

ОБ ЭВОЛЮЦИИ ПОЛОС НА ДИНАМИЧЕСКИХ СПЕКТРАХ СОЛНЕЧНЫХ РАДИОВСПЛЕСКОВ II ТИПА

© 2020 г. Ю. Т. Цап^{1,2*}, Е. А. Исаева³, Ю. Г. Копылова²

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Радиоастрономический институт НАН Украины

Поступила в редакцию 28.08.2019 г.

После доработки 13.11.2019 г.; принята к публикации 05.12.2019 г.

Исходя из анализа динамических спектров излучения солнечных вспышек в метровом диапазоне длин волн, полученных с помощью наземной сети радиотелескопов Radio Solar Telescope Network, рассмотрена эволюция параметров гармоник солнечных радиовсплесков II типа. Установлено, что относительное расстояние между полосами ведет себя немонотонным образом и его значение может меняться в широких пределах от 0.1 до 3. Это можно объяснить генерацией электромагнитных волн на первой и второй гармонике плазменной частоты по разные стороны фронта ударной волны. Обсуждаются следствия полученных результатов.

Ключевые слова: Солнце, радиоизлучение, радиовсплески II типа, гармоники.

DOI: 10.31857/S0320010820010064

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени не вызывает сомнений, что солнечные радиовсплески II типа, наблюдаемые как в короне, так и в межпланетном пространстве с характерной длительностью соответствующей минуте и дни, генерируются в области фронта ударных волн (Железняков, 1970; Уилд, Смерд, 1972; Фомичев, Черток, 1977; Зайцев, 1977; Крюгер, 1979; Нельсон, Мелроуз, 1985; Ленгель-Фрей, Стоун, 1989; Кэрнс и др., 2000; Вржжак и др., 2001; Васант и др., 2014). На динамических спектрах можно наблюдать две гармонические полосы (количество полос может быть и большим, Робертс, 1959; Злотник и др., 1998) — высокочастотную и низкочастотную, которые ведут себя подобным образом как по интенсивности, так и скорости дрейфа. В метровом диапазоне длин волн около половины радиовсплесков II типа обнаруживают гармоники (Робертс, 1959; Крюгер, 1979), усредненное отношение частот которых лежит между 1.8 и 2 (Робертс, 1959; Железняков, 1970; Крюгер, 1979; Кэрнс и др., 2000). Гармонические полосы наблюдаются и в межпланетном пространстве (Ленгель-Фрей, Стоун, 1989; Вржжак и др., 2001, 2004). Как показали Ленгель-Фрей и Стоун (1989), исходя из 600 спектров

33 радиовсплесков II типа, полученных в диапазоне 0.03–2 МГц с помощью International Sun-Earth Explorer 3, в 30% случаев наблюдаются две полосы с характерным значением отношения частот 1.9 ± 0.3 . Между тем усредненные характеристики далеко не всегда адекватно отражают природу рассматриваемого явления и соответственно могут приводить к некорректным выводам, в связи с чем чрезвычайно плодотворным может оказаться изучение эволюции полос излучения радиовсплесков II типа.

Раздвоение полос обычно характеризуют относительным расстоянием между полосами $b = (f_2 - f_1)/f_1$, где f_1 и f_2 — частоты, соответствующие низкочастотной (1) и высокочастотной (2) компонентам (см. также Манн и др., 1995, 1996). Как правило, наблюдаемые гармонические полосы ассоциируют с плазменным механизмом радиоизлучения в области фронта ударной волны (Железняков, 1970; Крюгер, 1979; Нельсон, Мелроуз, 1985; Вржжак и др., 2001). Считается, что неравновесные электроны возбуждают легмюровские волны L вблизи фронта на частоте, близкой к плазменной f_p , которые затем трансформируются в электромагнитные волны T . В результате их рассеяния ($L \rightarrow T(f_p) + S$) возбуждается первая гармоника, а вследствие слияния ($L + L' \rightarrow T(2f_p)$) — вторая, где обозначение S соответствует ионно-звуковой моде (Нельсон, Мелроуз, 1985).

*Электронный адрес: yur_crao@mail.ru

Если же величина b , по крайней мере, в разы меньше 1, что может иметь место одновременно на двух гармониках (Смерд и др., 1975), то говорят о расщеплении гармонических полос. Наблюдаемую тонкую спектральную структуру связывают с генерацией электромагнитных волн на одной гармонике по обе стороны фронта ударной волны (плотность плазмы n позади фронта больше, чем впереди, а плазменная частота $f_p \propto \sqrt{n}$). Именно этот механизм, несмотря на большое число альтернативных подходов (Зайцев, 1977; Крюгер, 1979; Фомичев, Черток, 1977), обычно и привлекают для диагностики плазмы и магнитных полей в короне Солнца и межпланетном пространстве (Смерд и др., 1974, 1975; Вржнжак и др., 2001, 2002; Зимовец и др., 2012; Васант и др., 2014). Между тем вопрос о том, где происходит генерация радиоизлучения (позади, впереди, по обе стороны или в переходной области фронта), все еще остается открытым (Маклеан, 1967; Черток, Фомичев, 1975; Ламп, Пападополос, 1977; Зайцев, 1977; Холман, Писсис, 1983; Кэрнс, 1986; Ленгель-Фрей и др., 1997). Хотя последние как экспериментальные, так и теоретические оценки свидетельствуют, скорее, в пользу более эффективной генерации ленгмюровских волн перед фронтом ударной волны (Кэрнс и др., 2000; Ду и др., 2014), тем не менее их нельзя считать убедительными. На наш взгляд, решить данную проблему может помочь детальное изучение эволюции динамических радиоспектров.

Цель настоящей работы — на примере многих протонных событий исследовать в метровом диапазоне длин волн изменение относительного расстояния между гармониками b со временем. Затем, исходя из полученных результатов и существующих представлений, попытаться объяснить наблюдаемые особенности солнечных радиовсплесков II типа. В заключение сформулировать основные выводы.

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

В работе мы использовали данные наблюдений, полученные с помощью наземной сети RSTN (Radio Solar Telescope Network) — мировой сети службы Солнца, созданной Исследовательской лабораторией ВВС США (Air Force Research Laboratory) с целью мониторинга солнечных вспышек, шумовых бурь и других проявлений солнечной активности. RSTN включает в себя систему антенн Radio Interference Measuring Set и радиоспектрограф SRS (Solar Radio Spectrograph), размещенных в разных частях Земли. В сеть RSTN входят четыре наземные станции: Palehua (Гавайи), San Vito dei Normanni (Италия), Sagamore Hill (Массачусеттс, США), RAAF (Royal Australian Air Force) и Learmonth (Западная Австралия),

что позволяет проводить непрерывный мониторинг радиоизлучения Солнца. Анализировались оригинальные записи динамических спектров в диапазоне 25–180 МГц солнечного радиоспектрографа (SRS, <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/rstn-spectral/>).

Исследуемая нами выборка содержала 112 радиовсплесков II типа, связанных с протонными событиями, за период с 24.11.2000 по 20.12.2014 г. Динамические спектры SRS, получаемые с секундным разрешением по времени, имели два частотных канала. Им соответствовали полосы 25–75 МГц и 75–180 МГц.

Обработка метровых радиовсплесков II типа происходила в несколько этапов. Предварительно были построены динамические спектры по оригинальным данным SRS в диапазоне 25–180 МГц в линейном масштабе с максимально возможным разрешением. Затем осуществлялось выделение гармоник всплеска, т.е. вдоль каждой гармоники с учетом их яркости на динамическом спектре визуально проводились линии. Значения пикселей автоматически пересчитывались в частоты и время. Таким образом, происходила оцифровка гармоник радиовсплесков II типа. Аппроксимация гармоник (рис. 1) осуществлялась с помощью метода наименьших квадратов на основе следующей регрессионной модели (Исаева, Цап, 2017):

$$\lg f_{i,j} = a_j \sqrt{t_i} + d_j, \quad (1)$$

где $f_{i,j}$ — частота максимума интенсивности всплеска II типа выделенной полосы в момент времени t_i , $i = 0, 1, \dots$, — номер отсчета, $j = 1, 2$ — номер полосы, a_j и d_j — коэффициенты регрессии. Нулевой момент времени ($i = 0$) принимался равным началу радиовсплеска в высокочастотной области на 180 МГц. Сразу отметим, что эта модель позволила описать 95% выбранных событий, для которых коэффициент корреляции между наблюдаемыми и расчетными значениями частоты оказался ≥ 0.98 .

Затем, после определения параметров модели на основе метода наименьших квадратов, для всех радиовсплесков II типа мы рассчитали точность оценки значения частоты с помощью формулы (1), т.е. нашли среднеквадратичные отклонения σ_j между наблюдаемыми и расчетными значениями частоты, которые, как оказалось, не превысили 1 МГц. Убедившись в том, что функционал (1) дает достаточно хорошее приближение, далее нами проводилось исследование зависимости относительного расстояния

$$b_i = \frac{f_{i,2} - f_{i,1}}{f_{i,1}} \quad (2)$$

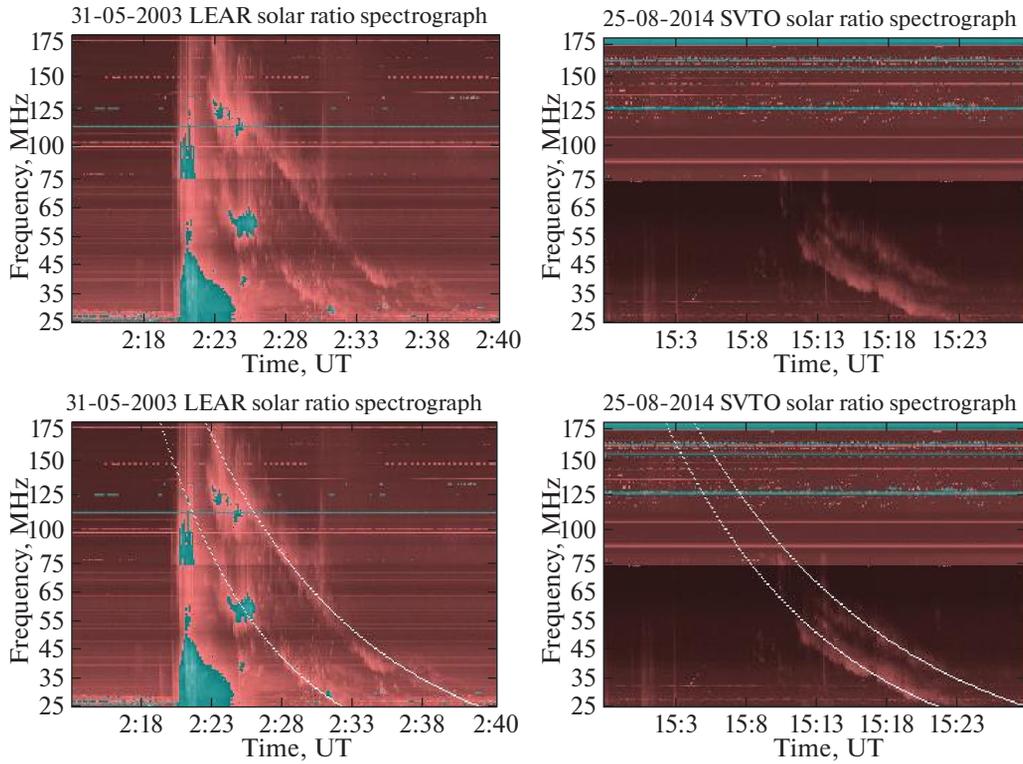


Рис. 1. Верхняя панель: примеры динамических спектров радиовсплесков II типа протонных событий 31.05.2003 и 25.08.2014 гг., полученные соответственно с помощью радиоспектрографов SRS в Learmonth (Западная Австралия) и San Vito dei Normanni (Италия). Нижняя панель: аппроксимация гармоник (пунктирная линия).

от времени t_i между гармониками радиовсплесков II типа в диапазоне 25–180 МГц для расчетных значений частоты с шагом в 1 с.

На рис. 2 показаны примеры изменения относительного расстояния b_i с течением времени t_i в диапазоне частот 25–180 МГц. Толщина линий соответствует среднеквадратичным ошибкам, связанным с аппроксимацией гармоник. Таким образом, было установлено, что практически для всех событий значения b_i ведут себя со временем подобным образом — сначала убывают, а затем увеличиваются. Более детальные исследования показали, что каждый радиовсплеск II типа можно характеризовать минимальным относительным расстоянием b_i , которому соответствует определенная частота на основной (первой) гармонике.

Результаты статистических исследований представлены на рис. 3. Как и следовало ожидать, максимум гистограмм соответствует относительным расстояниям между полосами порядка единицы (по отсчетам среднее значение равно 0.95 ± 0.05), что свидетельствует в пользу гармонической природы рассматриваемого явления. Вместе с тем обращает на себя внимание то, что b_i может меняться в широких пределах от 0.1 до 3, хотя для отдельных событий (рис. 3 справа) этот эффект из-за усред-

нения b_i по отсчетам менее выражен (см. также Цап, Исаева, 2013).

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

На наш взгляд, немонотонный характер поведения относительного расстояния между гармониками b_i можно объяснить тем, что их генерация происходит как впереди, так и позади фронта ударной волны, где соотношение между электронными концентрациями непрерывно меняется. Поскольку в случае реализации плазменного механизма излучения частота электромагнитных волн $f \propto \sqrt{n}$, то скачок плотности в области фронта (Васант и др., 2014)

$$X = \frac{n_2}{n_1} = (1 + b). \quad (3)$$

Следовательно, если генерация гармоник происходит по разные стороны фронта ударной волны, распространяющейся со скоростью V , а X зависит, в частности, от альвеновского числа Маха $M_A = V/V_A$ (Смерд и др., 1974; Вржнжак и др., 2002), где V_A — альвеновская скорость, то уменьшение или увеличение значения M_A с высотой должно сопровождаться соответствующими изменениями b .

Для того чтобы оценить максимальные значения b_{\max} , будем считать, что генерация радиоизлучения

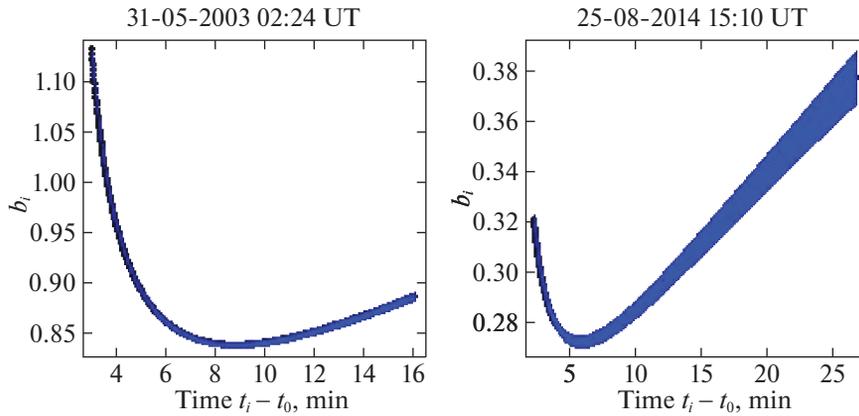


Рис. 2. Характерные примеры зависимости относительного расстояния между гармониками радиовсплесков II типа b_i от времени t_i для событий 31.05.2003 и 25.08.2014 гг. с учетом ошибок аппроксимации (среднеквадратичных отклонений) гармоник радиовсплесков II типа.

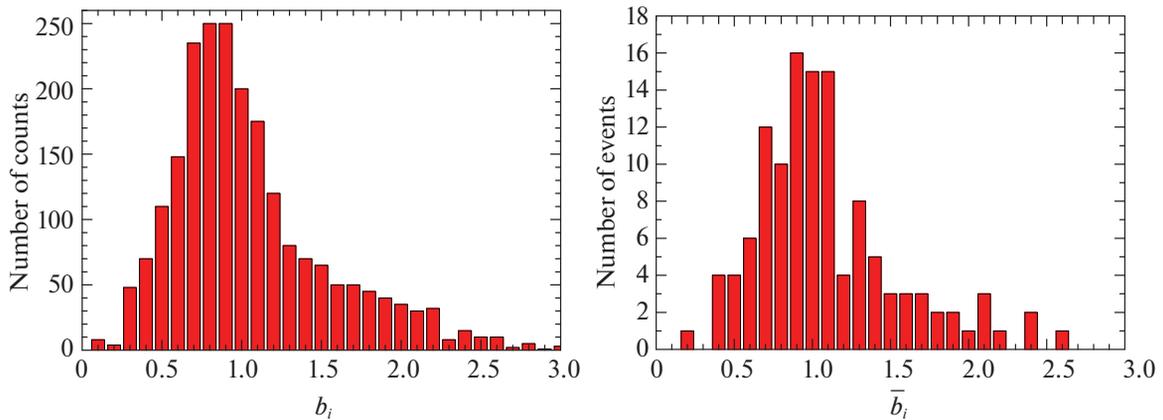


Рис. 3. Гистограммы зависимостей числа отсчетов от относительного расстояния между гармониками b_i в момент времени t_i (слева) и числа событий от усредненных за время наблюдений значений \bar{b}_i (справа).

происходит на второй гармонике позади фронта ударной волны, а на первой — впереди последнего. Тогда, принимая во внимание более высокую плотность плазмы позади фронта ударной волны ($n_2 > n_1$), согласно (2) имеем

$$b = \frac{2f(n_2) - f(n_1)}{f_1(n_1)} = 2\sqrt{X} - 1. \quad (4)$$

Поскольку максимальный скачок плотности, по крайней мере, для перпендикулярной и параллельной ударных волн $X = 4$ (Прист, 1985; Вржнжак и др., 2002), то из (3) получим $b_{\max} = 3$.

Для оценки минимальных b_{\min} будем исходить из предположения, что генерация электромагнитного излучения на второй гармонике происходит впереди фронта, а на первой — позади него. В этом случае относительное расстояние

$$b = \left| \frac{f(n_2) - 2f(n_1)}{2f_1(n_1)} \right| = \left| \frac{1}{2}\sqrt{X} - 1 \right|. \quad (5)$$

Знак модуля в формуле (4) отражает тот факт, что на динамических радиоспектрах высокочастотная компонента может генерироваться как впереди, так и позади фронта ударной волны. Вновь полагая $X = 4$, из (5) получим $b_{\min} = 0$.

Таким образом, в случае генерации гармоник позади и впереди фронта ударной волны должны выполняться неравенства: $0 < b < 3$, что хорошо согласуется с результатами наших статистических исследований. Причем b может быть и гораздо меньше 1. Вследствие этого широко распространенный метод диагностики плазмы и магнитного поля короны, основанный на определении расщепления полосы b на динамических спектрах, которое, как считается, зависит только от X (Смерд и др., 1974, 1975; Вржнжак и др., 2001, 2002; Зимовец и др., 2012; Васант и др., 2014), может приводить к некорректным выводам.

Интересно также отметить, что если генерация радиоизлучения происходит как впереди, так и по-

зади фронта ударной волны, но на одной гармонике, то

$$b = \frac{f(n_2) - f(n_1)}{f(n_1)} = \sqrt{X} - 1. \quad (6)$$

При $1 < X < 4$ находим диапазон возможных относительных расстояний между компонентами тонкой структуры радиовсплесков II типа b , который будет заключен в промежутке от 0 до 1. Следовательно, для сильных ($X \rightarrow 4$) ударных волн отношение $f_2/f_1 \rightarrow 2$, даже когда излучение генерируется на одной гармонике плазменной частоты f_p .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В представленной работе нами было показано, что гармоники метровых радиовсплесков II типа ведут себя немонотонным образом на динамических спектрах. Сначала расстояние между ними уменьшается, а затем — увеличивается. Данную особенность, а также диапазон значений относительного расстояния между гармоническими полосами b_i мы связали с генерацией гармоник впереди и позади фронта ударной волны и изменением скачка плотности с высотой, который зависит от числа Маха. Определенный вклад в наблюдаемое явление способна вносить и неоднородность источника, что приводит к более сильному поглощению электромагнитных волн в низкочастотной или высокочастотной полосе излучения на первой гармонике (Мелроуз, 1987). В пользу сделанного нами предположения свидетельствуют, в частности, изображения, полученные на Low Frequency Аггау в метровом диапазоне длин волн, согласно которым области излучения, ответственные за наблюдаемое расщепление полос радиовсплесков II типа, пространственно совпадают (Хрисафи и др., 2018). Вместе с тем из-за ряда модельных предположений этот вывод нельзя считать до конца убедительным (см. также Зимовец и др., 2012).

В работе мы детально не рассматривали механизмы ускорения и формирования неравновесных распределений ускоренных электронов на фронтах ударных волн. Осталась также без должного внимания проблема формирования тонкой структуры радиовсплесков II типа (Фомичев, Черток, 1977; Зайцев, 1977). Эти вопросы мы надеемся рассмотреть в нашей следующей работе.

Авторы выражают свою искреннюю признательность рецензентам за внимательное прочтение работы и полезные замечания.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-00856-а, Ю.Т. Цап, Ю.Г. Копылова), Минобрнауки (НИР № 0831-2019-0006) и программы ПРАН П-12 “Вопросы происхождения и эволюции Вселенной” (Ю.Т. Цап).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васант и др. (V. Vasanth, S. Umopathy, B. Vrsnak, T. Zic, and O. Prakash), *Solar Phys.* **289**, 251 (2014).
2. Вржнак и др. (B. Vrsnak, H. Aurass, J. Magdalenic, and N. Gopalswamy), *Astron. Astrophys.* **377**, 321 (2001).
3. Вржнак и др. (B. Vrsnak, J. Magdalenic, H. Aurass, and G. Mann), *Astron. Astrophys.* **396**, 673 (2002).
4. Вржнак и др. (B. Vrsnak, J. Magdalenic, and P. Zlobec), *Astron. Astrophys.* **413**, 753 (2004).
5. Ду и др. (G. Du, Y. Chen, M. Lv, X. Kong, S. Feng, F. Guo, and G. Li), *Astrophys. J.* **793**, L39 (2014).
6. Железняков (V.V. Zheleznyakov), *Radio emission of the Sun and planets* (Oxford: Pergamon Press, 1970).
7. Зайцев В.В., *Изв. Вузов, Радиофизика* **XX**, 1379 (1977).
8. Злотник и др. (E. Ya. Zlotnik, A. Klassen, K.L. Klein, H. Aurass, and G. Mann), *Astron. Astrophys.* **331**, 1087 (1998).
9. Зимовец и др. (I. Zimovets, N. Vilmer, A.C.-L. Chian, I. Sharykin, and A. Struminsky), *Astron. Astrophys.* **547**, id.A6 (2012).
10. Исаева, Цап (E.A. Isaeva and Yu.T. Tsap), *Odessa Astron. Publ.* **30**, 222 (2017).
11. Кэрнс (I.H. Cairns), *Proc. Astron. Soc. Aust.* **6**, 444 (1986).
12. Кэрнс и др. (I.H. Cairns, P.A. Robinson, and G.P. Zank), *Publ. Astron. Soc. Aust.* **17**, 22 (2000).
13. Ламп, Пападополос (M. Lampe and K. Papadopoulos), *Arophys. J.* **212**, 886 (1977).
14. Крюгер (A. Kruger), *Introduction to Solar Radio Astronomy and Radio Physics*-Springer Netherlands (1979).
15. Ленгель-Фрей, Стоун (D. Lengyel-Frey and R.G. Stone), *J. Geophys. Res.* **94**, 159L (1989).
16. Ленгель-Фрей и др. (D. Lengyel-Frey, G. Thejappa, R.J. MacDowall, R.G. Stone, and J.L. Phillips), *J. Geophys. Res.* **102**, 2611 (1997).
17. Маклеан (D.J. McLean), *Publ. Astron. Soc. Aust.* **1**, 47 (1967).
18. Манн и др. (G. Mann, T. Classen and H. Aurass), *Astron. Astrophys.* **295**, 775 (1995).
19. Манн и др. (G. Mann, A. Klassen, H.-T. Classen, H. Aurass, D. Scholz, R.J. MacDowall, and R.G. Stone), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **119**, 489 (1996).
20. Мелроуз (D.B. Melrose) *Solar Phys.* **111**, 89 (1987).
21. Нельсон, Мелроуз (G.J. Nelson and D.B. Melrose), *Type II Bursts* (Ed. D.J. McLean, N.R. Labrum, 333, 1985).

22. Прист Э.Р., *Солнечная магнитогидродинамика* (М.: Мир, 1985).
23. Робертс (J.A. Roberts), *Aust. J. Phys.* **12**, 327 (1959).
24. Смерд и др. (S.F. Smerd, K.V. Sheridan, and R.T. Stewart), *Proc. IAU Symp.* **57**, 389 (1974).
25. Смерд и др. (S.F. Smerd, K.V. Sheridan, and R.T. Stewart), *Astrophys. J.* **16**, L23 (1975).
26. Цап, Исаева (Yu.T. Tsap and E.A. Isaeva), *Cosm. Res.* **51**, 108 (2013).
27. Уилд, Смерд (J.P. Wild and S.F. Smerd), *Am. Rev. Astron. Astrophys.* **10**, 159 (1972).
28. Фомичев В.В., Черток И.М., *Изв. Вузов, Радиофизика* **XX**, 1255 (1997).
29. Холман, Писсис (G.D. Holman and M.E. Pesses), *Astrophys. J.* **267**, 837 (1983).
30. Хрисафи и др. (N. Chrysaphi, E.P. Kontar, G.D. Holman, and M. Temmer), *Astrophys. J.* **868**, 79 (2018).
31. Черток, Фомичев (I.M. Chertok and V.V. Fomichev), *Planet. Space Sci.* **24**, 459 (1975).