

УДК 519.6
DOI

CC BY 4.0

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ОБОЛОЧКИ ОБЪЕКТА НА РЕФРАКЦИЮ ИЗЛУЧЕНИЯ ВНЕШНЕГО ИСТОЧНИКА

Калашникова Е. И., Афанасьев Н. Т., Лукьянцев Д. С., Артола А. О.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский государственный университет», Иркутск, Российская Федерация,
e-mail: spacemaklay@gmail.com*

Для анализа рефракционных характеристик электромагнитного излучения, прошедшего через плазменную оболочку уединенного физического объекта, используется аппарат математического моделирования, основанный на представлениях геометрической оптики. Цель настоящей работы заключается в исследовании методом компьютерного моделирования особенностей рефракции излучения внешнего источника при просвечивании объекта, окруженного изотропной плазмой с крупномасштабными неоднородностями электронной концентрации. Для численных расчетов рефракционных эффектов плазмы в качестве исходной взята система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. При реализации вычислительной схемы использован язык программирования Python. Приведены результаты расчетов влияния фоновой и возмущенной плазменной оболочки на рефракцию излучения при просвечивании объекта. Рассмотрены возмущения плазмы в виде локализованных крупномасштабных неоднородностей обедненной и обогащенной электронной концентрации. В рамках принятой модели выявлены условия существенного изменения дистанции переноса излучения вследствие различных механизмов распространения, связанных с влиянием пространственной структуры плазменных возмущений. Показано, что волноводный механизм распространения излучения в системе «неоднородность – фоновая оболочка» является одним из механизмов, приводящих к возможной регистрации излучения внешнего источника, расположенного глубоко в теневой области объекта. В качестве волноводного канала может выступать полость плазменного возмущения либо пространство между фронтом возмущения и фоновой плазменной оболочкой.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, лучевое приближение, плазменная оболочка, электронные неоднородности, рефракция, механизмы распространения

MODELING OF IMPACT OF PLASMA SHELL OF OBJECT ON REFRACTION OF RADIATION OF EXTERNAL SOURCE

Kalashnikova E. I., Afanasev N. T., Lukyantsev D. S., Artola A. O.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Irkutsk State University”, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: spacemaklay@gmail.com*

Apparatus of mathematical modeling is used for analyze of refraction characteristics of electromagnetic radiation propagated through plasma shell of physical object. This apparatus bases on concept of geometrical optics. Purpose of this work consists of investigation by method of computer modeling of features of refraction of radiation of external source at radio sounding surrounded isotropic plasma with large-scale inhomogeneities of electron concentration. System of ordinary differential equations the first order is used as initial for numerical calculations of refraction effects of plasma. Language of programming Python is used for realization of calculation scheme. Results of calculations of impact of background and perturbed plasma shell on refraction of radiation at radio sounding are adduced. Plasma perturbations in kind localized large-scale inhomogeneities of depleted and enriched electron concentration are considered. Conditions of significant change of distance of radiation transport due to various mechanisms of propagation related to impact of spatial structure of plasma inhomogeneities are determined within the framework of the accepted model. Shown, that waveguide mechanism of propagation of radiation in a system “inhomogeneity – background shell” is one of mechanisms leading to possible registration of radiation of external source localized deeply in shadow area of object. Cavity of plasma inhomogeneity or space between inhomogeneity front and background plasma shell can perform as waveguide channel.

Keywords: electromagnetic radiation, ray approximation, plasma shell, electron-density inhomogeneities, refraction, propagation mechanism

Введение

Как известно [1; 2, с. 117; 3, с. 34], при интерпретации данных наблюдений источников электромагнитного излучения необходимо учитывать влияние окружающей среды на характеристики распространения излучения. Примерами таких сред являются околосолнечная плазма, корона Солнца и солнечный ветер, ионосферы Земли и других

планет, плазменные образования, образующиеся вокруг аппаратов, движущихся в мезосфере Земли с гиперзвуковой скоростью и др. [4–6]. Излучение, прошедшее сквозь плазменную оболочку уединенного объекта, может испытать сильную рефракцию, приводящую к потере информации об источнике излучения и процессах, протекающих как в его глубине, так и вблизи него

[7–9]. Дополнительные трудности при интерпретации данных наблюдений появляются в условиях возмущенных плазменных оболочек. В зависимости от типа объекта повторяемость, скорость и мощность плазменных возмущений могут существенно отличаться [10]. Среди различных видов возмущений крупномасштабные локализованные неоднородности плазмы, окружающей объект, являются значительным возмущающим фактором, требующим учета для корректного решения задачи электромагнитного просвечивания [11]. Благодаря интенсивному развитию прецизионного оборудования стало возможным более детальное изучение структуры и динамики крупномасштабных плазменных возмущений [12]. Для сепарации модуляции излучения источников, связанной с воздействием возмущений плазменной оболочки, представляется важной количественная оценка рефракционных эффектов крупномасштабных неоднородностей электронной концентрации в процессе переноса излучения.

Цель исследования – изучение методом компьютерного моделирования особенностей рефракции излучения внешнего источника при просвечивании объекта, окруженного изотропной плазмой с крупномасштабными неоднородностями электронной концентрации.

Материалы и методы исследования

Анализ рефракционных характеристик электромагнитного излучения, прошедшего через уединенный объект, окруженный плазмой, эффективно проводить с помощью математического моделирования. Реальную плазменную оболочку можно заменить ее

приближенной математической моделью. Для количественной оценки эффектов воздействия плазмы на характеристики прошедшего излучения необходим аппарат математического моделирования. В качестве аппарата в работе использовалось лучевое приближение [3, с. 72]. Основным достоинством геометрической оптики является ее наглядность и относительно простая математическая форма. В основе геометрикооптического решения волнового уравнения лежит предположение о медленных вариациях функции диэлектрической проницаемости плазмы на масштабе порядка длины волны излучения. Ключевым уравнением лучевого приближения является уравнение эйконала, представляющее собой нелинейное уравнение в частных производных первого порядка, принадлежащего к классу уравнений типа Гамильтона – Якоби [3, с. 74]. Решение этого уравнения методом характеристик позволяет определить траектории лучей. В итоге метод геометрической оптики дает возможность получить приближенное представление поля излучения, прошедшего через плазменную оболочку объекта, если найден способ решения лучевых уравнений. Существует и другой подход к выводу уравнений для траекторий лучей, основанный на вариационном исчислении. Для расчета влияния плазменной оболочки объекта на распространение электромагнитного излучения в работе использовались лучевые уравнения для изотропной плазмы, полученные из вариационного принципа Ферма в форме, не содержащей дополнительного параметра в виде элемента группового пути. В двумерном случае они имеют следующий вид [13]:

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

где R , φ – радиальная и угловая переменные соответственно (рис. 1); β – угол рефракции луча; ε – диэлектрическая проницаемость плазменной оболочки. В условиях возмущенной окружающей плазмы диэлектрическая проницаемость задавалась в виде суммы слагаемых:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1, \quad (2)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость невозмущенной плазменной оболочки, функция ε_1 характеризует крупномасштабные электронные неоднородности. В качестве последних были рассмотрены локализованные неоднородности обедненной и обогащенной концентрации. Диэлектрическая проницаемость фоновой плазмы представлялась функцией [14]:

$$\varepsilon_0 = 1 - \left(\frac{f_{pl}}{f} \right)^2 \left(\frac{R_m}{R} \right)^2, \quad (3)$$

где f_{pl} – плазменная частота оболочки объекта на уровне R_m , частота f характеризует излучение внешнего источника. Неоднородности окружающей плазмы задавались в виде

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{f_{pl}}{f} \right)^2 \left(\mu_1 \exp \left[-a_{R1} (R - R_{L1})^2 - a_{\varphi1} (\varphi - \varphi_{L1})^2 \right] + \mu_2 \exp \left[-a_{R2} (R - R_{L2})^2 - a_{\varphi2} (\varphi - \varphi_{L2})^2 \right] \right). \quad (4)$$

где $\mu_1, R_{L1}, \varphi_{L1}, a_{R1}, a_{\varphi1}$ – интенсивность, координаты центра локализации и пространственные масштабы изолированной неоднородности обедненной концентрации;

$\mu_2, R_{L2}, \varphi_{L2}, a_{R2}, a_{\varphi2}$ – соответствующие параметры изолированной неоднородности обогащенной концентрации.

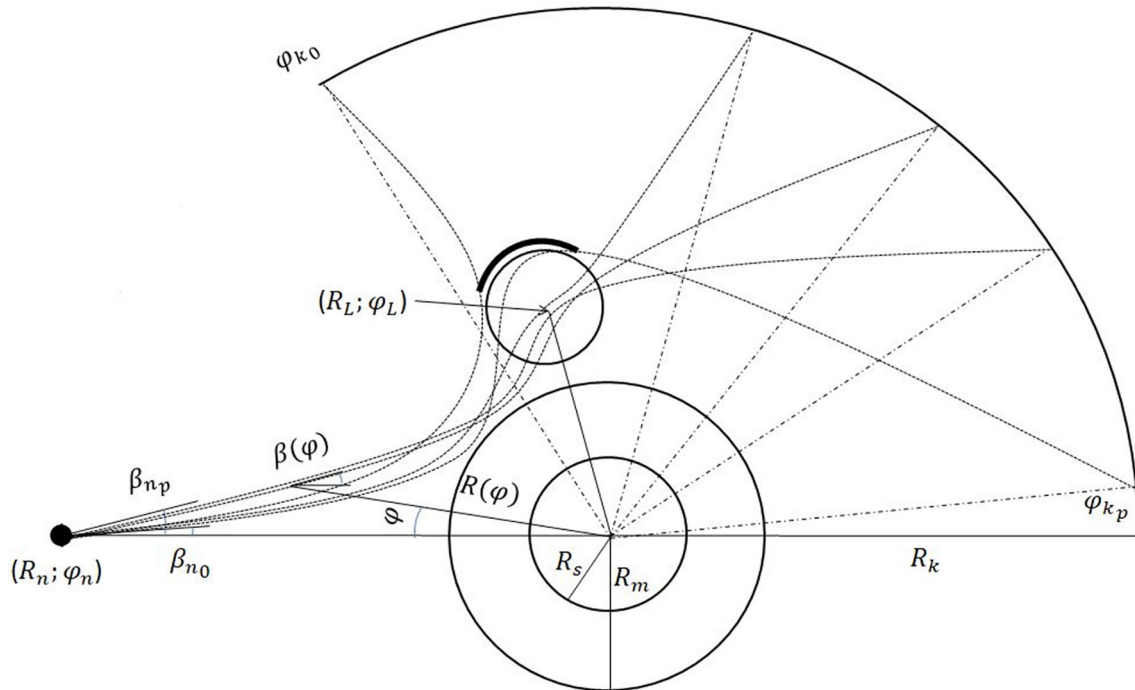


Рис. 1. Условная схема просвечивания объекта, окруженного плазмой:
 $(R_n; \varphi_n)$ – координаты источника, $[\beta_{n0}; \beta_{np}]$ – сектор углов излучения, R_s – радиус объекта;
 R_m – радиус внутренней границы плазменной оболочки, $(R_k; \varphi_{kp})$ – координаты приемника;
 $(R_L; \varphi_L)$ – координаты крупномасштабного локализованного возмущения;
ограниченная темная дуга соответствует фронту комбинированной структуры
локализованных неоднородностей обогащенной и обедненной электронной концентрации
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Результаты исследования и их обсуждение

Расчеты рефракционных характеристик излучения были выполнены с помощью численного интегрирования системы (1) для модели фоновой плазмы (3) и плазменного возмущения, описанного зависимостью (4). Интегрирование лучевых уравнений выполнялось посредством функции odeint (библиотека scipy) на языке программирования Python. В основу выбранной специальной функции положен классический метод численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений Рунге – Кутты 4-го порядка. Тестирование используемой вычислительной схемы

траекторных расчетов проводилось нами ранее в работах [14; 15] путем сравнения численного и аналитического решения, полученного для простой модели показателя преломления окружающей плазменной среды. Результаты выполненного тестирования показали хорошее соответствие аналитических и численных расчетов.

Моделирование процесса электромагнитного просвечивания объекта, окруженного плазмой, проводилось при следующих начальных условиях:

$$\begin{aligned} \varphi_n &= 0 \text{ rad}, R_n = 100 \text{ cul} \\ (\text{cul} - \text{условная единица длины}), \\ \beta_n &\in [-0.063; -0.02]. \end{aligned}$$

Радиус объекта $R_s = 1 \text{ cul}$.

Плазменная частота $f_{pl} = 20 \text{ МГц}$ задавалась на уровне $R_m = 5R_s$. Рассматривался многочастотный режим просвечивания в диапазоне 20–70 МГц. Расчеты проводились до расстояния $R_k = 100 \text{ cul}$. Крупномасштабная неоднородность описывалась набором параметров:

$$\begin{aligned}\mu_1 &= -\mu_2 = 1.5, R_{L1} = 6R_s, \\ R_{L2} &= 6.2R_s, \varphi_{L1} = \varphi_{L2} = 1.2, \\ a_{R1} &= 44.4R_s^{-2}, = 400R_s^{-2}, a_{\varphi1} = a_{\varphi2} = 2.6.\end{aligned}$$

Рассчитанные дистанционно-угловые характеристики (ДУХ) представлены на рис. 2. В качестве обобщенной дальности распространения излучения здесь является конечное значение угловой координаты φ_k . Нетрудно заметить (рис. 2, а), что присутствие в окружающей плазме неоднородности обогащенной электронной концентрации приводит к существенным изменениям в рефракционных характеристиках излучения, прошедшего сквозь оболочку объекта. Явно прослеживается граница между лучами, прошедшими с передней (внешней) и обратной сторонами неоднородности, где обратной стороной является область неоднородности в направлении на объект. В случае внешнего прохождения излучения происходит уменьшение дистанции переноса вследствие его отражения от поверхности плазменного возмущения. Взаимодействие излучения с обратной стороной локализованной неоднородности также может приводить к изменению пути распространения. При таком механизме просвечивания возникает заметное увеличение дистанции, что создает условия для регистрации низкочастотного излучения в пункте приема при расположении источника глубоко в теневой области уединенного объекта. Следует отметить особенность распространения излучения на частоте 25 МГц, когда возникает нетипичное увеличение дистанции. Этот эффект появления поддиапазона углов между минимальным и максимальным изменениями дистанции просвечивания соответствует прохождению луча вблизи границы возмущения, разделяющей процессы распространения с внешней и обратной сторон крупномасштабной неоднородности.

В другом случае, когда на пути переноса излучения встречается электронная неоднородность с пониженной концентрацией, возникают качественно другие рефракционные эффекты (рис. 2, б). При этом вариации траекторных характеристик происходят более плавно. Подобный характер

вариаций связан с эффектом распространения излучения через полость крупномасштабной неоднородности. Необходимо заметить, что эффект воздействия возмущения на прохождение излучения сквозь плазменную оболочку концентрируется в узком диапазоне углов падения. Причем, в отличие от ДУХ в случае плотного плазменного образования (рис. 2, а), влияние возмущения на рефракционные характеристики смещается в область больших значений угла падения. Граница между областями распространения излучения с внешней и обратной стороны крупномасштабной неоднородности соответствует переходной области, где происходит смена максимума дистанции на ее минимум. Как и в предыдущем случае, максимальное увеличение дистанции за счет влияния плазменного возмущения приводит к регистрации низкочастотного излучения при расположении источника излучения глубоко в теневой области объекта.

На рис. 2, в, представлены рассчитанные ДУХ в случае плазменной оболочки с неоднородностями обогащенной и обедненной электронной концентрации. Заметно сходство с поведением кривых на рис. 2, а. Общее уменьшение дистанции распространения излучения связано с дополнительным влиянием полости возмущения. Ход кривой на рабочей частоте 30 МГц для подобного типа крупномасштабной неоднородности является аномальным. Появление первой границы между минимумом и максимумом дистанции распространения ($\beta_n = -0.041 \text{ rad}$) вызвано влиянием внешней и обратной сторон плазменного возмущения. Заметное уменьшение дистанции переноса излучения ($\beta_n = -0.031 \text{ rad}$) связано с конечными размерами возмущения и возможностью распространения через фронт крупномасштабной неоднородности.

Важно отметить, что простейшие модели (3) и (4) являются достаточно универсальными, что позволяет применять их для широкого круга задач. В то же время эти модели, характеризуя плазменную среду, не рассматривают эффекты внешнего магнитного поля, турбулентность среды, поглощение электромагнитного излучения и сосредоточены главным образом на учете рефракционных свойств окружающей плазменной оболочки.

В качестве примера для демонстрации используемой вычислительной схемы расчета была рассмотрена задача многочастотного просвечивания возмущенной солнечной короны радиовсплесками корональных источников, локализованных в залимбовой области.

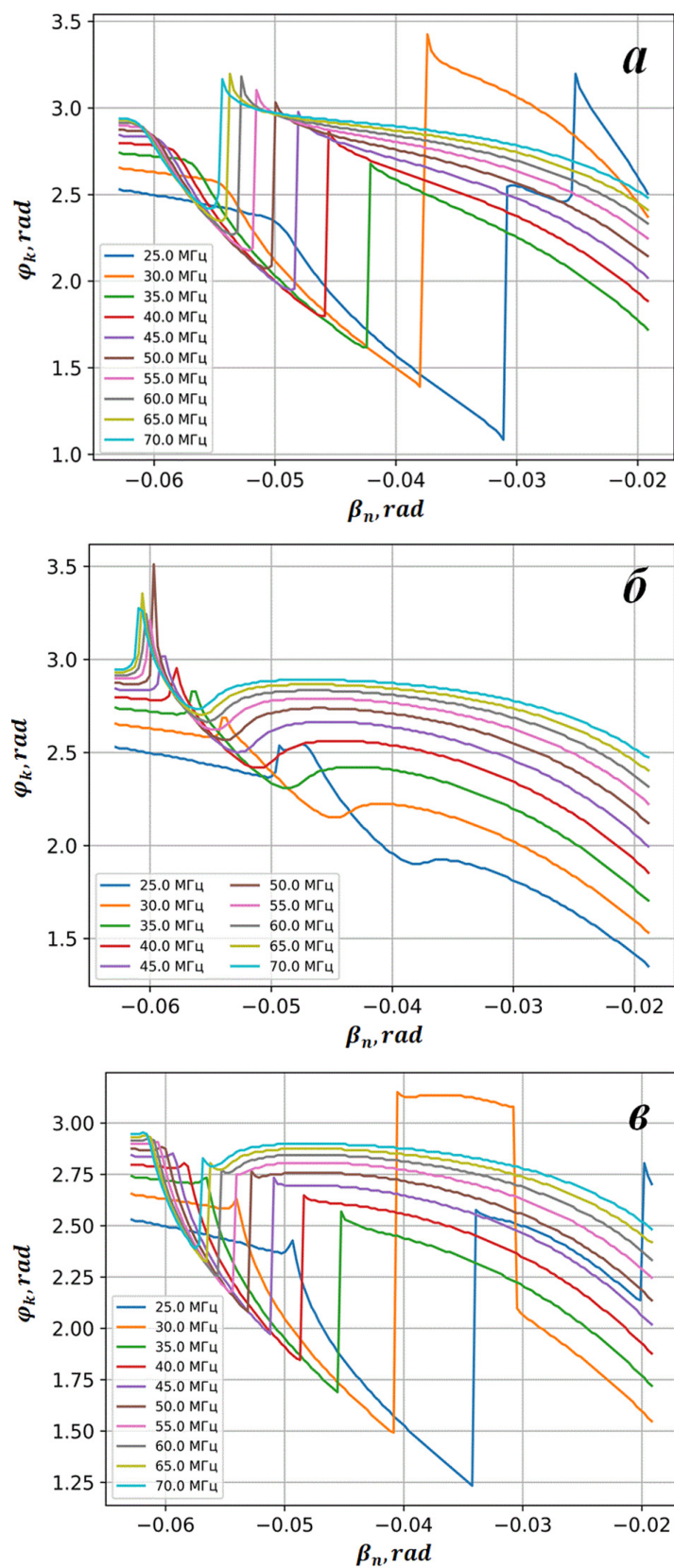


Рис. 2. Дистанционно-угловые характеристики излучения при распространении в плазменной оболочке объекта с локализованными электронными неоднородностями:

a – $\mu_1 = 0$, *б* – $\mu_2 = 0$, *в* – $\mu_1 = -\mu_2 = 1.5$

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

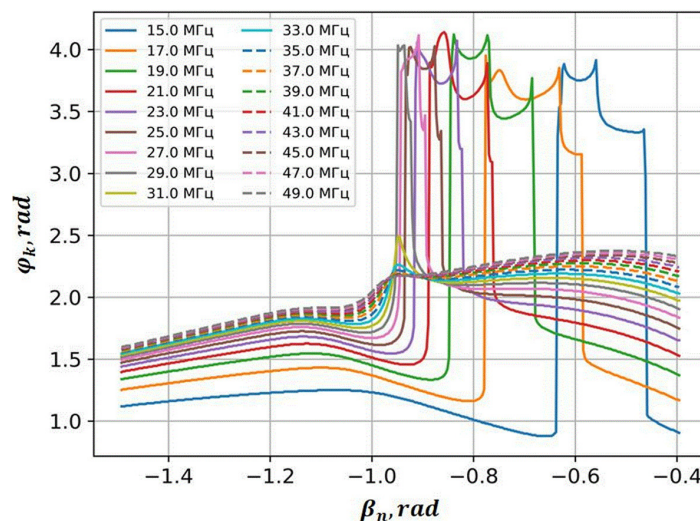


Рис. 3. Многочастотное просвечивание возмущенной околосолнечной плазмы радиоизлучением корональных источников

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

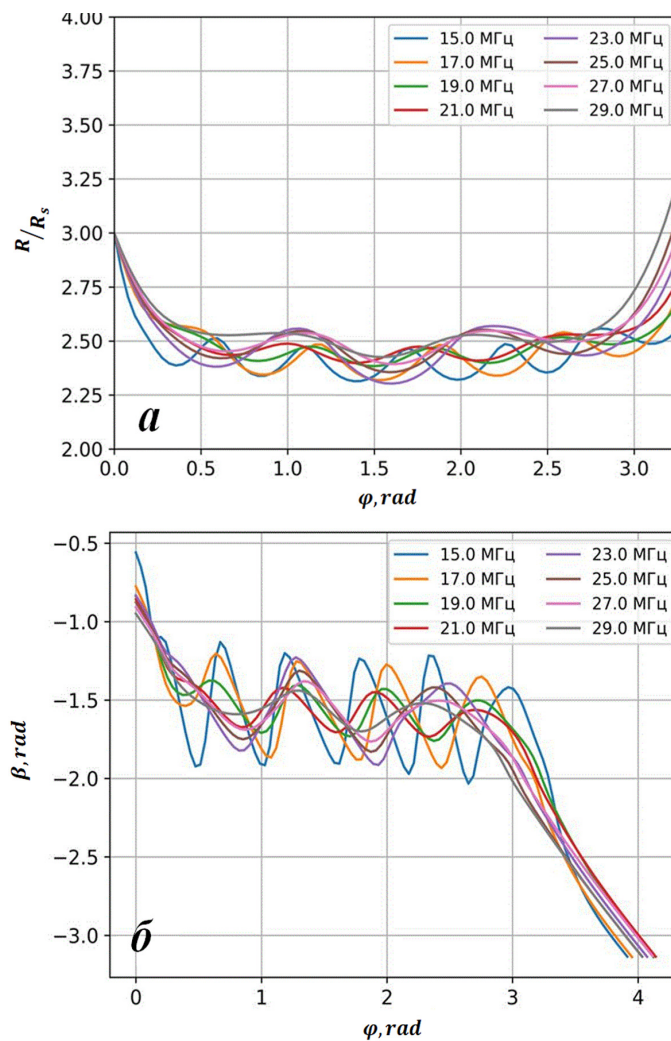


Рис. 4. Траектории (а) и углы рефракции (б) солнечных залифовых радиовсплесков в возмущенной короне

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Ранее в работе [16] с этой целью рассматривалось плазменное возмущение в виде простейшей модели коронального выброса массы (КВМ), состоящей из двух колец, где центральная часть соответствует области с обедненной концентрацией электронов. В качестве модели КВМ нами использовалась более общая аналитическая зависимость (4). Были заданы следующие параметры:

$$\begin{aligned} f_{pl} &= 11 \text{ МГц}, \mu_1 = -\mu_2 = 1, \\ R_{L1} &= 1.5R_s, R_{L2} = 2.6R_s, \\ \varphi_{L1} &= \varphi_{L2} = 0.5, a_{R1} = R_s^{-2}, a_{R2} = 100R_s^{-2}, \\ a_{\varphi1} &= a_{\varphi2} = 1, R_s = 7 \cdot 10^5 \text{ км.} \end{aligned}$$

Результаты численных расчетов представлены на рис. 3, 4, откуда следует, что в случае сложной структуры КВМ на ДУХ радиоизлучения формируются области, где происходит существенный рост дистанции распространения. В этих условиях возможна регистрация излучения корональных источников при их расположении глубоко в заливочной области.

Отметим, что диапазон частот, рассмотренных при моделировании, соответствует экспериментальным данным работы [16] и говорит в пользу волноводного механизма распространения. Отмеченный эффект для рабочих частот, где происходят существенные изменения в дистанции распространения, показан на рис. 4. Здесь приведены результаты расчетов траекторий распространения и текущие значения углов рефракции радиоизлучения. Волноводный механизм соответствует осциллирующим изменениям в рефракционных характеристиках.

Заключение

На основе приближения геометрической оптики проведено компьютерное моделирование влияния возмущенной плазменной оболочки объекта на рефракционные характеристики электромагнитного излучения внешнего источника. Поставлены численные эксперименты для оценки влияния крупномасштабных электронных неоднородностей окружающей плазмы на траекторные и дистанционно-угловые характеристики прошедшего излучения. Рассмотрен многочастотный режим просвечивания. Показано, что в процессе распространения излучения через плазменную оболочку с локализованными крупномасштабными неоднородностями могут возникать аномальные эффекты. В рамках принятой модели получены условия существенного

изменения дистанции распространения излучения на различных рабочих частотах в зависимости от структуры возмущения. Показано, что одним из механизмов, приводящих к значительным изменениям в рефракционных характеристиках излучения, является волноводный механизм распространения. В качестве волноводного канала может выступать полость возмущения либо пространство между фронтом возмущения и фоновой плазменной оболочкой. Выявлена возможность регистрации излучения от источника, локализованного в глубокой тени рассматриваемого объекта, погруженного в плазму.

Список литературы

1. Попов С. Б., Постнов К. А., Пширков М. С. Быстрые радиовсплески // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. Вып. 10. С. 1063–1079. DOI: 10.3367/UFN.2018.03.038313.
2. Современные достижения в плазменной гелиогеофизике / Под ред. Л. М. Зеленого, А. А. Петруковича, И. С. Веселовского. М: ФИЗМАТЛИТ, 2018. 688 с. ISBN 978-5-9221-1796-8.
3. Яковлев О. И., Якубов В. П., Урядов В. П., Павельев А. Г. Распространение радиоволн. М.: ЛЕНАНД, 2009. 496 с. ISBN 978-5-9710-0183-6.
4. Афанасьев Н. Т., Чудаев С. О. Диагностика стохастического ионосферного канала в декаметровом диапазоне радиоволн // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6. № 4. С. 77–85. DOI: 10.12737/szf-64202010.
5. Ефимов А. И., Луканина Л. А., Чашей И. В., Коломиец С. Ф., Бёрд М. К., Петцольд М. Наблюдение возмущенных плазменных структур в окрестности Солнца и околоземном пространстве методами радиозондирования и локальных измерений // Космические исследования. 2020. Т. 58. № 6. С. 495–502. DOI: 10.31857/S0023420620060047.
6. Тамбовцев В. И., Шевяков И. А., Литвинов А. А. Радиопрозрачность ионизированной оболочки, образующейся вокруг гиперзвукового объекта в мезосфере // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2015. Т. 15. № 3. С. 142–146. DOI: 10.14529/cter150317.
7. Злыднев Е. Н., Тамбовцев В. И., Шевяков И. А. Преломление и отражение радиоволн на фронте ударной волны в плазме спускаемого аппарата // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2018. Т. 74. № 3. С. 118–124.
8. Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Субаев И. А., Китаева М. А. Исследование ярких компактных радиоисточников северной полусферы на частоте 111 МГц // Астрономический журнал. 2020. Т. 97. № 5. С. 378–398. DOI: 10.31857/S0004629920060067.
9. Саванов И. С., Шематович В. И. Активность звезд с планетными системами и ее влияние на потерю атмосферы горячими экзопланетами // Астрофизический бюллетень. 2021. Т. 76. № 4. С. 533–557. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktivnost-zvezd-s-planetnymi-sistemami-i-ee-vliyaniya-na-poteryu-atmosfery-goryachimi-ekzoplanetami> (дата обращения: 06.05.2026).
10. Еселевич В. Г., Еселевич М. В., Зимовец И. В. О возможном различии в формировании корональных выбросов массы двух типов // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 2. С. 12–22. DOI: 10.12737/szf-82202202.
11. Ефимов А. И., Смирнов В. М., Чашей И. В., Набатов А. С. Крупномасштабные возмущения солнечного ветра по данным радиопросвечивания с космического аппарата

MARS EXPRESS и локальных измерений на космическом аппарате WIND // Геомагнетизм и аэрономия. 2023. Т. 63. № 3. С. 275–283. DOI: 10.31857/S0016794022600661. EDN: POETYS.

12. Гаврик А. Л., Коломиец С. Ф., Илюшин Я. А., Бондаренко М. И., Луканина Л. А., Копнина Т. Ф. Радиопросвечивание в миссии Венера-Д: концепция построения радиочастотных систем и усовершенствованные методики обработки результатов измерений // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2019. Т. 11. № 1. С. 5–12. DOI: 10.17725/rensit.2019.11.005.

13. Афанасьев Н. Т., Лукьянцев Д. С., Танаев А. Б., Чудаев С. О. Декаметровая радиодиагностика тонкой структуры ионосферы с высокоорбитальных ИСЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. 2023. Т. 20. № 4. С. 299–307. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-299-307.

14. Ким Д. Б., Афанасьев Н. Т., Лукьянцев Д. С., Ситов И. С., Танаев А. Б. Математическое моделирование групповой задержки сигнала в возмущенном канале с конечной кривизной // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 8. С. 49–55. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40111> (дата обращения: 02.05.2026). DOI: 10.17513/snt.40111.

15. Ким Д. Б., Афанасьев Н. Т., Лукьянцев Д. С., Ситов И. С., Танаев А. Б., Чудаев С. О. Рефракционные искажения характеристик сигнала в возмущенном информационном канале с конечной кривизной // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 12 (Ч. 2). С. 203–209. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39882> (дата обращения: 06.05.2026). DOI: 10.17513/snt.39882.

16. Станиславский А. А. Роль эффектов распространения радиоволн в солнечной короне для интерпретации заливковых всплесков // Радиофизика и радиоастрономия. 2016. Т. 21. № 1. С. 3–13. DOI: 10.15407/rpra21.01.003.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации (тема госзадания FZZE-2026-0006).

Financing: The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (projects FZZE-2026-0006).