

РАДИОАСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

УДК 523.9, 520.27

А. А. СТАНИСЛАВСКИЙ

PACS number: 96.60.-j

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

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

РОЛЬ ЭФФЕКТОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЗАЛИМБОВЫХ ВСПЛЕСКОВ

Предмет и цель работы: Исследуется распространение радиоизлучения солнечных всплесков в солнечной короне, источники которых находятся на обратной стороне Солнца по отношению к наблюдателю на Земле.

Методы и методология работы: С использованием кусочно-линейной аппроксимации траектории луча в различных моделях электронной концентрации короны оценивается влияние таких моделей на эффекты распространения радиоизлучения из залимбовой области в приближении геометрической оптики.

Результаты работы: Показано, что если в качестве модели солнечной короны выбрать монотонно убывающую зависимость электронной плотности плазмы с расстоянием от фотосферы, то радиоизлучение залимбовых источников в такой короне не может быть зарегистрировано наземными радиоастрономическими инструментами в силу его отражения в сторону от Земли.

Заключение: Предлагается объяснение возможности наземных наблюдений залимбовых всплесков за счет влияния выбросов корональной массы из активных областей вблизи солнечного лимба, порождающих полости с пониженной электронной плотностью.

Ключевые слова: Солнце, верхняя корона, декаметровое радиоизлучение, распределение электронной плотности, неоднородно-слоистая среда

1. Введение

Радиоастрономические наблюдения радиоизлучения Солнца в период высокой солнечной активности демонстрируют большое разнообразие типов и подтипов солнечных всплесков в декаметровом диапазоне длин волн, а также показывают наличие в них сложной тонкой структуры в виде субвсплесков [1]. Такое важное достижение солнечной радиоастрономии стало возможным, прежде всего благодаря интенсивному развитию современных радиоастрономических инструментов и техники регистрации результатов наблюдений, что позволило проводить радиоастрономические наблюдения с высоким частотно-временным разрешением и в широкой полосе частот. Существенный вклад в эти исследования вносят интенсивные наблюдения, выполняе-

мые с помощью украинских радиотелескопов УТР-2, УРАН-2 и ГУРТ. Самой многочисленной группой радиособытий солнечной активности являются всплески III типа и сопутствующие им всплески III ν типа [2]. Значительно реже наблюдаются всплески II и IV типов. Кроме того, регистрируются дрейфующие пары, S-всплески, U-всплески, стриа и др. При очень сильной активности солнечные всплески разных типов могут возникать независимо в близкие времена и на близких частотах, что чрезвычайно усложняет анализ динамических спектров таких радионаблюдений, а тем более их интерпретацию [3]. Все это говорит о сложности и разнообразии тех физических процессов в солнечной короне, которые приводят к наблюдаемым событиям, а значит требуется развитие разнообразных методик и подходов к исследованию солнечных явлений. Неудивительно, что при этом стало весьма популярным одновременное использование как

наземных, так и космических наблюдений для анализа солнечной активности и космической погоды.

В последнее время возник заметный интерес к солнечным декаметровым всплескам, имеющим так называемую высокочастотную отсечку на динамическом спектре [4, 5]. Напомним, что низкочастотная отсечка в солнечных всплесках возникает благодаря ионосфере, которая не пропускает космическое радиоизлучение с частотой ниже $10 \div 15$ МГц на широтах радиотелескопа УТР-2. В других местах на земном шаре эта граница может быть и ниже, т. е. достигать, например как на Тасмании, значения 2 МГц. Высокочастотная отсечка имеет, по-видимому, совсем другую природу, поскольку лежит она в высокочастотной области спектра за пределами ионосферной отсечки. Анализ явлений в солнечной короне, порождающих декаметровые всплески с высокочастотной отсечкой, с помощью космических аппаратов STEREO и SOHO убедительно показывает, что их источник зародился на обратной стороне солнечного лимба для наблюдателя, использующего наземные радиоастрономические инструменты. В работе [6] предложена интерпретация особенностей таких событий, основанная на исследовании поляризационных свойств этих всплесков, которые показывают, что уровень поляризации не превышает $10 \div 15$ %. Такие значения поляризации характерны для радиоизлучения всплесков III типа на второй гармонике. На основании полученного результата, а также из чисто геометрических соображений (см. рис. 5 в [6]) можно объяснить выход излучения из заливочной области в нужном направлении. В настоящей работе мы рассмотрим эту задачу с точки зрения распространения радиоизлучения указанных всплесков в солнечной короне, чего не было сделано ранее. Этот вопрос не следует упускать из виду, поскольку в рассматриваемом случае преломление и отражение радиолучей в плазме короны играет важную роль.

Представленная статья организована следующим образом. В разделе 2 наше рассмотрение начинается с представления распространения радиоволны произвольной частоты в приближении геометрической оптики в плазме, описываемой сферически симметричной в пространстве электронной плотностью, согласно известным из

литературы моделям солнечной короны. Это позволяет нам наиболее просто оценить характерные особенности распространения радиоволн от заливочных источников в короне. Затем в следующем разделе, используя кусочно-линейную аппроксимацию траектории луча в эллиптической модели короны, мы оцениваем влияние такой модели на эффекты распространения радиоизлучения из заливочной области. В разделе 4 мы анализируем результаты численного моделирования распространения лучей в плазме короны, в которой происходит изменение электронной концентрации из-за коронального выброса массы (КВМ), и сравниваем их с результатами распространения лучей в сферической модели электронной концентрации короны. В последнем разделе подведены итоги исследований, проведенных в работе.

2. Закон Снеллиуса при сферической симметрии задачи и его свойства

Как показано в [7, 8], исследование направления распространения радиоволн в солнечной короне в зависимости от изменения ее электронной концентрации можно проводить в рамках приближения геометрической оптики. Для простоты анализа воспользуемся сферически симметричной моделью электронной концентрации короны, которая позволяет применить подход, изложенный в работе [9]. Поскольку для рассматриваемых высот в короне Солнца электронная плазменная частота f_{pe} обычно значительно выше электронной циклотронной частоты, можно пренебречь влиянием магнитного поля на траекторию луча. Выберем полярную систему координат, начало которой совпадает с центром Солнца. Траектория луча характеризуется двумя величинами: гелиоцентрическим расстоянием ρ в радиусах Солнца и углом θ между радиальными направлениями на точку на луче и на точку наблюдения (см. рис. 1). В таком случае закон Снеллиуса представляется в виде

$$n(\rho)\rho \sin \varphi = a, \quad (1)$$

где $n(\rho)$ – показатель преломления среды (плазмы короны), зависящий от величины ρ ; φ – угол между касательной к траектории луча и радиальным направлением на точку с координатами (ρ, θ) ;

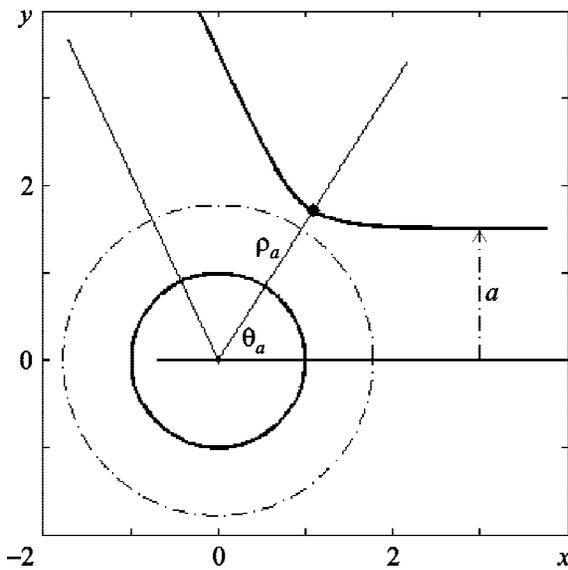


Рис. 1. Геометрия задачи для траектории луча в солнечной плазме согласно [8]. Большая окружность (штрихпунктирная линия) показывает положение уровня плазменной частоты 20 МГц для сферической модели короны Солнца. Меньшая окружность (непрерывная линия) отображает фотосферу Солнца, а жирная кривая показывает траекторию луча. Жирная точка на траектории соответствует повороту луча и имеет полярные координаты (ρ_a, θ_a) . По осям графика отложено расстояние в радиусах Солнца

a – расстояние между асимптотой луча (для больших значений ρ , где $n=1$ и где можно записать приведенную выше формулу в упрощенном виде, $\rho \sin \varphi = a$) и параллельной ей линией, проходящей через центр Солнца (рис. 1). Показатель преломления можно записать как

$$n = 1 - \frac{f_{pe}^2}{f^2},$$

где f – частота, МГц, а электронная плазменная частота f_{pe} , МГц, связана с плотностью электронов в плазме N_e , см⁻³, формулой

$$f_{pe}^2 = 8.06 \cdot 10^7 N_e.$$

Из простых геометрических соображений (рассматривая треугольник с катетами $\rho d\theta$ и $d\rho$ на рис. 2 в [9]) для любого луча можно найти траекторию в дифференциальной форме:

$$\rho \frac{d\theta}{d\rho} = -\operatorname{tg} \varphi,$$

которую легко преобразовать к виду

$$\frac{d\theta}{d\rho} = -\frac{a}{\rho \sqrt{n^2 \rho^2 - a^2}}.$$

В результате удается найти уравнение луча:

$$\theta = a \int_{\rho}^{\infty} \frac{dx}{x \sqrt{n^2 x^2 - a^2}}. \quad (2)$$

Следует отметить, что уравнения (1) и (2) связаны друг с другом и при нахождении траектории луча их нужно рассматривать вместе. Траектория луча имеет точку поворота при угле $\varphi = \pi/2$. Обозначив положение этой точки как (ρ_a, θ_a) , ее можно определить отдельно с помощью соотношений:

$$n(\rho_a)\rho_a = a, \quad \theta_a = a \int_{\rho_a}^{\infty} \frac{d\rho}{\rho \sqrt{n^2 \rho^2 - a^2}}. \quad (3)$$

Подынтегральное выражение в формуле (2) имеет сингулярность при $\theta = \theta_a$. Тем не менее она интегрируема, и это позволяет вычислить траекторию луча в полярных координатах. Следует отметить, что на основании такого подхода в работе [10] была предложена процедура для нахождения положения источника солнечных всплесков километрового диапазона длин волн из наблюдений с помощью космических аппаратов STEREO (Ahead и Behind).

В таком виде задачу вычисления траектории луча, в том числе и нахождение точки поворота, можно решить численно с помощью компьютера. Для этой цели мы воспользуемся адаптивным алгоритмом, предложенным в работе [11], для аппроксимации интегралов, имеющих сингулярность на конце интервала интегрирования. Существенное преимущество данного подхода состоит в том, что он позволяет организовать процесс вычислений так, чтобы они проводились на всех подынтервалах одновременно, а это дает возможность выполнять очень быстрые вычисления интегралов программными средствами.

Остается только выбрать модель электронной концентрации плазмы в солнечной короне, и здесь возможны варианты. Дело в том, что в литературе предлагаются различные модели электронной концентрации в зависимости от положения источника радиоизлучения в короне. Это и понятно, поскольку в общем случае коро-

на имеет разные законы изменения электронной концентрации по высоте в зависимости от радиального направления в короне. Кроме того, корона разная для спокойного Солнца и в период высокой солнечной активности, вблизи корональных дыр и активных областей и не только в таких случаях. Поэтому ниже мы рассмотрим несколько наиболее часто используемых видов сферически симметричных моделей электронной концентрации (в сантиметрах в минус третьей степени) плазмы короны.

Согласно работе [4], залимбовый всплеск наблюдался в период затянувшегося минимума солнечной активности. Поэтому первая модель электронной концентрации, которую мы будем принимать во внимание – это модель Ньюкирка [12]:

$$N_e = 4.2 \cdot 10^{4+4.32/\rho}.$$

Вблизи активных областей часто используют модель Баумбаха–Аллена [13, 14], в которой электронная плотность удовлетворяет выражению степенного характера

$$N_e = 1.55 \cdot 10^8 \rho^{-6} (1 + 1.93 \rho^{-10}).$$

Применительно к всплескам III типа используется модель Манна [15]:

$$N_e = 5.14 \cdot 10^9 \exp\left(13.83 \left[\frac{1}{\rho} - 1\right]\right).$$

Результаты численного расчета координат точки поворота траектории луча для разных значений a при частоте излучения $f = 20$ МГц в данных моделях представлены на рис. 2. Как видно из этих рисунков, при $a \rightarrow 0$ величина θ_a тоже стремится к нулю. Другими словами, из соотношений (3) в этом случае можно найти $\theta = \theta_a \approx Ca$, где $C \approx 0.6186$ для модели Ньюкирка, $C \approx 0.6828$ для модели Баумбаха–Аллена и $C \approx 0.5982$ для модели Манна. Этот факт имеет вполне понятную интерпретацию – луч проникает наиболее глубоко в солнечную корону, когда он направлен к центру Солнца. Только в таком случае радиоизлучение достигает в короне высоты (и отражается), где плазменная частота окружающей плазмы равна частоте зондирующего радиоизлучения. Если луч направлен иначе (под углом), то он проходит по траектории в короне заметно выше высоты, соответствующей плазменной частоте. Указанные

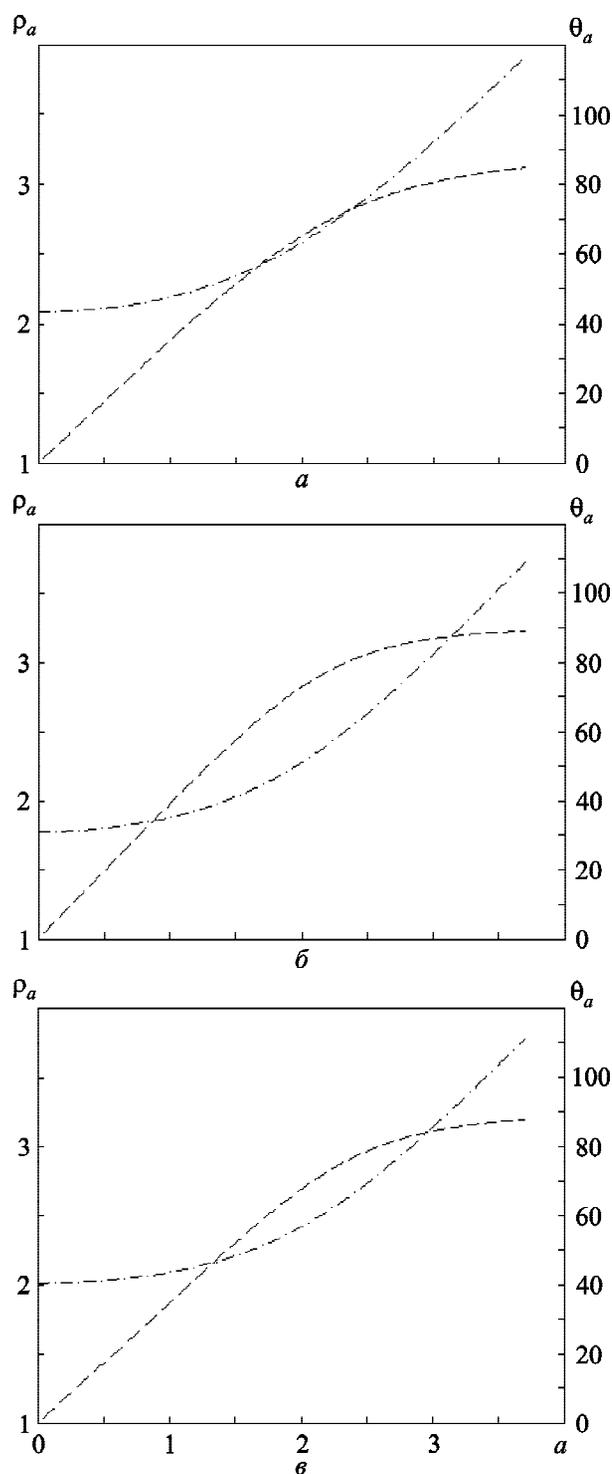


Рис. 2. Изменение полярных координат точки поворота луча в зависимости от параметра a для моделей Ньюкирка (a), Баумбаха–Аллена ($б$) и Манна ($в$). Штрихпунктирной линией показана величина ρ_a (вертикальная ось слева, в радиусах Солнца), а пунктирной – θ_a (вертикальная ось справа, в градусах). Частота радиоизлучения выбрана равной 20 МГц

свойства имеют место в любой сферически симметричной короне с монотонно спадающей функцией электронной концентрации плазмы. Конкретная функциональная форма модели короны, как показано выше, влияет только на величину C . Оказывается, рассмотренные модели короны приводят к строгим выводам относительно возможности наблюдения залимбовых всплесков. Дело в том, что радиус Солнца в 109 раз больше радиуса Земли. Чтобы луч попадал на Землю, параметр a должен быть весьма мал. Следовательно, в рамках рассмотренных моделей электронной плотности солнечной короны регистрация залимбовых всплесков наземными инструментами вряд ли возможна. Тем не менее они наблюдаются, а значит, для анализа залимбовых событий необходимо использовать другие представления о свойствах солнечной короны.

3. Распространение радиоизлучения в эллиптической модели короны

Следующую возможность, которую следует проверить – это отказаться от представления о сферической симметрии электронной концентрации в короне Солнца. Более реалистичная модель короны имеет эллипсоидную форму [16, 17]. В этом случае аналитическое представление, рассмотренное выше, уже не применимо. Для анализа эллиптической модели короны можно использовать кусочно-линейную аппроксимацию гладкой траектории луча, в которой корона разбивается на слои, а направление преломленного луча находится из закона Снеллиуса. Именно такой подход был успешно апробирован в работе [8], и в ней же можно ознакомиться со всеми подробностями данного алгоритма. Используя подходящее выражение для электронной концентрации плазмы в такой модели короны (например, приведенное в [18]), удастся шаг за шагом построить движение луча в ней при разных начальных условиях (таких как частота радиоизлучения и направление входа луча в корону в трех измерениях). Результаты численного моделирования траекторий лучей представлены на рис. 3. Основной вывод, вытекающий из такого анализа, близок к выводам предыдущего раздела. Луч отражается от плазменного уровня, если он первоначально направлен к центру Солнца, вокруг которого находится эллиптическая по форме корона.

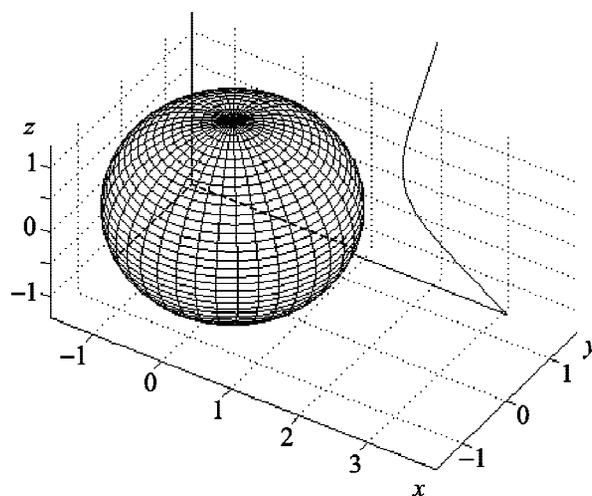


Рис. 3. Отражение лучей в эллиптической модели короны. В качестве примера показаны лучи, которые входят в корону под разными углами из одной точки. Один луч направлен к центру эллипсоида, а другой – под наклоном. Если луч изначально не направлен к центру эллипсоида, то он искривляется, не доходя до уровня плазменной частоты, и отражается в противоположную сторону. Эллипсоид показывает поверхность в солнечной короне, где соответствующая плазменная частота равна 20 МГц. Центры Солнца и эллипсоида совпадают, но размеры Солнца меньше (не показаны). По осям отложено расстояние в радиусах Солнца

В остальных случаях отражение происходит выше, а значит, регистрация залимбовых всплесков в этой модели короны наземными инструментами тоже проблематична. К этому нужно добавить, что даже в случае трехмерной модели электронной концентрации с несимметрично спадающей функцией (с более сложной поверхностью, чем сферическая или эллиптическая модели) с расстоянием от фотосферы в разных направлениях солнечной короны залимбовые всплески все равно оказываются недоступными для наземных радиоастрономических наблюдений.

Следует отметить, что на основании наблюдений можно сделать вывод, что структура реальной солнечной короны весьма динамична во времени и в пространстве. Она очень сильно зависит от состояния активности Солнца и тех процессов, которые на нем происходят (вспышки, КВМ и др.). Их воздействие на электронное содержание (электронную плотность) короны весомое. Поэтому в следующем разделе мы попробуем учесть влияние КВМ на эффекты распространения радиоизлучения в солнечной короне применительно к залимбовым источникам

всплесков. Почему мы уделяем особое внимание в анализе данного вопроса именно КВМ? Во-первых, наблюдения залимбовых всплесков 17–19 Августа 2012 г. сопровождались многочисленными КВМ. Во-вторых, сам КВМ обладает весьма интересными свойствами, а именно, он порождает внутри себя полости с пониженной электронной плотностью [19], которые могут сравнительно долго существовать во время движения КВМ в солнечной короне. Если КВМ случаются вблизи лимба, то через такие полости с низкой электронной плотностью излучение всплесков от залимбовых источников может перенаправиться в сторону наблюдателя на Земле.

4. КВМ и их возможное влияние на распространение радиоволн в солнечной короне

Сначала обратим внимание на особенности солнечных событий, которые сопровождали всплески с высокочастотной отсечкой. Наблюдавшаяся 17–19 августа 2012 г. солнечная активность была связана в основном с зарождением новой группы солнечных пятен NOAA11548 на обратной стороне солнечного лимба. Их удалось наблюдать с помощью космического аппарата STEREO, который находился в подходящем месте на орбите Земли, но вдали от нее. При этом появлялась возможность вести наблюдения событий на Солнце под иным углом, чем наблюдения с Земли. В это же время другой спутник GOES регистрировал вспышки в рентгеновском диапазоне (рис. 4). Можно видеть, что это была длительная серия, следующих друг за другом вспышек класса С и М, которая сопровождалась множеством КВМ, происходивших вблизи лимба и связанных с активной областью NOAA11548 (см. табл. 1). Наибольшее количество вспышек, КВМ и всплесков с отсечкой наблюдалось 18 августа 2012 г. Что касается отдельного события 3 июня 2011 г., описанного в [3], то его тоже удалось связать с активностью залимбовой группы пятен NOAA1222, которая сопровождалась КВМ.

Как известно [20], электронная плотность в КВМ – неоднородная, с изменяющимся на много порядков значением, функция расстояния в короне от фотосферы Солнца (или, иначе говоря, функция времени). В течение КВМ в солнечную корону выбрасывается примерно $10^{14} \div 10^{16}$ г

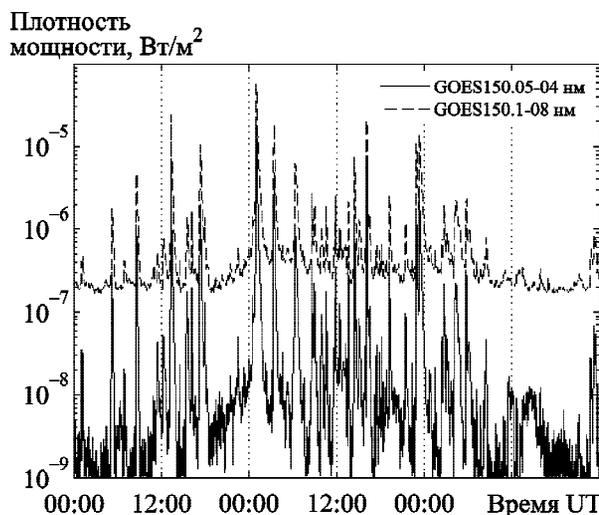


Рис. 4. Плотность мощности рентгеновского излучения, зарегистрированного 17–19 августа 2012 г. спутником GOES-15 в диапазонах мягкого и жесткого рентгена (<http://www.swpc.noaa.gov/>) с шагом 1 мин. Солнечная активность сопровождалась следующими друг за другом вспышками классов С и М

Таблица 1. Времена регистрации КВМ 18 августа 2012 г. и их свойства (дополнительную информацию можно найти на сайте http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/)

Тип	Время UT
Частичное гало, яркое извержение	00:48
Частичное гало, узкое извержение	03:36
	05:12
Узкое извержение	06:12
	08:48
	09:48
Слабое извержение	10:12
	10:48
	11:24
	12:36
Узкое извержение	13:26
	14:48
Частичное гало, узкое извержение	16:24
	17:36
	19:48
	21:12
Яркое узкое извержение	23:36

вещества. Структура КВМ хорошо видна на изображениях, полученных с помощью космического инструмента LASCO (рис. 5). Плотность плазмы в КВМ распределена очень неравномерно: в лидирующем ярком крае она выше, а в темном теле

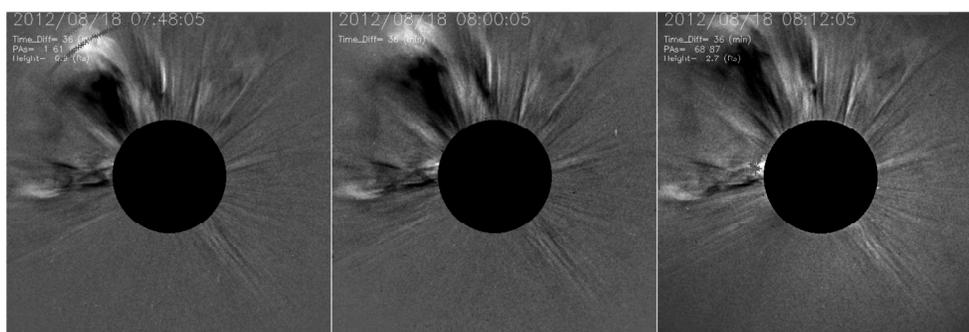


Рис. 5. Эволюция во времени одного из КВМ 18 августа 2012 г. Он имеет яркий лидирующий край с повышенной плотностью и следующее за ним темное тело с пониженной плотностью. По мере удаления этого КВМ от фотосферы появляется следующий КВМ (<http://cdaw.gsfc.nasa.gov/>)

за ним существенно меньше. Поскольку скорость радиационных потерь пропорциональна квадрату электронной концентрации, плотность КВМ $n_{\text{КВМ}}$ непосредственно определяется из наблюдаемой яркостной температуры КВМ [20]

$$T_b \approx 0.2 T_e^{-1/2} f^{-2} n_{\text{КВМ}}^2 L,$$

где L – линейные размеры КВМ, T_e – электронная температура окружающей плазмы. Следует отметить, что яркостная температура спокойного Солнца заметно меньше яркостной температуры лидирующего края КВМ.

Рассмотрим распространение радиоизлучения солнечных всплесков в присутствии полости, имеющей пониженную электронную плотность по сравнению с окружающей плазмой в короне, возникновение которой связано с КВМ. В качестве модели плотности окружающей плазмы можно использовать, например, формулу Ньюкирка, упомянутую выше, хотя это не принципиально. Возьмем для описания плотности самой полости ту же самую модель, что и для окружающей плазмы, но с плотностью в 10 раз меньшей. Пусть форма полости будет в виде сектора кольца, внутренний радиус которого равен 2.15 а внешний – 3.4 радиусов Солнца. Центр воображаемого кольца совпадает с центром лимба (окружности) Солнца. Сектор кольца охватывает угол от 5° до 70° . Для простоты анализа считалось, что на его границах значения электронной концентрации резко меняются, но это условие необязательно и может быть при необходимости изменено. Теперь направим луч в данную полость и отследим его движение в солнечной короне, используя кусочно-линейную

аппроксимацию траектории луча, подчиняющуюся закону Снеллиуса. Результаты численного моделирования представлены на рис. 6. Для сравнения рассмотрены два случая – без полости и при наличии полости. Как можно видеть из рисунка, они кардинально отличаются друг от друга. Как уже отмечалось выше, анализ модели с монотонно спадающей электронной концентрацией показывает, что в этом случае происходит отражение излучения залимбовых всплесков в сторону от Земли, в то время как появление полости на пути луча играет роль своего рода канала, по которому луч попадает на наземные радиоастрономические инструменты. В этой связи полезно упомянуть недавнюю интересную статью [21], авторы которой сообщают о том, что они добились распространения радиосигнала из Аляски в Антарктиду с минимальными потерями через ионосферный волновод. Его активация достигалась с помощью ионосферного нагревного стенда HAARP. Можно предположить, что нечто похожее происходит в случае залимбовых всплесков. В этом случае КВМ формирует своего рода “корональный” волновод (из полости с пониженной плотностью), по которому сигнал доставляется в точку, где указанные всплески удается зарегистрировать наземными средствами. Следует отметить, что КВМ – это изменяющееся во времени образование, при большом количестве солнечных всплесков, возникающих на обратной стороне Солнца (по отношению к наблюдателю на Земле), часть из них может перенаправляться через такой волновод в сторону Земли. Весьма вероятно, что залимбовые всплески – это обыч-

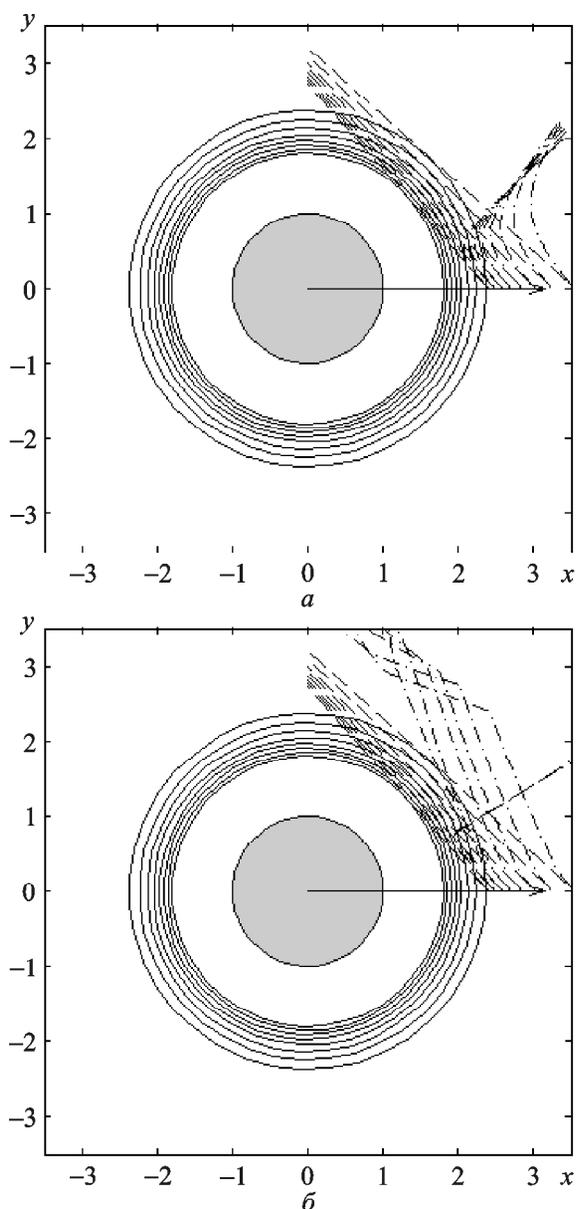


Рис. 6. Моделирование распространения лучей в отсутствие (а) и при наличии (б) полости с низкой плотностью (из-за КВМ) на луче зрения для источников залимбовых всплесков. В центре круг символизирует Солнце. Окружностями отмечены плазменные уровни от 15 до 30 МГц с шагом 2 МГц. Штрихпунктирными линиями показаны лучи, стрелкой – направление движения источника излучения, пунктирными линиями – касательные, проведенные из точек излучения к соответствующим плазменным уровням, направленные в сторону Земли. Благодаря существованию полости лучи могут достигнуть Земли

ные всплески III типа, источниками которых являются электронные пучки, движущиеся со скоростью $c/3$, где c – скорость света. Это вполне ожидаемо, поскольку всплески III типа –

самая большая по численности популяция среди наблюдаемых всплесков. Учитывая скорость их источников, вероятность попадания в “корональный” волновод всплесков III типа существенно выше, чем для других типов солнечных всплесков. Отметим также, что отражающая поверхность такого волновода может быть довольно произвольной формы. Что касается морфологических особенностей залимбовых всплесков на динамическом спектре регистраций, они не всегда напоминают всплески III типа. Дело в том, что полости в КВМ имеют нерегулярную структуру (см. рис. 5). Это приводит не только к рефракции радиоизлучения в них, но и к ряду других явлений (дифракции, многократным отражениям, рассеянию и пр.). Они могут по-разному себя проявить на различных частотах (высотах короны). Все это может приводить к искажению динамического спектра залимбовых всплесков, к задержке отдельных их частей (с влиянием на скорость частотного дрейфа такого всплеска), появлению у всплесков дополнительной необычной тонкой структуры. Поэтому неудивительно, что в статье [4] зарегистрированный залимбовый всплеск получил название “гусеница” из-за его внешнего вида на динамическом спектре солнечного радиоизлучения.

5. Выводы

В работе установлено существенное влияние эффектов распространения радиоизлучения в солнечной короне на результаты интерпретации солнечных всплесков, источники которых возникают в залимбовой области Солнца по отношению к наземному наблюдателю. Детальный анализ траекторий луча в сферически симметричных и эллиптических моделях электронной концентрации солнечной короны показывает, что излучение залимбовых всплесков отражается короной не в сторону Земли. Следовательно, в этих случаях они не могут быть зарегистрированы наземными радиоастрономическими инструментами. В настоящей работе отмечена важная роль КВМ, которую они играют в процессе распространения залимбовых всплесков. Если КВМ возникают вблизи лимба и радиоизлучение залимбовых источников направлено в сторону полости с пониженной электронной плотностью в КВМ, через них излучение залимбовых ис-

точников может достигнуть Земли. Такое представление о причинах обнаружения залимбовых всплесков наземными инструментами открывает возможности для диагностики плазмы в самих КВМ, если рассматривать залимбовые всплески в качестве зондирующих сигналов.

Автор благодарен Тишковцу В. П. за полезные замечания по улучшению качества представления результатов настоящей работы. Отдельная благодарность командам обеспечения космических миссий GOES, SOHO и STEREO за свободный доступ к данным наблюдений. Работа была выполнена при частичной поддержке Целевой комплексной программы НАН Украины научных космических исследований 0115U004085.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mel'Nik V. N., Konovalenko A. A., Abranin E. P., Dorovskyy V. V., Stanislavsky A. A., Rucker H. O., and Lecacheux A. Solar sporadic radio emission in the decametre waveband // *Astron. Astrophys. Trans.* – 2005. – Vol. 24, Is. 5. – P. 391–401. DOI: 10.1080/10556790600568854
- Железняков В. В. Радиоионизация Солнца и планет. – М.: Наука, 1964. – 560 с.
- Stanislavsky A. A., Konovalenko A. A., Koval A. A., Dorovskyy V. V., Zarka P., and Rucker H. O. Coronal Magnetic Field Strength from Decameter Zebra-Pattern Observations: Complementarity with Band-Splitting Measurements of an Associated Type II Burst // *Sol. Phys.* – 2015. – Vol. 290, Is. 1. – P. 201–218. DOI: 10.1007/s11207-014-0620-9
- Браженко А. И., Мельник В. Н., Коноваленко А. А., Доровский В. В., Французенко А. В., Рукер Х. О., Панченко М., Станиславский А. А. Необычный солнечный всплеск в декаметровом диапазоне длин волн. 1. Наблюдения // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2012. – Т. 17, № 2. – С. 99–105.
- Браженко А. И., Мельник В. Н., Французенко А. В., Рукер Х. О., Панченко М. Необычные солнечные декаметровые радиовсплески с отсечкой на высоких частотах // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2015. – Т. 20, № 1. – С. 10–19.
- Мельник В. Н., Браженко А. И., Коноваленко А. А., Доровский В. В., Французенко А. В., Рукер Х. О., Панченко М., Станиславский А. А. Необычный солнечный всплеск в декаметровом диапазоне длин волн. 2. Интерпретация // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2012. – Т. 17, № 3. – С. 199–206.
- Ramesh R. Low frequency radio emission from the “quiet” Sun // *J. Astrophys. Astron.* – 2000. – Vol. 21, Is. 3. – P. 237–240. DOI: 10.1007/BF02702398
- Станіславський О. О., Коваль А. О. Еліптична модель корони Сонця // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2013. – Т. 18, № 1. – С. 3–11.
- Bracewell R. N. and Preston G. W. Radio reflection and refraction phenomena in the high solar corona // *Astrophys. J.* – 1956. – Vol. 123. – P. 14–30. DOI: 10.1086/146125
- Thejappa G. and MacDowall R. J. Localization of a type III radio burst observed by the STEREO spacecraft // *Astrophys. J.* – 2010. – Vol. 720, No. 2. – P. 1395–1404. DOI: 10.1088/0004-637X/720/2/1395
- Shampine L. F. Vectorized adaptive quadrature in MATLAB // *J. Comput. Appl. Math.* – 2008. – Vol. 211, Is. 2. – P. 131–140. DOI: 10.1016/j.cam.2006.11.021
- Newkirk G., Jr. A model of the electron corona with reference to radio observations // *IAU Symposium no. 9 and URSI Symposium no. 1.* – 1959. – Ed. Bracewell R. N. – Stanford: Stanford University Press. – P. 149–158.
- Baumbach S. Strahlung, Ergiebigkeit und Elektronendicht der Sonnekrona // *Astron. Nachr.* – 1937. – Vol. 263. – P. 121–134.
- Allen C. W. Interpretation of electron densities from coronal brightness // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 1947. – Vol. 107, Iss 5-6. – P. 426–432. DOI: 10.1093/mnras/107.5-6.426
- Mann G., Jansen F., MacDowall R. J., Kaiser M. L., and Stone R. G. A heliospheric density model and type III radio bursts // *Astron. Astrophys.* – 1999. – Vol. 348. – P. 614–620.
- Saito K., Makita M., Nishi K., and Hata S. A non-spherical axisymmetric model of the solar K corona of the minimum type // *Ann. Tokyo Astron. Obs.* – 1970. – Vol. 12. – P. 51–173.
- Kathiravan C., Ramesh R., and Subramanian K. R. Metric Radio Observations and Ray-tracing Analysis of the Onset Phase of a Solar Eruptive Event // *Astrophys. J.* – 2002. – Vol. 567, No. 1. – P. L93–L95. DOI: 10.1086/339801
- Абранин Э. П., Базелян Л. Л. Декаметровое излучение спокойного Солнца: Препр. / Институт радиофизики и электроники АН УССР, № 304.– Харьков: 1986. – 32 с.
- Reeves K. K., Gibson S. E., Kucera T. A., Hudson H. S., and Kano R. Thermal Properties of a Solar Coronal Cavity Observed with the X-Ray Telescope on Hinode // *Astrophys. J.* – 2012. – Vol. 746, No. 2. – id. 146. DOI: 10.1088/0004-637X/746/2/146
- Aschwanden M. *Physics of the Solar Corona: An Introduction with Problems and Solutions.* – Chichester: Springer Praxis Books, 2005. – 924 p.
- Najmi A., Milikh G., Yampolski Y. M., Koloskov A. V., Sopin A. A., Zalizovski A., Bernhardt P., Briczinski S., Siefinger C., Chiang K., Morton Y., Taylor S., Mahmoudian A., Bristow W., Ruohoniemi M., and Papadopoulos K. Studies of the ionospheric turbulence excited by the fourth gyroharmonic at HAARP // *J. Geophys. Res. Space Phys.* – 2015. – Vol. 120, Is. 8. – P. 6646–6660. DOI: 10.1002/2015JA021341

REFERENCES

- MEL'NIK, V. N., KONOVALENKO, A. A., ABRANIN, E. P., DOROVSKYY, V. V., STANISLAVSKY, A. A., RUCKER, H. O. and LECACHEUX, A., 2005. Solar sporadic radio emission in the decametre waveband. *Astron.*

- Astrophys. Trans.* vol. 24, is. 5, pp. 391–401. DOI: 10.1080/10556790600568854
2. ZHELEZNYAKOV, V. V., 1970. *Radio Emission of the Sun & Planets*. Oxford: Pergamon Press.
 3. STANISLAVSKY, A. A., KONOVALENKO, A. A., KOVAL, A. A., DOROVSKYY, V. V., ZARKA, P. and RUCKER, H. O., 2015. Coronal Magnetic Field Strength from Decameter Zebra-Pattern Observations: Complementarity with Band-Splitting Measurements of an Associated Type II Burst. *Sol. Phys.* vol. 290, is. 1, pp. 201–218. DOI: 10.1007/s11207-014-0620-9
 4. BRAZHENKO, A. I., MELNIK, V. N., KONOVALENKO, A. A., DOROVSKYY, V. V., FRANTSUZENKO, A. V., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M. and STANISLAVSKY, A. A., 2012. An unusual burst at decameter wavelengths. 1. Observations. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 17, no. 2, pp. 99–105 (in Russian).
 5. BRAZHENKO, A. I., MELNIK, V. N., FRANTSUZENKO, A. V., RUCKER, H. O. and PANCHENKO, M., 2015. Unusual solar decameter radio bursts with high frequency cut off. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 20, no. 1, pp. 10–19 (in Russian).
 6. MELNIK, V. N., BRAZHENKO, A. I., KONOVALENKO, A. A., DOROVSKYY, V. V., FRANTSUZENKO, A. V., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M. and STANISLAVSKY, A. A., 2012. An unusual burst at decameter wavelengths. 2. Interpretation. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 17, no. 3, pp. 199–206 (in Russian).
 7. RAMESH, R., 2000. Low frequency radio emission from the “quiet” Sun. *J. Astrophys. Astron.* vol. 21, is. 3, pp. 237–240. DOI: 10.1007/BF02702398
 8. STANISLAVSKY, A. A. and KOVAL, A. A., 2013. Solar corona elliptical model. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 18, no. 1, pp. 3–11 (in Ukrainian).
 9. BRACEWELL, R. N. and PRESTON, G. W., 1956. Radio reflection and refraction phenomena in the high solar corona. *Astrophys. J.* vol. 123, pp. 14–30. DOI: 10.1086/146125
 10. THEJAPPA, G. and MACDOWALL, R. J., 2010. Localization of a type III radio burst observed the STEREO spacecraft. *Astrophys. J.* vol. 720, no. 2, pp. 1395–1404. DOI: 10.1088/0004-637X/720/2/1395
 11. SHAMPINE, L. F., 2008. Vectorized adaptive quadrature in MATLAB. *J. Comput. Appl. Math.* vol. 211, is. 2, pp. 131–140. DOI: 10.1016/j.cam.2006.11.021
 12. NEWKIRK, G., Jr., 1959. A model of the electron corona with reference to radio observations. In: R. N. Bracewell, ed. *IAU Symposium no. 9 and URSI Symposium no. 1*. Stanford: Stanford University Press, pp. 149–158.
 13. BAUMBACH, S., 1937. Strahlung, Ergiebigkeit und Elektronendicht der Sonnenkorona. *Astron. Nachr.* vol. 263, pp. 121–134.
 14. ALLEN, C. W., 1947. Interpretation of electron densities from coronal brightness. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* vol. 107, iss. 5–6, pp. 426–432. DOI: 10.1093/mnras/107.5-6.426
 15. MANN, G., JANSEN, F., MACDOWALL, R. J., KAISER, M. L. and STONE, R. G., 1999. A heliospheric density model and type III radio bursts. *Astron. Astrophys.* vol. 348, pp. 614–620.
 16. SAITO, K., MAKITA, M., NISHI, K. and HATA, S., 1970. A non-spherical axisymmetric model of the solar K corona of the minimum type. *Ann. Tokyo Astron. Obs.* vol. 12, pp. 51–173.
 17. KATHIRAVAN, C., RAMESH, R. and SUBRAMANIAN, K. R., 2002. Metric Radio Observations and Ray-tracing Analysis of the Onset Phase of a Solar Eruptive Event. *Astrophys. J.* vol. 567, no. 1, pp. L93–L95. DOI: 10.1086/339801
 18. ABRANIN, E. P. and BAZELYAN, L. L., 1986. *Decametric radiation of quiet Sun*. Preprint. is. 304. Kharkiv: Institute for Radiophysics and Electronics of Academy of Sciences of USSR (in Russian).
 19. REEVES, K. K., GIBSON, S. E., KUCERA, T. A., HUDSON, H. S. and KANO, R., 2012. Thermal Properties of a Solar Coronal Cavity Observed with the X-Ray Telescope on Hinode. *Astrophys. J.* vol. 746, no. 2, id. 146. DOI: 10.1088/0004-637X/746/2/146
 20. ASCHWANDEN, M., 2005. *Physics of the Solar Corona: An Introduction with Problems and Solutions*. Chichester: Springer Praxis Books.
 21. NAJMI, A., MILIKH, G., YAMPOLSKI, Y. M., KOLOSKOV, A. V., SOPIN, A. A., ZALIZOVSKI, A., BERNHARDT, P., BRICZINSKI, S., SIEFRING, C., CHIANG, K., MORTON, Y., TAYLOR, S., MAHMOUDIAN, A., BRISTOW, W., RUOHONIEMI, M. and PAPADOPOULOS, K., 2015. Studies of the ionospheric turbulence excited by the fourth gyroharmonic at HAARP. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 120, is. 8, pp. 6646–6660. DOI: 10.1002/2015JA021341

A. A. Stanislavsky

Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine
V. Kazarin National University of Kharkiv,
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

THE ROLE OF RADIO WAVE PROPAGATION
EFFECTS IN THE SOLAR CORONA
TO INTERPRET THE BEHIND-LIMB BURSTS

Purpose: The radio emission propagation of solar radio bursts in the solar corona which sources are located on the far side of the Sun relative to the observer on Earth is studied.
Design/methodology/approach: Using the piecewise linear approximation of the beam path in various models of electron density in corona, we find out the impact of these models on the propagation effects of radio emission from the far side of the Sun in approximation of geometric optics.
Findings: It is shown that if as a model of the solar corona one chooses the plasma density decreasing in solar corona with distance from photosphere, the radiation of limb-behind burst sources cannot be recorded by ground-based radio astronomy instruments due to radio emission reflection in the direction outward the Earth.
Conclusions: The arguments to explain the possibility of ground-based observations of limb-behind bursts due to the influence of

coronal mass ejections on the solar corona density from active spots near the solar limb are proposed.

Key words: Sun, upper corona, decameter radio emission, electron density distribution, inhomogeneous layered medium

О. О. Станіславський

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

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

РОЛЬ ЕФЕКТИВ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ У СОНЯЧНІЙ КОРОНІ ДЛЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ЗАЛІМБОВИХ СПЛЕСКІВ

Предмет і мета роботи: Досліджується поширення радіовипромінювання сонячних сплесків у сонячній короні, джерела яких знаходяться на зворотному боці Сонця відносно спостерігача на Землі.

Методи та методологія роботи: З використанням кусочно-лінійної апроксимації траєкторії променя в різних моде-

лях електронної концентрації корони оцінюється вплив таких моделей на ефекти поширення радіовипромінювання з залімбовою областю в наближенні геометричної оптики.

Результати роботи: Показано, що якщо в якості моделі сонячної корони вибрати монотонно спадаючу залежність електронної концентрації плазми з відстанню від фотосфери, то радіовипромінювання залімбових джерел у такій короні не може бути зареєстровано наземними радіоастрономічними інструментами в силу його відбиття в сторону від Землі.

Висновок: Пропонується пояснення можливості наземних спостережень залімбових сплесків за рахунок впливу викидів корональної маси з активних областей поблизу сонячного лімба, що породжують порожнини зі зниженою електронною щільністю.

Ключові слова: Сонце, верхня корона, декаметрове радіовипромінювання, розподіл електронної густини, неоднорідно-шарувате середовище

Стаття постуила в редакцію 24.12.2015