

УДК 523.985.7-77

В. В. ДОРОВСКИЙ¹, В. Н. МЕЛЬНИК¹, А. А. КОНОВАЛЕНКО¹,
А. И. БРАЖЕНКО², М. ПАНЧЕНКО³, Х. О. РУКЕР³, С. ПУДС⁴,
А. А. СТАНИСЛАВСКИЙ¹, В. А. МИХАЙЛОВ⁵

¹ Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
melnik@gian.kharkov.ua

² Полтавская гравиметрическая обсерватория Института геофизики
им. С. И. Субботина НАН Украины,
ул. Мясоедова, 27/29, г. Полтава, 36014, Украина

³ Институт космических исследований Австрийской академии наук,
Шмидльштрассе, 6, г. Грац, 8042, Австрия

⁴ Католический университет Лёвен,
Селестийненлаан, 200В, В-3001, Лёвен, Бельгия

⁵ Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

СВОЙСТВА СЛОЖНОГО ВСПЛЕСКА II ТИПА С БОГАТОЙ “ЕЛОЧНОЙ” СТРУКТУРОЙ НА ЧАСТОТАХ 3–33 МГц

Рассмотрены характеристики всплеска II типа с “елочной” структурой, который наблюдался 7 июня 2011 г. в полосе частот 3 ÷ 33 МГц как наземными радиотелескопами (УТР-2, УРАН-2), так и космическими аппаратами (“СТЕРЕО”). Впервые в декаметровом диапазоне проведен статистический анализ основных параметров субвсплесков “елочной” структуры всплеска II типа (длительности и модуля скорости частотного дрейфа) отдельно для субвсплесков с положительным и отрицательным частотным дрейфом. Впервые также в этом диапазоне выполнена оценка степени круговой поляризации тонкой структуры всплеска II типа. Обнаружена тонкая частотная структура “елочных” субвсплесков, которая по параметрам оказалась близкой к “бахроме”, наблюдающейся у солнечных S-всплесков. По характерному волнообразному изменению частоты “ствола” всплеска определены параметры корональных стримеров, пересекаемых фронтом ударной волны. По данным наблюдений космических аппаратов “СТЕРЕО” и “СОХО” найдены направление и скорость распространения коронального выброса масс, ответственного за генерацию всплеска. По данным наземных радионаблюдений определена скорость источника всплеска II типа. В результате найдено возможное местоположение источника всплеска на фронте ударной волны. Установлена также степень геоэффективности данного солнечного явления.

Ключевые слова: всплеск II типа, “елочная” структура, декаметровый диапазон, степень поляризации, скорость коронального выброса масс, стример, геоэффективность

1. Введение

Начало 24-го цикла солнечной активности сопровождалось резко возросшим числом высокоэнергетических событий, таких как корональные выбросы масс (Coronal Mass Ejection – CME). Это не удивительно, поскольку считается, что CME тесно связаны с солнечными вспышками [1]. CME находятся в ряду наиболее геоэффективных проявлений солнечной активности, играющих определяющую роль в формировании космической погоды [2]. Известно, что порождаемая CME ударная волна является источником потока ускоренных электронов, ответственных за генерацию солнечных всплесков II типа [3–5]. Всплески II типа наблю-

даются в широком диапазоне длин волн – от метровых до километровых – что является прямым подтверждением распространения инициированных CME ударных волн на расстояния от радиуса Солнца до 1 а. е. Как сами CME, так и ударные волны при взаимодействии с магнитосферой Земли могут вызывать геомагнитные возмущения – магнитные бури. Всплески II типа в декаметровом диапазоне длин волн представляют особый интерес, с одной стороны, тем, что могут наблюдаться наземными радиотелескопами с высокой чувствительностью и разрешающей способностью, а с другой – тем, что они связаны с потенциально наиболее геоэффективными CME, способными формировать ударную волну на больших расстояниях от Солнца [6].

Особый интерес с точки зрения понимания процессов, происходящих на фронте ударной вол-

© В. В. Доровский, В. Н. Мельник, А. А. Коноваленко,
А. И. Браженко, М. Панченко, Х. О. Рукер, С. Пудс,
А. А. Станиславский, В. А. Михайлов, 2013

ны, представляют так называемые всплески с “елочной” структурой. Они наиболее явно демонстрируют явление ускорения заряженных частиц на фронте ударной волны как в направлении от Солнца, так и к Солнцу [3]. Эта разновидность тонкой структуры впервые была идентифицирована Робертсом [7] по результатам наблюдений в метровом диапазоне длин волн, и названа им исходя из морфологии динамического спектра “Herringbone structure”, т. е. “структура типа селедочная кость”. В русскоязычной литературе такая структура получила название “елочная”.

По данным [8] 21 % всех наблюдаемых всплесков II типа имеют “елочную” структуру. При этом уточняется, что эта структура в большей степени присуща всплескам с большими потоками радиоизлучения. Так, среди мощных всплесков II типа всплеск с “елочной” структурой регистрируется уже в 60 % случаев. Как и обычные всплески II типа, всплески с “елочной” структурой наблюдаются в излучении как на основной, так и на второй гармонике электронной плазменной частоты. При этом, в отличие от обычных всплесков II типа, субвсплески “елочной” структуры на первой гармонике обычно более интенсивны и имеют высокую степень круговой поляризации [9]. Судзуки и др. [10] утверждали, что отрицательно дрейфующие субвсплески имеют большую степень поляризации, нежели положительно дрейфующие.

2. Наблюдения

Наблюдения солнечного радиоизлучения в летние месяцы 2011 г. проводились на радиотелескопе УТР-2 в полосе частот $12 \div 33$ МГц и на радиотелескопе УРАН-2 в полосе частот $20 \div 33$ МГц. Это дало возможность определять основные параметры солнечного радиоизлучения, включая поляризацию. Временное разрешение в обоих случаях составляло 100 мс при разрешении по частоте 4 кГц. Указанный период времени характеризовался необычайно высокой частотой появления всплесков II типа. Всего за летнюю кампанию 2011 г. было зарегистрировано более 10 таких всплесков. Причем все они отличались богатой тонкой структурой.

Для анализа был выбран всплеск II типа, наблюдавшийся 7 июня 2011 г. Этот всплеск был зарегистрирован как наземными радиотелескопами (УТР-2 и УРАН-2), так и радиометрами космичес-

ких аппаратов “СТЕРЕО-А” и “СТЕРЕО-Б”, что позволило изучить свойства всплеска в очень широкой полосе частот – от 3 до 33 МГц.

Сам всплеск II типа был частью более сложного и масштабного события, явившегося, по-видимому, результатом мощной солнечной вспышки класса M2, произошедшей в 6:20 UT над активной областью NOAA1226, расположенной в юго-западной части солнечного диска (22° ю. ш., 52° з. д.).

Событие в декаметровом диапазоне радиоволн началось в 6:26:00 UT с мгновенного подъема потока фонового излучения Солнца во всей наблюдаемой полосе частот. За 8 с поток вырос от 1 до 10000 солнечных единиц потока (с. е. п.). Через полторы минуты началась группа мощных всплесков III типа с потоками до 10^5 с. е. п. Примерно в 6:34:00 UT на верхних частотах рабочего диапазона радиотелескопа было зарегистрировано начало всплеска II типа с подъемом потока излучения еще на порядок, до 10^6 с. е. п. Динамический спектр всплеска, полученный путем объединения данных наблюдений на радиотелескопах УРАН-2 (полоса частот $16.6 \div 32$ МГц, начало записи 6:20 UT) и УТР-2 (полоса частот $12 \div 32$ МГц, начало записи в 6:48 UT), приведен на рис. 1. Данный спектр однозначно указывает на принадлежность всплеска к хорошо известному классу всплесков II типа с “елочной” структурой. Отдельные субвсплески “елочной” структуры (рис. 1, в) имеют как отрицательный, так и положительный частотный дрейф. “Ствол” всплеска в этом случае представляет собой воображаемую линию раздела субвсплесков с разнополярированными дрейфами. Термин “воображаемая” в данном случае означает, что иногда “ствол” такого всплеска не излучает электромагнитной волны и определяется на динамическом спектре лишь как провал в излучении между субвсплесками с положительным и отрицательным частотным дрейфом [11].

2.1. Скорость частотного дрейфа

Как сообщалось ранее, скорости частотного дрейфа “ствола” всплеска с “елочной” структурой либо очень малы, либо отсутствуют вовсе. Считается, что это связано с тем, что участки фронта ударной волны, являющиеся источниками излучения, распространяются нерадиально, т. е. под углами более 45° к антиградиенту плотности солнечной

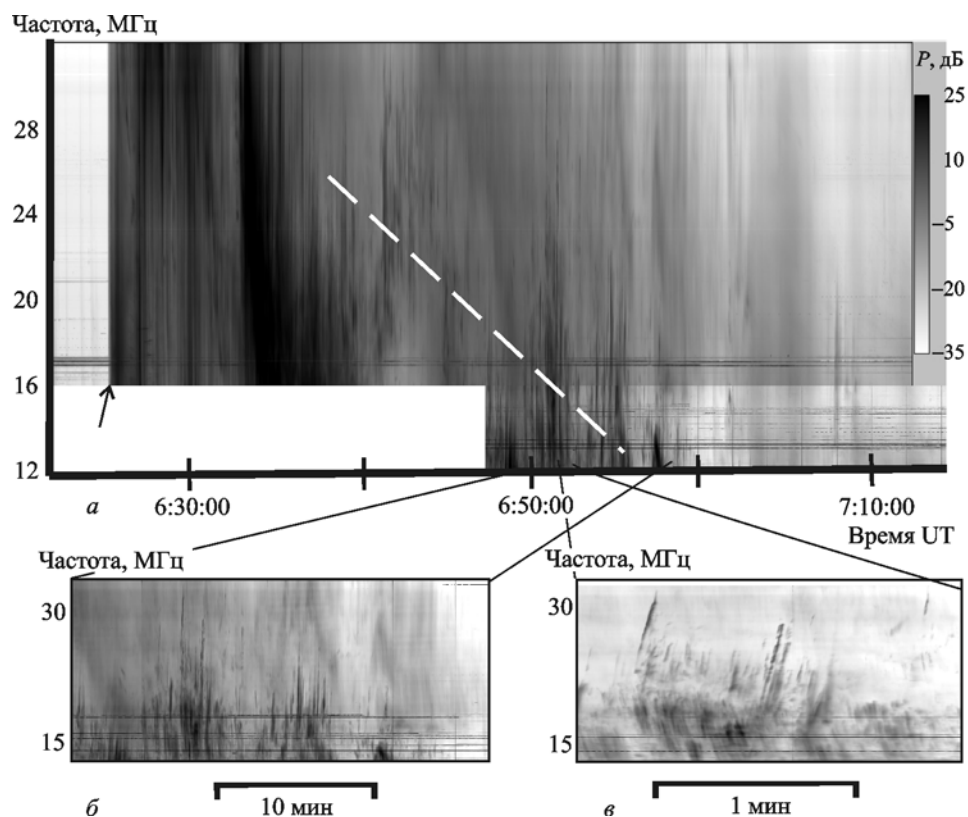


Рис. 1. Динамические спектры всплеска, зарегистрированного 7 июня 2011 г.: *a* – спектр всего события, где мгновенный подъем уровня фонового излучения отмечен черной стрелкой, а траектория частотного дрейфа всплеска II типа – белой штриховой линией; *б* – волнообразный характер дрейфа; *в* – отдельные субвсплески “елочной” структуры. Интенсивность излучения P указана в децибелах относительно уровня сигнала калибровки

короны [11, 12]. Отличительной особенностью всплеска, зарегистрированного 7 июня 2011 г., является не только заметная средняя скорость дрейфа “ствола” всплеска (штриховая линия на рис. 1, *a*), но и волнообразный характер его дрейфа по частоте, хорошо различимый на рис. 1, *б*.

Всего на временном отрезке с 6:41 до 6:57 UT обнаружено три полных периода колебаний “ствола” всплеска. Эти периоды оказались равны 530, 230 и 150 с соответственно. При этом амплитуда колебаний “ствола” всплеска по частоте, т. е. разность между частотами максимума и следующего за ним минимума, в среднем составляла 10 МГц.

В случае монотонного дрейфа общая скорость частотного дрейфа всплеска, характеризующая, по сути, скорость удаления фронта ударной волны от поверхности Солнца, может определять как скорость дрейфа его “ствола” в любой момент времени. В случае волнообразного характера дрейфа “ствола” целесообразно определять среднюю скорость частотного дрейфа всплеска вдоль

линии, представляющей собой линейную аппроксимацию волнообразного “хребта”. Для данного всплеска средняя скорость частотного дрейфа в диапазоне частот 12 ÷ 26 МГц составила -25 кГц/с, что соответствует радиальной составляющей скорости перемещения источника 650 км/с, в то время как на отдельно взятых временных отрезках скорости дрейфа достигали -100 кГц/с.

Продолжение данного всплеска на частотах ниже 12 МГц было зарегистрировано также с помощью радиометров, расположенных на борту аппаратов “СТЕРЕО” (рис. 2). Учитывая низкую разрешающую способность по времени, а также слабую чувствительность этих инструментов, выявить “елочную” структуру всплеска, а значит и идентифицировать его “ствол” на частотах 3 ÷ 12 МГц не представлялось возможным. Оценка средней скорости дрейфа данного всплеска по нижней границе его динамического спектра (рис. 2) дала результат -8 кГц/с на частоте 6 МГц и -5 кГц/с на частоте 3 МГц. Полученные скорости дрейфа соответствуют линейным скоростям источника в короне 550

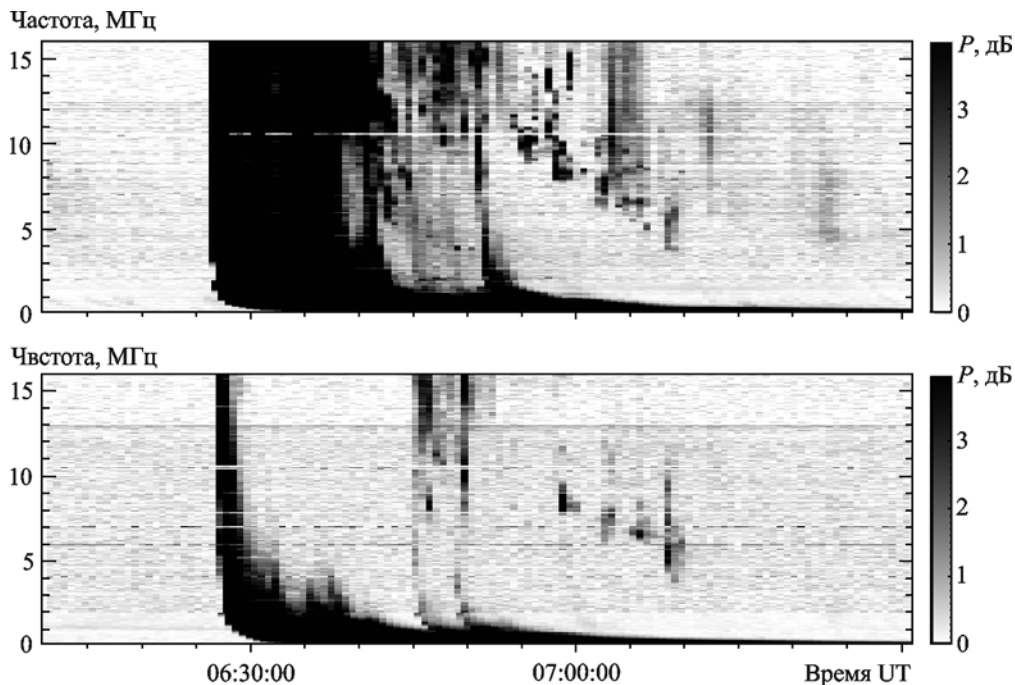


Рис. 2. Динамические спектры всплеска, зарегистрированного 7 июня 2011 г., полученные аппаратами “СТЕРЕО-А” (вверху) и “СТЕРЕО-Б” (внизу). Интенсивность излучения P указана в децибелах относительно уровня фонового излучения

и 400 км/с. При этом, учитывая характерную огибающую нижней границы динамического спектра, можно предположить, что, по-видимому, волнообразные колебания “ствола” всплеска с периодами 3 ÷ 5 мин сохраняются вплоть до окончания всплеска на частоте 3 МГц. Суммируя вышесказанное, можно заключить, что источник всплеска II типа на участке гелиовысот от $1.5R_{\odot}$ до $5R_{\odot}$ (R_{\odot} – радиус Солнца) движется с замедлением от 650 до 400 км/с, что соответствует ускорению порядка -100 м/с^2 .

2.2. Тонкая структура всплеска

Высокая разрешающая способность по времени и частоте спектрополяриметра DSPZ позволила осуществить подробный и обширный статистический анализ основных параметров субвсплесков “елочной” структуры всплеска II типа, который ранее не проводился.

За время существования всплеска в диапазоне частот наземных радиотелескопов было зарегистрировано более 300 субвсплесков “елочной” структуры, из которых около 100 имели положительный частотный дрейф, остальные – отрицательный.

Основные параметры субвсплесков, такие как длительность и скорость дрейфа, оказались рас-

пределенными в достаточно узком диапазоне значений.

2.3. Скорость частотного дрейфа субвсплесков “елочной” структуры

Общее количество обработанных субвсплесков с отрицательным частотным дрейфом составило 201. Распределение этой группы субвсплесков по скоростям дрейфа показано на рис. 3, а. Среднее значение скорости дрейфа этих субвсплесков оказалось равным -1.23 МГц/с при максимуме распределения, соответствующем скорости -0.8 МГц/с . Распределение носит явно выраженный несимметричный характер – с резким убыванием количества всплесков с абсолютными скоростями дрейфа меньшими 0.6 МГц/с и сравнительно пологим спадом их числа с увеличением абсолютной скорости. Полученное распределение очень близко к распределению скоростей дрейфа прямых дрейфующих пар [13] и солнечных S-всплесков [14], что может явиться немаловажным фактом при построении моделей излучения как первых, так и вторых.

Распределение субвсплесков с положительным частотным дрейфом по скоростям (рис. 3, б) в общем аналогично распределению субвсплесков

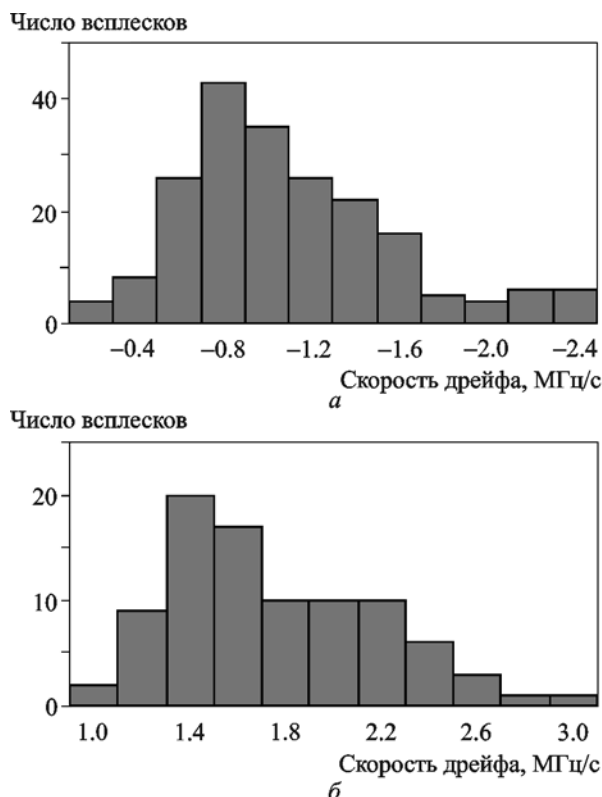


Рис. 3. Распределение по скорости дрейфа субвсплесков “елочной” структуры с отрицательным (а) и положительным (б) частотным дрейфом

с отрицательным дрейфом, однако абсолютное среднее значение скорости дрейфа этих субвсплесков почти в полтора раза выше, 1.8 МГц/с, а максимум распределения наблюдается на скорости дрейфа 1.4 МГц/с. В целом можно сделать вывод о том, что абсолютные скорости частотного дрейфа субвсплесков “елочной” структуры отдельно взятого всплеска II типа распределены в относительно узком интервале значений от 0.5 до 2.5 МГц/с, что близко к скоростям дрейфа дрейфующих пар и S-всплесков, и в 2–3 раза меньше скоростей дрейфа всплесков III типа в дециметровом диапазоне длин волн.

Поскольку субвсплески “елочной” структуры наблюдались в относительно широкой полосе частот, представляет интерес проанализировать зависимость абсолютных значений скоростей частотного дрейфа субвсплесков от частоты. Результаты этого анализа графически показаны на рис. 4.

Для обеих разновидностей субвсплесков наблюдается уменьшение абсолютного значения скорости частотного дрейфа с уменьшением частоты, что является одним из свойств всплесков, имеющих движущийся в короне источник и плаз-

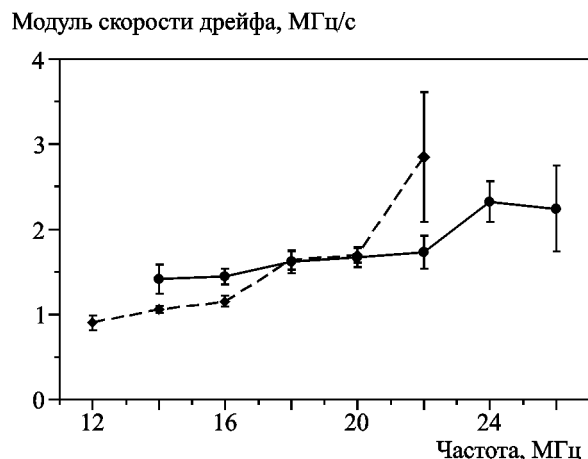


Рис. 4. Модуль скорости частотного дрейфа для субвсплесков с положительным (сплошная линия) и отрицательным (штриховая линия) знаком частотного дрейфа

менный механизм излучения. Аппроксимация полученных экспериментальных зависимостей степенной функцией дала следующие результаты:

для субвсплесков с отрицательным знаком дрейфа

$$\left| \frac{df}{dt} \right|_- = 0.02 f^{1.5}, \quad (1)$$

для субвсплесков с положительным знаком дрейфа

$$\left| \frac{df}{dt} \right|_+ = 0.14 f^{0.85}. \quad (2)$$

2.4. Длительность субвсплесков “елочной” структуры

Одним из важнейших параметров солнечных всплесков, несущих информацию о свойствах пучков субрелятивистских электронов, является длительность всплеска на фиксированной частоте. Статистический анализ показывает, что распределения для обоих типов субвсплесков по длительностям сходны (рис. 5). Тем не менее средняя длительность субвсплесков с положительным дрейфом несколько меньше, чем с отрицательным (1.85 и 2.27 с соответственно). При этом оба значения существенно меньше, чем характерные длительности всплесков III типа.

Немаловажным также является такой параметр, как интервал частот, в котором наблюдаются отдельные субвсплески “елочной” структуры.

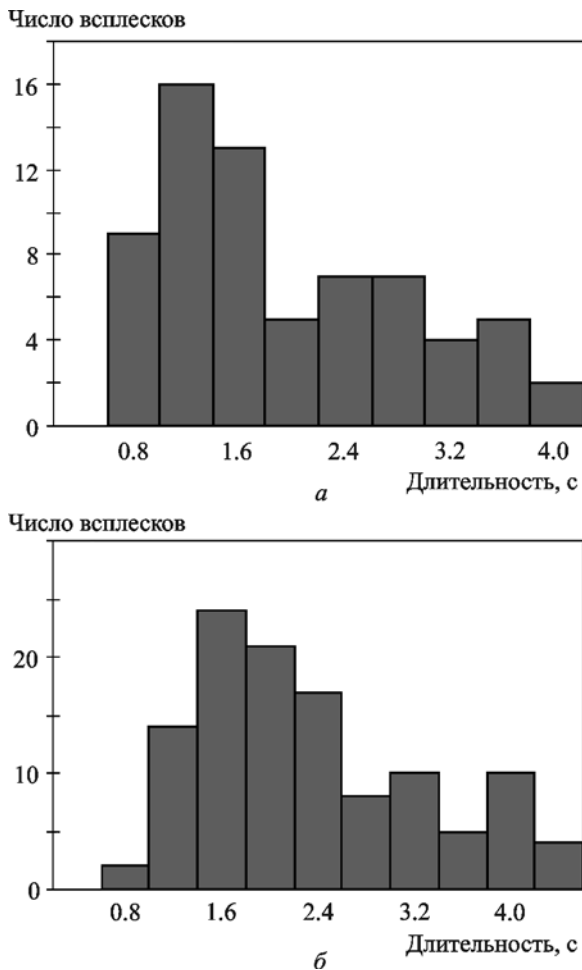


Рис. 5. Распределение субвсплесков по длительности: а) положительный знак частотного дрейфа, б) – отрицательный знак частотного дрейфа

По динамическому спектру (рис. 1, в) видно, что субвсплески имеют ограниченную длину на плоскости частота – время. Анализ данных показал, что ширина полосы, в которой могут наблюдаться отдельно взятые субвсплески, изменяется от 2 до 10 МГц со средним значением 5 МГц.

2.5. Поляризация субвсплесков “елочной” структуры

Использование для наблюдений радиотелескопа УРАН-2, оснащенного широкополосным спектрополяриметром DSPZ, позволило определить степень круговой поляризации элементов всплеска в диапазоне частот 16 ÷ 32 МГц. Наблюдения поляризации тонкой структуры всплесков II типа на таких низких частотах были проведены впервые.

Как отмечалось ранее [10], субвсплески “елочной” структуры, соответствующие основной гар-

монике излучения, обладают гораздо большей степенью поляризации, чем “ствол” самого всплеска II типа (если таковой имеется в излучении) и окружающие всплески III типа. Наши наблюдения полностью подтверждают этот факт. Среднее значение степени круговой поляризации субвсплесков как с положительным, так и с отрицательным дрейфом оказалось равным 50 %, а отдельные субвсплески имели степень поляризации более 80 %. Немаловажным фактом является то, что знак круговой поляризации у обеих разновидностей субвсплесков совпадает: во всех случаях наблюдалась левосторонняя круговая поляризация, что хорошо видно на рис. 6. При этом поляризация сопутствующих данному событию всплесков III типа была меньшей (не более 30 %) и имела противоположный знак.

2.6. Тонкая частотная структура субвсплесков “елочной” структуры

Использование регистрирующей аппаратуры с высоким разрешением по частоте позволило впервые обнаружить тонкую частотную структуру субвсплесков “елочной” структуры. Примеры такой тонкой структуры “второго порядка” приведены на рис. 7. Эта тонкая структура имеет вид квазипериодической цепочки узкополосных субвсплесков частотной шириной 30 ÷ 60 кГц, следующих с периодичностью по частоте 60 ÷ 120 кГц, и по параметрам близка к “бахроме” (fringes) солнечных S-всплесков [14, 15]. Как правило, узкополосные субвсплески имеют нулевой собственный частотный дрейф, хотя в отдельных случаях наблюдался небольшой (100 кГц/с) положительный дрейф (рис. 7, з). Характерной особенностью первого по времени субвсплеска, показанного на рис. 7, з, является то, что скорость частотного дрейфа узкополосных элементов изменяется от 150 кГц/с в начале субвсплеска до 20 кГц/с в конце. Следует отметить, что собственный дрейф узкополосных субвсплесков изменяется синхронно на всех частотах существования основного субвсплеска.

3. Обсуждение

Анализ данных, полученных со спутников “СОХО” и GOES, показывает, что исследуемый сложный всплеск является следствием вспышки класса M2,

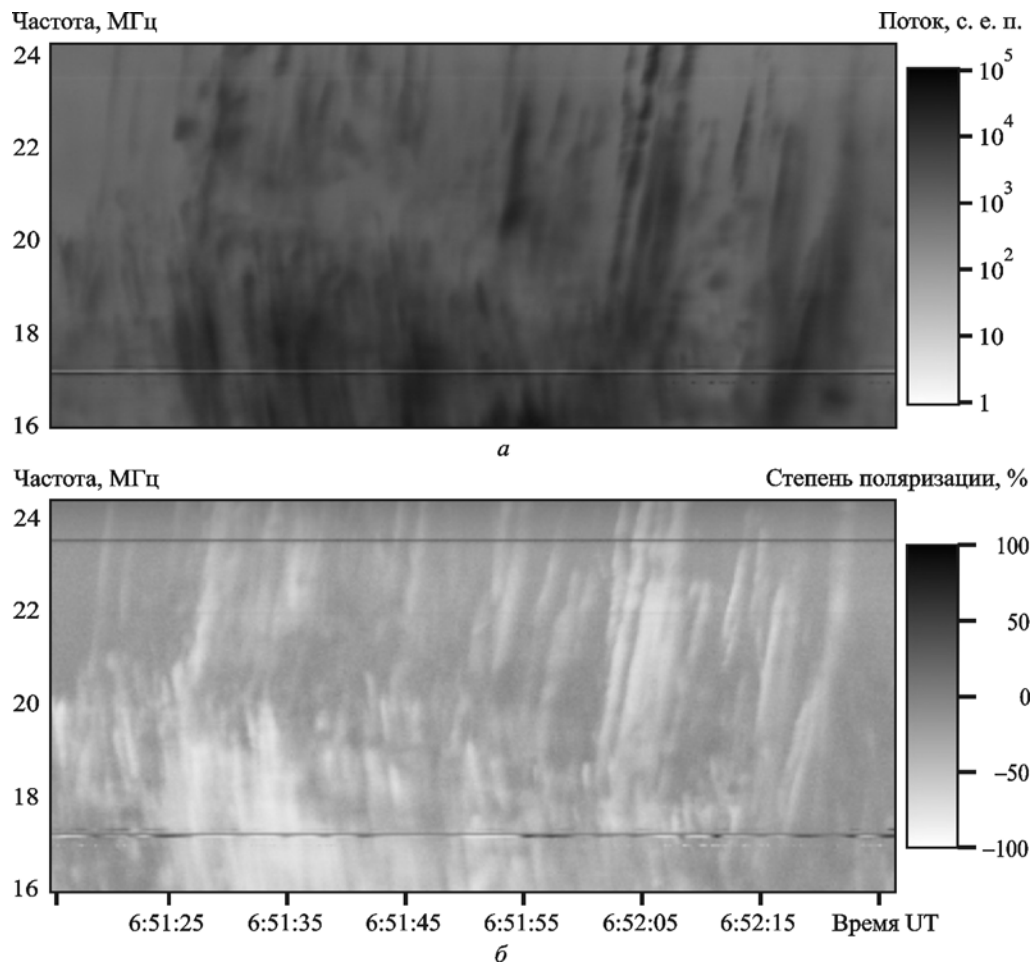


Рис. 6. Динамические спектры потока (а) и поляризации (б) субвсплесков “елочной” структуры

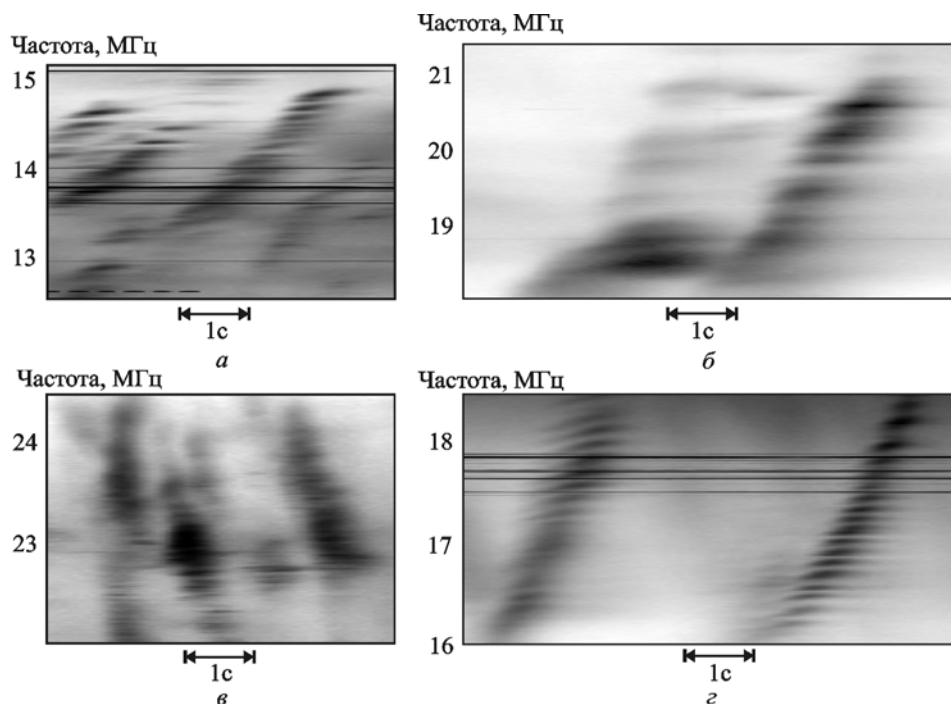


Рис. 7. Примеры тонкой частотной структуры субвсплесков “елочной” структуры

произошедшей над активной областью NOAA1226 с координатами 22° ю. ш. и 52° з. д. Согласно данным спутника GOES-12 поток рентгеновского излучения вспышки нарастал от фонового уровня до максимума в течение 8 мин, с 6:19 до 6:27 UT. При этом поток декаметрового континуального радиоизлучения поднялся от уровня спокойного Солнца до величины 10000 с. е. п. всего за 9 с, с 6:26:03 до 6:26:12 UT. Примерно через 2 мин после этого была зарегистрирована группа мощных всплесков III типа. Всплеск II типа с “елочной” структурой начался в 6:34 UT. Наблюдаемому частотному дрейфу всплесков III типа (4.5 МГц/с) соответствует радиальная скорость движения источника около 10^{10} см/с. Учитывая это, можно утверждать, что ускорение электронов, ответственных за всплески III типа, произошло сразу после фазы максимума рентгеновского излучения вспышки. И уже на этапе спада интенсивности вспышки сформировался СМЕ, породивший всплеск II типа. Время начала этого всплеска в декаметровом диапазоне длин волн 6:34 UT.

По данным коронографов COR1, установленных на космических аппаратах “СТЕРЕО-А” и “СТЕРЕО-Б”, видно, что движимая СМЕ ударная волна достигла гелиоцентрической высоты $1.5R_\odot$ с локальной плазменной частотой 30 МГц между 6:30 и 6:35 UT. Это время совпадает со временем появления всплеска II типа в рабочей полосе частот радиотелескопа УТР-2.

Известно, что коронографы дают не реальную скорость распространения СМЕ, а лишь ее проекцию на картинную плоскость, т. е. на плоскость, перпендикулярную лучу зрения. Однако, имея такие данные с трех спутников, расположенных вдоль орбиты Земли с угловым разносом примерно 90° друг от друга, можно определить как реальную скорость, так и направление распространения выброса. Так, по данным коронографа COR1 (“СТЕРЕО-А”) скорость ударной волны составила $1.2 \cdot 10^8$ см/с, а по данным LASCO C2 (“СОХО”) – $1.55 \cdot 10^8$ см/с. Решая простую систему тригонометрических уравнений, получаем абсолютную скорость распространения ударной волны $1.95 \cdot 10^8$ см/с в направлении примерно 50° к западу от направления на Землю. Полученный угол совпадает с долготным положением активной области NOAA1226, над которой произошла вспышка, и подтверждает связь СМЕ с указанной активной областью.

Линейная скорость, полученная по данным коронографов в оптическом диапазоне, почти в три раза превышает скорость, вычисленную по скорости частотного дрейфа всплеска II типа (1950 и 650 км/с соответственно). По нашему мнению, такое расхождение может быть связано с тем, что источник всплеска II типа находился не на передней части, а на боковом участке ударной волны, который распространялся нерадиально, под углом примерно 50° к направлению распространения СМЕ. Согласно [16] скорость радиального распространения и скорость поперечного расширения СМЕ могут существенно отличаться. Детальный анализ данных коронографа LASCO C2 (“СОХО”) показывает, что скорость участков, отклоненных от основного направления распространения СМЕ на $40^\circ \div 50^\circ$, примерно втрое меньше скорости передней части СМЕ. Предполагая квазисимметричное конусовидное расширение СМЕ по мере распространения [16] можно считать, что скорости широтного и долготного расширения СМЕ одинаковы. Таким образом, можно предположить, что источник всплеска II типа находился на восточном крае ударной волны и распространялся нерадиально (под углом примерно 50° к направлению движения СМЕ) в направлении, близком к направлению на Землю.

Волнообразное изменение частоты “ствола” всплеска II типа впервые было описано в работе [13]. Авторы предположили, что это явление могло быть связано с пересечением ударной волной коронального стримера при распространении квазинормально к направлению градиента плотности короны. Такое объяснение кажется уместным и в обсуждаемом случае, с той лишь разницей, что источник радиоизлучения двигался под углом 50° к градиенту плотности. При этом по пути распространения источник пересек как минимум три корональных стримера. Амплитуда колебаний частоты “ствола” всплеска, очевидно, определяется разностью плотности плазмы внутри стримера и в окружающей короне. Таким образом, наблюдаемые колебания частоты амплитудой 10 МГц вызваны разницей плотностей внутри и вне стримеров около $5 \cdot 10^6$ см⁻³. Иными словами, плотность внутри стримера примерно в 2.8 раза выше, чем в окружающей короне. Из периодов колебаний частоты “ствола” всплеска следует, что размеры соответствующих стримеров равны $0.5R_\odot$, $0.2R_\odot$ и $0.15R_\odot$. Так как

указанные величины определялись на гелиоцентрических высотах около $2R_{\odot}$, соответствующее угловое расстояние между данными стримерами оказывается равным $\sim 10^{\circ}$, 15° и 25° соответственно.

Высокая степень круговой поляризации субвсплесков “елочной” структуры говорит в пользу излучения на основной гармонике электронной плазменной частоты. В то же время имеются основания считать, что наблюдается также и вторая гармоника излучения, поляризация которой намного ниже (примерно $10 \div 20\%$) и имеет тот же знак. В отличие от субвсплесков “елочной” структуры окружающие их всплески III типа имеют противоположный знак поляризации, что может указывать на различные условия в областях генерации этих всплесков. Прежде всего, это касается направления магнитного поля.

Диапазон частот, в котором наблюдаются отдельно взятые субвсплески “елочной” структуры, достаточно узок. Для зарегистрированного всплеска II типа протяженность субвсплесков по частоте лежала в пределах $2 \div 10$ МГц. Учитывая скорость электронов, полученную из скорости дрейфа субвсплесков, можно определить, что линейные размеры областей, в которых существуют условия для генерации электромагнитных волн, равны примерно $3 \cdot 10^9 \div 2 \cdot 10^{10}$ см, или $(0.05 \div 0.3)R_{\odot}$.

Считается, что линейные скорости электронов, ускоренных на фронте ударной волны в направлении от Солнца и к Солнцу, примерно равны. Следовательно, различие в средних скоростях вероятнее всего вызваны различными состояниями короны перед источником и за ним, т. е. перед и за фронтом ударной волны. Это также может быть причиной различия в зависимостях (1) и (2) скоростей дрейфа от частоты. Следует заметить, что показатель степени зависимости скорости частотного дрейфа отрицательно дрейфующих субвсплесков от частоты (1.5) близок к показателю зависимости, полученной в [17] для всплесков III типа в невозмущенной короне (1.86). В то время как аналогичный показатель для положительно дрейфующих субвсплесков (0.85) существенно ниже. Действительно, электроны, ответственные за формирование отрицательно дрейфующих субвсплесков, движутся в направлении от Солнца, а значит через еще не возмущенную ударной волной корону. А электроны, движущие-

ся к Солнцу, перемещаются через возмущенную корону.

Как известно, способность СМЕ приводить к значительным изменениям космической погоды в окрестностях Земли определяется его основными кинетическими параметрами: скоростью, угловым размером и, разумеется, направлением распространения [18]. Геоэффективные СМЕ имеют среднюю скорость $1 \cdot 10^8$ см/с и по большей части представляют собой гало-СМЕ, которые по сути являются обычными СМЕ, распространяющимися в направлении к Земле или от нее [19]. При этом многие авторы отмечают, что при прочих равных параметрах СМЕ, зародившиеся в западной полусфере Солнца, вызывали наиболее сильные геомагнитные возмущения [20, 21]. Связанный с обсуждаемым всплеском СМЕ имел все признаки геоэффективности, кроме направления. Тем не менее в начале суток 8 июня 2011 г. было зарегистрировано уменьшение индекса D_{st} примерно до -30 нТ. При скорости распространения $1.98 \cdot 10^8$ см/с анализируемый СМЕ должен был достичь орбиты Земли примерно через 20 ч, т. е. в 2:30 UT 8 июня 2011 г. Мы предполагаем, что данное геомагнитное возмущение могло быть вызвано воздействием крайнего восточного участка СМЕ на земную магнитосферу.

В то же время наблюдались изменения в параметрах солнечного ветра в окрестностях Земли: скорость протонов солнечного ветра возросла с 400 до 550 км/с, температура протонов увеличилась с $7 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^5$ К. Кратковременно (в течении 5 часов) наблюдалось также резкое повышение плотности протонов в солнечном ветре с 4 до 12 см^{-3} .

4. Выводы

Подробный анализ свойств всплеска II типа с “елочной” структурой позволил выявить новые свойства этого типа всплесков.

Обнаружен волнообразный характер дрейфа “ствола” всплеска II типа, который, по нашему мнению, связан с пересечением ударной волной нескольких корональных стримеров. По периоду и амплитуде этих колебаний оценены характеристики стримеров: плотность плазмы внутри стримеров в 2.8 раза выше, чем в окружающей короне, а размеры стримеров лежат в пределах $(0.1 \div 0.5)R_{\odot}$.

Статистический анализ субвсплесков показал, что в среднем субвсплески с отрицательным частотным дрейфом имеют меньшие абсолютные скорости дрейфа (1.23 МГц/с) и большую длительность (1.8 с), чем всплески с положительным частотным дрейфом (1.8 МГц/с и 2.3 с соответственно). При этом длительности и скорости дрейфа обеих групп субвсплесков ближе к параметрам дрейфующих пар, нежели к параметрам обычных всплесков III типа.

Обнаружена тонкая частотная структура субвсплесков, сходная по параметрам с “бахромой” S-всплесков.

“Елочная” структура имела высокую степень круговой поляризации (до 80 %). Знак поляризации противоположно дрейфующих субвсплесков совпадал, в то время как знак поляризации окружающих всплесков III типа был противоположным.

Вычисленная по скорости частотного дрейфа всплеска II типа скорость его источника оказалась втрое меньшей скорости движения СМЕ, полученной из оптических наблюдений. Такое расхождение, по нашему мнению, может быть связано с тем, что источник радиоизлучения находился на участке ударной волны, отклоненном от направления движения СМЕ примерно на 50°.

Связанный со всплеском II типа СМЕ имел все основные признаки геоэффективности, однако не вызвал заметных геомагнитных возмущений в основном из-за значительного отклонения направления его движения от направления на Землю.

Работа выполнена в рамках международного проекта SOLSPANET (F9P7-People-2010-IRSES).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yashiro S. and Gopalswamy N.* Statistic relationship between solar flares and Coronal Mass Ejections // Proc. IAU symp. – 2008. – No. 257. – P. 101–110.
2. *Gopalswamy N., Lara A., Lepping R. P., Kaiser M. L., Berdichevsky D., and St. Cyr O. C.* Interplanetary acceleration of coronal mass ejections // Geophys. Res. Lett. – 2000. – Vol. 27, Is. 2. – P. 145–148.
3. *Zaitsev V. V., Zlotnik E. Ya., Mann G., Aurass H., and Klassen A.* Efficiency of electron acceleration by shock waves in the solar corona according to observational data on the fine structure of type II radio bursts // Radiophys. Quantum Electron. – 1998. – Vol. 41, Is. 2. – P. 107–114.
4. *Mann G. and Klassen A.* Electron beams generated by shock waves in the solar corona // Astron. Astrophys. – 2005. – Vol. 441, Is. 1. – P. 319–326.
5. *Miteva R. and Mann G.* The electron acceleration at shock waves in the solar corona // Astron. Astrophys. – 2007. – Vol. 474, No. 2. – P. 617–625.
6. *Gopalswamy N., Aguilar-Rodriguez E., Yashiro S., Nunes S., Kaiser M. L., and Howard R. A.* Type II radio bursts and energetic solar eruptions // J. Geophys. Res. – 2005. – Vol. 110, A11S07, doi: 10.1029/2005JA011158.
7. *Roberts J. A.* Solar Radio Bursts of Spectral Type II // Aust. J. Phys. – 1959. – Vol. 12. – P. 327–356.
8. *Cane H. V. and White S. M.* On the source conditions for herringbone structure in type II solar radio bursts // Sol. Phys. – 1989. – Vol. 120, Is. 1. – P. 137–144.
9. *Cairns H. and Robinson R. D.* Herringbone bursts associated with type II solar radio emission // Sol. Phys. – 1987. – Vol. 111, Is. 2. – P. 365–383.
10. *Suzuki S., Stewart R. T., and Magun A.* Polarization of the herringbone structure in type II bursts. In: Kundu M. R. and Gergely T. E., editors. Radio Physics of the Sun. – Dordrecht: Reidel Publishing Co., 1980. – P. 241–245.
11. *Holman G. D. and Pesses M. E.* Solar type II radio emission and the shock drift acceleration of electrons // Astrophys. J. – 1983. – Vol. 267. – P. 837–843.
12. *Mel'nik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Stanislavsky A. A., Abranin E. P., Lecacheux A., Mann G., Warmuth A., Zaitsev V. V., Boudjada M. Y., Dorovskii V. V., Zaharenko V. V., Lisachenko V. N., and Rosolen C.* Observations of Solar Type II bursts at frequencies 10-30 MHz // Sol. Phys. – 2004. – Vol. 222, Is. 1. – P. 151–166.
13. *Melnik V. N., Konovalenko A. A., Dorovskyy V. V., Rucker H. O., Abranin E. P., Lisachenko V. N., and Lecacheux A.* Solar Drift Pair Bursts in the Decameter Range // Sol. Phys. – 2004. – Vol. 231, Is. 1-2. – P. 143–155.
14. *Dorovskyy V. V., Mel'nik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Abranin E. P., and Lecacheux A.* Observations of Solar S-bursts at the decameter wavelengths. In: Rucker H., Kurth W., Mann G., editors. Planetary Radio Emissions VI. – Vienna: Verlag der Akademie der Wissenschaften, 2006. – 383 p.
15. *McConnell D.* Spectral characteristics of solar S-bursts // Sol. Phys. – 1982. – Vol. 78, Is. 2. – P. 253–269.
16. *Gopalswamy N., Dal Lago A., Yashiro S., and Akiyama S.* The Expansion and Radial Speeds of Coronal Mass Ejections // Cent. Eur. Astrophys. Bull. – 2009. – Vol. 33. – P. 115–124.
17. *Alvarez H. and Haddock F. T.* Solar Wind Density Model from km-Wave Type III Bursts // Sol. Phys. – 1973. – Vol. 29, Is. 1. – P. 197–209.
18. *Gopalswamy N.* Coronal Mass Ejections and their heliospheric consequences. ASI Conference Series. – 2011. – Vol. 2. – P. 241–258.
19. *Gopalswamy N.* Halo coronal mass ejections and geomagnetic storms // Earth Planets Space. – 2009. – Vol. 61, No. 5. – P. 595–597.
20. *Kim R.-S., Cho K.-S., Moon Y.-J., Dryer M., Lee J., Yi Y., Kim K.-H., Wang H., Park Y.-D., and Kim Yong Ha.* An empirical model for prediction of geomagnetic storms using initially observed CME parameters at the Sun // J. Geophys. Res.: Space Phys. – 2010. – Vol. 115, Is. A12, doi:10.1029/2010JA015322.
21. *Michalek G., Gopalswamy N., Lara A., and Yashiro S.* Properties and geoeffectiveness of halo coronal mass ejections // Space Weather. – 2006. – Vol. 4, Is. 10, S1003, doi:10.1029/2005SW000218.

В. В. Доровський¹, В. М. Мельник¹, О. О. Коноваленко¹,
А. І. Браженко², М. Панченко³, Г. О. Рукер³, С. Пудс⁴,
О. О. Станіславський¹, В. А. Михайлов⁵

¹Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

²Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту
геофізики ім. С. І. Суботіна НАН України,
вул. М'ясоєдова, 27/29, м. Полтава, 36014, Україна

³Інститут космічних досліджень Австрійської академії наук,
Шмідльштрассе, 6, м. Грац, 8042, Австрія

⁴Католицький університет Льовен,
Селестійненлаан, 200В, В-3001, м. Льовен, Бельгія

⁵Харківський національний університет імені В. М. Каразіна,
пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ВЛАСТИВОСТІ СКЛАДНОГО СПЛЕСКА II ТИПУ З БАГАТОЮ “ЯЛИНКОВОЮ” СТРУКТУРОЮ НА ЧАСТОТАХ 3–33 МГц

Розглянуто характеристики сплеска II типу з “ялинковою” структурою, що спостерігався 7 червня 2011 р. у смузі частот 3÷33 МГц як наземними радіотелескопами (УТР-2, УРАН-2), так і космічними апаратами (“СТЕРЕО”). Уперше в декаметровому діапазоні виконано статистичний аналіз основних параметрів субсплесків “ялинкової” структури сплеска II типу (тривалості та модуля швидкості частотно-го дрейфа) окремо для субсплесків з позитивним та негативним частотним дрейфом. Вперше також у цьому діапазоні оцінено ступені кругової поляризації тонкої структури сплеска II типу. Знайдено тонку частотну структуру “ялинкових” субсплесків, яка за параметрами виявилася близькою до “бахромі”, що спостерігається у сонячних S-сплесків. За характерним хвилеподібним коливанням частоти “стовбуру” сплеску визначено параметри корональних стримерів, що перетинаються фронтом ударної хвилі. За даними спостережень космічних апаратів “СТЕРЕО” та “СОХО” визначено напрямок та швидкість руху коронального викида мас, відповідального за генерацію сплеска. За даними наземних радіоспостережень знайдено швидкість поширення джерела сплеску II типу. В результаті визначено можливе місцезнаходження джерела сплеска на фронті ударної хвилі. Встановлено також міру геоэффективності даної сонячної події.

V. V. Dorovsky¹, V. M. Melnyk¹, A. A. Konovalenko¹,
A. I. Brazhenko², M. Panchenko³, H. O. Rucker³, S. Poedts⁴,
A. A. Stanislavsky¹, and V. A. Mykhaylov⁵

¹Institute of Radio Astronomy, National Academy
of Sciences of Ukraine,
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

²Poltava Gravimetric Observatory, S. Subotin Institute
of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine,
Myasoedov St., 27/29, Poltava, 36014, Ukraine

³Institut für Weltraumforschung der Österreichischen
Akademie der Wissenschaften,
6, Schmiedlstrasse, Graz, 8042, Austria

⁴Katholieke Universiteit Leuven,
Celestijnenlaan 200B, B-3001, Leuven, Belgium

⁵V. Kazarin National University of Kharkiv,
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

PROPERTIES OF THE COMPLEX TYPE II BURST WITH RICH HERRINGBONE STRUCTURE WITHIN 3–33 MHz

Characteristics of the type II burst with “herringbone” structure observed on 7 June 2011 within 3–33 MHz are considered. The burst was recorded both by the two ground-based radiotelescopes (UTR-2, URAN-2) and the spaceborne STEREO radio receivers. For the first time, a detailed statistical analysis of main parameters of the herringbone sub-bursts of type II (duration and frequency drift rate) was performed at decameter wavelengths separately for those positively and negatively drifting ones. Another new result within these frequencies is the measured degree of circular polarization of fine structure type II bursts. A fine frequency structure of the sub-bursts herringbone was found to be similar to the so-called “fringes” in the solar S-bursts. From the characteristic wave-like oscillations of the type II back-bone the parameters of coronal streamers intersected by the shock wave were derived. Using the observational data from the STEREO and SOHO spacecraft, the speed and direction of the associated CME propagation were detected. From the ground-based radio observations the radial speed of type II burst source was found. As a result, possible location of the type II burst source was determined. In addition, the geoeffectiveness of the discussed solar event was estimated.

Статья поступила в редакцию 15.04.2013