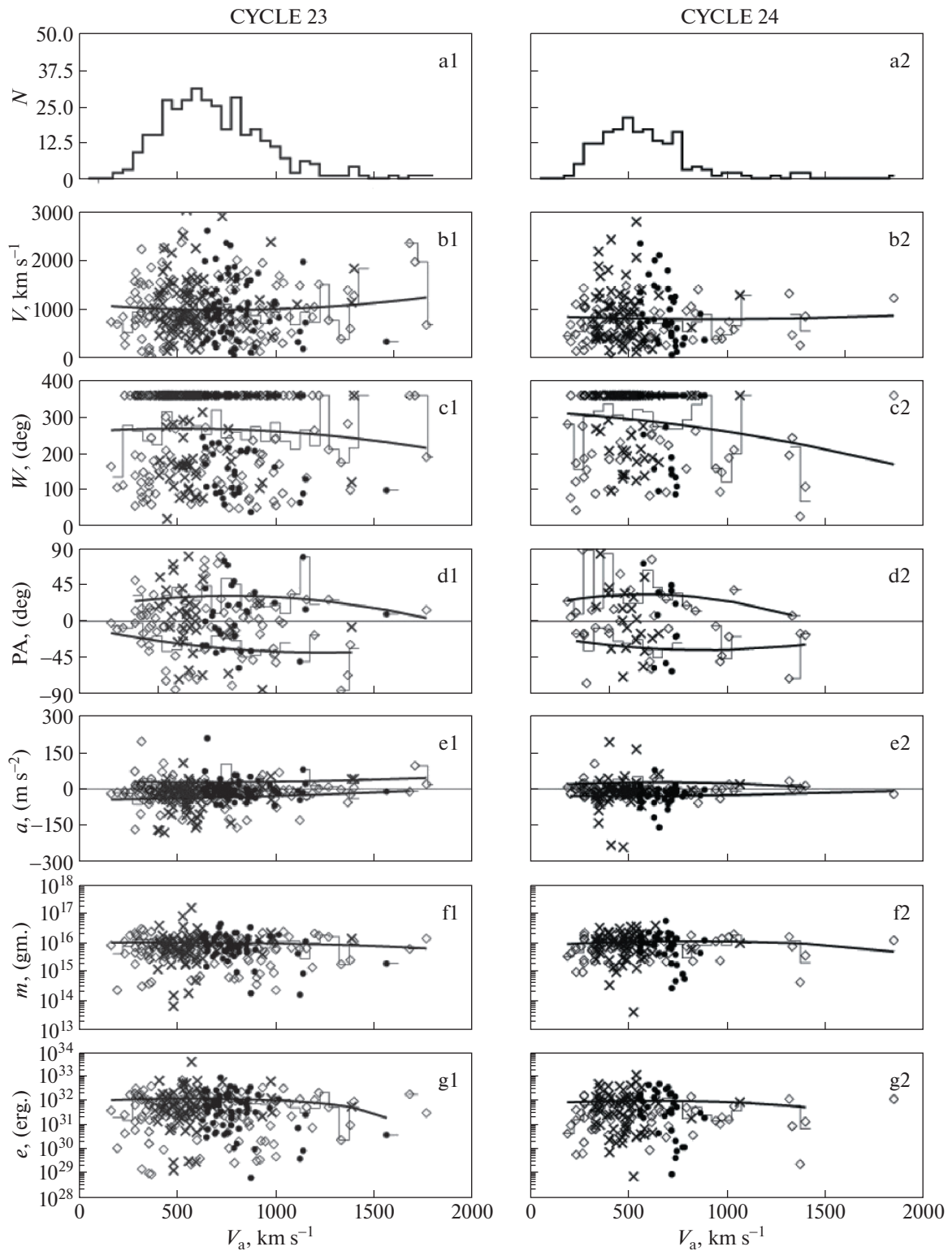


Рис. 5. Зависимости параметров РВП КВМ от величины альвеновской скорости в 23 (a1–g1) и 24 (a2–g2) циклах: (a1, a2) гистограммы числа РВП КВМ; (b1, b2) скоростей РВП КВМ V ; (c1, c2) угла раствора W ; (d1, d2) локализации PA ; (e1, e2) ускорения a ; (f1, f2) массы m ; (g1, g2) кинетической энергии e . Тонкие линии представляют собой гистограммы, а толстые – аппроксимации полиномами второй степени каждой зависимости. Обозначения те же, что и на рис. 4.

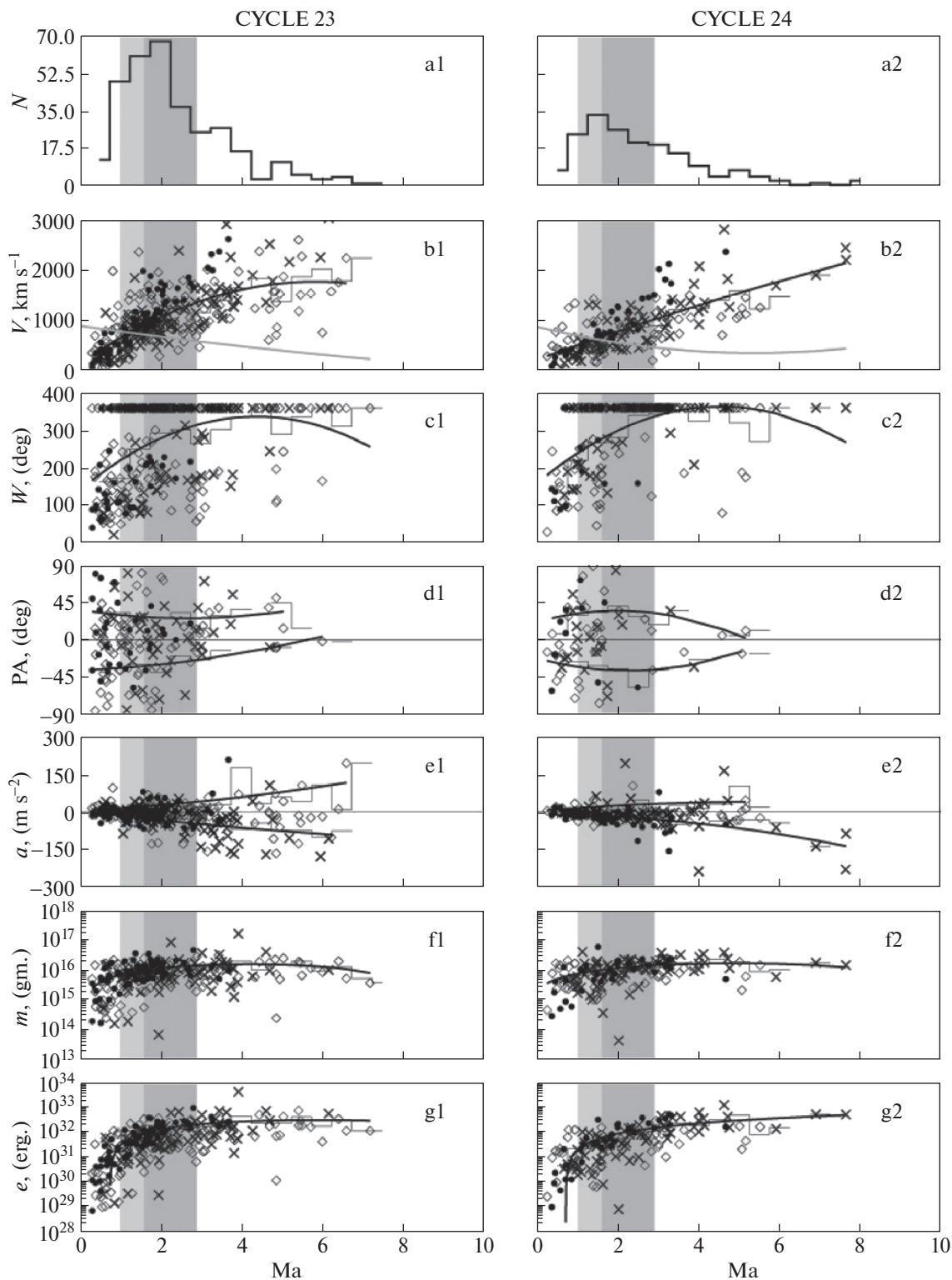


Рис. 6. Зависимости параметров РВП КВМ от значений альвеновского числа Маха в 23 (a1–g1) и 24 (a2–g2) циклах: (a1, a2) гистограммы числа РВП КВМ; (b1, b2) скоростей РВП КВМ; (c1, c2) угла раствора; (d1, d2) локализации; (e1, e2) ускорения; (f1, f2) массы; (g1, g2) кинетической энергии. Значения для всех параметров плазмы, соответствующих интервалу $1 < M_a < 1.6$, отмечены светло-серым цветом, а $1.6 < M_a < 2.9$ – темно-серым цветом. Обозначения те же, что и на рис. 4.

$1.6 < M_a < 2.9$ – темно-серым цветом. Из приведенных зависимостей следует, что с ростом M_a растут скорости, масса, энергия и абсолютные значения ускорения. Значения угла раствора КВМ, не относящиеся к типу HALO, растут при увеличении M_a до 4.5, а затем снижаются. Большинство РВП КВМ с $1 < M_a < 1.6$ имеют скорости от ≈ 300 до ≈ 1300 км/с, ускорение от -50 до $+50$ м/с². То есть РВП, которые согласно теоретическим моделям могут генерироваться при $1 < M_a < 1.6$, соответствуют не самые мощные и не самые быстрые КВМ. РВП КВМ с $1.6 < M_a < 2.9$, в среднем, имеют более высокие значения всех параметров и, в основном, имеют отрицательное ускорение. Это более быстрые и мощные события, локализованные, в основном, на средних широтах в 24 цикле и на средних и низких широтах в 23 цикле. Основное снижение числа РВП КВМ произошло именно для событий с $1 < M_a < 2.9$. РВП КВМ с M_a более 3 имеют наивысшие скорости, значения массы, энергии и доминирующее отрицательное ускорение. События типа “не HALO” имеют более низкие значения угла раствора и относятся к первой и второй группам по магнитному полю. Все КВМ с $M_a > 6.1$ в 23 цикле и с $M_a > 5.2$ в 24 цикле – это КВМ типа HALO.

На рис. 6b1, b2 показаны также средние за КО значения V_a (тонкая светлая сплошная линия). Для РВП КВМ с $V_{\text{сме}} \leq V_a$ также и $M_a \leq 1$ и, соответственно, ударные волны возникать не могут. В 23 цикле наблюдалось 61 (18.05%), а в 24–31 (17.22%) подобное событие. Это может свидетельствовать о том, что РВП, сопутствующие этим КВМ, могут быть следствием разных механизмов генерации. В эту группу входят КВМ, локализованные на всех широтах, с низким ускорением, массой и энергией, средними скоростями, обладающие широким диапазоном углов раствора. Следует отметить, что ударные волны от КВМ, имеющих малые углы раствора и локализованных вблизи края солнечного лимба, могут не регистрироваться на орбите Земли. Для КВМ, произошедших вблизи центра солнечного диска и сопровождающихся генерацией РВП, должны наблюдаться ударные волны на орбите Земли с соответствующей временной задержкой. Однако для довольно большого числа таких РВП КВМ ударные волны на орбите Земли не наблюдаются. Выяснение этого вопроса очень важно, так как РВП используются в качестве ранних индикаторов в прогнозировании космической погоды.

В работе [55] были рассмотрены РВП, наблюдавшиеся на Wind/WAVES с сопутствующими КВМ, локализованными в пределах 30° от центрального меридиана. Ими было обнаружено, что

21 из 74 РВП КВМ (28%) не сопровождались ударными волнами на орбите Земли, хотя для этих КВМ ударные волны должны были регистрироваться на орбите Земли с соответствующим временным запаздыванием. Параметры РВП КВМ, не сопровождавшихся наблюдениями ударных волн на орбите Земли, были сопоставлены с параметрами РВП КВМ, сопровождавшихся наблюдениями ударных, и с параметрами КВМ, не сопровождавшихся РВП. Согласно их результатам параметры РВП КВМ, не сопровождавшихся наблюдениями ударных волн на орбите Земли, значимо отличались. Это были слабые, низкоскоростные, с малыми углами раствора КВМ. Они предположили, что поскольку это довольно слабые события (это соответствует значениям параметров ряда КВМ с $V_{\text{сме}} \leq V_a$, полученными в данном исследовании), то, возможно, что ударные волны формируются на малых расстояниях от Солнца, а затем затухают, так как у КВМ нет достаточной энергии для поддержания необходимых для ударной волны условий. Однако следует заметить, что в данной работе параметры плазмы определялись на моменты начала регистрации каждого события. Для РВП с начальной частотой, равной предельной частоте регистрации по данным Wind (14 МГц), в 23 цикле было зарегистрировано 20 РВП, а в 24 – 14 РВП. Для РВП с начальной частотой, равной предельной частоте регистрации по данным STEREO (16 МГц), в 24 цикле было зарегистрировано 2 РВП. Для этих событий возможно, что ударные волны формировались на более низких высотах, а к моменту их регистрации они уже затухли, но для 41 (65.57%) РВП в 23 цикле и 15 (48.39%) РВП в 24 цикле, начало регистрации которых соответствует более низким частотам и, соответственно, большим расстояниям, это объяснение не подходит. Также в работе [55] было предположено, что поскольку исследуемые ими КВМ имеют малые углы раствора, то на направление их распространения могут оказывать влияние близлежащие корональные дыры, и на орбите Земли может фиксироваться только область КВМ без ударной волны. Однако 24 (39.34%) РВП КВМ с $V_{\text{сме}} \leq V_a$ и $M_a \leq 1$ в 23 цикле и 17 (54.84%) в 24 – это КВМ с углом раствора более 100° , а 14 (22.95%) в 23 и 8 (25.81%) РВП КВМ в 24 циклах в этой группе являются КВМ типа HALO и, следовательно, это объяснение для данных событий не подходит.

На рис. 7b отдельно показаны значения скорости для каждого РВП КВМ (значки) и рассчитанные для каждого КО V_a (сплошная линия), а на рис. 7c – разность между $V_{\text{сме}}$ РВП КВМ и V_a для каждого события. На рис. 7a повторен график изменения суммарного числа РВП КВМ в КО для удобства сопоставления. События со скоростью меньше V_a наблюдаются в периоды максимума

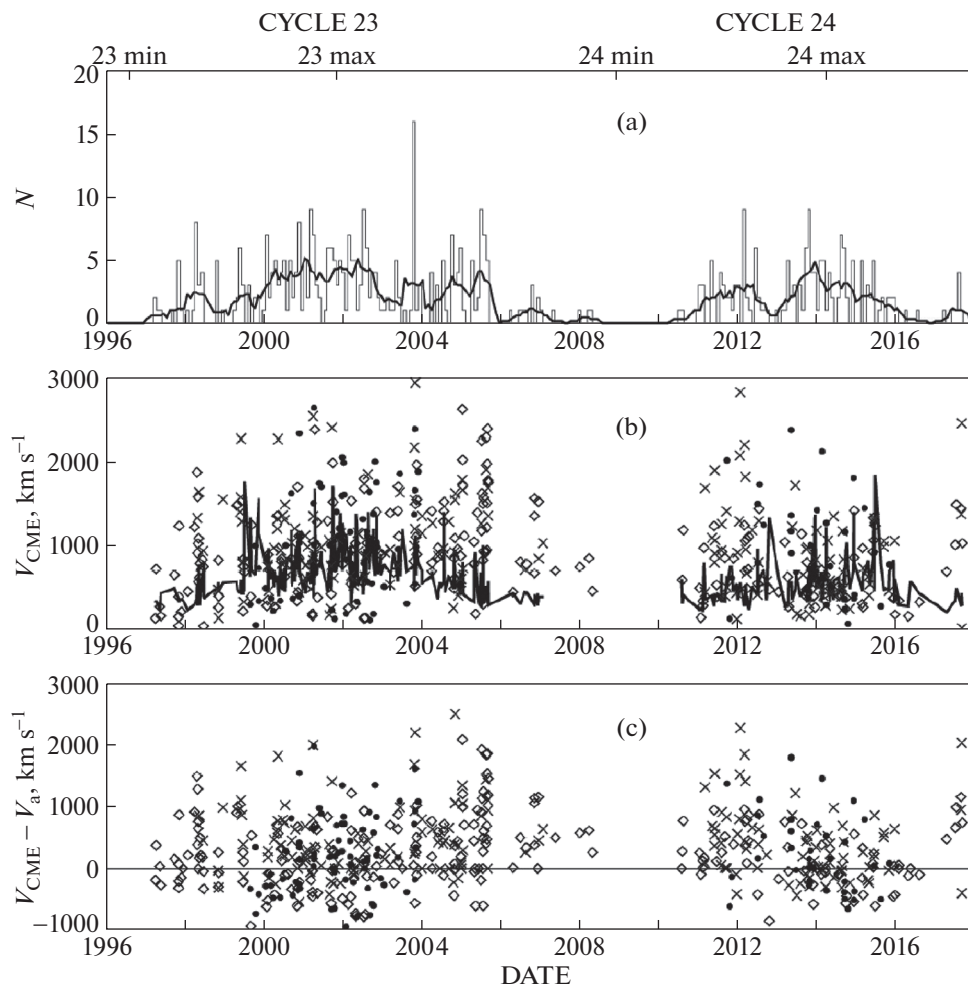


Рис. 7. Зависимости параметров РВП КВМ от времени: (а) изменение суммарного числа РВП КВМ в КО в 23 и 24 циклах; (б) скоростей РВП КВМ, значки обозначают значения скорости каждого РВП КВМ, соответствующие трем группам по B , сплошной жирной линией показаны рассчитанные для каждого КО значения альвеновской скорости; (с) отклонений скорости каждого РВП КВМ от альвеновской скорости.

обоих циклов. Они могут соответствовать всем трем группам по магнитному полю. Одним из объяснений того, что для ряда событий скорость РВП КВМ ниже V_a , а РВП наблюдаются, может служить то, что V_a рассчитывалась не конкретно для момента наблюдения каждого КВМ, а как среднее значение за КО. Для расчета плотности плазмы в области РВП КВМ была использована модель [49], которая тоже дает приблизительные значения. Соответственно, в конкретные моменты наблюдения РВП КВМ V_a могла быть ниже. Кроме того, в каталоге CDAW представлены значения скоростей КВМ в картинной плоскости, определенные только для одной области каждого КВМ, движущейся с наибольшей скоростью, использование которых является допустимым при статистических исследованиях [56]. Но большое относительное число этих событий (18.05% в 23 цикле и 17.22% в 24-м), которое остается на од-

ном уровне в обоих циклах, а также концентрация параметров этих КВМ к определенным значениям и фазе солнечной активности свидетельствуют о неслучайном характере их появления.

Большинство исследованных РВП считаются генерируемыми плазменным механизмом с локализацией на или за фронтом или на флангах ударной волны, вызванной КВМ. Режим модели [17] при перпендикулярных ударных волнах может реализоваться при $1 < M_a < 1.6$, а в случае генерации РВП в МГД ударных волнах, распространяющихся вдоль магнитного поля $1 < M_a < 1.5$ [22]. Возможно, что для РВП, соответствующих КВМ со скоростями, равными или ниже V_a и $M_a \leq 1$, могут реализовываться какие-то иные механизмы генерации РВП, например, механизм, предложенный в работе [57]. Согласно этой модели часть событий может быть связана с генерацией неко-

герентного синхротронного излучения от около релятивистских электронов, взаимодействующих с магнитным полем в области КВМ или между ударной волной и КВМ. Источниками релятивистских электронов могут быть быстрая ударная волна, вызванная КВМ, вспышка, токовый слой КВМ или некий иной процесс выделения энергии. В работе [58] детально рассмотрен ряд событий, для которых возможно реализуется синхротронный механизм генерации РВП вместо плазменного. РВП с предполагаемым синхротронным механизмом связаны с быстрыми КВМ, имеющими большой угол раствора, часто это КВМ типа HALO. Эти РВП имеют широкую частотную полосу, которая в несколько раз превышает полосу частот РВП с плазменным механизмом. Возможно, что большой угол раствора КВМ может приводить к увеличению масштаба неоднородности областей, ответственных за радиоизлучение. Кроме того, в подобных событиях зависимости частоты от времени как наблюдаемые, так и рассчитанные, не соответствуют тем, которые должны быть в РВП при плазменном механизме [57].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследования РВП и РВП КВМ, а также параметров плазмы на моменты начала генерации/регистрации каждого РВП в 23 и 24 циклах с 1995 по 2017 г. Результаты свидетельствуют, что число РВП и средние значения B , V_a , h , n_e и M_a изменяются в виде отдельных импульсов в обоих циклах. Рассчитанные для областей начала регистрации каждого РВП значения B , V_a , h , n_e и M_a , как и параметры РВП КВМ, отличаются в 23 и 24 циклах. В обоих циклах к максимуму активности B , V_a и h растут, а M_a остается приблизительно на одном уровне, но в 23 цикле максимальное число РВП в КО и средние значения всех параметров плазмы наблюдались на всех фазах цикла, приблизительно, на одном уровне. В 24 цикле в изменениях числа РВП в КО и значениях всех параметров плазмы наблюдаются два пика с характерным провалом. Наибольшие расстояния начала генерации РВП наблюдаются на фазах максимума и спада в обоих циклах.

Число событий растет с ростом магнитного поля. При этом возрастает и среднее расстояние начала генерации РВП, растет V_a и, соответственно, снижается M_a . В зависимости от B выделяются три группы в каждом цикле: $0 \mu\text{T} < B < 30 \mu\text{T}$, $30 \mu\text{T} < B < 50 \mu\text{T}$, $B > 50 \mu\text{T}$ с числом РВП КВМ в каждой группе: 159, 103 и 76 в 23 цикле и 67, 75 и 38 в 24 цикле. Наибольшее число РВП КВМ в 23 цикле соответствует первой группе (159), а в 24 – второй (75). В 24 цикле число РВП КВМ уменьшилось во всех группах, но основное сни-

жение произошло за счет событий первой группы со 159 до 67, регистрируемых при низких плотностях и больших расстояниях. При этом в 24 цикле снизилась средняя скорость РВП КВМ, уменьшилось число как высокоскоростных, так и низкоскоростных событий. Полностью отсутствуют КВМ с $V_{\text{сме}} > 1500$ км/с. Также снизилось среднее значение угла раствора, уменьшилось число КВМ типа HALO, число высокоширотных событий, значения ускорения и средняя энергия РВП КВМ. События второй группы ($30 \mu\text{T} < B < 50 \mu\text{T}$) наблюдаются на меньших расстояниях, при больших значениях плотностях плазмы, с меньшим разбросом V_a , максимальными значениями M_a и $V_{\text{сме}}$ в 24 цикле. К третьей группе ($B > 50 \mu\text{T}$) относятся события, регистрируемые на минимальных расстояниях при максимальных значениях B , n_e и V_a .

На снижение числа РВП в 24 цикле могло повлиять уменьшение времени существования фотосферных магнитных полей высокой напряженности. В 23 цикле фотосферные магнитные поля высокой напряженности наблюдались в течение 120 КО с 1930 по 2050 КО, тогда как в 24 цикле поля высокой напряженности наблюдались в течение 70 КО с 2110 по 2180 КО [53]. Возможно, что причиной снижения числа регистрируемых ДН РВП стало и то, что вследствие снижения напряженности коронального магнитного поля и плотности корональной плазмы, РВП в 24 цикле генерируются на более низких высотах в атмосфере Солнца, и ряд РВП метрового диапазона не получили продолжения в ДН диапазоне.

Максимальные значения V_a смещены к более низким величинам в 24 цикле из-за общего снижения магнитного поля. Но рост числа РВП начинается одинаково, примерно, с $V_a \cong 250$ км/с в обоих циклах.

Большинство РВП КВМ соответствуют $1 < M_a < 2.9$ и основное снижение числа РВП КВМ в 24 цикле наблюдается именно для событий с $1 < M_a < 2.9$. РВП КВМ с $1 < M_a < 1.6$ имеют скорости от 300 до 1000 км/с и ускорения от -50 до $+50$ м/с². То есть это не самые мощные и не самые быстрые события. Этим значениям M_a соответствуют РВП, которые могут генерироваться разными механизмами: ударными волнами, распространяющимися поперек магнитного поля [17], ударными волнами, движущимися вдоль магнитного поля [22], механизмом, предложенным в работе [9] для квазипараллельных фронтов.

РВП КВМ с $1.6 < M_a < 2.9$ в среднем имеют более высокие значения всех параметров и, в основном, имеют отрицательное ускорение. Это более быстрые и мощные события, локализованные на средних широтах в 24 цикле, а в 23 цикле

на средних и низких широтах. РВИ КВМ с M_a более 3 имеют наивысшие скорости, массу, энергию и доминирующее отрицательное ускорение. События типа “не HALO” имеют более низкие значения угла раствора и относятся к первой и второй группам по магнитному полю. В 24 цикле в интервале $1.6 < M_a < 2.9$ значительно снижено число событий с начальными плотностями плазмы менее 10^6 см^{-3} , фоновым магнитным полем менее 20 мТл , начинающихся на высотах более $2.5 R_s$. Все КВМ с $M_a > 6.1$ в 23 цикле и с $M_a > 5.2$ в 24 цикле – это КВМ типа HALO.

РВИ КВМ в количестве 61 (18.05%) в 23 цикле и 31 (17.22%) в 24 цикле регистрируются при $V_{\text{сме}} \leq V_a$ и $M_a \leq 1$, в основном, в максимумах 23 (24) циклов при значениях n_e и B в широком диапазоне. Возможно, что в этих событиях реализуется другой, не плазменный механизм генерации РВИ.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы каталоги CDAW SOHO/LASCO и радиовсплесков II типа. Каталог КВМ создан и поддерживается в центре данных CDAW НАСА и католическим университетом Америки совместно с Морской исследовательской лабораторией. SOHO является совместным международным проектом между Европейским космическим агентством и Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства США (НАСА).

Данные солнечной обсерватории Wilcox, использованные в этой работе, получены через интернет² 2020:03:11 в 01:13:34 благодаря Д.Т. Хоексеме. Солнечная обсерватория Wilcox в настоящее время поддерживается НАСА.

Автор выражает благодарность службе данных космической физики NASA/GSFC и группе поддержки базы данных OMNI за предоставляемые ими данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Ciaravella, J. C. Raymond, S. W. Kahler, A. Vourlidas, and J. Li, *Astrophys. J.* **621**, 1121 (2005).
2. K.-S. Cho, Y.-J. Moon, M. Dryer, A. Shanmugaraju, C. D. Fry, Y.-H. Kim, S.-C. Bong, and Y.-D. Park, *J. Geophys. Res.* **110**, id. A12101 (2005).
3. P. Zucca, M. Pick, P. Démoulin, A. Kerdraon, A. Lécacheux, and P. T. Gallagher, *Astrophys. J.* **795**, id. 68 (2014).
4. V. Krupar, J. Magdalení, J. P. Eastwood, N. Gopalswamy, O. Kruparova, A. Szabo, and F. Němec, *Astrophys. J.* **882**, id. 92 (2019).
5. H. K. Sen, *Australian J. Physics* **7**, 30 (1954).
6. Y. Uchida, *Publ. Astron. Soc. Japan* **12**, 376 (1960).
7. J. P. Wild, *J. Phys. Soc. Japan* **17** (Supplement A-II), 249 (1962).
8. G. D. Holman and M. E. Pesses, *Astrophys. J.* **267**, 837 (1983).
9. G. Mann, T. Clafßen, and H. Auräß, *Astron. and Astrophys.* **295**, 775 (1995).
10. S. A. Knock, I. H. Cairns, P. A. Robinson, and Z. Kuncic, *J. Geophys. Res.* **106** (A11), 25041 (2001).
11. G. P. Chernov, A. A. Stanislavsky, A. A. Konovalenko, E. P. Abranin, V. V. Dorovsky, and H. O. Rucker, *Astron. Letters* **33** (3), 192 (2007).
12. F. Frassati, R. Susino, S. Mancuso, and A. Bemporad, *Astrophys. J.* **871**, id. 212 (2019).
13. Y. I. Egorov, V. G. Fainshtein, and D. V. Prosovetskiy, *Solar Phys.* **296** (4), id. 58 (2021).
14. J. P. Wild, J. D. Murray, and W. C. Rowe, *Australian J. Physics* **7**, 439 (1954).
15. В. В. Железняков, *Радиоизлучение Солнца и планет* (М.: Наука, 1964).
16. S. D. Bale, M. J. Reiner, J.-L. Bougeret, M. L. Kaiser, S. Krucker, D. E. Larson, and R. P. Lin, *J. Geophys. Res.* **26** (11), 1573 (1999).
17. S. B. Pikel'ner and M. A. Gintsburg, *Astronomicheskii Zhurnal* **7**, 639 (1964).
18. В. В. Зайцев, *Изв. ВУЗов. Радиофизика* **20** (9), 1379 (1977).
19. V. V. Fomichev, *Astronomicheskii Zhurnal* **16**, 284 (1972).
20. A. O. Benz and G. Thejappa, *Astron. and Astrophys.* **202**, 267 (1988).
21. I. H. Cairns, K. A. Kozarev, N. V. Nitta, N. Agueda, et al., *Solar Phys.* **295** (2), id. 32 (2020).
22. V. V. Zaitsev and V. G. Ledenëv, *Soviet Astron. Letters* **2** (5), 172 (1976).
23. V. V. Zaitsev, *Astronomicheskii Zhurnal* **12**, 610 (1969).
24. I. A. Bilenko, *Geomagnetizm and Aeronomy* **55** (8), 1141 (2015).
25. I. A. Bilenko, *Astron. Astrophys. Trans.* **29** (4), 547 (2016).
26. I. A. Bilenko, *Geomagnetizm and Aeronomy* **58** (7), 989 (2018).
27. K.-S. Cho, J. Lee, D. E. Gary, Y.-J. Moon, and Y. D. Park, *Astrophys. J.* **665**, 799 (2007).
28. N. Gopalswamy, N. Nitta, S. Akiyama, P. Mäkelä, and S. Yashiro, *Astrophys. J.* **744**, id. 72 (2012).
29. C. A. Maguire, E. P. Carley, J. McCauley, and P. T. Gallagher, *Astron. and Astrophys.* **633**, id. A56 (2020).
30. P. З. Сагдеев, *Журн. техн. физики* **31** (10), 296 (1961).
31. P. Makela, N. Gopalswamy, M. J. Reiner, S. Akiyama, and V. Krupar, *Astrophys. J.* **827** (2), id. 141 (2016).
32. G. Chernov and V. Fomichev, *Astrophys. J.* **922**, id. 82 (2021).
33. S. Pohjolainen and N. T. Sheshvan, *Solar Phys.* **296**, id. 81 (2021).
34. Ю. Т. Цан, Е. А. Исаева, Ю. Г. Копылова, *Письма в Астрон. журн.* **46** (2), 147 (2020).
35. P. Zucca, E. P. Carley, D. S. Bloomfield, and P. T. Gallagher, *Astron. and Astrophys.* **564**, id. A47 (2014).

² <http://wso.stanford.edu>

36. *V. Krupar, J. P. Eastwood, O. Kruparova, O. Santolik, et al.*, *Astrophys. J. Letters* **823** (1), id. L5, (2016).
37. *S. Majumdar, S. P. Tadepalli, S. S. Maity, K. Deshpande, A. Kumari, R. Patel, and N. Gopalswamy*, *Solar Phys.* **296**, id. 62 (2021).
38. *D. E. Morosan, E. P. Carley, L. A. Hayes, S. A. Murray, et al.*, *Nature Astron.* **3**, 452 (2019).
39. *S. W. Feng, Y. Chen, H. Q. Song, B. Wang, and X. L. Kong*, *Astrophys. J. Letters* **827**, id. L9 (2016).
40. *F. Al-Hamadani, S. Pohjolainen, and E. Valtonen*, *Solar Phys.* **292** (9), id. 127 (2017).
41. *N. Gopalswamy, P. Mäkelä, and S. Yashiro*, *Sun and Geosphere* **14** (2), 111 (2019).
42. *N. Gopalswamy, S. Yashiro, G. Michalek, G. Stenborg, A. Vourlidas, S. Freeland, and R. Howard*, *Earth, Moon, and Planets* **104**, 295 (2009).
43. *A. Vourlidas, R. A. Howard, E. Esfandiari, S. Patsourakos, S. Yashiro, and G. Michalek*, *Astrophys. J.* **722**, 1522 (2010).
44. *A. Vourlidas, R. A. Howard, E. Esfandiari, S. Patsourakos, S. Yashiro, and G. Michalek*, *Astrophys. J.* **730**, id. 59 (2011).
45. *J. H. King and N. E. Papitashvili*, *J. Geophys. Res.* **110**, id. A02104 (2005).
46. *I. A. Bilenko*, *Solar Phys.* **293**, 106 (2018).
47. *T. L. Jr. Duvall, J. M. Wilcox, L. Svalgaard, P. H. Scherrer, and P. S. McIntosh*, *Solar Phys.* **55**, 63 (1977).
48. *J. T. Hoeksema and P. H. Scherrer*, *Solar Phys.* **105**, 205 (1986).
49. *Y. Leblanc, G. A. Dulk, and J.-L. Bougeret*, *Solar Phys.* **183**, 165 (1998).
50. *E. P. Carley, D. M. Long, J. P. Byrne, P. Zucca, D. S. Bloomfield, J. McCauley, and P. T. Gallagher*, *Nature Phys.* **9** (12), 811 (2013).
51. *P. Zucca, E. P. Carley, D. S. Bloomfield, and P. T. Gallagher*, *Astron. and Astrophys.* **564**, id. A47 (2014).
52. *N. R. Jr. Sheeley, Y.-M. Wang, S. H. Hawley, G. E. Brueckner, et al.*, *Astrophys. J.* **484**, 472 (1997).
53. *I. A. Bilenko*, *Astrophys. J.* **889**, id. 1, (2020).
54. *D. F. Smith*, *Astrophys. J.* **170**, 559 (1971).
55. *N. Gopalswamy, P. Mäkelä, S. Akiyama, S. Yashiro, H. Xie, R. J. MacDowall, and M. L. Kaiser*, *J. Geophys. Res. Space Physics* **117**(A8), id. A08106 (2012).
56. *T. A. Howard, D. Nandy, and A. C. Koepke*, *J. Geophys. Res.* **113**, id. A01104 (2008).
57. *T. S. Bastian*, *Astrophys. J.* **665**, 805 (2007).
58. *S. Pohjolainen, H. Allawi, and E. Valtonen*, *Astron. and Astrophys.* **558**, id. A7 (2013).