

Солнечные S-всплески в декаметровом диапазоне длин волн

В. Н. Мельник, А. А. Коноваленко, Х. О. Рукер¹, В. В. Доровский,
Э. П. Абринин, А. Лекашо², А. С. Лонская³

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

*¹Институт космических исследований Австрийской Академии наук,
Грац, 8042, Шмидельитрассе, 6, Австрия*

²Париж-Мейдонская обсерватория, CNRS UMR 8644, Париж, Франция

*³Харьковский Национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина*

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2010 г.

Исследуются свойства S-всплесков, которые наблюдались в диапазоне частот $10 \div 30$ МГц на радиотелескопе УТР-2 в 2001 – 2002 гг. Для анализа были выбраны три бури таких всплесков, которые произошли 23 – 26 мая 2001 г., 13 – 16 июля и 27 – 30 июля 2002 г. Всего за эти дни было зарегистрировано более 800 всплесков. Всплески наблюдались всегда на фоне повышенной солнечной активности в декаметровом диапазоне длин волн. Это были обычные всплески III и IIIb типа, быстрые всплески III типа, дрейфующие пары, спайки. S-всплески наблюдались в дни, когда активная область, с которой они связаны, находилась вблизи центрального меридиана. Длительности всплесков в течение каждой бури оставались практически неизменными – 0.3 с во время бури 2001 г. и $0.4 \div 0.6$ с во время бурь 2002 г. Было обнаружено, что мгновенная частотная ширина увеличивается с частотой практически линейно. Скорость дрейфа S-всплесков изменяется с частотой по закону, близкому к найденному Макконнеллом для всплесков на более высоких частотах. Предложена модель генерации S-всплесков, основанная на предположении, что эти всплески генерируются за счет слияния ленгмюровских волн с быстрыми магнитозвуковыми волнами, фазовые и групповые скорости которых равны.

1. Введение

Эллис [1] выделил S-всплески в отдельный тип солнечных всплесков в 1969 г. Они были названы “бурями быстро дрейфующих всплесков”, так как появлялись во время бурь в виде групп всплесков и напоминали бури всплесков I типа. Позже Макконнелл [2] назвал их S-всплесками, где латинская буква S означала “короткий”. Эти всплески напоминают также юпитерианские S-всплески. Солнечные S-всплески представляют собой узкие треки

излучения, которые дрейфуют от высоких частот к низким. Как подчеркивали многие авторы [1, 3-7], они наблюдаются на фоне другой солнечной активности. Очень редко [4] у этих всплесков отмечался неправильный дрейф (от низких частот к высоким). S-всплески наблюдались на частотах $20 \div 80$ МГц с увеличением их числа при уменьшении частоты наблюдения [1, 4]. Отдельные всплески наблюдаются в полосе частот $5 \div 12$ МГц. Эти всплески довольно слабые – их потоки не

превышают, как правило, десятков с. е. п. ($1 \text{ с. е. п.} = 10^{-22} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$). Что касается длительности, то в литературе имеются различные данные. Так, у Эллиса [1] среднее значение длительности этих всплесков равно 0.6 с. Согласно Макконнеллу [4] их длительность изменяется от 20 до 150 мс со средним значением 50 мс. Доровский и соавторы [7], анализируя 200 S-всплесков, наблюдавшихся во время различных бурь на частотах $18 \div 30 \text{ МГц}$, пришли к заключению, что длительность S-всплесков изменяется в пределах $0.2 \div 0.7 \text{ с}$. В [7] было отмечено также, что в распределениях S-всплесков по длительности возможно имеется два максимума, при 0.3 и 0.5 с. Другим важным параметром этих всплесков является скорость частотного дрейфа. Она изменяется от 0.6 МГц/с [7] на частоте 20 МГц до 7 МГц/с на частоте 80 МГц [4]. Эти значения скорости дрейфа в несколько раз меньше скорости дрейфа обычных всплесков III типа в этом же диапазоне частот. Соответствующая линейная скорость источников S-всплесков в несколько раз больше тепловой скорости электронов в предположении, что излучение происходит на местной плазменной частоте. Приведенные в литературе значения мгновенной частотной полосы этих всплесков изменяются в широком диапазоне: 30 кГц у Эллиса [1] и от 100 кГц на 30 МГц до 500 кГц на 80 МГц у Макконнелла [4].

Очень редко, в 1 % случаев, S-всплески имеют квазипериодическую структуру в виде чередующихся светлых и темных полос – фринджей (fringe [3]), длительность которых около 50 мс, а расстояние между соседними фринджами около 100 кГц.

Для интерпретации S-всплесков обычно используется плазменный механизм излучения. Согласно ему быстрые частицы генерируют ленгмюровские волны, которые затем трансформируются в поперечные волны. Макконнелл [4] пришел к выводу, что излучение происходит на местной плазменной частоте. Мелроуз [8] считал, что S-всплеск – это дрейфующая пара на динамическом спектре которой видна только одна компонента. Это возможно в модели, в которой предполагается, что

источник дрейфующих пар распространяется в плазменных волноводах – дактах (duct), и его излучение, отраженное от двух стенок дакта, воспринимается как дрейфующая пара. Если же мы видим излучение только от одной стенки, то тогда регистрируется S-всплеск. В модели Зайцева и Злотник [9] генерация S-всплесков связана с быстрыми частицами со скоростями $(10 \div 20)v_{Te}$ (v_{Te} – тепловая скорость электронов), которые возбуждают плазменные волны в условиях двойного плазменного резонанса вблизи верхней гибридной частоты. Эти волны при рассеянии на ионах плазмы трансформируются в электромагнитные волны на частоте $f = f_{pe} = \omega_{pe}/2\pi$ ($\omega_{pe} = \sqrt{4\pi e^2 n/m}$ – плазменная частота) в полосе частот $\Delta f/f \approx (3/2)(\omega_{Be}/\omega)^2$ ($\omega_{Be} = eB/mc$ – электронная циклотронная частота).

Для объяснения явления фринджей используется идея фарадеевского вращения [3] или идея о прохождении источника излучения всплесков через неоднородную плазму, с помощью которой интерпретировались всплески IIIb типа [10].

В настоящей статье обсуждаются свойства S-всплесков, которые наблюдались на частотах $10 \div 30 \text{ МГц}$ на радиотелескопе УТР-2 в 2001–2002 гг. Обсуждается также возможная модель этих всплесков, объясняющая некоторые их свойства.

2. Радиотелескоп УТР-2 и регистрирующая аппаратура

В наблюдательной кампании 2001 – 2002 гг. были задействованы три секции антенны “север-юг” УТР-2. При такой конфигурации эффективная площадь антенны составила 30000 м², а размеры луча – $1^\circ \times 13^\circ$ (1° – склонение и 13° – прямое восхождение). Для регистрации использовался цифровой поляриметр (DSP), разработанный совместно с французскими и австрийскими учеными [11] и 60-канальный спектрометр. Временное разрешение обоих инструментов равнялось 10 мс. Частотное разрешение у DSP составляло 12 кГц, а у 60-канального спектрометра – 300 кГц. Чувствительность их была около 10^{-3} с. е. п. У DSP спектрометра полоса анализа была

18 ÷ 30 МГц, а у 60-канального – 10 ÷ 30 МГц. В 2001 г. использовался только DSP, а в 2002 г. оба прибора. Для нашего анализа были выбраны три бури, наблюдавшиеся 19–30 мая 2001 г., а также 9–22 июля и 23 июля – 3 августа 2002 г. Это дало возможность исследовать изменение свойств S-всплесков как в течение одной бури, так и на различных временных интервалах – месяцы и год. Наблюдения проводились, как правило, в течение 6 ч (3 ч до полудня и 3 ч после полудня), что соответствовало интервалу с 06:00 UT до 12:00 UT.

3. Наблюдения

Буря S-всплесков 23 – 26 мая 2001 г.

Активная область №194 (нумерация активных областей приводится согласно данным Пулковского обзора <http://www.gao.spb.ru/english/database/sd/daily_sun_charts.htm>, с которой были связаны S-всплески, появилась на восточной стороне солнечного диска 19 мая. S-всплески начали регистрироваться только 23 мая. 24 мая активная область пересекла центральный меридиан. Солнечная активность в декаметровом диапазоне была сильной во все время присутствия этой области на диске Солнца. В это время наблюдались бури всплесков III типа, всплески IIIb типа, дрейфующие пары, спайки. Общее число зарегистрированных S-всплесков составило 393. Так как время наблюдений каждый день было разным, чтобы сравнивать активность в различные дни, мы ввели частоту появления S-всплесков. Она несколько отличается в различные дни и изменяется в пределах 20 – 40 событий в час с минимальной частотой появления всплесков 24 мая. В другие дни этой бури наблюдались только единичные S-всплески.

Буря S-всплесков 13 – 16 июля 2002 г.

Во время этой бури S-всплески были связаны с активной областью №249, которая появилась на солнечном диске 9 июля. Она пересекла центральный меридиан 16 июля и зашла за западную часть лимба 22 июля. Как и в предыдущем случае, S-всплески наблюдались на фоне повышенной солнечной активности в декаметровом диапазоне длин волн.

Полное число S-всплесков в течение 13 – 16 июля равнялось 238. Для этой бури частота появления S-всплесков изменялась от 15 всплесков в час 16 июля (наименьшая частота появления) до 27 всплесков в час 15 июля. 13 и 14 июля; она составила около 20 всплесков в час.

Буря S-всплесков 27 – 30 июля 2002 г.

S-всплески наблюдались в дни, когда активная область №260 проходила через диск Солнца. Она появилась на восточной части лимба 23 июля и исчезла на западной 3 августа. Максимальная частота появления S-всплесков (27 всплесков в час) была зарегистрирована 28 июля, в день, когда эта активная область пересекала центральный меридиан. В другие 3 дня частота появления была всего 5 ÷ 13 всплесков в час. За четыре дня нами было зарегистрировано только 183 S-всплеска, наименьшее число за три периода наблюдений.

Из вышесказанного следует, что S-всплески наблюдались только в те дни, когда активная область находилась вблизи центрального меридиана. Исходя из того что они наблюдались только в течение 4 дней, можно прийти к заключению, что диаграмма направленности излучения S-всплесков не больше $40^\circ \div 50^\circ$ в направлении распространения электронов. Для сравнения напомним, что диаграмма направленности быстрых всплесков III типа [12], которые также наблюдаются в дни, когда активная область пересекает центральный меридиан, в несколько раз меньше, не более 12° .

4. Свойства декаметровых S-всплесков

На рис. 1 показаны S-всплески, которые наблюдались на радиотелескопе УТР-2 25 мая 2001 г. Видно, что эти всплески хаотически расположены на динамическом спектре на фоне другой декаметровой активности. Поскольку на такую особенность уже обращали внимание другие авторы (см., например, [1, 4, 7]), мы пришли к выводу, что она является общим правилом. По нашему мнению,

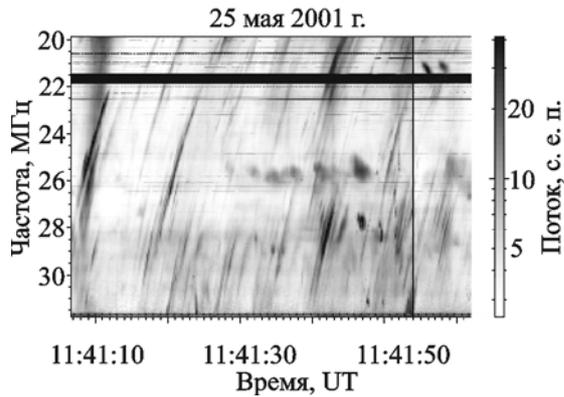


Рис. 1. Буря S-всплесков

присутствие других всплесков в декаметровом диапазоне является необходимым условием появления S-всплесков, и это должно учитываться при построении адекватной модели этих всплесков. Как уже отмечалось выше, S-всплески – это узкие треки излучения, у которых наблюдается дрейф от высоких частот к низким частотам. Значения скоростей дрейфа S-всплесков близки к скоростям дрейфа дрейфующих пар на соответствующих частотах. Но если у последних скорость дрейфа постоянна для каждой отдельной пары, то у S-всплесков скорость дрейфа увеличивается с частотой. Этим они похожи на всплески III типа. В то же время индивидуальные S-всплески наблюдаются в относительно узкой полосе частот, а большинство всплесков III типа регистрируется во всей полосе частот 10 ÷ 30 МГц.

Измерение параметров S-всплесков проводилось следующим образом. Весь частотный диапазон 10 ÷ 30 МГц был разбит на пять поддиапазонов по 4 МГц каждый. Для каждого из них определялось среднее значение соответствующего параметра и считалось, что такое значение имел всплеск на средней частоте соответствующего поддиапазона.

Длительность S-всплесков

Согласно нашим результатам S-всплески – это всплески с самой короткой длительностью в декаметровом диапазоне длин волн.

У других всплесков, таких, как всплески III типа, быстрые всплески III типа, всплески IIIb типа, дрейфующие пары, всплески типа страя, всплески II типа, всплески IV типа, длительность изменяется от 1 с до нескольких часов [13]. Временной профиль S-всплесков симметричный. На частотах 10 ÷ 30 МГц длительность всплесков составляет от 0.3 ÷ 0.4 с во время бури 2001 г. до 0.5 ÷ 0.7 с во время бури 2002 г. Такие длительности S-всплесков согласуются с данными Эллиса [1]. В распределениях средних значений длительностей по частоте для каждой бури имеется небольшой максимум, приходящийся на частоту 20 МГц. Это отличает их от всплесков III типа, для которых, как известно [14], длительность обратно пропорциональна частоте.

Частотная ширина S-всплесков

Имеющиеся данные в основном на более высоких, чем у нас частотах указывают на то, что мгновенная частотная ширина S-всплесков увеличивается с частотой. Мы детально рассмотрели этот вопрос не только для каждой бури, но и для каждого дня, когда регистрировалось заметное количество этих всплесков. Оказалось, что во всех случаях частотная ширина всплесков растет с частотой практически линейно. Ее значения не меняются в течение данной бури на данной частоте, но имеется небольшое изменение от бури к буре, что видно на рис. 2. Наклон кривых для всех бурь приблизительно одинаков и изменяется в узких пределах от 0.017 для бури 2001 г. до 0.022 для бури 2002 г., т. е.

$$\Delta f / f = 0.017 \div 0.022. \quad (1)$$

По-видимому, относительная частотная ширина S-всплесков является величиной, которая характеризует данную бурю.

Скорости частотного дрейфа S-всплесков

Мы проанализировали изменения скоростей частотного дрейфа всплесков в зависимости от частоты, дня наблюдения и бури. Оказалось, что скорость дрейфа зависит от частоты.

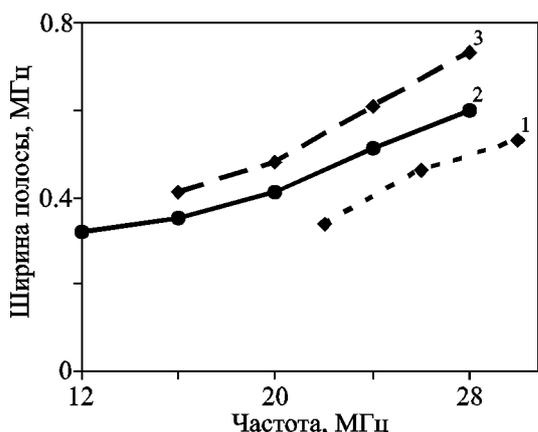


Рис. 2. Зависимость мгновенной частотной полосы S-всплесков от частоты для разных бурь 2001–2002 гг.: кривая 1 – 23–26 мая 2001 г., кривая 2 – 13–16 июля 2002 г.; кривая 3 – 27–30 июля 2002 г.

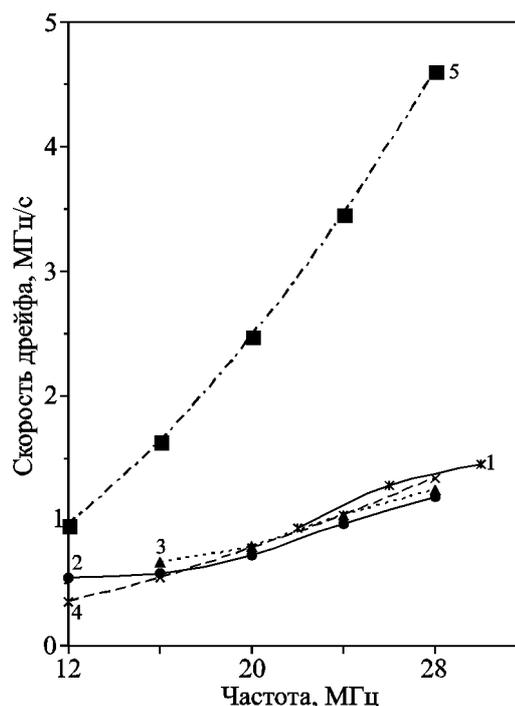


Рис. 3. Зависимости скорости дрейфа S-всплесков от частоты для различных бурь: кривая 1 – 23–26 мая 2001 г., кривая 2 – 13–16 июля 2002 г.; кривая 3 – 27–30 июля 2002 г.; кривая 4 – зависимость Макконнелла, рассчитанная по формуле (2); кривая 5 – эмпирическая зависимость Алвареца и Хэддока [15]

ты для разных бурь S-всплесков практически одинаково (рис. 3). Для каждой из бурь мы аппроксимировали получившиеся зависимости формулой

$$df/dt = -Cf^\alpha, \tag{2}$$

где C и α – постоянные, значения которых приведены в таблице. Видно, что показатель степени α заключен в пределах $1.2 \div 1.4$ и немного отличается от показателя степени в формуле Макконнелла [4]:

$$df/dt = -6.5 \cdot 10^{-3} \cdot f^{1.6}. \tag{3}$$

Отличие в коэффициенте C более значительное, в $2 \div 4$ раза. Тем не менее кривые, полученные нами, хорошо согласуются с зависимостью (3) Макконнелла, продолженной в область частот $10 \div 30$ МГц из области более высоких частот. На рис. 3 показана также эмпирическая зависимость Алвареца и Хэддока для всплесков III типа [15], более крутая, чем для S-всплесков. Видно, что скорости дрейфа S-всплесков отличаются от ско-

Таблица. Параметры зависимости (2) для различных бурь

Бури	C , МГц/с	α	Погрешность
23 – 26 мая 2001 г.	0.013	1.4	0.1
13 – 16 июля 2002 г.	0.014	1.34	0.07
27 – 30 июля 2002 г.	0.026	1.17	0.05

ростей дрейфа всплесков III типа в $2 \div 4$ раза. Это означает, что в предположении плазменного механизма излучения S-всплесков линейная скорость их источников во столько же раз меньше линейной скорости источников всплесков III типа, которая обычно принимается равной $(0.2 \div 0.3)c$. То есть источники S-всплесков движутся со скоростями равными приблизительно $(5 \div 9)v_{Te}$.

Потоки S-всплесков

Среди всплесков, наблюдаемых в декаметровом диапазоне, S-всплески имеют наименьшие потоки. Их значения в подавляющем большинстве случаев не превышают 20 с. е. п., хотя для отдельных всплесков могут достигать до 100 с. е. п. Распределения всплесков по потокам не зависят от дня наблюдения и бури. Наши попытки найти какую-либо определенную зависимость от частоты оказались безуспешными. Для некоторых дней на всех частотах поток всплесков практически одинаков, в другие дни он растет с частотой или уменьшается. Мы не нашли также какой-либо связи потока с положением активной области на диске Солнца.

Для получения яркостной температуры излучения оценим размер источников излучения всплесков исходя из наблюдаемой их длительности Δt и скорости источников излучения v_s . Принимая $\Delta t = 0.5$ с и $v_s = (3 \div 5) \cdot 10^9$ см/с, получаем характерный размер источника $l = (1 \div 3) \cdot 10^9$ см. Тогда для яркостной температуры излучения $T_{\text{эфф}} = S\lambda^2 / (2k\Omega)$ (S – поток, λ – длина волны, k – постоянная Больцмана, Ω – телесный угол) получаем значение $T_{\text{эфф}} = 10^{11} \div 10^{12}$ К для частотного диапазона 10 ÷ 30 МГц.

Полоса частот S-всплесков

Полоса частот, в которой наблюдается отдельный S-всплеск, ограничена несколькими мегагерцами, в отличие от всплесков III типа, которые регистрируются в полосе частот иногда в сотни мегагерц. Интересной особенностью является то, что среднее значение полосы в течение первых двух дней бурь 2001 г. и 2002 г. (13 – 16 июля) было около 4 и 3 МГц соответственно и только 2 МГц в другие два дня каждой бури. Для бури 27–30 июля 2002 г. средняя полоса частот в первые три дня была 2 МГц, а в последний день 30 июля больше 3 МГц.

Диапазон изменения полосы частот S-всплесков для каждой бури в основном составляет 6 ÷ 7 МГц, хотя в редких случаях доходит до 12 МГц. Ограниченность полосы частот, в которой регистрируются S-всплески, по-видимому, связана с ограниченностью высот, на которых имеются условия для генерации этих всплесков.

Появление S-всплесков на разных частотах

Мы рассмотрели также вопрос, на каких частотах S-всплески появляются наиболее часто. В диапазоне частот 10 ÷ 30 МГц наибольшее число всплесков наблюдается на частотах 24 ÷ 25 МГц, в полученных распределениях достаточно четко выделяется максимум (рис. 4). Затем число зарегистрированных всплесков быстро падает с уменьшением или увеличением частоты. Это справедливо для всех трех бурь. То есть можно утверж-

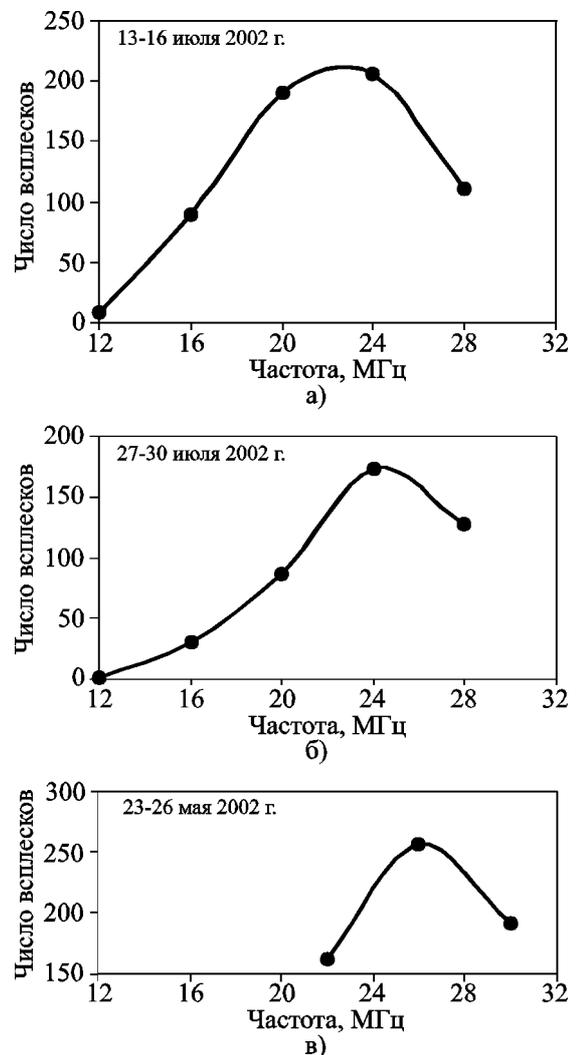


Рис. 4. Появление S-всплесков на различных частотах во время бурь 2002 г. (а), (б) и бури 2001 г. (в)

дать, что S-всплески – это преимущественно декаметровое явление.

5. Обсуждение

Как было сказано во Введении, имеются определенные трудности при интерпретации свойств S-всплесков в рамках предложенных моделей [8, 9].

Как видно из сравнения функциональных зависимостей скоростей дрейфа, длительностей и мгновенной частотной ширины S-всплесков и дрейфующих пар [16], они не могут рассматриваться в качестве подвидов одного типа всплесков, как предполагал Мелроуз [8]. Длительности компонентов дрейфующих пар равны $1.5 \div 2$ с, что в несколько раз больше, чем длительность S-всплесков. Скорость дрейфа одиночного S-всплеска зависит от частоты, в то время как у одиночной дрейфующей пары скорость дрейфа постоянна. Более того, функциональные зависимости скорости дрейфа от частоты для этих всплесков различны – они более крутые у дрейфующих пар [16], чем у S-всплесков.

Что касается теории, предложенной Зайцевым и Злотник [9] для объяснения S-всплесков в метровом диапазоне длин волн, то она дает завышенные значения магнитного поля и размеров неоднородности на высотах, соответствующих генерации излучения S-всплесков на частотах $10 \div 30$ МГц. Так, согласно работе [9] для S-всплесков с центральной частотой 20 МГц, шириной полосы отдельного всплеска $4 \div 12$ МГц и скоростями дрейфа 0.6 МГц/с магнитное поле в месте генерации имеет значение $2 \div 5$ Гс, а размеры неоднородности – $(4 \div 8)R_{\odot}$ (R_{\odot} – радиус Солнца). Такие значения представляются сильно завышенными. Кроме того, зависимость скорости дрейфа от частоты в этой модели является намного более пологой, чем получается из наблюдательных данных для S-всплесков.

По нашему мнению, необходимо построить новую теорию, которая объясняла бы непротиворечивым образом основные свойства S-всплесков. Наиболее важные из них следующие:

– все S-всплески наблюдаются на фоне повышенной активности Солнца в декаметровом диапазоне длин волн, такой, как всплески III типа, всплески IIIb и др.;

– линейная скорость источников излучения S-всплесков равна $(5 \div 9)v_{Te}$;

– мгновенная частотная полоса S-всплесков увеличивается линейно с частотой.

Из того что S-всплески наблюдаются во время повышенной активности, следует, что источники их излучения движутся через плазму с высоким уровнем ленгмюровской турбулентности, о наличии которой свидетельствует присутствие всплесков III типа, всплесков IIIb типа, дрейфующих пар и др. Скорость источников должна быть по какой-то причине определенной (все S-всплески имеют приблизительно одинаковую скорость дрейфа как для разных бурь, так и в разные дни бури) и равной $(5 \div 9)v_{Te}$. Необходима также естественная интерпретация того, что мгновенная частотная полоса S-всплесков изменяется в пределах $0.3 \div 0.6$ МГц и растет линейно с частотой.

Мы считаем, что этим требованиям удовлетворяет модель, в которой источником этих всплесков являются потоки частиц, электронов или протонов, которые движутся со скоростями $(5 \div 9)v_{Te}$ через плазму с развитой ленгмюровской турбулентностью. При таких скоростях частицы могут возбуждать магнитозвуковые волны, у которых фазовые и групповые скорости равны скорости частиц. В этом случае равенство скорости частиц и фазовой скорости волн (черенковский резонанс) обеспечивает (при наличии положительной производной у функции распределения частиц) условия генерации таких магнитозвуковых волн. А равенство скорости частиц и групповой скорости магнитозвуковой волны обеспечивает более длительное взаимодействие частиц и волны, что дает возможность передать от частицы к волне большее количество энергии. При слиянии этих волн с фоновыми волнами ленгмюровской турбулентности образуются поперечные волны, которые и регистрируются как S-всплески.

Из уравнения дисперсии для быстрых магнито-звуковых волн

$$\omega = \frac{\omega_{Be} k^2 c^2}{\omega_{pe}^2 + k^2 c^2}, \quad (4)$$

где ω_{pe} – плазменная частота, ω_{Be} – электронная циклотронная частота, k – волновое число магнитозвуковых волн, получаем для волн, у которых фазовая скорость равна групповой скорости, выражение

$$v_{\phi} = v_{gp} = \frac{\omega_{Be}}{2\omega_{pe}} c \quad (5)$$

Тогда скорость частиц, которые будут находиться в черенковском резонансе с этими волнами, равна $v_a = v_{\phi} = \frac{\omega_{Be}}{2\omega_{pe}} c$. Как мы увидим ниже, эта скорость будет близка к требуемой. Быстрые магнитозвуковые волны m , которые генерируются этими частицами, сливаясь с ленгмюровскими волнами l фоновой турбулентности, в процессах $l + m = t$ образуют поперечные электромагнитные волны t . Их частота равна $\omega_{\omega_e} + \omega_{Be}/2$, где

$$\omega_{\omega_e} = \left(\frac{1}{2} (\omega_{pe}^2 + \omega_{Be}^2) + \frac{1}{2} \sqrt{(\omega_{pe}^2 + \omega_{Be}^2)^2 - 4\omega_{pe}^2 \omega_{Be}^2 \cos^2 \theta} \right)^{1/2} - \quad (6)$$

верхняя гибридная частота [17]. В выражении (6) θ – угол между вектором магнитного поля \vec{B} и волновым вектором ленгмюровской волны \vec{k}_l . Можно предположить, что в месте генерации S-всплесков ленгмюровские волны фоновой турбулентности имеют широкое угловое распределение, а следовательно, волны с различными направлениями волнового вектора \vec{k}_l могут принимать участие в процессах $l + m = t$. Как результат частоты электромагнитных волн будут заключены в полосе частот $\Delta\omega = \omega_{\omega_e}(\theta_0) - \omega_{\omega_e}(0) = \frac{\omega_{Be}^2}{2\omega_{pe}} \sin^2 \theta_0$, где θ_0 – угловая ширина спектра ленгмюровских волн.

Для относительной частотной ширины тогда имеем выражение

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\omega_{Be}^2}{2\omega_{pe}^2} \sin^2 \theta_0, \quad (7)$$

которое определяется отношением квадратов электронной циклотронной частоты и плазменной частоты, а также зависит от угловой ширины фоновой ленгмюровской турбулентности. Выражение (7) получено в предположении $\omega_{pe} \gg \omega_{Be}$, которое справедливо для короны. Из сравнения выражений (7) и (1) имеем

$$\frac{\omega_{Be}}{\omega_{pe}} |\sin \theta_0| = 0.17 \div 0.22. \quad (8)$$

Из этого равенства можно сделать оценку значения величины магнитного поля в месте генерации S-всплесков при известной угловой ширине фоновой ленгмюровской турбулентности. Нами, как и другими авторами, отмечалось, что S-всплески наблюдаются на фоне большого числа других всплесков. В условиях солнечной короны механизмом их генерации является плазменный механизм. Согласно ему пучки частиц, ответственные за эти всплески, возбуждают в плазме ленгмюровскую турбулентность высокого уровня. Ленгмюровские волны, взаимодействуя с частицами плазмы и другими волнами плазмы, трансформируются в поперечные волны, которые и регистрируются как всплески того или другого типов. После прохождения быстрых частиц часть волн остается в данном месте корональной плазмы (см., например, Контарь [18]). Если вначале эти волны были существенно анизотропными – их волновые вектора в основном были заключены в телесном угле равном 20° (угол разлета быстрых электронов [19]) вдоль направления распространения быстрых частиц, то после ухода быстрых частиц, в процессах рассеяния ленгмюровских волн на тепловых частицах плазмы, они частично изотропизуются. Из (7) получаем, что магнитное

поле заключено в пределах от 1.8 Гс при значительной изотропизации ленгмюровских волн ($\theta_0 = 90^\circ$) до 5 Гс в отсутствии таковой ($\theta_0 = 20^\circ$). В случае частичной изотропизации ($\theta_0 \approx 50^\circ \div 60^\circ$) магнитное поле принимает значение 2 Гс. Эти значения магнитного поля получены для гелиовысот, на которых происходит излучение с частотой 25 МГц. Для больших высот значение магнитного поля, даваемое формулой (8), убывает. Предполагая, что угловая ширина незначительно меняется на гелиовысотах, соответствующих частотам 10 ÷ 30 МГц, получаем, что отношение ω_{Be}/ω_{pe} остается практически неизменным на этих высотах. А это означает, что отношение плотности энергии магнитного поля к плотности кинетической энергии плазмы, $B^2/8\pi nkT$, постоянно и равно приблизительно 50. Что касается линейной скорости источников S-всплесков, то, как следует из (5), требуемое значение $(5 \div 9)v_{Te}$ получается в случае, если магнитное поле в месте, откуда происходит излучение на частоте 25 МГц, равно 2 Гс, т. е. реализуется ситуация частичной изотропизации фоновой ленгмюровской турбулентности.

Заключение

Исследование свойств S-всплесков на частотах 10 ÷ 30 МГц показало, что эти всплески наблюдались на фоне повышенной спорадической активности Солнца в декаметровом диапазоне длин волн. Они регистрировались в течение 4 дней, когда активная область находилась вблизи центрального меридиана. Длительности S-всплесков изменялись в пределах 0.3 ÷ 0.6 с, что согласуется с первыми результатами Эллиса [1]. Скорости дрейфа S-всплесков изменялись от приблизительно 0.5 МГц/с на частоте 10 МГц до 1.5 МГц/с на частоте 30 МГц. Функциональная зависимость скорости дрейфа от частоты – степенная с показателем степени 1.2 ÷ 1.4 и близка к полученной в работе [4] Макконнеллом. Мы подтвердили также вывод Макконнелла о том, что скорость дрейфа S-всплесков в 2 ÷ 4 раза меньше скорости дрейфа всплесков III типа на тех же частотах наблюдения. Это указывает

на то, что источники S-всплесков имеют линейные скорости равные $(5 \div 9)v_{Te}$. Нами впервые было обращено внимание на то, что мгновенная частотная ширина всплесков линейно растет с частотой и изменяется в интервале 0.3 ÷ 0.7 МГц на декаметровых волнах. Отдельные всплески имели полосу частот, в которой наблюдаются, равную в среднем 3 ÷ 4 МГц, хотя были случаи, когда эта полоса достигала 12 МГц. По-видимому, при пересечении активной областью центрального меридиана среднее значение полосы частот S-всплесков претерпевает скачок в 1 ÷ 2 МГц. Максимальное число всплесков наблюдалось на частотах 24 ÷ 25 МГц с уменьшением числа всплесков в область больших и меньших частот. Максимальные потоки S-всплесков не превышали значения 100 с. е. п., а среднее значение потоков – 40 с. е. п.

Вслед за многими авторами мы считаем, что излучение S-всплесков происходит на частоте близкой к местной плазменной частоте. Нами предложена модель генерации S-всплесков, основанная на слиянии быстрых магнитозвуковых волн (с законом дисперсии (4)) с ленгмюровскими волнами. Первые возбуждаются частицами со скоростями $(5 \div 9)v_{Te}$, равными фазовой и групповой скоростям быстрых магнитозвуковых волн. Ленгмюровские волны – это волны фоновой ленгмюровской турбулентности, которая остается после прохождения быстрых частиц, обеспечивающих посредством плазменного механизма генерацию различных типов спорадического радиоизлучения, регистрируемого во время наблюдения S-всплесков. Предполагая, что фоновая ленгмюровская турбулентность частично изотропна, мы находим значение магнитного поля в месте генерации этих всплесков, которое равно 2 Гс. Такое значение поля является необходимым для получения требуемых значений линейной скорости частиц, генерирующих быстрые магнитозвуковые волны. Таким образом, в рамках данной модели удастся объяснить отдельные свойства S-всплесков, а по наблюдаемым значениям частотной полосы и скорости дрейфа можно определять магнитное поле и угловой спектр фоновой ленгмюровской турбулентности на высотах $(1.5 \div 3)R_\odot$.

Работа была выполнена частично в рамках INTAS-проекта 03-5727. В. Н. Мельник и А. А. Коноваленко выражают признательность Институту космических исследований (г. Грац, Австрия) за оказанное гостеприимство во время их пребывания в г. Грац.

Литература

1. Ellis G. R. A. Fine structure in the spectra of solar radio bursts // *Aust. J. Phys.* – 1969. – Vol. 22. – P.177-188.
2. McConnell D. Fine spectral structure of solar radio storms // *Astron. Soc. Aust. Proc.* – 1980. – Vol. 4, Issue 1. – P. 64-67.
3. McConnell D., Ellis G. R. A. Fine structure in fast drift storm bursts // *Sol. Phys.* – 1981. – Vol. 69. – P. 161-168.
4. McConnell D. Spectral characteristics of solar S bursts. // *Sol. Phys.* – 1982. – Vol. 78. – P. 253-269.
5. Barrow C. H., Zarka P., Aubier M. G. Fine structures in solar radio emission at decametre wavelengths // *Astron. Astrophys.* – 1994. – Vol. 286, Issue 2. – P. 597-606.
6. Briand C., Zaslavsky A., Maksimovic M., Zarka P., Lecacheux A., Rucker H. O., Konovalenko A. A., Abranin E. P., Dorovsky V. V., Stanislavsky A. A., Melnik V. N. Faint solar radio structures from decametric observations // *Astron. Astrophys.* – 2008. – Vol. 490, Issue 1. – P. 339-344.
7. Dorovskyy V. V., Mel'nik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Abranin E. P., Lecacheux A. Observations of solar S-bursts at the decameter wavelengths. In *Planetary Radio Emissions VI* / Ed. by H. O. Rucker, W. S. Kurth and G. Mann. – Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, 2006. – P. 383-390.
8. Melrose D. B. Fine structures in Decametric noise storms: possible mechanisms // *Solar Radio Storms. Proc. Committee of European Solar Radio Astronomers Workshop 4.* – Duino (Italy). – 1982. – P. 182-218.
9. Зайцев В. В., Злотник Е. Я. Механизм генерации солнечных s-всплесков // *Письма в астрономический журнал.* – 1986. – Т. 12. – С. 311-317.
10. Takakura T., Yousef S. Type IIIb radio bursts – 80 MHz source position and theoretical model // *Sol. Phys.* – 1975. – Vol. 40. – P. 421-438.
11. Kleewein P., Rosolen C., Lecacheux A. New digital spectrometers for ground based decameter radio astronomy. In *Planetary Radio Emissions IV* / Ed. by H. O. Rucker, S. J. Bauer, A. Lecacheux. – Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, 1997. – P. 349-358.
12. Melnik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Rutkevych B. P., Dorovskyy V. V., Abranin E. P., Brazhenko A. I., Stanislavskii A. A., Lecacheux A. Decameter Type III-Like Bursts // *Sol. Phys.* – 2008. – Vol. 250. – P. 133-145.
13. Melnik V. N., Rucker H. O., Konovalenko A. A., Dorovskyy V. V., Abranin E. P., Brazhenko A. I., Stanislavskyy A. A. Solar Type IV bursts at frequencies $10 \div 30$ MHz. In *Solar Physics Research and Trend.* – New York: Nova Publishers, 2008. – P. 287-325.
14. Suzuki S., Dulk G. A. Bursts of Type III and Type V. In *Solar radiophysics: Studies of emission from the Sun at metre wavelengths.* – Cambridge and New York: Cambridge University Press, 1985. – P. 289-332.
15. Alvarez H., Haddock F. T. Solar wind density model from km-wave Type III bursts // *Sol. Phys.* – 1973. – Vol. 29. – P. 197-209.
16. Melnik V. N., Konovalenko A. A., Dorovskyy V. V., Rucker H. O., Abranin E. P., Lisachenko, V. N., Lecacheux A. Solar Drift Pair Bursts in the Decameter Range // *Sol. Phys.* – 2005. – Vol. 231, Issue 1-2. – P. 143-155.
17. Ахиезер А. И., Ахиезер И. А., Половин Р. В., Ситенко А. Г., Степанов К. Н. *Электродинамика плазмы.* – М.: Наука, 1974. – 719 с.
18. Kontar E. P. Dynamics of electron beams in the inhomogeneous solar corona plasma. // *Sol. Phys.* – 2001. – Vol. 202, Issue 1. – P. 131-149.
19. Зайцев В. В. О квазиодномерности спектра плазменных волн в источниках радиовсплесков III типа // *Астрономический журнал.* – 1974. – Т. 51. – С. 801-812.

Сонячні S-сплески в декаметровому діапазоні довжин хвиль

**В. М. Мельник, О. О. Коноваленко,
Х. О. Рукер, В. В. Доровський,
Е. П. Абранін, А. Лекашо, А. С. Лонська**

Досліджуються властивості S-сплесків, що спостерігалися в діапазоні частот $10 \div 30$ МГц на радіотелескопі УТР-2 у 2001 – 2002 рр. Для аналізу були обрані три бурі таких сплесків, які сталися 23 – 26 травня 2001 р., 13 – 16 липня 2002 р. та 27 – 30 липня 2002 р. Усього у ці дні було зареєстровано понад 800 сплесків. Сплески завжди спостерігалися на тлі підвищеної сонячної активності в декаметровому діапазоні довжин хвиль, такої, як звичайні сплески III та IIIb типу, швидкі сплески III типу, дрейфуючі пари, спайки. S-сплески спостерігалися у дні, коли активна область, з якою вони пов'язані, перебувала поблизу центрального меридіана. Тривалість сплесків упродовж однієї бурі залишалася практично незмінною – 0.3 с під час бурі 2001 р. та $0.4 \div 0.6$ с під час бурі 2002 р. Було знайде-

но, що миттєва частотна ширина зростає з частотою практично лінійно. Швидкість дрейфу S-сплесків змінюється з частотою за законом, близьким до знайденого Макконнеллом для сплесків на вищих частотах. Запропоновано модель генерації S-сплесків, яка ґрунтується на припущенні, що ці сплески генеруються за рахунок злиття ленгмюрівських хвиль зі швидкими магнітозвуковими хвилями, фазові та групові швидкості яких однакові.

Solar S-Bursts at Decameter Wavelengths

**V. N. Melnik, A. A. Konovalenko,
H. O. Rucker, V. V. Dorovsky,
E. P. Abranin, A. Lecacheux,
and A. S. Lonska**

The properties of solar S-bursts observed within 10 to 30 MHz at the UTR-2 radio telescope in 2001 – 2002 are studied. Three storms of these bursts occurred on May 23 – 26, 2001, July 13 – 16 and July 27 – 30, 2002 were chosen for a detailed analysis. More than 800 S-bursts were recorded during the days of these storms. All bursts were always observed against the background of other solar radio activity such as Type III and IIIb bursts, Type III-like bursts, drift pairs and spikes. S-bursts storms occurred in the days when the related active region was located near the central meridian. The durations of S-bursts were constant during one storm and equal to about 0.3 s for the 2001 storm and 0.4 to 0.6 s for the 2002 storms. It was found that the instantaneous frequency width of S-bursts increased with frequency sensibly linearly. The frequency drift rate of S-bursts changes with frequency according to the McConnell's dependence derived for higher frequencies. We propose the model of S-bursts based on assumption that they are generated due to the confluence of Langmuir waves with fast magnetosonic waves whose phase and group velocities are equal.