

РАДИОАСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

УДК 523.985.7-77

А. В. АНТОНОВ¹, В. Н. МЕЛЬНИК¹, А. А. КОНОВАЛЕНКО¹,
В. В. ДОРОВСКИЙ¹, Х. О. РУКЕР², Т. ЗАКАРАШВИЛИ²,
А. А. СТАНИСЛАВСКИЙ¹, А. А. КОВАЛЬ¹

¹ Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: antonovdom@mail.ru

² Институт космических исследований Австрийской академии наук,
Шмидльштрассе, 6, г. Грац, 8042, Австрия

ДЕКАМЕТРОВЫЕ ВСПЛЕСКИ IV ТИПА, ФАЙБЕР-ВСПЛЕСКИ И ВСПЛЕСКИ III ТИПА НАД ГРУППОЙ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ СОЛНЦА

Рассмотрены особенности спорадического декаметрового солнечного радиоизлучения, связанного с несколькими активными областями, по данным наблюдений 1 августа 2011 г. на радиотелескопе УТР-2. Проведен анализ характеристик всплесков IV типа, фибер-всплесков, а также предшествующих и последующих за ними всплесков III типа. Установлена однотипность происхождения фибер-всплесков и всплесков III типа. По значению скорости частотного дрейфа они распределены по статистически независимым группам. Проведено отождествление каждой группы всплесков и всплесков IV типа с излучением из конкретной области активности. Получены оценка параметров плазмы в этих областях и их вариации в период генерации всплесков IV типа.

Ключевые слова: группа активных областей, декаметровый диапазон, всплески IV типа, фибер-всплески, всплески III типа, отождествление, области генерации, параметры плазмы

1. Введение

Исследования спорадического радиоизлучения Солнца в декаметровом диапазоне радиоволн дают возможность оценить параметры и структуру его короны на высотах приблизительно от полутора до трех солнечных радиусов.

В период высокой солнечной активности на этих высотах генерируется широкий спектр узкополосных и широкополосных всплесков, среди которых наиболее многочисленны всплески III типа. Иногда, когда в состоянии короны формируются особые условия, наблюдается широкополосное радиоизлучение, классифицируемое как всплески IV типа, одной из компонентов тонкой структуры которых являются фибер-всплески, похожие на всплески III типа. Длительность радиоизлучения всплесков IV типа в декаметровом диапазоне может составлять от десятков минут

до нескольких часов [1]. В настоящее время существует много нерешенных вопросов, связанных с формированием особых условий в короне, приводящих к генерации всплесков IV типа и сопровождающих их фибер-всплесков, с процессами генерации континуума всплесков IV типа и фибер-всплесков, с факторами, определяющими их параметры.

Считается, что появление всплесков связано с возбуждением плазменных колебаний и преобразованием их в поперечные волны в солнечной короне [2], возмущенной прохождением корональных выбросов массы (Coronal Mass Ejection—CME) [3]. Предполагается также, что всплески IV типа могут генерироваться в высоких трансэкваториальных магнитных арках, возбуждаемых солнечными вспышками без проявления CME [4].

В настоящее время отсутствует строгая теория всплесков IV типа и сопровождающих их фибер-всплесков, поэтому необходимо дальнейшее экспериментальное исследование их характеристик для выявления особенностей, анализ

© А. В. Антонов, В. Н. Мельник, А. А. Коноваленко,
В. В. Доровский, Х. О. Рукер, Т. Закарашвили,
А. А. Станиславский, А. А. Коваль, 2014

которых будет способствовать выяснению механизмов генерации таких всплесков.

Процесс развития всплесков IV типа характеризуется достаточно быстрым возрастанием на два-три порядка континуального радиоизлучения и генерацией мощных узкополосных фибер-всплесков. Предполагается, что фибер-всплески, как и всплески III типа, генерируются потоками нетепловых электронов, которые могут быть ускорены во время микровспышек, возникающих в нижней короне в результате процесса пересоединения магнитных силовых линий. Пучки ускоренных электронов, проходя сквозь толщу возмущенной солнечной короны, генерируют фибер-всплески, характеристики которых определяются параметрами возмущенной среды. Исследование таких характеристик всплесков, как скорость их частотного дрейфа и ее частотная зависимость, является мощным инструментом для изучения параметров среды на высотах, где происходит декаметровое радиоизлучение.

Ряд работ по исследованию всплесков IV типа был выполнен на радиотелескопе УТР-2 [5–7]. В них определялись характеристики континуума всплесков IV типа и параметры фибер-всплесков для небольшого числа этих событий. Однако недостаточность полученной информации не позволяет делать обобщения относительно свойств этих всплесков. Поэтому регистрация новых событий данного типа и их анализ с целью выделения новых особенностей в их структуре и параметрах представляются важными для более полного понимания происхождения этого феномена.

Особый интерес представляют исследования всплесков IV типа, фибер-всплесков и всплески III типа в период наблюдения на солнечной поверхности группы областей высокой активности (АО). В этих условиях может формироваться широкое многообразие характеристик всплесков, что способствует лучшему пониманию происходящих процессов. Важным является также исследование тех всплесков IV типа, появление которых не отождествляется с событиями СМЕ, приведенными в каталогах космических аппаратов “СОХО” и “СТЕРЕО-А, В”.

В настоящей работе представлено исследование спорадического радиоизлучения Солнца, когда на его диске наблюдалась группа АО. Оно выполнено по результатам наблюдений этого радиоизлучения 1 августа 2011 г. в декаметровом

диапазоне на радиотелескопе УТР-2. Проводится анализ связи фибер-всплесков и всплесков III типа с отдельными АО. Оцениваются параметры модели солнечной короны над АО.

2. Наблюдения и обработка

Наблюдения спорадического радиоизлучения на радиотелескопе УТР-2 [8] проводились в режиме широкой диаграммы направленности, который реализуется при использовании одной половины полотна антенной решетки “север-юг”. В этом режиме эффективная площадь приемной антенны в зенитном направлении составляла около 50000 м² при ширине диаграммы направленности приблизительно 0.75°×13° на частоте 25 МГц.

Измерения осуществлялись в широком частотном диапазоне от 8.25 до 32.75 МГц. Запись радиоизлучения регистрировалась с помощью широкополосного высокочастотного анализатора спектра DSP-z, характеристики которого обеспечивали частотное разрешение анализа, равное 4 кГц, и временное разрешение, равное 100 мс.

Во время наблюдений, которые выполнялись 01.08.2011 г., был зарегистрирован мощный всплеск IV типа. Запись динамического спектра спорадического радиоизлучения, на которой выделяется всплеск IV типа, приведена на рис. 1, а. Временной профиль радиоизлучения на частоте 30 МГц показан на рис. 1, б. Динамический спектр фибер-всплесков во время максимальной фазы всплеска IV типа приведен на рис. 1, в, а динамический спектр всплесков III типа приведен на рис. 1, г.

В течение всего времени наблюдений активность спорадического радиоизлучения, судя по количеству фибер-всплесков и всплесков III типа, была высокой. Их число в единицу времени изменялось незначительно и в среднем составляло около 5 всплесков в минуту. В период, предшествующий появлению всплеска IV типа, на частоте 30 МГц средний уровень континуума был около 10 с. е. п. (солнечных единиц потока, 1 с. е. п. = 10⁻²² Вт/(Гц·м²)), а потоки всплесков III типа составляли от 4 до 20 с. е. п. Рисунок 1, б показывает, что всплеск IV типа по интенсивности радиоизлучения в континууме и динамике развития во времени можно разделить примерно на две равные части. В центре каждой из них наблюдался пик интенсивности радиоизлучения. На частоте 30 МГц плотность потока континуу-

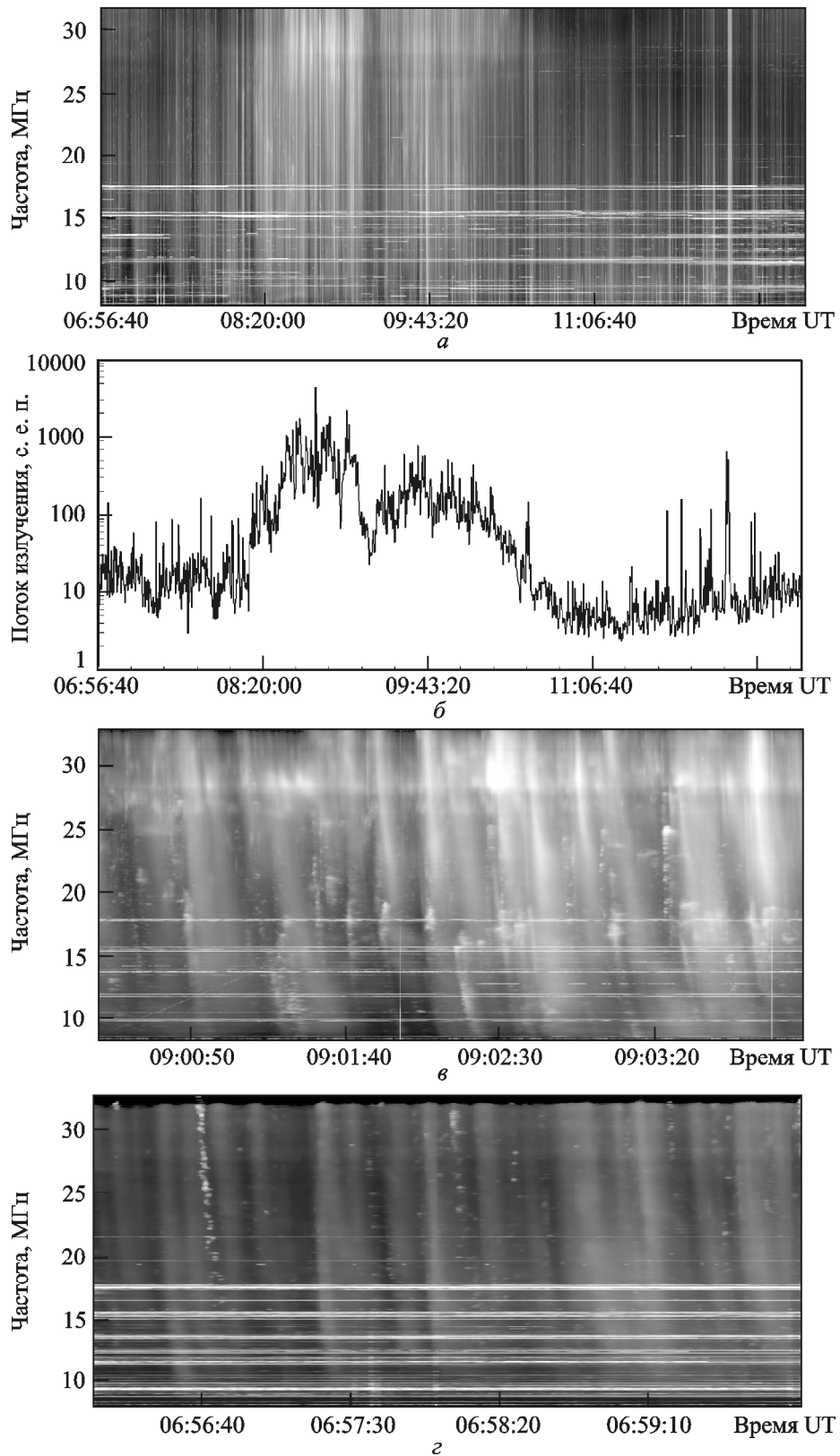


Рис. 1. Динамический спектр спорадического излучения Солнца 01.08.2011 г., на котором в период с 8:13 до 10:20 UT наблюдается всплеск IV типа (а); временной профиль потока спорадического излучения на частоте 30 МГц (б); динамический спектр фибер-всплесков (в); динамический спектр всплесков III типа (г)

ма в максимуме в первой части всплеска составила около 700 с. е. п., а во второй части всплеска – около 200 с. е. п. В обеих частях всплеска IV типа наблюдался высокий уровень радиоизлучения фибер-всплесков, который изменялся в пределах от 100 до 1000 с. е. п. Этот уровень значительно превышал уровень всплесков III типа в предшествующий период. Наблюдалась различная глубина модуляции потока в обеих частях всплеска IV типа и различие времен их характерных периодов. Очевидно, что такие различия параметров в обеих частях всплеска IV типа связаны с различными условиями их генерации. Поэтому будем считать, что эти части всплеска являются двумя независимыми всплесками IV типа с незначительным наложением друг на друга. Будем анализировать их как 1-й и 2-й всплеск IV типа. После окончания 2-го всплеска IV типа, примерно с 10:40 UT, значение континуума по отношению к предшествующему периоду снизилось примерно до 4 с. е. п., а амплитуда всплесков III типа уменьшилась до 3 ÷ 8 с. е. п.

Анализ фибер-всплесков и характеристик всплесков III типа в предшествующем и последующем за появлением всплесков IV типа периодах проведен по наблюдениям, условно разделенным на четыре временные области. В 1-й области до момента появления 1-го всплеска IV типа в период с 06:56 по 07:55 UT проводились измерения параметров всплесков III типа. Во 2-й временной области в период с 08:36 по 9:13 UT измерялись параметры фибер-всплесков, относящихся к радиоизлучению 1-го всплеска IV типа. В 3-й временной области в период с 9:14 по 9:58 UT измерялись параметры фибер-всплесков, наблюдаемых во время регистрации 2-го всплеска IV типа. В 4-й временной области после окончания радиоизлучения 2-го всплеска IV типа в период с 10:35 по 11:59 UT проводилось измерение параметров всплесков III типа. В каждом из перечисленных интервалов наблюдений было выделено примерно по сотне фибер-всплесков и всплесков III типа.

Основным направлением исследований было изучение характеристик скорости частотного дрейфа всплесков и ее частотной зависимости. В общем случае они связаны с высотным профилем концентрации солнечной плазмы $n(r)$, где $r = R/R_s$, R_s – радиус Солнца. Для описания высотного профиля плотности плазмы атмосферы Солнца используются различные модели ее

поведения. Спокойное состояние солнечной короны можно представить степенной моделью вида $n(r) = Mr^{-m}$. При распространении в такой короне пучков ускоренных нетепловых электронов со скоростью v_0 генерируемые в ней всплески III типа имеют скорость частотного дрейфа всплесков $\dot{f}(f)$, которую можно получить из условия $\dot{f}(f) = (df/dn)(dn/dr)v_0$. Здесь f – частота наблюдений. Для первой гармоники частоты излучения она близка к частоте плазменных колебаний $f_{pe} = 8980 \cdot n^{1/2}$. Учитывая это, можно получить следующую формулу:

$$\dot{f}(f) = -0.5m(8980)^{-2/m} M^{-1/m} f^{1+2/m} R_s^{-1} v_0. \quad (1)$$

Измеряя скорости дрейфа всплесков \dot{f}_1 и \dot{f}_2 на частотах наблюдений f_1 и f_2 , можно определить параметры модели по следующим формулам:

$$m = 2 \ln(f_1/f_2) / \ln(\dot{f}_1 f_2 / \dot{f}_2 f_1), \quad (2)$$

$$M = (f/8980)^2 (0.5 f m v_0 / \dot{f} R_s)^m. \quad (3)$$

Параметр m можно определить по данным выполненных измерений, но для вычисления параметра M необходимо знать значение скорости пучка ускоренных электронов. Известно, что наиболее вероятная скорость таких электронов равна $0.3c$, где c – скорость света, и это значение обычно используется в подобных расчетах.

При обработке результатов наблюдений для определения скорости дрейфа регистрируемых всплесков и их частотной зависимости весь частотный диапазон наблюдений был разбит на 6 равных поддиапазонов размером 4 МГц. Скорость частотного дрейфа измерялась на центральных частотах поддиапазонов, равных 30, 26, 22, 18, 14 и 10 МГц.

Точность измерений скорости дрейфа на указанных частотах определялась стандартным статистическим методом, основанным на многократном измерении физической величины одного и того же размера. Было определено, что стандартное отклонение измеряемых значений практически линейно связано с частотой. Оно возрастало от 0.07 МГц/с на частоте 10 МГц до 0.24 МГц/с на частоте 30 МГц.

Измерения скоростей дрейфа фибер-всплесков и всплесков III типа показали, что они имеют широкий спектр значений, не подчиняющийся нормальному закону распределения. В исследуе-

мых массивах данных присутствуют статистически независимые группы по значениям скоростей дрейфа всплесков. Обычно их выделение проводится по результатам анализа числа событий в интервалах, на которые разбивается исследуемый массив. Однако даже для наиболее простого случая равномерного разбиения выборки на интервалы до сих пор нет удовлетворительного способа построения гистограммы эмпирической плотности вероятности. Поэтому, используя различные формулы определения числа интервалов либо их ширины для каждого массива данных, необходимо экспериментально оптимизировать найденные значения этих величин для получения максимальной разрешающей способности при выделении независимых групп с учетом сохранения устойчивости получаемого результата.

Графически определяемое число событий в каждом интервале необходимо представлять в виде графика распределений с интерполяцией, что позволяет наглядно оценивать устойчивость получаемого результата в процессе оптимизации.

Типичные графики распределения числа событий по скоростям дрейфа в четырех временных областях на отдельных частотах приведены на рис. 2.

Проведенный анализ показал, что во всех временных областях во всех частотных поддиапазонах четко выделяются, в основном, три статистически независимые группы всплесков.

Достоверность полученного результата обосновывается тем, что различия средних значений скоростей дрейфа в соседних группах существенно превышают стандартные отклонения измерений.

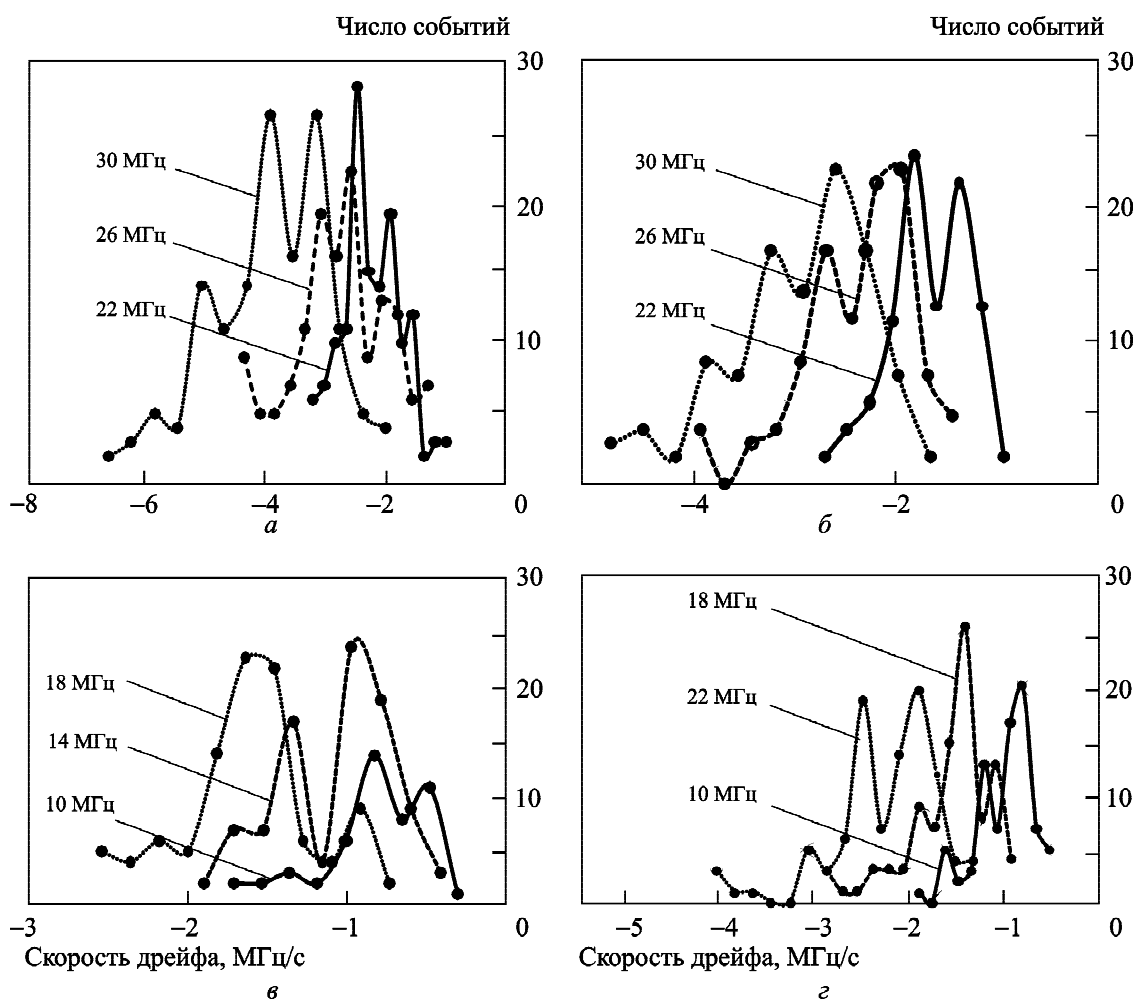


Рис. 2. Распределение числа событий по скоростям дрейфа на отдельных частотах в 1-й временной области (а), во 2-й области (б), в 3-й области (в) и в 4-й области (з)

Статистическая независимость выделенных групп во всех частотных поддиапазонах подтверждается вероятностью нулевой гипотезы об их зависимости. Вычисленная по методу Стьюдента [9], она оказывается менее 0.1 %. Достоверность независимости выделенных групп подтверждают и значения доверительного интервала. Например, при различии средних скоростей дрейфа между 1-й и 2-й группами на частоте 30 МГц, равном 0.94 МГц/с, нижняя граница доверительного интервала на уровне 95 % определения этой величины равна 0.77 МГц/с, а верхняя граница равна 1.11 МГц/с. Следовательно, возможный минимальный разнос между ними составляет не менее 0.77 МГц/с, что значительно превышает стандартное отклонение измерений в этих группах на данной частоте, равное 0.24 МГц/с.

Характер распределения вероятности событий по скоростям дрейфа в этих группах во всех частотных поддиапазонах и временных областях подобен. Частотные зависимости скоростей дрейфа в каждой группе подобны и имеют различный функциональный характер. Представленный на рис. 3 пример показывает, что время появления всплесков в двух группах во 2-й временной области и его вариации различны.

Надежность полученных результатов по скорости дрейфа всплесков в трех группах поз-

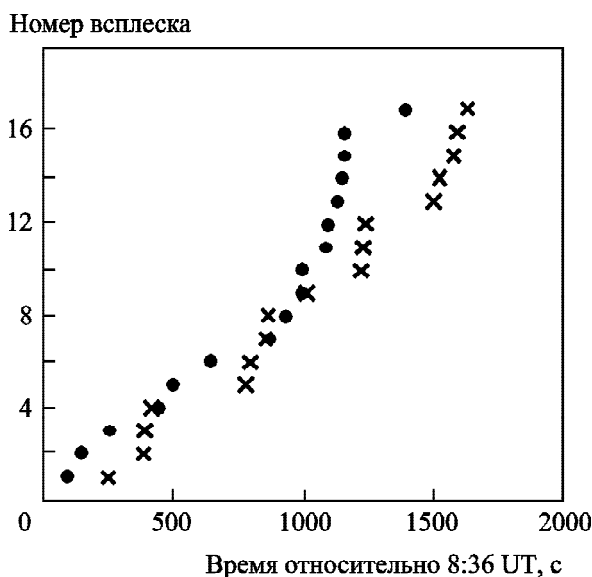


Рис. 3. Время регистрации фибер-всплесков относительно 08:36 UT в 1-й (кружки) и 2-й (крестики) группах скоростей дрейфа во 2-й временной области на частоте 22 МГц

воляет установить их частотную зависимость во всех четырех временных областях. Она показана на рис. 4. Здесь приведены модули средней скорости дрейфа в группах всплесков. Уровни стандартного отклонения измерений показывают, что в соседних группах они не перекрываются.

В известных работах по изучению свойств всплесков в спорадическом радиоизлучении анализируются параметры функции, аппроксимирующей частотную зависимость скорости дрейфа. По аналогии с таким подходом по результатам настоящей работы была проведена аппроксимация полученной частотной зависимости скорости дрейфа в каждой из трех групп степенной функцией. Найденные значения параметров аппроксимации приведены в табл. 1. Параметры аппроксимации имеют следующие особенности: во всех временных областях частотные зависимости скорости дрейфа всплесков III типа и фибер-всплесков во всех трех группах достаточно хорошо аппроксимируются степенной функцией $\dot{f} = af^n$; квадрат коэффициента корреляции между данными частотной зависимости и аппроксимирующей функцией для всех случаев анализа лежит в пределах от 0.95 до 0.995.

Для первой группы частотная зависимость скорости дрейфа всплесков III типа в 1-й и 4-й временных областях, до и после всплесков IV типа, почти одинакова, с показателем степени частоты n , равным соответственно 1.74 и 1.73 при коэффициенте a , равным соответственно $7 \cdot 10^{-3}$ и $6 \cdot 10^{-3}$. Показатель n для фибер-всплесков во 2-й области, в 1-м всплеске IV типа, значительно меньше и равен 1.23, а коэффициент a больше в 6 раз и достигает значений $4.5 \cdot 10^{-2}$. Во 2-м всплеске IV типа, когда уровень его континуума относительно 1-го всплеска уменьшается в 3.5 раза, коэффициент a уменьшается почти в 4 раза, а показатель степени n возрастает до значения 1.58. Уменьшение коэффициент a практически пропорционально уменьшению уровня континуума.

Близкие соотношения изменения параметров аппроксимации наблюдаются во 2-й и 3-й группах скоростей дрейфа всплесков III типа в 1-й и 4-й временных областях. Важно отметить, что во 2-й области во время 1-го всплеска IV типа, в период максимума его континуума, три группы скоростей дрейфа на частоте выше 26 МГц одно-

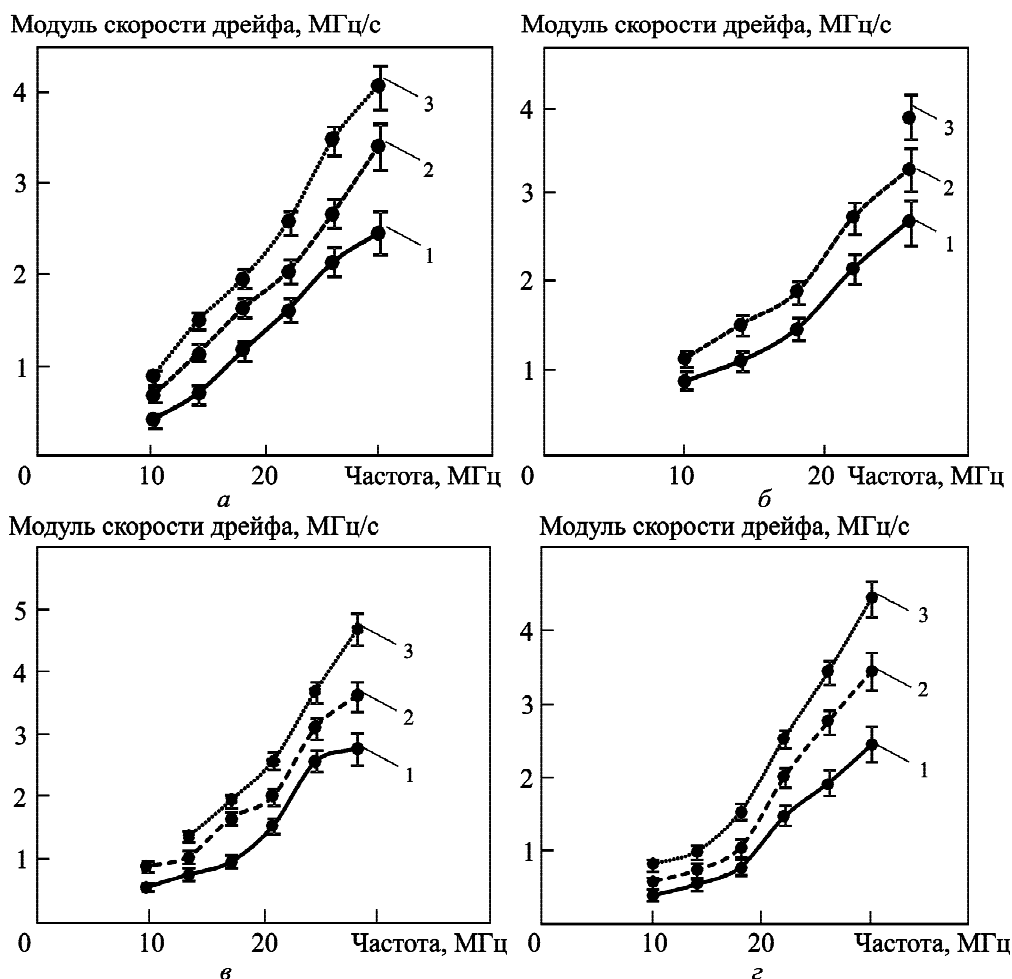


Рис. 4. Частотные характеристики модуля скорости дрейфа всплесков в 3-х группах (номера групп указаны возле соответствующих зависимостей) в 1-й временной области (а), во 2-й области (б), в 3-й области (в) и в 4-й области (г)

Таблица 1. Аппроксимации частотной зависимости скорости дрейфа всплесков степенной функцией $\dot{f} = af^n$ в 3-х группах в 4-х временных областях

№ группы	1-я область 6:56–7:55 UT		2-я область 8:36–9:13 UT		3-я область 9:14–9:58 UT		4-я область 10:35–11:59 UT	
	<i>a</i>	<i>n</i>	<i>a</i>	<i>n</i>	<i>a</i>	<i>n</i>	<i>a</i>	<i>n</i>
1	0.007	1.74	0.045	1.23	0.012	1.58	0.006	1.73
2	0.024	1.44	0.071	1.16	0.033	1.36	0.008	1.75
3	0.035	1.4	–	–	0.017	1.64	0.016	1.62

значно не проявились. Третья группа с максимальной скоростью дрейфа проявилась только на частоте 26 МГц, а на более низких частотах она не была обнаружена.

Полученные параметры аппроксимации имеют сложную связь с параметрами модели высотного профиля солнечной атмосферы. Для модели степенной зависимости плотности плазмы от

высоты показатель частотной зависимости скорости дрейфа всплесков *n* в соответствии с (1) равен $n = 1 + 2/m$. Коэффициент *a* в степенной аппроксимации еще более сложным образом зависит от параметров модели *M* и *m*. Поэтому для понимания физики происходящих процессов целесообразно анализировать непосредственно параметры плотности солнечной плазмы, которые для

степенной модели высотного профиля плотности плазмы можно определить по формулам (2) и (3) на основе данных проведенной аппроксимации. Результаты расчета параметров областей генерации трех групп всплесков приведены в табл. 2. В этой таблице, полученной на основании измерений скорости дрейфа всплесков III типа и фибер-всплесков в декаметровом диапазоне, приведена плотность плазмы M на высоте R_s и степень крутизны m ее высотного профиля.

Подобное представление результатов исследования наглядно показывает среднюю динамику изменения параметров корональной плазмы в областях генерации 3-х групп всплесков в последовательных временных областях. Детальный их анализ рассмотрим в разделе Обсуждение.

3. Обсуждение

Во всех 4-х временных областях анализа спорадического радиоизлучения выделены три статистически независимые группы скоростей дрейфа всплесков, которые подобны между собой, но имеют различные значения параметров. В связи с этим можно предположить, что они генерируются в корональных областях над тремя различными АО Солнца. В этом случае характеристики групп отражают условия генерации всплесков над соответствующими АО и могут служить инструментом для их изучения. Поэтому важно установить однозначность связи выделенных групп с соответствующими АО.

Важным вопросом исследований продолжает оставаться вопрос о происхождении всплесков IV типа, об источнике и механизме их генерации.

Рассмотрим возможные условия генерации анализируемого спорадического радиоизлучения. 1 августа 2011 г. по данным “СОХО”, приведенным на рис 5, а, вблизи центра солнечного диска в его восточной, центральной и западной части,

находилось три АО, соответственно NOAA11263, NOAA11261 и NOAA11260. Наибольшую активность в рентгеновском диапазоне проявляла центральная область, а наименьшую активность – западная область, однако общий уровень рентгеновских всплесков был невысоким. Согласно изображению АО в ультрафиолетовом диапазоне, приведенному на рис 5, б, на низких высотах над ними и между ними наблюдалось широкое семейство магнитных арок, что способствовало генерации в этих областях микровспышек, приводящих к генерации пучков ускоренных нетепловых электронов. Этим, по-видимому, объясняется наблюдаемая высокая частота следования всплесков III типа и фибер-всплесков в декаметровом диапазоне.

Наличие связи двух наблюдаемых всплесков IV типа с событиями СМЕ можно оценить по данным каталогов космических аппаратов “СОХО” и “СТЕРЕО-А, В”. Они представляют результаты наблюдений СМЕ в белом свете, полученные с помощью коронографа LASCO C2 на борту аппарата “СОХО” и коронографов COR1 аппаратов “СТЕРЕО-В” и “СТЕРЕО-А”, которые в это время имели солнечные координаты соответственно E92° и W100°.

На этот период в каталоге “СОХО” описано только одно событие СМЕ, которое было обнаружено коронографом по переднему фронту выброса на гелиоцентрической высоте $4.2R_s$ в 11:00 UT. Линейная скорость движения СМЕ равнялась 343 км/с. Масса выброса не была определена из-за своей незначительности. Приводится время старта СМЕ, 8:39:07 UT, которое найдено при экстраполяции положения выброса к центру солнечного диска при указанной скорости движения. Однако реальное время старта может быть более ранним, поскольку при данной экстраполяции не учитывается тот известный факт, что в нижней короне начальная

Таблица 2. Параметры плазмы в области генерации 3-х групп всплесков в 4-х временных областях в модели высотного профиля плотности плазмы $N(r) = Mr^{-m}$

№ группы	1-я область 6:56–7:55 UT		2-я область 8:36–9:13 UT		3-я область 9:14–9:58 UT		4-я область 10:35–11:59 UT	
	$M, \text{см}^{-3}$	n	$M, \text{см}^{-3}$	n	$M, \text{см}^{-3}$	n	$M, \text{см}^{-3}$	n
1	$7.3 \cdot 10^7$	2.7	$3.3 \cdot 10^{12}$	8.6	$3.1 \cdot 10^7$	3.5	$1.3 \cdot 10^8$	2.8
2	$9.3 \cdot 10^8$	4.5	–	12.6	$5.9 \cdot 10^9$	5.5	$4.6 \cdot 10^7$	2.7
3	10^9	5.1	–	–	$2.9 \cdot 10^7$	3.1	$4.1 \cdot 10^7$	3.2

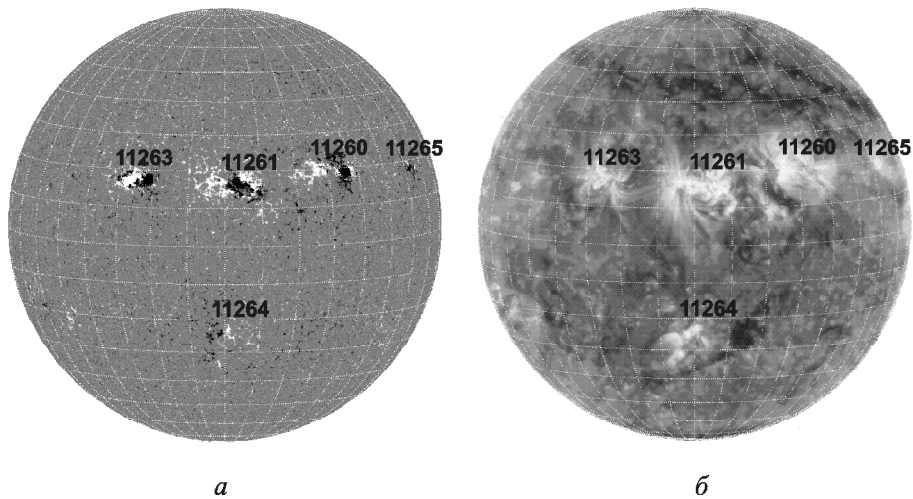


Рис. 5. Активные области на диске Солнца 01.08.2011 г. по данным космического аппарата “СОХО” на магнитограмме в 18:13 UT (а) и на волне 174 \AA в 17:15 UT (б)

скорость всплывания СМЕ может быть значительно меньшей. Она может плавно увеличиваться при подъеме до высот порядка $2R_s$, выше которых скорость выброса стабилизируется [10]. Учет этого обстоятельства позволяет с некоторой вероятностью совместить времена появления СМЕ на высоте начала генерации 2-го всплеска IV типа. Однако подобный более мощный 1-й всплеск IV типа однозначно не отождествляется с событиями СМЕ из каталога “СОХО”. Кроме того, оба всплеска IV типа не отождествляются с дифференциальными изображениями СМЕ, полученными коронографами COR1 аппаратов “СТЕРЕО-А, В”. Эти обстоятельства не позволяют считать, что оба всплеска IV типа связаны с СМЕ.

События, которые могли вызвать возмущения корональной плазмы и возможно привести к формированию наблюдаемых всплесков IV типа могли быть связаны с двумя наблюдавшимися рентгеновскими вспышками. Первая небольшая по интенсивности рентгеновская вспышка класса C4 произошла в центральной АО в 07:19 UT, а вторая более слабая вспышка класса C1.4 – в 08:10 UT в восточной АО.

Внимание привлекает тот факт, что времена задержки между двумя вспышками и двумя всплесками IV типа совпадают. Время задержки начала 1-го и 2-го всплесков IV типа относительно соответственно 1-й и 2-й рентгеновской вспышек практически одинаково и равно примерно 50 мин. Отношение интенсивности рентгеновско-

го излучения первой вспышки к интенсивности второй примерно совпадает с отношением средних континуумов 1-го и 2-го всплесков IV типа. Эти факты важны при рассмотрении вопросов происхождения всплесков IV типа, когда события СМЕ не наблюдались коронографами. Можно предположить, что эти вспышки могли вызвать возмущения плазмы в высоких корональных магнитных петлях и привести к генерации всплесков IV типа. Данный вопрос нуждается в дальнейших исследованиях.

Сравнительный анализ параметров всплесков III типа и фибер-всплесков показывает, что по скоростям дрейфа они сгруппированы практически одинаково, а их частотные характеристики во всех группах подобны. Темп следования всплесков обоих типов практически одинаков. Основное различие между всплесками III типа и фибер-всплесками наблюдается в значениях плотности потоков и может составлять более двух порядков. Наблюдается практически синхронное возрастание потока фибер-всплесков с ростом потока всплесков IV типа. Эти обстоятельства позволяют предположить однотипность происхождения всплесков III типа и фибер-всплесков. Мы будем полагать, что каждая группа всплесков III типа вызывается быстрыми электронами, ускоренными в одной из АО.

Особенностью скоростей дрейфа всплесков в группах является практически неизменное соотношение их значений между группами, которое

не зависит ни от временной области измерений, т. е. типа всплесков, ни от частоты наблюдений. Скорость дрейфа всплесков III типа и фэйбер-всплесков на любой частоте максимальна в 3-й группе. В среднем в 1-й группе она меньше в 1.88 раза, а во 2-й группе – в 1.3 раза. Представляется, что эта зависимость может быть связана только с различием солнечных координат соответствующих АО.

Проведем отождествление каждой группы скоростей дрейфа с конкретной излучающей АО, анализируя зависимость значения скорости дрейфа от угла α между направлением пучка ускоренных электронов и направлением на наблюдателя [11–13] для каждой из трех АО. При радиальном движении пучка электронов в АО центральный угол между его направлением и направлением на наблюдателя для восточной АО равен примерно 28° , для центральной АО он равен приблизительно 11° и для западной АО – примерно 35° .

В работе [12] показано, что скорость дрейфа всплесков зависит от угла α следующим образом: $f(f) \approx \frac{df}{dn} \frac{dn}{dr} \frac{v_0 v_{sp}}{v_{sp} - v_0 \cos \alpha}$. Здесь v_{sp} – групповая скорость поперечной волны в области генерации всплесков. С увеличением угла α скорость дрейфа всплесков уменьшается. Эта зависимость соответствует тому, что 1-я группа всплесков с минимальной скоростью дрейфа генерируется над западной АО с максимальным углом α , 2-я группа всплесков генерируется над восточной АО, а 3-я группа всплесков с максимальной скоростью дрейфа генерируется над центральной АО, имеющей минимальный угол α . На основании этого предположения получено расчетное значение v_{sp} , которое определено по значениям угла α , скорости дрейфа в группах во всех временных областях и скорости пучков электронов $v_0 = 0.3c$. Оно на всех частотах примерно одинаково и лежит в пределах $0.33c \div 0.38c$. Эта величина соответствует наблюдаемым отрицательным значениям скорости дрейфа всплесков. Таким образом, различие скоростей дрейфа в группах вызвано, в основном, различием центральных углов положения АО относительно наблюдателя, над которыми генерируются рассматриваемые всплески.

Полученные результаты одинаковы для всплесков III типа и фэйбер-всплесков и являются

дополнительным подтверждением общности источников их происхождения.

Выполним анализ параметров плазмы, приведенных в табл. 2, над тремя АО в период предшествующий всплескам IV типа, во время их наблюдения и в период после их окончания. При этом наиболее однозначным является анализ параметра m – показателя степенной функции, описывающей высотный профиль плотности корональной плазмы, который не зависит от параметров v_0 и α . Данный показатель для всех трех АО в 4-й временной области после окончания всплесков IV типа минимален и имеет значение около 2.9. В этот период континуум спорадического радиоизлучения и уровень всплесков III типа были минимальными за все время наблюдений.

Перед 1-м всплеском IV типа, в 1-й временной области, такое же значение параметра m имела корональная плазма над западной АО. Однако над восточной АО его значение было больше в 1.7 раза, а над центральной областью – в 1.9 раза. В этот период континуум спорадического радиоизлучения и уровень всплесков III типа был почти на порядок больше, чем в 4-й временной области. Эти данные показывают, что перед 1-м всплеском IV типа корональная область была относительно спокойной только над западной АО, а над восточной и центральной АО она была в состоянии значительного возмущения.

Во время 1-го всплеска IV типа произошло сильное возмущение корональных областей над всеми тремя АО. Максимальное возмущение наблюдалось над центральной АО. Над западной АО параметр m относительно спокойного состояния в 4-й временной области возрос более чем в 3 раза, а над восточной АО он увеличился в 4.7 раза.

Во время 2-го более слабого всплеска IV типа наибольшее возмущение корональной плазмы произошло над восточной АО. Параметр m над ней относительно спокойного состояния возрос более чем в 2 раза. В то же время над центральной и западной АО возмущения были небольшими.

Эти результаты показывают, что если радиоизлучение обоих всплесков IV типа происходит в областях возмущенной корональной плазмы, то эти области имеют определенные размеры и местоположение. В данном случае, учитывая воздействие области короны радиоизлучения 1-го всплеска IV типа на плазму над тремя АО, а также разнос между восточной и западной АО

по долготе, можно считать, что размер этой области был порядка 60° солнечной долготы, а ее центр располагался над центральной АО.

Аналогично, рассматривая параметр m плазмы над 3-мя АО во время радиоизлучения 2-го всплеска IV типа, можно установить, что возмущенная область короны радиоизлучения 2-го всплеска IV типа располагалась над восточной АО, а половина ее размера была порядка 25° солнечной долготы.

Местоположение этих двух областей совпадает с областями двух рентгеновских вспышек, поэтому можно предположить, что данные вспышки могли быть агентами возбуждения корональной плазмы и радиоизлучения всплесков IV типа. Возможно, эти вспышки и всплески IV типа явились результатом определенных динамических процессов в корональной плазме.

4. Выводы

С помощью радиотелескопа УТР-2 в декаметровом диапазоне проведено исследование спорадического радиоизлучения группы АО Солнца. Наблюдения и обработка выделенных в этом радиоизлучении всплесков III типа, всплесков IV типа и фибер-всплесков позволила установить новые факты касательно их структуры, свойств параметров и происхождения.

1. Впервые по наблюдениям в декаметровом диапазоне было обнаружено существование независимых групп скоростей частотного дрейфа всплесков III типа и фибер-всплесков, число которых определяется числом АО со значительным спорадическим радиоизлучением.

2. Установлена однотипность источников происхождения всплесков III типа и фибер-всплесков.

3. Выполнено отождествление каждой группы всплесков с конкретными АО.

4. Определено местоположение областей генерации всплесков IV типа, оценены их размеры.

5. Исследована динамика изменения параметров плазмы над тремя АО, связанная с появлением всплесков IV типа.

6. Наблюдаемые всплески IV типа не были связаны с заметными СМЕ. Рассмотрены другие возможные условия генерации наблюдаемых всплесков IV типа.

Работа частично выполнена в рамках международного проекта SOLSPANET.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boisshot A. Étude du rayonnement radioélectrique solaire sur 169 MHz é l'aide d'un grand interféromètre a réseau // Ann. d'Astrophys. – 1958. – Vol. 21. – P. 273.
2. Ginzburg V. L. and Zhelezniakov V. V. On the Possible Mechanisms of Sporadic Solar Radio Emission (Radiation in an Isotropic Plasma) // Astron. Zh. (Sov. Astron). – 1959. – Vol. 35. – P. 694–705.
3. Melnik V. N., Rucker H. O., Konovalenko A. A., Dorovskyy V. V., Abranin E. P., Brazhenko A. I., Thidé B., and Stanislavskyy A. A. Solar Type IV bursts at frequencies 10–30 MHz. In: Pingzhi Wang, editor, Solar Physics Research Trends. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2008. – P. 287–325.
4. Zaqarashvili T. V., Melnik V. N., Brazhenko A. I., Panchenko M., Konovalenko A. A., and Franzuzenko A. V. Radio seismology of the outer solar corona // Astronomy & Astrophysics manuscript no. manuscripts c ESO. – 2013. – May 13.
5. Melnik V. N., Konovalenko A. A., Brazhenko A. I., Rucker H. O., Dorovskyy V. V., Abranin E. P., Lecacheux A., and Lonskaya A. S. Bursts in emission and absorption as a fine structure of Type IV bursts // Astrophysics and Cosmology after Gamow: Proc. 4th Gamow International Conf. Astrophysics and Cosmology After Gamow and the 9th Gamow Summer School “Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology, Radio Astronomy, High Energy Physics and Astrobiology”. – AIP Conference Proceedings. – 2010. – Vol. 1206. – P. 450–454.
6. Boiko A. I., Melnik V. N., Konovalenko A. A., Abranin E. P., Dorovskyy V. V., and Rucker H. O. Decametric radio bursts associated with the 13 July 2004 CME event at frequencies 10–30 MHz // Adv. Astron. Space Phys. – 2012. – Vol. 2, Is. 1. – P. 76–78.
7. Brazhenko A. I., Melnik V. N., Konovalenko A. A., Abranin E. P., Dorovskyy V. V., Vashchishin R. V., Frantuzenko A. V., and Rucker H. O. Observations of the Solar Continuum Radio Emission at Decameter Wavelengths // Astrophysics and Cosmology after Gamow: Proc. 4th Gamow International Conf. Astrophysics and Cosmology After Gamow and the 9th Gamow Summer School “Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology, Radio Astronomy, High Energy Physics and Astrobiology”. – AIP Conference Proceedings. – 2010. – Vol. 1206. – P. 440–444.
8. Брауде С. Я. Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // Антенны. – Москва: Связь. – 1978. – Вып. 26. – С. 3–14.
9. Student. The probable error of a mean // Biometrika. – 1908. – Vol. 6, No. 1. – P. 1–25.
10. Gopalswamy N. A Global Picture of CMEs in the Inner Heliosphere. In: G. Poletto and S. Suess, editors, The Sun and the Heliosphere as an Integrated system. Astrophys. Space Sci. Libr. – Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2004. – Vol. 317. – P. 201–250.
11. Hartz T. R. Type III solar radio noise bursts at hectometer wavelengths // Planet. Space Sci. – 1969. – Vol. 17, Is. 2. – P. 267–287.
12. Melnik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Rutkevych B. P., Dorovskyy V. V., Abranin E. P., Brazhenko A. I.,

Stanislavsky A. A., and Lecacheux A. Decameter Type III like bursts // *Sol. Phys.* – 2008. – Vol. 250, Is. 1. – P. 133–145.

13. *Melnik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Boiko A. I., Dorovskyy V. V., Abranin E. P., and Lecacheux A.* Observations of Powerful Type III Bursts in the Frequency Range 10 – 30 MHz // *Sol. Phys.* – 2011. – Vol. 269, Is. 2. – P. 335–350.

О. В. Антонов¹, В. М. Мельник¹, О. О. Коноваленко¹, В. В. Доровський¹, Г. О. Рукер², Т. Закарашвілі², О. О. Станіславський¹, А. О. Коваль¹

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

²Інститут космічних досліджень Австрійської академії наук, Шмідльштрассе, 6, м. Грац, 8042, Австрія

ДЕКАМЕТРОВІ СПЛЕСКИ ІV ТИПУ, ФАЙБЕР-СПЛЕСКИ ТА СПЛЕСКИ ІІІ ТИПУ НАД ГРУПОЮ АКТИВНИХ ОБЛАСТЕЙ СОНЦЯ

Розглянуто особливості спорадичного декаметрового сонячного радіовипромінювання, пов'язаного з декількома активними областями, за даними спостережень 1 серпня 2011 р. на радіотелескопі УТР-2. Виконано аналіз характеристик сплесків ІV типу, файбер-сплесків, а також сплесків ІІІ типу, що передують сплескам ІV типу та з'являються після них. Встановлено однотипність походження файбер-сплесків та сплесків ІІІ типу. За значенням швидкості частотного дрейфу вони розподілені за статистично незалежними групами. Виконано ототожнення кожної групи сплесків та сплесків ІV типу з випромінюванням

з конкретної області активності. Оцінено параметри плазми у цих областях та їх варіацій у період генерації сплесків ІV типу.

A. V. Antonov¹, V. N. Melnik¹, A. A. Konovalenko¹, V. V. Dorovskyy¹, H. O. Rucker², T. Zaqarashvili², A. A. Stanislavsky¹, and A. A. Koval¹

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

²Institut für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 6, Schmiedlstrasse, Graz, 8042, Austria

DECAMETER TYPE IV BURSTS, FIBER-BURSTS AND TYPE III BURSTS ASSOCIATED WITH GROUP OF SOLAR ACTIVE REGIONS

Features of sporadic decameter solar radio emission associated with some active regions according to observations made with radio telescope UTR-2 on August 1, 2014 are considered. Analysis of characteristics of type IV bursts, fiber-bursts and type III bursts, which were preceded and followed by type IV bursts, was carried out. Similarity of origins of fiber-bursts and type III bursts. By the frequency drift rate, they are distributed by statistically independent groups. Each group of bursts and that of type IV bursts were identified with radio emission from a particular active region. The plasma parameters in these regions and their variations while generating type IV bursts are estimated.

Статья поступила в редакцию 07.05.2014