

## ВЛИЯНИЕ КОРОНАЛЬНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ И УДАЛЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Д.С. Лукьянцев, Н.Т. Афанасьев

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия  
cmeofs1997@mail.ru

## INFLUENCE OF CORONAL PLASMA FORMATIONS ON RADIO EMISSIONS FROM SOLAR AND REMOTE COSMIC SOURCES

D.S. Lukyantsev, N.T. Afanasiev

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia  
cmeofs1997@mail.ru

**Аннотация.** Выполнены траекторные расчеты характеристик распространения радиоизлучения солнечных и удаленных космических источников, находящихся на обратной стороне Солнца по отношению к наблюдателю на орбите Земли. Определены гелиофизические условия существенного воздействия корональных плазменных образований на зондирующий луч. Показана возможность уверенных наземных наблюдений залимбового радиоизлучения в присутствии коронального выброса массы.

**Ключевые слова:** гелиофизика, солнечная корона, радиоизлучение, моделирование, лучевая оптика.

**Abstract.** We performed trajectory calculations of the propagation characteristics of the solar and remote cosmic radio sources located on the reverse side of the Sun relative to an observer on the earth's orbit. The heliophysical conditions for the significant effect of coronal plasma formations on the probing beam were determined. We show the capability of confident ground-based observations of behind-limb radio emission in the presence of coronal mass ejections.

**Keywords:** Heliophysics, solar corona, radio-emissions, modeling, beam optics.

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно [Ефимов, 2002], при интерпретации данных наземных и орбитальных наблюдений структуры радиоизлучения удаленных космических и солнечных источников необходимо учитывать эффекты воздействия околосолнечной плазмы. В работе [Станиславский, 2016] выполнены расчеты характеристик распространения декаметровых радиовсплесков в солнечной короне, источники которых находятся на обратной стороне Солнца по отношению к наблюдателю на орбите Земли. На основе закона Снеллиуса и кусочно-линейной аппроксимации траектории луча сделана оценка влияния корональных выбросов массы (КВМ) на распространение радиоизлучения из залимбовой области. В результате показана возможность наземных наблюдений залимбовых всплесков за счет влияния КВМ из активных областей вблизи солнечного лимба, порождающих полость с пониженной электронной концентрацией.

В настоящей работе на основе строгих численных расчетов лучевых уравнений проведен анализ траекторных характеристик залимбового радиоизлучения, прошедшего через возмущенную солнечную корону. Рассмотрены солнечные и удаленные космические радиоисточники.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЗМУЩЕННОЙ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ

В качестве модели диэлектрической проницаемости солнечной короны использовалась зависимость:

$$\varepsilon(R) = 1 - \left( \frac{f_{pl}}{f} \right)^2 \left( \frac{R_m}{R} \right), \quad (1)$$

где  $R_m = 5R_s$ ;  $f_{pl}$  — плазменная частота на уровне  $R_m$ ;  $f$  — рабочая частота.

Для расчета траекторных характеристик распространения радиоизлучения была взята система лучевых уравнений в сферических координатах:

$$\frac{dR}{d\varphi} = R \cot \beta, \quad (2)$$

$$\frac{d\beta}{d\varphi} = \frac{1}{2\varepsilon} \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi} \cot \beta - R \frac{\partial \varepsilon}{\partial R} \right) - 1,$$

где  $\varphi$  — угол относительно центра системы координат, связанный с Солнцем;  $\beta(\varphi)$  — угол рефракции луча в среде;  $R(\varphi)$  — текущая радиальная координата луча.

Учет коронального плазменного образования проводился путем введения в (1) дополнительного слагаемого:

$$\varepsilon_1 = \mu \exp \left( - \left( \frac{R - R_1}{a} \right)^2 - \left( \frac{\varphi - \varphi_1}{b} \right)^2 \right), \quad (3)$$

где:  $R_1$  — радиальная координата центра локализации КВМ;  $\varphi_1$  — угловая координата центра КВМ;  $a$ ,  $b$  — масштабы КВМ по радиусу и углу, соответственно;  $\mu$  — параметр интенсивности КВМ.

Вначале был рассмотрен случай воздействия КВМ на траекторные характеристики солнечных декаметровых радиовсплесков. Для системы (2) задавались следующие начальные условия. Предполагалось, что источник радиоизлучения находится на высоте  $R_0 = 3R_s$ , где  $R_s \approx 7 \cdot 10^5$ , км — радиус фотосферы Солнца, угол  $\varphi_0 = 0 \text{ rad}$ , начальный угол излучения  $\beta_0 = 2.07 \text{ rad}$ . Рассматривалось излучение залимбовых радиоисточников в диапазоне частот 25–44 МГц. Па-

параметры КВМ составляли:  $a=0.06R_s$ ,  $b=0.15rad$ ,  $\mu=1$ . Центр локализации солнечного возмущения имел координаты:  $R_1=3R_s$ ,  $\varphi_1=0.8rad$ .

На рис. 1 представлены зависимости углов рефракции радиоизлучения от угловой переменной, рассчитанные с помощью системы уравнений (2), для спокойных (рис. 1, а) и возмущенных (рис. 1, б) условий. Из полученных графиков следует, что при росте рабочей частоты, происходит увеличение общего пути распространения радиовсплеска. При появлении в короне Солнца возмущения обедненной электронной концентрации происходит увеличение общего пути распространения радиовсплесков во всем диапазоне рассматриваемых рабочих частот. Также можно заметить, что в зависимостях углов рефракции возникают немонотонные участки. Такое необычное поведение кривых связано с появившейся возможностью просачивания декаметровых радиовсплесков на низких частотах на более дальние расстояния.

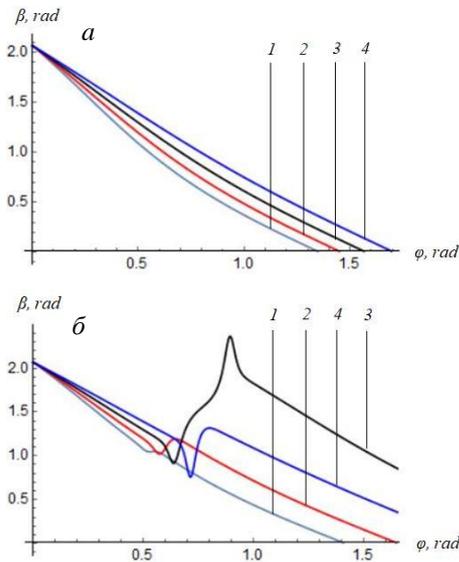


Рис. 1. Результаты расчетов углов рефракции декаметровых радиовсплесков на различных рабочих частотах в отсутствии (а) и при наличии (б) полости с пониженной электронной концентрацией. 1 — 25 МГц, 2 — 27 МГц, 3 — 30 МГц, 4 — 35 МГц

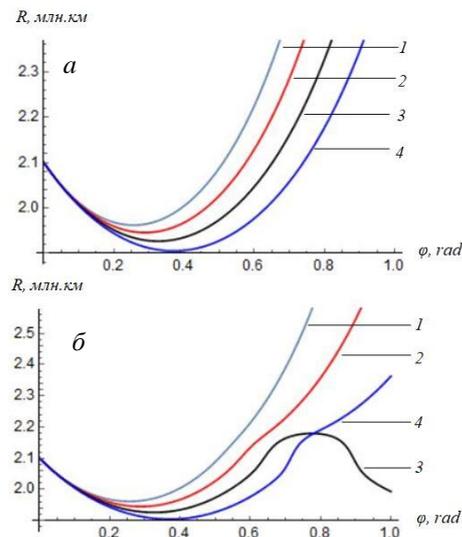


Рис. 2. Траектории радиовсплесков на различных рабочих частотах в отсутствии (а) и при наличии (б) полости с обедненной электронной концентрацией

На рис. 2 представлены соответствующие траектории радиовсплесков.

Из рис. 2 следует, что появление неоднородности в короне способствует значительному искривлению траектории распространения радиовсплеска и соответственно увеличению общего пути распространения. Также видно, что траектория радиовсплеска, у которого угол рефракции проявил себя необычным образом, становится значительно длиннее вследствие распространения радиоизлучения в КВМ.

Нестандартное поведение траекторий распространения декаметровых радиовсплесков в присутствии КВМ проявляется и на дистанционно-частотных характеристиках (ДЧХ), рассчитанных в солнечной короне. На рис. 3 представлены ДЧХ для спокойных и возмущенных условий.

Из полученных графиков видно, что при отсутствии КВМ (рис. 3, а) отмечается тенденция роста общего пути распространения при увеличении частоты радиовсплеска. Чем выше частота радиовсплеска, тем менее сильно корона влияет на его распространение. Но в присутствии КВМ (рис. 3, б) ДЧХ существенно изменяется и появляется немонотонная зависимость общего пути распространения от частоты.

Также была рассмотрена возможность наземных наблюдений залимбового радиоизлучения внешнего, по отношению к Солнцу, удаленного источника. Для анализа воздействия КВМ на траекторные характеристики радиоизлучения вне солнечного источника были заданы следующие начальные условия. Предполагалось, что изучение происходит с противоположной по отношению к Солнцу стороны. Для простоты радиальная координата источника задавались на расстояниях порядка орбиты Земли  $R(\varphi_0)=R_z$ . Также был задан некоторый сектор начальных углов излучения  $\beta(\varphi_0)=\beta_0$ . Для удобства предполагалось  $\varphi_0=0rad$ .

В процессе вращения Земли вокруг Солнца возможны условия, когда внешний источник радиоизлу-

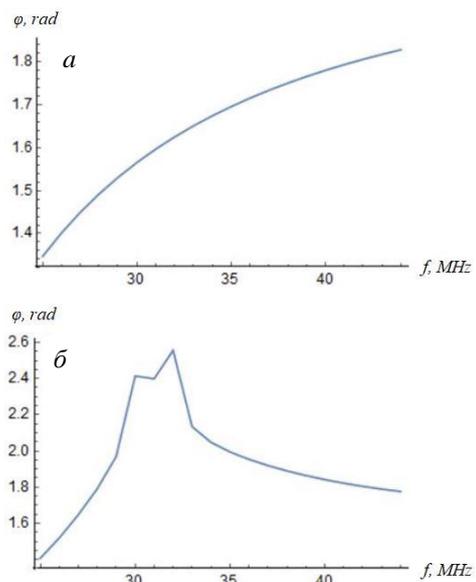


Рис. 3. Результаты расчетов ДЧХ ( $\varphi_i(f)$ ) радиовсплесков, приходящих на орбиту Земли, в отсутствии (а) и при наличии (б) полости с обедненной электронной концентрацией.  $f \in [25; 44]$  МГц.

чения заходит за лимб Солнца. При выбросе КВМ, радиоизлучение от источника может быть зарегистрировано наземным приемником. На основе моделей (1), (3) и системы уравнений (2) было проведено численное моделирование траекторных характеристик радиоизлучения в данной задаче. В расчетах полагалось  $\varphi_0=1rad$ . Полученные графики представлены на рис. 4. Нетрудно заметить, что при появлении на пути распространения радиоизлучения крупномасштабного возмущения обедненной концентрации, возможно образование плазменного волновода, в котором общий путь распространения значительно возрастает за счет последовательных отражений радиоизлучения от стенок волновода. Эти условия способствуют просачиванию радиоизлучения на дальние расстояния и, в конечном счете, позволяют ему попасть в точку приемника, находящегося на Земле.

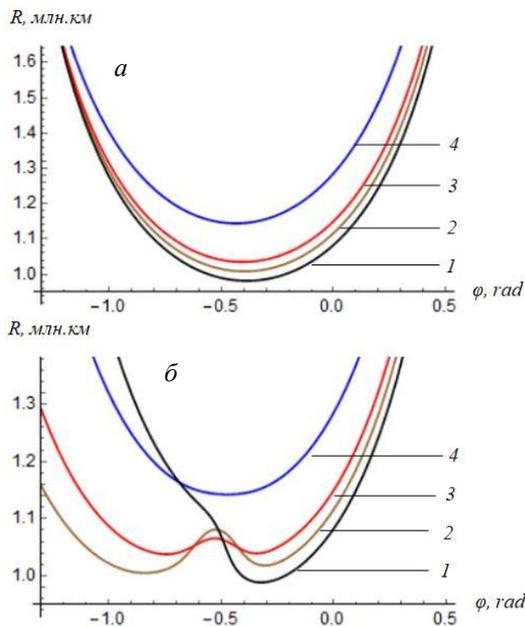


Рис. 4. Траектории радиоизлучения удаленного космического источника с различными начальными углами падения на солнечную корону в отсутствии (а) и при наличии (б) полости с обедненной электронной концентрацией. 1 —  $0.0058rad$ , 2 —  $0.006rad$ , 3 —  $0.0062rad$ , 4 —  $0.007rad$ . Рабочая частота  $f=2.31$  GHz ( $\lambda=13$  см)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе аналитического и численного моделирования проведено исследование распространения радиоизлучения солнечных и удаленных космических источников через корону Солнца. Рассмотрены источники, которые находятся на обратной стороне Солнца по отношению к наблюдателю на Земле. Определены гелиофизические условия существенного воздействия корональных плазменных образований на зондирующий луч. Показана возможность уверенных наземных наблюдений залимбового радиоизлучения в присутствии КВМ. Аппарат математического моделирования может быть использован для решения задач интерпретации данных измерений в различных вариантах просвечивания КВМ с космических аппаратов (одночастотном, двухчастотном, однопозиционном, многопозиционном, а также в случае, когда приемный пункт сам находится на космическом аппарате). Также его можно использовать при анализе экспериментальных данных о сигналах планетарных радаров и данных наблюдений проходящего через гелиосферу радиоизлучения дискретных космических источников.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ефимов А.И., Рудаш В.К. Исследование плазменных образований сверхкороны Солнца методом радиозондирования // Зарубежная радиоэлектроника. 2002. № 9. С. 28–30.  
 Станиславский А.А. Роль эффектов распространения радиоволн в солнечной короне для интерпретации залимбовых всплесков // Радиоастрономия и астрофизика. 2016. Т. 21, №1. С. 3–13.