

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ  
ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН  
В ВОЗМУЩЕННОЙ ОКОЛОСОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЕ**

**Д.С. Лукьянцев**

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

**MATHEMATICAL MODELING OF REFRACTION EFFECTS  
IN PROPAGATION OF RADIO WAVES IN PERTURBED NEAR-SUN PLASMA**

**D.S. Lukyantsev**

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

**Аннотация.** Для расчета характеристик радиоизлучения, прошедшего сквозь возмущенную солнечную корону, используется аппарат геометрической оптики. Рассмотрены приближенные аналитические модели электронной концентрации в спокойной и возмущенной околосолнечной плазме. Приведены результаты математического моделирования влияния корональных плазменных образований на траекторную картину распространения излучения внесолнечного источника в диапазоне сантиметровых и дециметровых радиоволн. Определены условия сильного воздействия плазменных образований на рефракцию радиоизлучения внешнего источника. Выявлены особенности транскоронального распространения радиоизлучения в возмущенных гелиофизических условиях для различных угловых расстояний между источником и Солнцем.

**Ключевые слова:** солнечная корона, радиоизлучение, моделирование, геометрическая оптика, рефракция.

**Abstract.** A geometrical optics tool is used to calculate characteristics of radio emission propagated through the perturbed solar corona. The approximated analytical models of electron concentration in perturbed and unperturbed near-Sun plasma have been considered. This report presents the results of mathematical modeling of the influence of coronal plasma inhomogeneities on trajectory pattern of radiation propagation of an extrasolar source in a range of centimetric and decimetric radio waves. Conditions for significant influence of plasma inhomogeneities on refraction of radio emission of an outer source have been determined. Features of transcoronal propagation of radio emission under disturbed heliophysical conditions have been detected for various angle distances between the source and the Sun.

**Keywords:** solar corona, radio emissions, modeling, geometrical optics, refraction.

**ВВЕДЕНИЕ**

Одним из широко известных методов радиодиагностики состояния солнечной короны является метод просвечивания околосолнечной плазмы излучением дискретных источников и сигналами с борта космических аппаратов [Ефимов, Рудащ, 2002; Станиславский, 2016; Лукьянцев, Афанасьев, 2019]. Несмотря на результаты, полученные в данном направлении, в настоящее время остается нерешенным ряд вопросов, связанных с надежной диагностикой и контролем мощных плазменных возмущений короны, одним из ярких представителей которых является корональный выброс массы (КВМ).

В настоящей работе на основе приближения геометрической оптики и численных расчетов лучевых уравнений проведен анализ траекторных характеристик внесолнечного радиоизлучения, прошедшего через солнечную корону с мощными плазменными возмущениями.

**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ  
И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Для анализа влияния околосолнечной плазмы на траекторные характеристики радиоизлучения внешних источников использовалась система лучевых дифференциальных уравнений

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

где  $R, \varphi$  — сферические координаты луча;  $\beta$  — угол рефракции луча в среде.

Для учета присутствия в короне Солнца плазменного образования в виде коронального выброса массы использовалась приближенная интегральная модель

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

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

Для учета наличия в короне Солнца плазменного образования в виде коронального выброса массы (КВМ) использовалась модель

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

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

В работе рассмотрено влияние КВМ на траекторные характеристики радиоизлучения от внешних источников на рабочих частотах сантиметрового и дециметрового диапазонов. Для системы (1) задавались следующие начальные условия. Предполагалось, что источник имеет радиальную координату  $R_0 = 1.5 \cdot 10^8$  км, а его положение относительно центра Солнца определяется углом  $\varphi_0 = 0$  рад. Начальный угол излучения  $\beta_0$  рассматривался в диапазоне  $[0, 0.05]$  рад с шагом 0.00125 рад. Рабочие частоты просвечивания  $f_1 = 937.5$  МГц,  $f_2 = 6$  ГГц. Параметры КВМ:

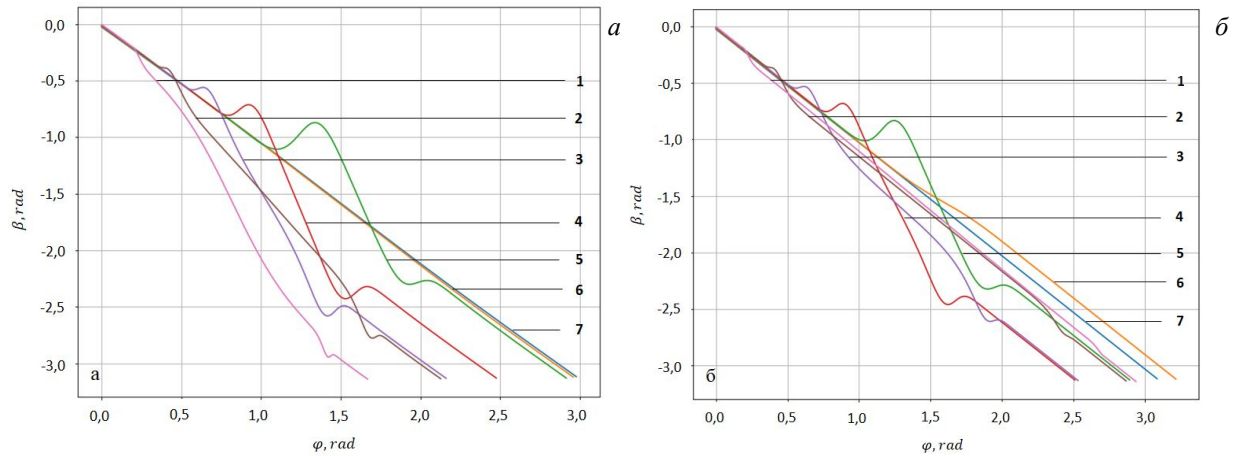


Рис. 1. Результаты расчетов углов рефракции дециметрового (а) и сантиметрового (б) диапазонов длин волн при наличии возмущения с обедненной электронной концентрацией. 1 — 0 рад; 2 — 0 рад; 3 — 0.0025 рад; 4 — 0.00375 рад; 5 — 0.005 рад; 6 — 0.00625 рад; 7 — 0.0075 рад

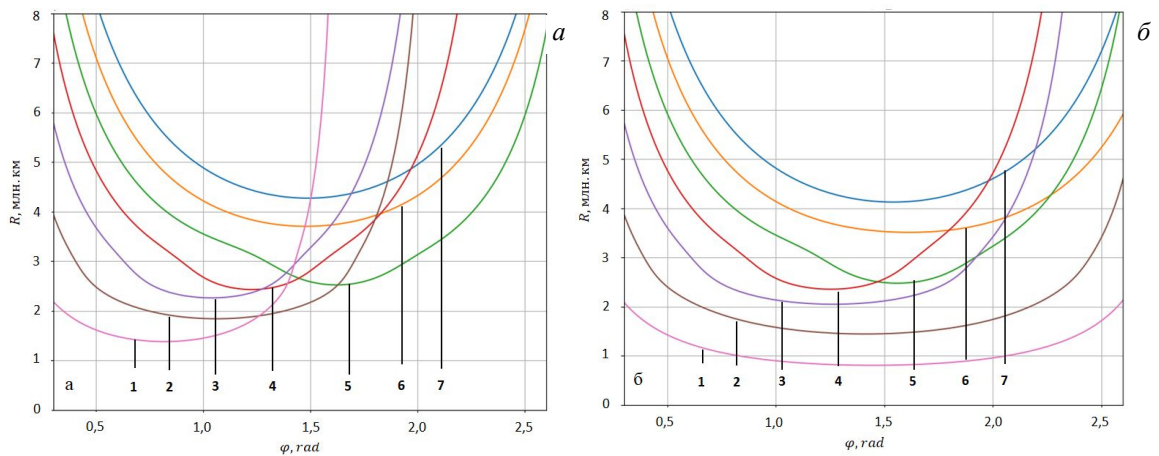


Рис. 2. Траектории радиоизлучения для рабочих частот 937.5 МГц (а) и 6 ГГц (б) при наличии возмущения с обедненной электронной концентрацией

$a=0.5R_s$ ,  $b=0.9$  рад,  $\mu=1$ . Центр локализации КВМ имел координаты:  $R_1=4R_s$ ,  $\phi_1=1.2$  рад.

На рис. 1 показаны углы рефракции радиоизлучения, полученные при использовании системы уравнений (1), для сантиметрового и дециметрового диапазонов при наличии в околосолнечной плазме КВМ с обедненной электронной концентрацией. Цифры соответствуют углам, при которых траектории распространения радиоизлучения проходят непосредственно через околосолнечную плазму.

Следует отметить, что присутствие в околосолнечной плазме локализованной неоднородности видно на полученных графиках как немонотонное поведение кривых. Первое нарушение монотонности кривых связано с проникновением луча в КВМ, второе — с выходом луча из полости. Как показывает поведение кривых, данный эффект может быть значительным. Это связано с тем, что радиоизлучение проходит через разные области КВМ — чем ближе траектория к центру локализации неоднородности, тем меньше вклад в изменение кривых. Из рисунка следует также, что для сантиметрового диапазона разброс углов рефракции меньше, чем для дециметрового. Связано это с тем, что для высоких частот околосолнечная плазма более прозрачна.

В целом, кривые для обеих частот соответствуют уменьшению общего пути распространения радиоизлучения по сравнению с фоновой короной.

На рис. 2 представлены соответствующие траектории радиоизлучения в околосолнечной плазме при наличии КВМ с обедненной электронной концентрацией.

Видно, что наличие КВМ в околосолнечной плазме приводит к достаточно сильному искажению траектории распространения радиоизлучения. В зависимости от того, в какой области неоднородности проходит луч, возникает соответствующее изменение общего пути распространения. Это непосредственно проявляется на рассчитанных дистанционно-угловых характеристиках (ДУХ), показанных на рис. 3.

Видно, что неоднородность влияет на некоторые сектора начальных углов излучения  $\beta_0$ . Для низкой частоты (а) хорошо прослеживается плавное изменение ДУХ, что соответствует сильному выталкиванию луча околосолнечной плазмой. Здесь проявляется эффект влияния КВМ в секторе углов  $\beta_0$ , при котором вначале происходит уменьшение общего пути распространения радиоизлучения, а затем его увеличение. Так, например, сектору углов  $[0.02, 0.022]$  рад соответствует залимбовое прохождение радиоизлу-

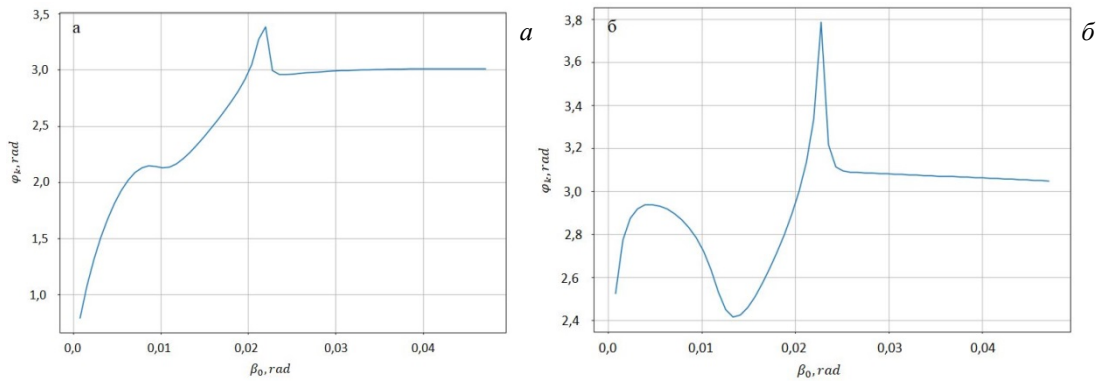


Рис. 3. Результаты расчетов ДУХ  $\varphi_k(\beta_0)$  радиоизлучения, приходящего на орбиту Земли, для 937.5 МГц (а) и 6 ГГц (б) при наличии возмущения с обедненной электронной концентрацией

нения. Связано это с тем, что при увеличении начального угла излучения общий путь распространения может уменьшиться при попадании луча в неоднородность с пониженной электронной концентрацией, а после прохождения центра локализации — наоборот, увеличиться за счет указанного фактора. Далее поведение ДУХ соответствует распространению радиоизлучения вне околосолнечной короны с постепенным уменьшением общего пути распространения. Присутствие в околосолнечной плазме КВМ приводит к немонотонности ДУХ, где также проявляется эффект прохождения излучения из заливочной области. В целом, полученные характеристики качественно похожи для обеих рабочих частот.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено математическое моделирование траекторных характеристик внесолнечного радиоизлучения сантиметрового и дециметрового диапазонов, прошедшего через возмущенную солнечную корону. Для этих частотных диапазонов определены гелиофизические условия существенного воздействия корональных плазменных образований на характеристики радиопросвечивания. Выявлены особенности поведения траекторных характеристик в возмущенной околосолнечной плазме. Предложенный аппарат математического моделирования применим для интерпретации данных измерений в задачах просвечивания КВМ с борта космических аппаратов и радиоизлучением дискретных космических источников.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ефимов А.И., Рудащ В.К. Исследование плазменных образований сверхкороны Солнца методом радиозондирования. *Зарубежная радиоэлектроника*. 2002. № 9. С. 28–30.
- Лукьянцев Д.С., Афанасьев Н.Т. Влияние корональных плазменных образований на радиоизлучение солнечных и удаленных космических источников. *Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. XVI конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»: Труды*. Иркутск, 2019. С. 80–82.
- Станиславский А.А. Роль эффектов распространения радиоволн в солнечной короне для интерпретации заливочных всплесков. *Радиоастрономия и астрофизика*. 2016. Т. 21, № 1. С. 3–13.