

Солнечные U- и J-всплески на декаметровых волнах

В. В. Доровский, В. Н. Мельник, А. А. Коноваленко, Х. О. Рукер¹,
Э. П. Абранин, А. Лекашо²

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: dorovsky@ri.kharkov.ua*

*¹Институт космических исследований,
Грац, Шмидльштрассе, 6, Австрия*

*²Париж-Мейдон обсерватория,
Париж, CNRS UMR 8644, Франция*

Статья поступила в редакцию 31 марта 2009 г.

Приведены результаты первых наблюдений солнечных U- и J-всплесков на радиотелескопе УТР-2 в декаметровом диапазоне длин волн в 2003–2004 гг. За указанный период было зарегистрировано более 50 J-всплесков и только 7 U-всплесков. Это первый случай наземного наблюдения U-всплесков с частотами поворота в диапазоне между 10 и 25 МГц. Обнаружена гармоническая структура J-всплесков в виде J_b–J пар, аналогичных парам всплесков ШЬ–Ш типа. Среднее отношение частот гармоник оказалось равным 1.8. Зарегистрирована группа J-всплесков с необычной скоростью дрейфа частот поворота (TFD) –2 кГц/с, что соответствует скорости подъема корональной арки около 60 км/с. Арки с такой скоростью подъема были обнаружены также коронографом SOHO/LASCO в видимом свете. Приведены динамические спектры необычных U- и J-всплесков. По динамическому спектру U-всплеска с хорошо развитыми восходящей и нисходящей ветвями построена упрощенная модель корональной арки в виде полуокружности. На основании этой модели найдены линейная скорость перемещения источника вдоль магнитной арки, высота точки поворота в короне, геометрические размеры арки.

Введение

Так называемые солнечные всплески U-типа (U-всплески) получили свое название из-за формы динамических спектров, напоминающей перевернутую букву “U” на плоскости частота – время. Впервые они были классифицированы как отдельный тип спорадической составляющей радиоизлучения Солнца в 1958 г. Максвеллом и Сварупом [1] на метровых волнах. Позже они были зарегистрированы и на более низких частотах [2]. Сузуки и Далк [3] сообщали, что U-всплески наиболее

часто наблюдаются в диапазоне частот от 20 до 200 МГц, а Леблан и Хойос [4] уточнили, что при наблюдениях в диапазоне 25 ÷ 75 МГц U-всплески имели преимущественно частоты поворота между 25 и 30 МГц. По данным Ашвандена и др. [5], на более высоких частотах (до 1.4 ГГц) эти всплески чрезвычайно редки. В то же время Стоун и Фэйнберг [6] обнаружили U-всплеск на частотах 5 ÷ 0.7 МГц. Регистрация данного типа всплесков, как и всех остальных известных типов всплесков, проводилась обычно с помощью фильтровых приемников или свип-анализато-

ров с записью данных на бумагу или фото-пленку. Последний факт существенно ограничивал возможность более детального анализа свойств спорадического солнечного радиоизлучения.

Основная отличительная особенность U-всплесков – их динамический спектр, состоящий из двух ветвей: восходящей и нисходящей. Восходящая ветвь характеризуется относительно быстрым частотным дрейфом от высоких частот к низким. Фактически восходящая ветвь напоминает хорошо известные всплески III типа. Всплески III типа интерпретируются в рамках плазменной модели радиоизлучения, согласно которой пучки субрелятивистских электронов, распространяясь вдоль открытых силовых линий магнитного поля Солнца, возбуждают плазменные ленгмюровские волны на локальной плазменной частоте, которые, в свою очередь, трансформируются в электромагнитные волны на близкой частоте. U-всплески также связывают с пучками субрелятивистских электронов, которые, в отличие от всплесков III типа, распространяются вдоль закрытых силовых магнитных линий, так называемых магнитных арок, что и определяет, по сути, форму их динамических спектров. В то время как скорость частотного дрейфа всплесков III типа зависит от частоты как $df/dt = -0.01f^{1.84}$ (f – частота в МГц) [7] в широком диапазоне частот, U-всплески не следуют этому закону. Их скорости дрейфа уменьшаются намного быстрее при приближении к так называемой частоте (или точке) поворота. На частоте поворота скорость дрейфа обращается в нуль, а затем изменяет свой знак на положительный, формируя нисходящую ветвь всплеска. В настоящее время общепризнанной является точка зрения, что уменьшение скорости частотного дрейфа и изменение ее знака вызваны изменением направления движения потока электронов при перемещении его вдоль замкнутых магнитных силовых линий в солнечных магнитных арках.

Считается [5, 8], что скорость потока электронов, ответственных за U-всплески, постоянна и равна приблизительно $(0.1 \div 0.2)c$, где c – скорость света, что несколько меньше скорости электронов, с которыми связывают всплески III типа. Принимая во внимание частоты,

на которых наблюдаются всплески U-типа, можно полагать, что высоты арок могут изменяться от 130000 км [5] до приблизительно 35 радиусов Солнца [6].

U-всплески наблюдаются гораздо реже, чем обычные всплески III типа [5]. Фоккер [8] предположил, что это может быть связано с тем, что в большинстве своем магнитные арки невысоки и не достигают плазменных уровней, на которых возможна генерация всплесков III типа и U-всплесков. Отсутствие высоких арок, в свою очередь, объясняется действием нагретого коронального вещества, которое стремится разорвать замкнутые линии [9].

Чаще U-всплески регистрируются как одиночные события и реже встречаются в виде групп всплесков. В группу обычно входит до десяти всплесков общей продолжительностью около 2 ÷ 3 мин. Вместе с тем родственные всплески III типа могут образовывать группы длительностью от нескольких часов до нескольких суток.

Среди групп U-всплесков встречаются такие, в которых частота поворота всех входящих в группу всплесков остается неизменной в течение всего времени существования группы. В предположении, что все всплески одной группы генерируются пучками электронов, движущихся вдоль одной и той же магнитной арки, этот факт указывает на то, что корональные арки в данном случае являются стабильными во времени образованиями. В других группах частота поворота уменьшается у каждого последующего U-всплеска. Такие группы получили название дрейфующих U-всплесков [4]. Если связывать дрейфующие U-всплески одной группы с одной и той же магнитной аркой, можно говорить о дрейфе частот поворота, определенном в [10] как “TFD” (Turning Frequency Drift), который характеризует скорость подъема магнитной арки в солнечной короне.

U-всплески с хорошо развитой формой динамического спектра наблюдаются редко. Как правило, нисходящая ветвь всплесков менее интенсивна, размыта или отсутствует вовсе. Эта особенность может быть связана с различной эффективностью взаимодействия пучка электронов с плазмой при распространении его в направлении к и от Солнца [8], с рас-

фокусированием пучка вследствие “расширения” направляющей магнитной трубки [11] или вследствие рассеивания пучка электронов на неоднородностях, создаваемых в верхней точке арки корональными лучами* [12].

В случае, когда видны только восходящая ветвь и окрестности частоты поворота, всплески обычно называют J-всплесками [8].

Иногда могут наблюдаться пары гармонически связанных U-всплесков. Согласно данным, приведенным в [2], гармоническое соотношение в таких парах заключено в довольно широких пределах, от 1.4 до 2.2, и в большинстве случаев меньше 2. Кроме того, оказалось, что мгновенное отношение частот гармонически связанных пар в точке поворота меньше, чем на любой из ветвей всплеска.

В декаметровом диапазоне U-всплески обычно ассоциируются со всплесками III и II типа, а в метровом еще и со всплесками I типа [10]. Леблан и Хойос отмечали, что в диапазоне 25 ÷ 75 МГц группы U-всплесков наблюдаются преимущественно в пределах 50 мин до или после всплесков II типа и соответствующих им выбросов корональной массы – CME (coronal mass ejection) [4].

В настоящей работе сообщается о результатах наблюдений U- и J-всплесков в диапазоне частот 10 ÷ 30 МГц на радиотелескопе УТР-2. Обсуждаются их свойства на основе анализа 50 таких всплесков, зарегистрированных в течение 2003–2004 гг.

Аппаратура

Все наблюдения выполнялись при помощи антенны “Север” радиотелескопа УТР-2, что обеспечило широкий и плоский луч размером $15^\circ \times 1^\circ$ на частоте 25 МГц. Эффективная площадь антенны в этом случае составляла около 50000 м².

Радиоизлучение регистрировалось 60-канальным фильтровым спектрометром. Все 60

*Корональный луч (streamer) – вытянутая в радиальном от Солнца направлении плазменная неоднородность с повышенной в несколько раз плотностью, ограниченная близкорасположенными силовыми магнитными линиями противоположной направленности [13].

узкополосных приемников были настроены в диапазоне частот 10 ÷ 30 МГц с интервалом между соседними частотами приблизительно 300 кГц. Точная подстройка частоты каждого канала позволила очистить спектр от интенсивных узкополосных помех в низкочастотной части рабочей полосы телескопа (10 ÷ 20 МГц). Данные оцифровывались с помощью многоканального (коммутируемого) 16-разрядного АЦП. Динамический диапазон системы по уровням калибровки составлял 42 дБ с минимальным уровнем, соответствующим $10^{-23} \text{ Вт} \cdot \text{ м}^{-2} \cdot \text{ Гц}^{-1}$, или 0.1 с. е. п. ($1 \text{ с. е. п.} = 10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{ м}^{-2} \cdot \text{ Гц}^{-1}$).

Наблюдения и обсуждение

Благодаря использованию антенны с большой эффективной площадью (до 50000 м²) и высокочувствительной аппаратуры со спектральным анализом в широкой непрерывной полосе частот, впервые на радиотелескопе УТР-2 были зарегистрированы и идентифицированы солнечные U-всплески. Это первый случай наземного наблюдения U-всплесков с частотами поворота между 10 и 25 МГц, свидетельствующий о существовании корональных арок с высотами до 3 радиусов Солнца.

За период наблюдений в 2003–2004 гг. для анализа были отобраны всего 50 всплесков, из которых только 7 могли быть с уверенностью идентифицированы как U-всплески. Остальная часть всплесков не имела сколько-нибудь заметной нисходящей ветви. Во всех случаях динамические спектры U-всплесков имели асимметричную форму с более короткой нисходящей ветвью. Примеры полностью сформированных U-всплесков представлены на рис. 1, а, б.

Как уже было отмечено, U-всплески наблюдаются намного реже, чем обычные всплески III типа. При идентификации U-всплесков основной критерий отбора заключался в наличии области на динамическом спектре всплеска, где скорость частотного дрейфа начинает быстро уменьшаться, обращаясь в нуль в точке поворота.

Частоты поворота анализируемых U-всплесков были практически равномерно распределены в диапазоне от 10 до 22 МГц (рис. 2). Имелась небольшая тенденция к уменьшению чис-

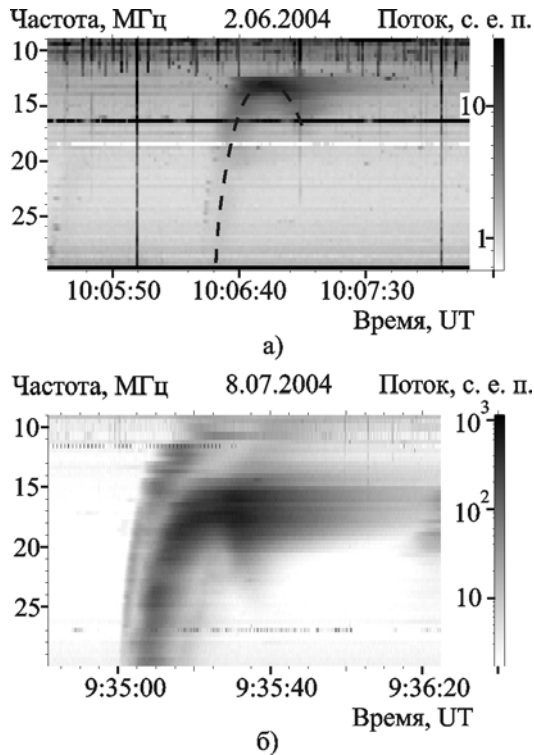


Рис. 1. Динамические спектры U-всплесков с развитой нисходящей ветвью, зарегистрированных 2 июня 2004 г. (а) и 8 июля 2004 г. (б)

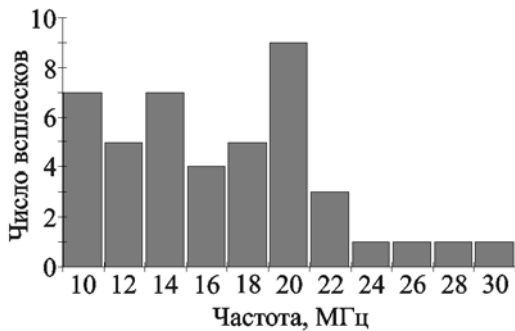


Рис. 2. Распределение U и J всплесков по частоте поворота

ла всплесков с более высокими частотами поворота – приблизительно 90 % всех обработанных U-всплесков имели частоту поворота ниже 24 МГц.

Восходящие ветви U- и J-всплесков вдали от точки поворота по временным и частотным

характеристикам были очень близки к хорошо известным всплескам III типа. Длительности всплесков изменялись от 1.5 до 13 с со средним значением 6 с, а абсолютные скорости дрейфа восходящих ветвей U- и J-всплесков составили $1.8 \div 4.5$ МГц/с, что в целом соответствует характеристикам всплесков III типа в декаметровом диапазоне (скорости дрейфа $2 \div 4$ МГц/с, длительности $4 \div 10$ с) [14, 15].

Среди всех зарегистрированных нами U-всплесков в двух случаях (оба случая 15 августа 2004 г.) абсолютные скорости дрейфа восходящих и нисходящих ветвей на фиксированной частоте были приблизительно равны, в двух случаях (оба 2 июня 2004 г.) восходящая ветвь дрейфовала как минимум в два раза быстрее нисходящей, и в оставшихся трех случаях (8 июля, 16 июля и 29 августа 2004 г.) ситуация была обратной.

Отсутствие жесткого соответствия абсолютных скоростей частотных дрейфов двух ветвей одного и того же всплеска может объясняться либо несимметричностью магнитных арок, например, вследствие перезамыкания силовых линий между различными магнитными структурами [16], либо наличием плазменных неоднородностей в области существования арки.

Группы J-всплесков

Следует отметить, что если U-всплески наблюдались исключительно как одиночные события, то J-всплески появлялись и как одиночные события, и в группах по 3–4 всплеска.

Группа из трех дрейфующих J-всплесков была зарегистрирована 26 июня 2004 г. (рис. 3). Период следования всплесков в группе не был постоянным: второй всплеск наблюдался через 90 с после первого, а третий – через 70 с после второго. Всплески в группе отличались высокой степенью подобия, что иллюстрируется наложением контура, очерченного вокруг динамического спектра первого всплеска группы (12:10:30 UT) на динамические спектры второго и третьего всплесков группы (рис. 3).

Характерной особенностью этой группы J-всплесков является ее необычный TFD. Считается, что TFD дрейфующих J-всплесков очень близок к частотному дрейфу всплесков

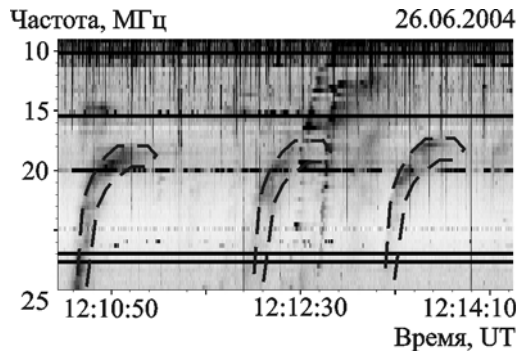


Рис. 3. Группа J-всплесков, зарегистрированная 26 июня 2004 г.

II типа и соответствует линейным скоростям СМЕ в короне ($600 \div 700$ км/с) [4]. Зарегистрированная нами группа всплесков имела TFD около -2 кГц/с. В рамках плазменной модели излучения такой частотный дрейф соответствует линейной скорости перемещения источника всего 60 км/с, что на порядок меньше скорости СМЕ и ударных волн.

В настоящей работе оценки линейных скоростей и гелиовысот выполнены в рамках модели короны Ньюкирка.

Во время регистрации указанной группы J-всплесков на солнечном диске имелись две биполярные активные области: NOAA 10635 и NOAA 10637. Диск коронографа LASCO-C2 закрывает области Солнца, соответствующие гелиовысотам от 0 до $2R_{\odot}$ (R_{\odot} – радиус Солнца, равный 695 990 км). То есть арки, с которыми ассоциировались обсуждаемые J-всплески, могли быть также обнаружены в оптическом диапазоне. Одновременно с регистрацией группы J-всплесков 26 июня 2004 г. над заходящей активной областью NOAA 10635 наблюдалось большое количество арочных структур с высотами от $2R_{\odot}$ до $3.5R_{\odot}$ (отмечены стрелками на рис. 4). Судя по времени существования и по наблюдаемым высотам эти арки могли содержать источники зарегистрированных J-всплесков.

По последовательности изображений короны, полученной LASCO-C2 (рис. 4), можно легко определить, что эти арки поднимаются в короне со средними скоростями в картинной плоскости около 40 км/с. Такая скорость подъема бу-

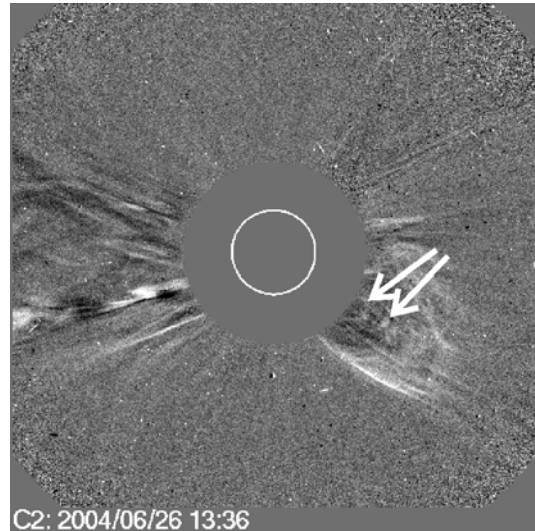


Рис. 4. Арки в короне Солнца 26 июня 2004 г. по данным SOHO/LASCO-C2

дет приводить к частотному дрейфу в динамическом спектре около 1 кГц/с, что близко к TFD рассматриваемой группы J-всплесков.

Обычно подобные арочные структуры наблюдаются во время и после СМЕ. В частности 26 июня 2004 были зарегистрированы СМЕ в 7:48 UT и 13:48 UT. Все зарегистрированные в этот день арочные структуры по отношению к сопутствующим СМЕ являлись квазистационарными – скорости их подъема по данным того же коронографа лежали в диапазоне от 20 до 60 км/с, притом что скорости зарегистрированных в этот день СМЕ в среднем равнялись 300 км/с.

Некоторое несоответствие значений скоростей, полученных при наблюдениях в оптическом и радиодиапазоне, может быть объяснено тем, что коронограф позволяет получить, по сути, проекцию реальной скорости арки на картинную плоскость, в то время как радионаблюдения позволяют определять радиальную скорость источника.

Гармоническая структура

В редких случаях были найдены гармонически связанные пары всплесков J-типа. Об этом свойстве J-всплесков в диапазоне

25 ÷ 200 МГц сообщали многие авторы [2, 4]. Необходимо, однако, отметить, что в упомянутых работах сообщалось только об обычных гармонических (F–H) парах. В наших наблюдениях были обнаружены пары J-всплесков, аналогичные парам IIb–III типа. В такой паре компонента на основной гармонике плазменной частоты (F-компонента) состоит из цепочки узкополосных стриа* всплесков, в то время как компонента на второй гармонике плазменной частоты (H-компонента) не имеет тонкой частотной структуры. Примеры таких “Jb–J” пар представлены на рис. 5.

Наблюдения гармонически связанных пар U- и J-всплесков представляют несомненный интерес для изучения гармонической структуры солнечного радиоизлучения вообще. При исследовании гармонически связанных пар всплесков III типа, имеющих большие скорости частотного дрейфа, различие в групповых скоростях излучения первой и второй гармоник либо канализированное распространение волн в короне могут приводить к временной задержке одного элемента F–H пары относительно другого, а следовательно, к ошибкам в определении реального гармонического соотношения. В то же время пары J-всплесков, имея области с нулевым частотным дрейфом, дают истинное значение гармонического соотношения даже при наличии временного сдвига между элементами пары.

Отношение мгновенных частот всплесков на 1-й и 2-й гармониках лежало в диапазоне 1.5 ÷ 2 и в основном было меньше 2, что согласуется с данными, приведенными Стюартом [2]. Среднее значение гармонического соотношения по выборке из 6 пар всплесков оказалось равным 1.8. Длительности всплесков основной гармонике (F) изменялись от 1.5 до 3.8 с со средним значением 3 с по выборке из 10 всплесков.

Всплески на второй гармонике (H) имели большие длительности – от 6 до 13 с со средней

*Стриа (stria) всплески – короткие (около 1 с) узкополосные (30 кГц) всплески солнечного радиоизлучения, имеющие на динамическом спектре вид горизонтальных “штрихов” [13].

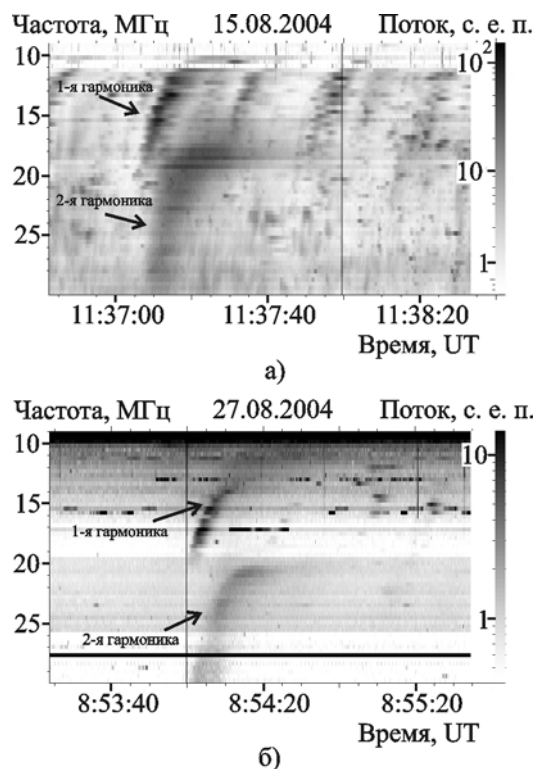


Рис. 5. F–H пары “Jb–J” типа на фоне бури (а) и изолированная пара (б)

величиной 9.3 с по выборке из 23 всплесков. Необходимо отметить, что вышесказанное верно только для начальных участков восходящих ветвей U- и J-всплесков, т. е. достаточно далеко от частоты поворота. Скорости дрейфа U- и J-всплесков на частотах вдали от точки поворота также близки к скоростям дрейфа всплесков III типа. На частоте 25 МГц средние значения скорости дрейфа F и H компонентов составили –4.5 МГц/с и –1.8 МГц/с соответственно. Для всплесков III типа в декаметровом диапазоне длин волн согласно [14, 15] скорости дрейфа изменяются в пределах от –2 до –4 МГц/с, а длительности – от 4 до 10 с.

Характерной особенностью большинства зарегистрированных J- и U-всплесков является то, что максимальный поток всплеска соответствует области точки поворота частоты (рис. 1, а, рис. 3, рис. 5, а).

Необычные всплески U- и J-типов

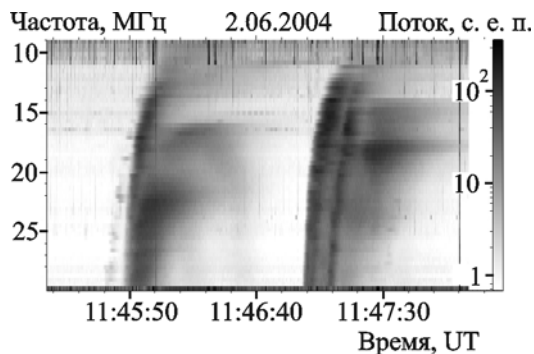
В очень немногих случаях наблюдались необычные, сложные разновидности U-всплесков. Один из них зарегистрирован 2 июня 2004 г. в 11:46 UT (см. рис. 6, а). На частоте 30 МГц всплеск представлял собой обычный всплеск III типа с частотным дрейфом примерно -3 МГц/с и длительностью 8.2 с. Но на более низких частотах этот всплеск “расщепился” как минимум на два отдельных U-всплеска с частотами поворота 23 и 18 МГц и один всплеск, который, возможно, представлял собой всплеск Jb-типа с частотой поворота ниже 10 МГц либо являлся обычным всплеском IIIb типа. Хотя гелиографические наблюдения в этом частотном диапазоне не проводились, такое событие нельзя считать простой суперпозицией нескольких отдельных всплесков.

Карубалос и др. [12] предположили, что U- и J-всплески генерируются в окрестностях

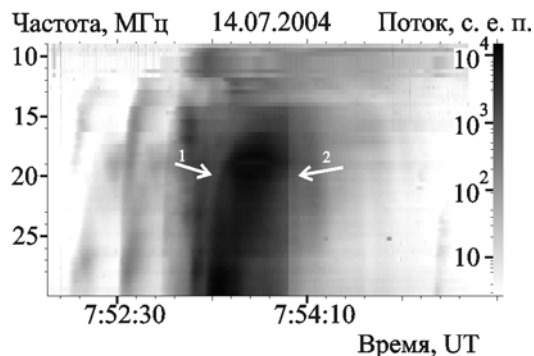
нейтральной плоскости корональных лучей. Они считали, что в зависимости от области инжекции электронов могут формироваться либо обычные всплески III типа (инжекция в области с открытыми магнитными силовыми линиями), либо U-всплески (инжекция в области с закрытыми линиями), либо совмещенные всплески III типа и U-типа, когда область инжекции захватывает как открытые, так и закрытые силовые линии. Аналогичная идея может быть использована для объяснения расщепленного U-всплеска (рис. 6, а) с той лишь разницей, что в данном случае область инжекции может захватывать как открытые, так и несколько закрытых силовых линий магнитных арок, формируя как всплеск III типа, так и несколько U-всплесков с разными частотами поворота.

Другой интересный случай наблюдался 14 июля 2004 г. в 7:53:20 UT. Сложный всплеск имеет вид нескольких вложенных друг в друга U-всплесков (рис. 6, б).

На частоте 20 МГц скорости частотного дрейфа внутренней арки равнялись -0.6 МГц/с (точка 1) и $+1.5$ МГц/с (точка 2). Восходящие и нисходящие ветви всплеска отличались высокими абсолютными скоростями частотного дрейфа – до 6 МГц/с.



а)



б)

Рис. 6. Необычные U-всплески: а) – расщепленный U-всплеск, б) – U-всплеск с “вложенными арками”

Модель корональной арки

По имеющимся динамическим спектрам и известным моделям распределения плотности корональной плазмы, учитывая, что механизм излучения плазменный, можно оценить высоты и поперечные размеры соответствующих U-всплескам магнитных арок. Для оценки был выбран один из лучших представителей этого типа всплесков, зарегистрированный 2 июня 2004 г. (рис. 1, а). В качестве модели короны выбрана модель Ньюкирка, согласно которой зависимость плотности корональной плазмы от гелиовысоты имеет вид

$$n_e = 4.2 \cdot 10^4 \cdot 10^{(4.32/r)}, \quad (1)$$

где n_e – плотность плазмы, см^{-3} , а r – гелиоцентрическая высота в радиусах Солнца.

Локальная плазменная частота f_{pe} (в Гц) равна

$$f_{pe} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} \approx 9 \times 10^3 \sqrt{n_e}, \quad (2)$$

где m_e и e – масса и заряд электрона соответственно. Подставляя (1) в (2) имеем зависимость плазменной частоты, а следовательно, и частоты радиоизлучения (в МГц) от гелио-высоты в виде:

$$f = 1.82 \cdot 10^{(2.16/r)}. \quad (3)$$

Решая (3) относительно r получаем зависимость высоты источника от частоты излучения:

$$r = \frac{2.16}{\lg f - 0.26},$$

где f – частота излучения, МГц.

Схематически динамический спектр этого всплеска может быть представлен в виде, показанном на рис. 7, а. В данном случае времена $t_1 = 0$, $t_2 = 10.4$ с, $t_3 = 20.4$ с, $t_4 = 32.4$ с, а соответствующие им частоты (гелиоцентрические высоты) $f_1 = 30$ МГц ($h = 1.7R_\odot$), $f_2 = 17$ МГц ($h = 2.25R_\odot$), $f_3 = 14$ МГц ($h = 2.5R_\odot$). Легко видеть, что временные отрезки 1–2 (восходящая ветвь), 2–3 и 3–4 (собственно область частоты поворота) практически одинаковы (10.4, 10 и 12 с соответственно).

В предположении постоянства скорости источника излучения это говорит о том, что соответствующие этим отрезкам линейные расстояния также одинаковы.

На рис. 7, а точки 1, 2, 3 и 4 соответствуют одноименным точкам на рис. 7, б. Пунктирными линиями на рис. 7 указаны плазменные уровни, отвечающие частотам f_1 , f_2 и f_3 на рис. 7, а.

Предположим, что арка, связанная с наблюдаемой нами частью динамического спектра на рис. 1, а, представляет собой полуокружность (рис. 7, б) с центром в точке, расположенной на гелио высоте, соответствующей частоте f_1 на динамическом спектре. При этом

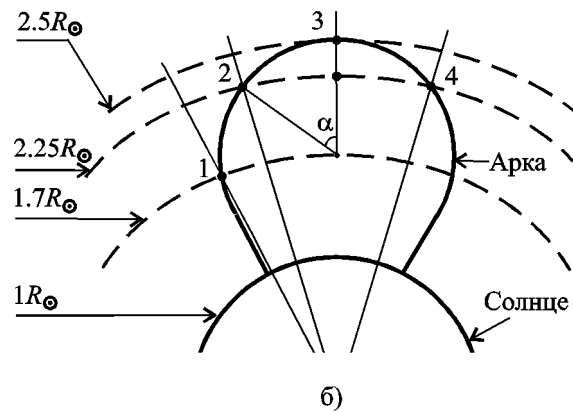
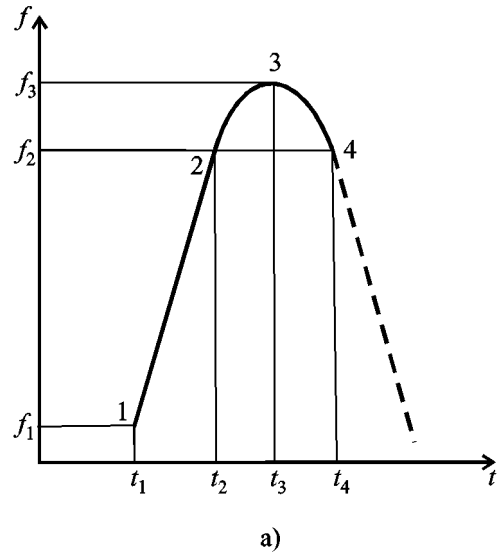


Рис. 7. Схематическое представление динамического спектра U-всплеска, наблюдавшегося 2 июня 2004 г. (а) и соответствующей ему корональной арки (б)

радиус окружности будет определяться расстоянием между высотами, соответствующими частотам f_1 и f_3 (рис. 7, а, б). В таком случае высота центра полуокружности будет равна $1.7R_\odot$, а ее радиус – $0.8R_\odot$.

При такой конфигурации угол α равен примерно 45° . По известному времени пролета между точками 2 и 4 (22 с) и вычисленному линейному расстоянию между этими точками ($5.5 \cdot 10^9$ см) была оценена скорость источника. Она составила $0.18c$, что согласуется с утверждениями, в частности в [5], о том,

что скорости источников U-всплесков несколько меньше скоростей источников обычных всплесков III типа. С использованием полученных параметров петли в рамках модели короны Ньюкирка (3) был просчитан динамический спектр U-всплеска и наложен на реальный динамический спектр (пунктирная кривая на рис. 1, а).

Следует отметить, что, очевидно, конфигурация реальной арки отличается от приведенной упрощенной конфигурации в силу как минимум двух причин.

1. Время пролета источником отрезков 2–3 и 3–4 отличается (10 с и 12 с соответственно), что может говорить либо об асимметричности арки, либо о замедлении источника в точке поворота. Это несоответствие нисходящих ветвей смоделированного и реального всплесков хорошо заметно на рис. 1, а.

2. Обнаруженные в видимом свете коронографом LASCO-C2 арки, предположительно связанные с зарегистрированной группой U-всплесков, имеют поперечный размер $(0.8 \div 1)R_{\odot}$, в то время как модельная оценка этого размера по динамическому спектру всплеска 2 июня 2004 г. дает $1.2R_{\odot}$. Одной из причин этого несоответствия может быть эллиптичность арки. Для всплеска 2 июня 2004 г. для получения поперечного размера арки $0.8R_{\odot}$ соотношение осей эллипса арки должно быть 1.5.

Заключение

В работе приведены результаты первых наблюдений солнечных U- и J-всплесков в частотном диапазоне от 10 до 30 МГц на радиотелескопе УТР-2. Регистрация таких всплесков является свидетельством существования магнитных арок с гелиоцентрическими высотами $2 \div 3$ радиуса Солнца. Показано, что появление данного типа всплесков в этом диапазоне длин волн является редким событием – за 2 года наблюдений отобрано всего 50 всплесков, из которых только 7 могли классифицироваться как U-всплески, а остальные не имели сколько-нибудь заметной нисходящей ветви. Кроме этого, на динамических спектрах всех зарегистрированных U-всплесков нисходящие ветви имели

намного меньшее время жизни, нежели ветви восходящие. Все это говорит об ускоренном затухании излучения источника при его движении по магнитной арке в сторону Солнца.

Не было выявлено устойчивой взаимосвязи между абсолютными скоростями дрейфа восходящей и нисходящей ветвей на фиксированной частоте.

Обнаружена гармоническая структура этих всплесков. Показано, что среднее значение гармонического соотношения в парах равно 1.8. Впервые также обнаружены пары Jb–J всплесков, аналогичные парам IIIb–III всплесков.

Обнаружены группы J-всплесков с необычными значениями TFD – $1 \div 2$ кГц/с, которые соответствуют линейным скоростям $40 \div 60$ км/с и близки к значениям, полученным в оптическом диапазоне.

Дальнейшее изучение свойств U- и J-всплесков в декаметровом диапазоне длин волн может служить дополнительным инструментом диагностики магнитных структур на высотах $2 \div 3$ радиуса Солнца, не всегда доступных для изучения в оптическом диапазоне.

Работа была выполнена частично в рамках INTAS проекта 03-5727.

Литература

1. Maxwell A., Swarup G. A new spectral characteristic in solar radio emission // Nature. – 1958. – Vol. 181. – P. 36.
2. Stewart R. T. Harmonic ratios of inverted-U Type III bursts // Sol. Phys. – 1974. – Vol. 39. – P. 451-458.
3. Suzuki S., Dulk G. A. Bursts of Type III and Type V // Solar radiophysics: Studies of emission from the sun at metre wavelengths. – Cambridge and New York: Cambridge University Press, 1985. – P. 289-332.
4. Leblanc Y. and Hoyos M. Storms of U-bursts and the stability of coronal loops // Astron. Astrophys. – 1985. – Vol. 143. – P. 365-373.
5. Aschwanden M. J., Bastian T. S., Benz A. O. and Brosius J. W. Decimetric solar type-U bursts: VLA and PHOENIX observations // Astrophys. J. – 1992. – Vol. 391. – P. 380-392.
6. Stone R. G., Fainberg J. A. U-Type solar radio bursts originating in the outer corona // Sol. Phys. – 1971. – Vol. 20. – P. 106-111.
7. Alvarez H. and Haddock F. T. Solar wind density model from km-wave Type III bursts // Sol. Phys. – 1973. – Vol. 29, No.1. – P. 197-209.

8. Fokker A. D. Trajectories followed by U-like solar radio bursts // *Sol. Phys.* – 1970 – Vol. 11. – P. 92-103.
9. Kuperus M. and Tandberg-Hanssen E. The Nature of Quiescent Solar Prominences // *Sol. Phys.* – 1967. – Vol. 2. – P. 39-48.
10. Leblanc Y., Poquerusse M., and Aubier M. G. Solar – type U bursts and coronal transients // *Astron. Astrophys.* – 1983. – Vol. 123. – P. 307-315.
11. Smith D. F. On the Relative Intensity of Second Branches of U-Like Solar Radio Bursts // *Sol. Phys.* – 1970. – Vol. 13, №2. – P. 444-447.
12. Caroubalos C., Couturier P., and Prokakis T. A U-Like radio bursts observed with high space-time resolution // *Astron. Astrophys.* – 1973. – Vol. 23. – P. 131-138.
13. Солнечная и солнечно-земная физика. Иллюстрированный словарь терминов / Под ред. А. Бруцека и Ш. Дюрана. – М.: Мир, 1980. – 254 с.
14. Abranin E. P., Bazelian L. L., Rapoport V. O., Tsybko, Ia. G. Variations of type III burst parameters during a decametric solar storm // *Sol. Phys.* – 1980. – Vol. 66. – P. 333-346.
15. Абрагин Э. П., Базелян Л. Л., Цыбко Я. Г. Устойчивость параметров декаметровых всплесков III типа в 11-летнем цикле солнечной активности. Скорости частотного дрейфа радиовсплесков // *Астрономический журнал.* – 1990. – Т. 67, №1. – С. 141-150.
16. Démoulin P., Klein K.-L., Goff C. P., van Driel-Gesztelyi L., Culhane J. L., Mandrini C. H., Matthews S. A., Harra L. K. Decametric N Burst: A Consequence of the Interaction of Two Coronal Mass Ejections // *Sol. Phys.* – 2007. – Vol. 240. – P. 301-313.

Сонячні U- та J-сплески на декаметрових хвилях

**В. В. Доровський, В. М. Мельник,
О. О. Коноваленко, Х. О. Рукер,
Е. П. Абрагин, А. Лекашо**

Наводяться результати перших спостережень сонячних U- та J-сплесків на радіотелескопі УТР-2 у декаметровому діапазоні довжин хвиль у 2003–2004 рр. За вказаний період було зареєстровано понад 50 J-сплесків і лише 7 U-сплесків. Це перший випадок наземного спостереження U-сплесків з частотами повороту в діапазоні між 10 та 25 МГц. Вперше зареєстрована гармонічна структура J-сплесків у вигляді Jb–J пар, аналогічних парам сплесків IIIb–III типу. Середнє відношення частот гармонік виявилось рівним 1.8. Зареєстрована група J-сплесків з незвичайною швид-

кістю дрейфу частот повороту (TFD) –2 кГц/с, що відповідає швидкості підйому корональної арки близько 60 км/с. Арки з такою швидкістю підйому були зареєстровані також коронографом SOHO/LASCO у видимому світлі. Наведено динамічні спектри незвичайних U- та J-сплесків. За динамічним спектром U-сплеску з добре розвиненими прямою та зворотною гілками була побудована спрощена модель корональної арки у вигляді півкола. На основі цієї моделі знайдені лінійна швидкість переміщення джерела уздовж магнітної арки, висота точки повороту в короні, геометричні розміри арки.

Solar U- and J-Bursts at the Decameter Waves

**V. V. Dorovskyy, V. N. Melnik,
O. O. Konovalenko, H. O. Ruker,
E. P. Abranin, and A. Lecacheux**

The first solar U- and J-bursts observed with the UTR-2 radiotelescope at the decameter wavelengths in 2003–2004 are reported. During that period more than 50 J-bursts and only 7 U-bursts were recorded. It is the first case of ground based observations of J- and U-bursts with turning frequencies ranging between 10 and 25 MHz. The harmonic structure of J-bursts in the form of Jb–J pairs similar to well known Type IIIb–III pairs was first found. The mean harmonic ratio appeared to be 1.8. Also a group of J-bursts with unusual Turning Frequency Drift (TFD) of –2 kHz/s was detected. Such TFD corresponds to the coronal loop elevation velocity of about 60 km/s. Coronal loops with similar elevation velocities were also detected by SOHO/LASCO coronagraph in white light. The dynamic spectra of unusual U- and J-bursts are shown. Simplified model of the coronal loop in the form of semi-circle was created on the base of the U-burst dynamic spectrum and the Newkirk coronal density model. With this loop model the linear velocity of the source along the loop, the height of the turning frequency point and the geometrical size of the loop were calculated.