

На правах рукописи



Лукьянцев Дмитрий Сергеевич

**ВЛИЯНИЕ РЕФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ГРАВИТАЦИОННЫХ  
И ПЛАЗМЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ**

Специальность 1.3.4 — Радиофизика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ИГУ»).

Научный руководитель: **Афанасьев Николай Тихонович**,  
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Чашей Игорь Владимирович**,  
доктор физико-математических наук,  
Филиал «Пушчинская радиоастрономическая обсерватория им.  
В. В. Виткевича АКЦ ФИАН» Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Физического института им.  
П. Н. Лебедева Российской академии наук (ПРАО АКЦ  
ФИАН),  
Главный научный сотрудник отдела плазменной астрофизики

**Уралов Аркадий Михайлович**,  
доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-  
земной физики Сибирского отделения Российской академии  
наук (ИСЗФ СО РАН),  
Главный научный сотрудник отдела радиоастрофизики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова  
Российской академии наук, Фрязинский филиал

Защита диссертации состоится «17» сентября 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.306.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет» и на сайте <https://isu.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, доцент

А. Э. Растёгин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Хорошо известно, что явление рефракции электромагнитного излучения космических источников имеет исключительно важное значение при интерпретации результатов астрофизических экспериментов [1–8]. Данные измерений рефракционных характеристик принятых сигналов и существующие представления о неоднородной структуре космической плазмы позволяют исследовать механизмы генерации и статистику источников излучения. С другой стороны, анализируя рефракционные характеристики принятого излучения источника с известными свойствами можно, решая обратную задачу, определить параметры неоднородностей космической плазмы. Дополнительные трудности при интерпретации астрофизических экспериментов возникают вследствие влияния окружающих полей тяготения. В частности, распространение излучения в окрестности массивных астрофизических объектов может сопровождаться рядом таких значимых эффектов, как гравитационное линзирование, фокусировка потока излучения, изменение наблюдаемого спектра и др. [4, 9–12]. В то же время измеренные рефракционные характеристики и структурные особенности излучения, прошедшего поля тяготения, содержат уникальную информацию о природе скрытых объектов, невидимых в электромагнитном диапазоне.

Одним из следствий общей теории относительности (ОТО) является гравитационное замедление времени при распространении электромагнитного излучения вблизи массивного астрофизического объекта. Этот эффект был предсказан Ирвином Шапиро для случая распространения радиоизлучения вблизи Солнца [4, 11, 12]. В настоящее время благодаря интенсивному развитию прецизионного оборудования с использованием новой элементной базы на практике реализуются тонкие эксперименты, связанные с наблюдениями гравитационных возмущений от объектов, удаленных на космологические расстояния [13, 14]. Поэтому интерес к эффекту Шапиро возродился вновь. В частности, в гамма-астрономии большое внимание уделяется поиску гравитационно-линзированных гамма-всплесков [5]. Под воздействием поля тяготения массивного объекта, встречающегося в окрестности луча зрения на источник, в результате линзирования может реализоваться многопутевое распространение кратковременного гамма-импульса. Вследствие эффекта Шапиро эти моды импульса достигнут наблюдателя в разные моменты времени, причем величина групповой задержки между модами пропорциональна массе гравитационного объекта. Измерения замедления Шапиро имеет большое значение и при интерпретации наблюдаемого радиоизлучения пульсаров. Массивные объекты, движущиеся в окрестности луча зрения, направленного на пульсар, оказывают влияние на временные характеристики излучения и приводят к модуляции моментов прихода импульсов пульсара.

Длительные наблюдения моментов прихода импульсов пульсаров используют для обнаружения невидимых объектов большой массы.

Для детального восстановления возмущающих гравитационных потенциалов скрытых объектов по характеристикам принятого излучения необходимо учитывать не только маскирующее действие космической плазмы, но и присутствие в окружающем пространстве областей стохастических неоднородностей полей тяготения, поскольку последние также могут приводить к частичному замыванию гравитационных эффектов детерминированных массивных объектов.

**Цель диссертации** заключается в исследовании методом математического моделирования особенностей распространения электромагнитного излучения космических источников с учетом рефракционных эффектов гравитационных и плазменных неоднородностей.

Для достижения цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. На основе лучевого приближения и теории возмущений разработать численно-аналитический метод моделирования рефракционных характеристик электромагнитного излучения при распространении в космической среде с гравитационными и плазменными неоднородностями.

2. Разработать программный комплекс расчета направления распространения, групповой задержки и пространственного ослабления потока электромагнитного излучения в космической плазме с учетом влияния окружающих полей тяготения.

3. Выполнить тестирование разработанных программ расчета путем сравнения результатов вычислений с аналитическими решениями, полученными для простых моделей среды.

4. Используя разработанный аппарат математического моделирования, поставить численные эксперименты для оценки рефракционных эффектов гравитационных и плазменных неоднородностей в структуре электромагнитного излучения космических источников.

#### **Научная новизна.**

1. Для интерпретации данных измерений астрофизических прецизионных инструментов нового поколения разработан аппарат математического моделирования рефракционных характеристик распространения электромагнитного излучения в космической среде с гравитационными и плазменными неоднородностями. Влияние гравитации учтено путем использования модели эффективного показателя преломления вакуума, выраженного через гравитационный потенциал.

2. Предложен новый численно-аналитический метод моделирования рефракционных характеристик распространения электромагнитного излучения космических источников в поле тяготения группы астрофизических объектов в присутствии локализованного гравитационного шума. Основу метода составляет модель аддитивного показателя преломления гравитационного поля объектов и решение стохастических дифференциальных уравнений Лагранжа-Эйлера, полученных из вариационного принципа Ферма.

3. Для определения параметров звездного коронального выброса по данным многоволнового радиопросвечивания сигналами дискретных космических источников предложены новые функциональные соотношения, учитывающие значительные искривления траекторий просвечивания. Полученные соотношения с учетом сведений о пространственной структуре коронального выброса позволяют оценить плотность регулярной фронтальной части выброса.

**Научная и практическая значимость работы.** Предложенный аппарат численно-аналитического моделирования рефракционных характеристик электромагнитного излучения можно использовать для интерпретации экспериментальных данных, в том числе при изучении объектов ненаблюдаемых во всех диапазонах электромагнитной шкалы. Задавая различные конфигурации систем астрофизических объектов с соответствующими пространственными масштабами, можно синтезировать различные лучевые структуры в картинной плоскости наблюдателя, которые позволят идентифицировать скрытые массивные объекты в натуральных экспериментах. Предложенные функциональные соотношения при решении задачи многоволнового просвечивания звездной и солнечной короны могут быть использованы для оценки структуры корональных выбросов массы в ближайших и будущих экспериментах.

**Методология и методы исследования.** Исследования, выполненные в диссертации, проведены на основе результатов численно-аналитического моделирования с использованием приближения геометрической оптики и теории возмущений. Разработанные программы расчета протестированы путем сравнения результатов моделирования с аналитическими решениями, полученными для простых моделей. Интерпретация результатов расчетов проводилась с использованием известных экспериментальных данных.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Предложенный численно-аналитический метод моделирования рефракционных характеристик электромагнитного излучения космических источников при распространении в стохастическом поле тяготения позволяет синтезировать лучевую структуру изображения в картинной плоскости наблюдателя и может быть использован для детального восстановления возмущающих гравитационных потенциалов массивных астрофизических объектов, невидимых в электромагнитном диапазоне, но проявляющих себя через гравитационное взаимодействие. Под воздействием многокомпонентного флуктуирующего поля тяготения группы объектов происходит сепарация излучения в картинной плоскости наблюдателя.

2. Разработанный аппарат математического моделирования рефракционных характеристик электромагнитного излучения при распространении в поле тяготения группы астрофизических объектов, погруженных в космическую плазму, позволяет проводить оценку условий стохастического замыкания эффектов гравитационного линзирования излучения различных частотных диапазонов. Показано, что рабочие частоты метрового диапазона длин волн представляют

собой условную низкочастотную границу электромагнитной шкалы для наблюдений эффекта гравитационного линзирования в стохастической космической плазме.

3. Использование сведений о пространственной структуре коронального выброса звездной массы и многочастотных радиоизмерений групповых задержек сигналов просвечивания дискретных космических источников позволяет оценить электронную плотность фронтальной части выброса.

**Достоверность результатов.** Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается адекватным использованием математического аппарата, совпадением полученных аналитических результатов в предельных частных случаях с известными из литературы, а также использованием для моделирования хорошо апробированных численных схем.

**Личный вклад автора.** Основные результаты работы были получены лично самим автором, либо при его непосредственном участии. Автор сделал вывод основных аналитических соотношений, представленных в диссертации, разработал программный комплекс расчета и выполнил численные эксперименты. Анализ полученных результатов был выполнен автором совместно с научным руководителем.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на XXVIII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» (Йошкар-Ола, 2023 г.), Научных конференциях «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, 2020, 2023, 2024, 2025 гг.), 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2022 г.), Международных симпозиумах «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Москва, 2023 г.; Санкт-Петербург, 2024 г.), на Российских конференциях «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества» (Омск, 2022, 2024 гг.), Международных конференциях «Физика А.СПб» (Санкт-Петербург, 2022, 2023, 2024 гг.), Ежегодной Всероссийской конференции «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, 2023 г.), Международных конференциях «Динамические системы и компьютерные науки: теория и приложение (DYSC)» (Иркутск, 2021, 2022, 2023, 2024 гг.), Международных Байкальских Молодежных научных школах по фундаментальной физике (Иркутск, 2019, 2022 гг.), научных семинарах ИГУ.

Исследования проводились при поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FZZE-2020-0024, FZZE-2023-0004, FZZE-2024-0005) на базе уникальной научной установки «Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ» (соглашение № 075-15-2021-675) и грантов для поддержки молодых ученых ИГУ (темы 091-20-305, 091-21-305, 091-22-307).

**Публикации.** По материалам диссертации было опубликовано **42** работы, в том числе **6** в журналах из списка ВАК: «Техника радиосвязи», «Современные наукоемкие технологии», «Математическая физика и компьютерное моделирование», «Компьютерные исследования и моделирование», — **7**, индексируемых Scopus и Web of Science: «St. Petersburg Polytechnic University

Journal. Physics and Mathematics», «Журнал технической физики», «Proceeding SPIE», «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса».

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет **108** страниц, включая **40** рисунков. Список литературы включает **163** наименования.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрена актуальность исследуемой темы, обозначена цель диссертационной работы и сформулированы решаемые задачи. Указана научная новизна и научно-практическая ценность работы, а также методы решения поставленных задач. Перечислены научные положения, выносимые на защиту, представлена информация об апробации результатов. Излагается краткое содержание диссертации.

В **Главе 1** рассмотрены основные положения лучевого приближения и области его применимости. Разработан метод численно-аналитического моделирования направления распространения, групповой задержки и пространственного ослабления потока электромагнитного излучения в космической среде. В **разделе 1.1** представлен вывод лучевых дифференциальных уравнений в форме Лагранжа-Эйлера, полученных из вариационного принципа Ферма. В **разделе 1.2** рассматриваются некоторые детерминированные модели описания космической среды в присутствии гравитационных и плазменных неоднородностей. В **подразделе 1.2.1** рассмотрены известные модели диэлектрической проницаемости околосредной плазмы. Проанализированы аналитические модели профилей диэлектрической проницаемости солнечной короны. Для оценок рефракционных эффектов околосредной плазмы отмечается полезность приближенной аналитической модели вида:

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

где  $f$  — рабочая частоты источника излучения;  $f_{pl}$  — плазменная частота на уровне  $R_m$ .

В **подразделе 1.2.2** рассмотрены детерминированные модели показателя преломления гравитационных неоднородностей космической среды. Для описания рефракции излучения в поле тяготения используется следствие общей теории относительности (ОТО), позволяющее свести задачу распространения излучения в искривленном (римановом) пространстве к задаче прохождения излучения в евклидовом пространстве с эффективным показателем преломления вакуума. В случае относительно слабых гравитационных полей (исключая окрестности нейтронных звезд, черных дыр) показатель преломления вакуума может быть записан в виде [4, 10]:

$$n \approx 1 - \frac{2\Phi(\vec{R})}{c^2}, \quad (2)$$

где  $c$  — скорость света;  $\Phi(\vec{R})$  — гравитационный потенциал, который является решением уравнения Пуассона:

$$\Delta\Phi(\vec{R}) = 4\pi G\sigma(\vec{R}), \quad (3)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная;  $\sigma(\vec{R})$  — функция плотности распределения массы в пространстве. В случае одиночного гравитационного объекта массой  $M$ , когда  $\sigma(\vec{R}) = const$ , для показателя преломления имеем:

$$n \approx 1 + \frac{2GM}{c^2 R} = 1 + \frac{R_g}{R}, \quad (4)$$

где  $R_g$  — гравитационный радиус (радиус Шварцшильда).

Для учета влияния поля тяготения группы астрофизических объектов в работе использован фундаментальный принцип суперпозиции гравитационных полей и введена приближенная модель эффективного показателя преломления вакуума:

$$n \approx 1 + \frac{R_g}{R} + \sum_{i=1}^N A_i \exp\left[-b_{Ri}(R - R_{Li})^2 - b_{\varphi i}(\varphi - \varphi_{Li})^2 - b_{\delta i}(\delta - \delta_{Li})^2\right] \quad (5)$$

где  $N$  — количество дополнительных гравитационных неоднородностей;  $A_i, b_{Ri}, b_{\varphi i}, b_{\delta i}, R_{Li}, \varphi_{Li}, \delta_{Li}$  — интенсивность, масштабы и координаты центра локализации  $i$ -ого гравитационного возмущения.

В разделе 1.3 получены аналитические решения для рефракционных характеристик излучения в случае простой модели показателя преломления (4). С использованием этих решений выполнена проверка работы созданных программ расчета направления распространения, групповой задержки и пространственного ослабления потока электромагнитного излучения при распространении в космической среде. Показано, что результаты расчетов на основе разработанных программ имеют высокую точность соответствия значениям, полученным с помощью аналитических соотношений. Степень расхождения результатов в среднем не превышает доли процента.

**Глава 2** посвящена исследованию влияния гравитационных и плазменных неоднородностей на рефракционные характеристики электромагнитного излучения космических источников. В разделе 2.1 представлены литературные сведения о гравитационной фокусировке излучения различными астрофизическими объектами. В подразделе 2.1.1 рассмотрены гравитационно-линзовые эффекты квазаров. В подразделе 2.1.2 представлена информация об открытиях экзопланет методом гравитационного микролинзирования. В подразделе 2.1.3 рассмотрено явление гамма-всплесков. Для объяснения высокого уровня энергвыделения в гамма-диапазоне, как и в случае квазаров, обсуждается гипотеза об эффекте мезолинзирования.

В разделе 2.2 поставлены численные эксперименты для оценки влияния гравитационно-линзовой системы объектов на рефракционные характеристики электромагнитного излучения в задаче просвечивания космической среды. Рассмотрены высокочастотные диапазоны, для которых

плазменные неоднородности космической среды несут существенны. Оценка рефракционных характеристик излучения проводилась с помощью численного интегрирования системы дифференциальных уравнений, представленной в разделе 1.1:

$$\frac{dR}{d\varphi} = R \operatorname{ctg} \beta, \quad \frac{d\beta}{d\varphi} = \left(1 + \sin^2 \beta \operatorname{tg}^2 \alpha\right) \left[ \frac{1}{n} \left( \frac{\partial n}{\partial \varphi} \operatorname{ctg} \beta - R \frac{\partial n}{\partial R} \right) - 1 \right];$$

$$\frac{d\delta}{d\varphi} = \operatorname{tg} \alpha, \quad \frac{d\alpha}{d\varphi} = \left(1 + \operatorname{ctg}^2 \beta \cos^2 \alpha\right) \frac{1}{n} \left( \frac{\partial n}{\partial \delta} - \frac{\partial n}{\partial \varphi} \operatorname{tg} \alpha \right),$$
(6)

где  $R(\varphi)$ ,  $\delta(\varphi)$ ,  $\varphi$  — радиальная и угловые координаты луча;  $\alpha(\varphi)$ ,  $\beta(\varphi)$  — углы рефракции;  $n$  — эффективный показатель преломления среды в присутствии гравитационного возмущения. В подразделе 2.2.1 приведены результаты расчета влияния одиночного астрофизического объекта с эффективным показателем преломления (4), на направление распространения падающего излучения. По данным расчетов формировалась картинная плоскость наблюдателя, на которой отмечались конечные угловые координаты луча, достигающего фиксированного расстояния (рисунок 1а). Для наглядности представления лучевой структуры в картинной плоскости наблюдателя сферические координаты луча пересчитывались в декартовы (рисунок 1б). Отмечено, что при сближении излучения с объектом тяготения значения рефракционных характеристик луча изменяются в большей степени.

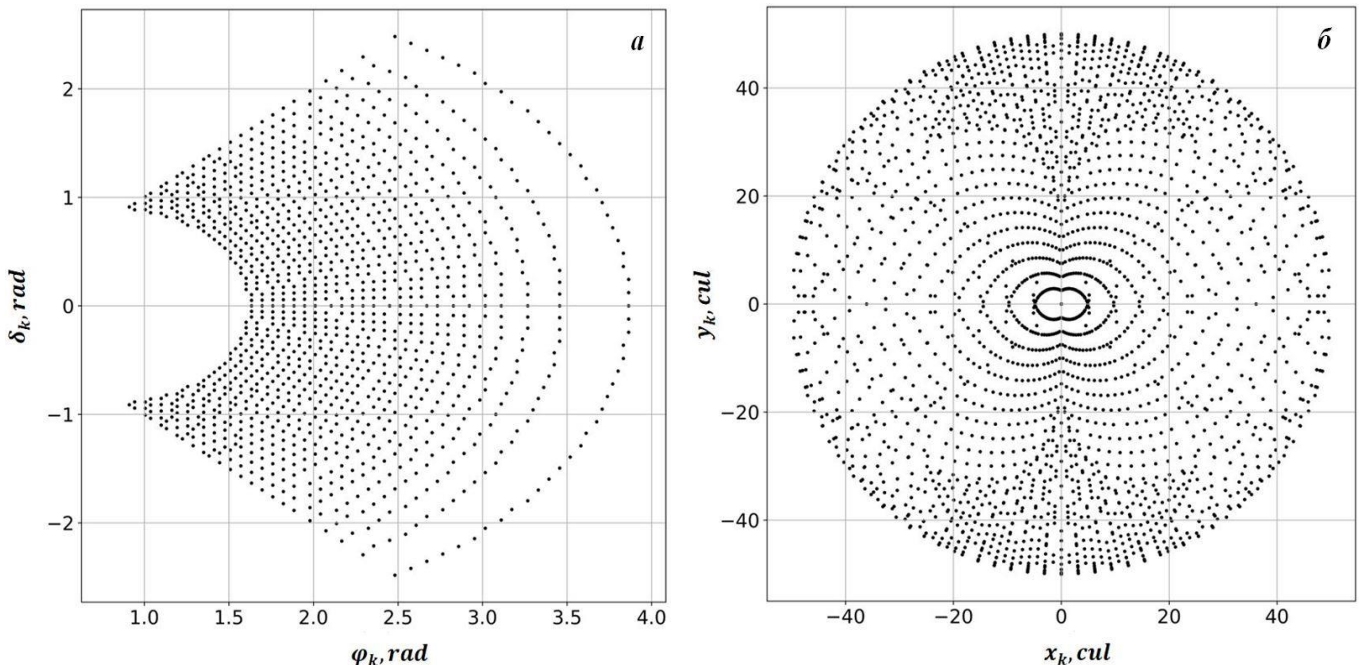


Рисунок 1 — Лучевая картина в плоскости наблюдателя при распространении электромагнитного излучения вблизи одиночного астрофизического объекта для источника, расположенного на луче зрения. Плоскости представлены в конечных угловых координатах (а) и декартовой системе координат (б), где  $cul$  — условная единица длины. Радиус Шварцшильда  $R_g = 1 cul$ .

В подразделах 2.2.2 и 2.2.3 рассмотрены особенности формирования лучевых распределений излучения в картинной плоскости наблюдателя под влиянием асимметричных гравитационно-линзовых систем, описываемых с помощью модели (5), в задаче просвечивания космической среды. Расчет рефракционных эффектов в случае системы массивных астрофизических объектов (подраздел 2.2.2) показал, что формирование уникальных лучевых распределений в картинной плоскости зависит от конфигурации гравитационного возмущения. За счет влияния дополнительной компоненты гравитационно-линзовой системы могут формироваться области фокусировок, выраженные повышением плотности точек прихода лучей в секторе картинной плоскости. В случае системы «экзопланета-звезда» (подраздел 2.2.3) для оценки влияния гравитационной неоднородности относительно малой массы на рефракцию излучения рассмотрено несколько ее положений в окрестности массивного гравитирующего объекта. Отмечено, что в зависимости от положения экзопланеты, сектора углов падающего излучения, подверженные ее влиянию, существенно изменяются. Это важное обстоятельство полезно учитывать при определении конфигурации гравитационно-линзовой системы.

В разделе 2.3 приведены результаты решения задачи просвечивания случайно-неоднородной космической среды в присутствии гравитационного возмущения. В подразделе 2.3.1 в приближении метода возмущений сделан вывод аналитических соотношений для расчета дисперсии боковых отклонений луча, возникающих под влиянием случайных неоднородностей космической плазмы. Показатель преломления  $\tilde{n}$  представляется в виде  $\tilde{n} = n_0 + \tilde{n}_1$ , где  $n_0$  – детерминированная часть, а  $\tilde{n}_1$  описывает случайные неоднородности плазмы. Характеристики луча в системе (6) определяются в виде:  $\tilde{R} = R_0 + \tilde{R}_1$ ,  $\tilde{\delta} = \delta_0 + \tilde{\delta}_1$ ,  $\tilde{\alpha} = \alpha_0 + \tilde{\alpha}_1$ ,  $\tilde{\beta} = \beta_0 + \tilde{\beta}_1$ , — где знак тильды соответствует случайному изменению параметра луча, индекс «0» описывает регулярные изменение рефракционных характеристик излучения, а индекс «1» соответствует влиянию случайных неоднородностей. В предположении, что гравитационно-линзовая система ограничена в пространстве, используется приближение  $n_0 \approx 1$ . В результате из системы (6) получена система для расчета вариаций параметров:

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{R}_1}{d\varphi} &= \tilde{R}_1 \operatorname{ctg} \beta_0 - \frac{R_0 \tilde{\beta}_1}{\sin^2 \beta_0}, & \frac{d\tilde{\beta}_1}{d\varphi} &= (1 + \sin^2 \beta_0 \operatorname{tg}^2 \alpha_0) \left( \frac{\partial \tilde{n}_1}{\partial \varphi} \operatorname{ctg} \beta_0 - R_0 \frac{\partial \tilde{n}_1}{\partial R} \right); \\ \frac{d\tilde{\delta}_1}{d\varphi} &= \frac{\tilde{\alpha}_1}{\cos^2 \alpha_0}, & \frac{d\tilde{\alpha}_1}{d\varphi} &= (1 + \cos^2 \alpha_0 \cot^2 \beta_0) \left( \frac{\partial \tilde{n}_1}{\partial \delta} - \frac{\partial \tilde{n}_1}{\partial \varphi} \operatorname{tg} \alpha_0 \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Решая последние два уравнения системы (7) совместно, можно получить интегральное выражение для вариации  $\tilde{\delta}_1$ . Составляя второй статистический момент, и, сводя его к дифференциальному уравнению первого порядка, для дисперсии  $\sigma_{\tilde{\delta}}^2$  получаем:

$$\frac{d\sigma_{\tilde{\delta}}^2}{d\varphi} = \frac{\mu}{4} \sqrt{\frac{\pi}{Q}} \left( \frac{DP^2}{Q} + 16 \left( D - \frac{K}{Q} \right) (\varphi J_1 - J_2) \right), \quad \frac{dJ_1}{d\varphi} = P^2, \quad \frac{dJ_2}{d\varphi} = \varphi P^2, \quad (8)$$

где  $P(\varphi) = (\cos^{-2} \alpha_0 + \text{ctg}^2 \beta_0)$ ,  $Q = \frac{1}{u_\varphi^2} + \frac{1}{u_\delta^2} \text{tg}^2 \alpha_0 + \frac{R_0^2}{u_R^2} \text{ctg}^2 \beta_0$ ,  $D = \frac{1}{u_\delta^2} + \frac{1}{u_\varphi^2} \text{tg}^2 \alpha_0$ ,  $K = \left( \frac{1}{u_\varphi^2} - \frac{1}{u_\delta^2} \right) \text{tg}^2 \alpha_0$ ,

параметры  $\mu, u_R, u_\varphi, u_\delta$  — интенсивность возмущения и пространственные радиусы корреляции случайных неоднородностей космической среды, описываемые гауссовой функцией корреляции.

В подразделе 2.3.2 исследовано влияние случайных плазменных неоднородностей, равномерно распределенных в космической среде, на рефракционные характеристики электромагнитного излучения различных частотных диапазонов в присутствии сложной гравитационно-линзовой системы объектов. Результаты расчетов показали, что метровый диапазон длин волн можно считать условной низкочастотной границей электромагнитной шкалы, на которой еще возможно наблюдение линзовых эффектов. Отмечено, что с увеличением количества гравитационных объектов возрастает значение среднеквадратичных отклонений луча. В качестве примера на рисунке 2 приведены результаты для частоты  $f = 6 \text{ ГГц}$ , где интенсивность задавалась зависимостью:  $\mu = \mu_0 (f_{pl}/f)^2$ .

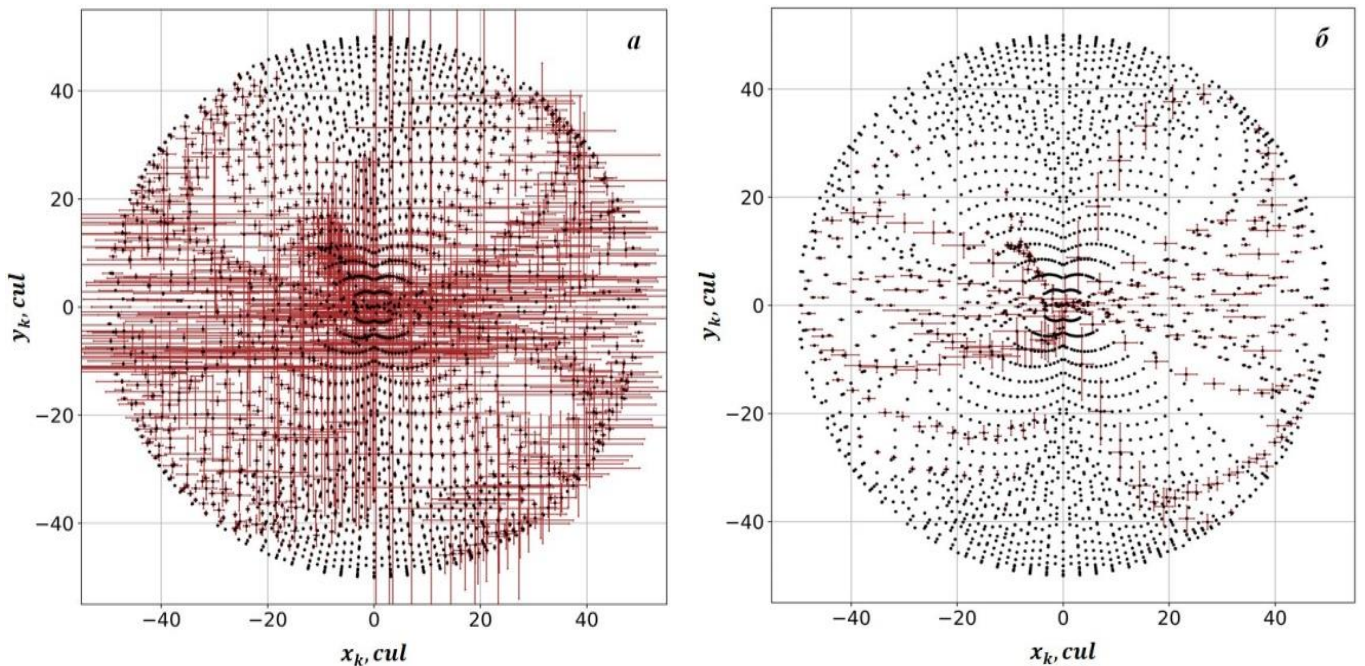


Рисунок 2 — Статистическое замывание лучевой картины в плоскости наблюдателя в случае трехкомпонентной гравитационно-линзовой системы на частоте  $f = 6 \text{ ГГц}$  в присутствии: **а** — хаотических плазменных неоднородностей ( $u_\varphi = 0.001$ ,  $u_\delta = 0.001$ ,  $u_R = 0.001 \text{ cul}$ ); **б** — крупномасштабных хаотических образований ( $u_\varphi = 0.1$ ,  $u_\delta = 0.1$ ,  $u_R = 0.1 \text{ cul}$ ), — со значениями параметров  $\mu_0 = 0.01$  и  $f_{pl} = 12 \text{ МГц}$ .

В подразделе 2.3.3 поставлены численные эксперименты для оценки влияния гравитационного шума на рефракционные характеристики высокочастотного излучения при просвечивании гравитационно-линзовой системы объектов. Гравитационным шумом здесь является случайное распределение масс, встречающихся на пути распространения излучения. Пространственная локализация гравитационно-шумового «облака» задана зависимостью:

$$\mu = \mu_0 \exp \left[ - \left( \frac{\varphi - \varphi_L^p}{m_\varphi} \right)^2 - \left( \frac{R - R_L^p}{m_R} \right)^2 - \left( \frac{\delta - \delta_L^p}{m_\delta} \right)^2 \right], \quad (9)$$

где  $\mu_0, R_L^p, \varphi_L^p, \delta_L^p, m_R, m_\varphi, m_\delta$  — интенсивность, радиальная и угловые координаты локализации «облака» и его пространственные масштабы. Выявлена зависимость эффекта замыкания лучевой структуры в картинной плоскости наблюдателя при различных положениях локализованного гравитационного шума. В частности, отмечено частичное понижение интенсивности свечения на периферии лучевой структуры в картинной плоскости. Показано, что в зависимости от положения зашумленной неоднородности гравитационно-линзовой системы, области пониженной интенсивности излучения имеют различную протяженность.

**Раздел 2.4** посвящен приближенной оценке рефракционных характеристик электромагнитного излучения в области гравитационной фокусировки. Для анализа выбрана трехкомпонентная асимметричная гравитационно-линзовая система. Основным объектом тяготения был погружен в локализованный гравитационный шум. Расчет среднеквадратичных отклонений (СКО) боковых отклонений луча  $\sigma_\delta$  показал, что область фокусировки формируется двумя семействами лучей, проходящих с различных сторон гравитационного возмущения (рисунок 3). Распространение лучей со стороны одиночного объекта сопровождается заметной сепарацией, зависящей от значений угловых прицельных параметров. При рефракции лучей со стороны трех объектов возникает множество путей распространения (рисунок 3б, 4а). В некоторых случаях возможно образование гравитационного волновода.

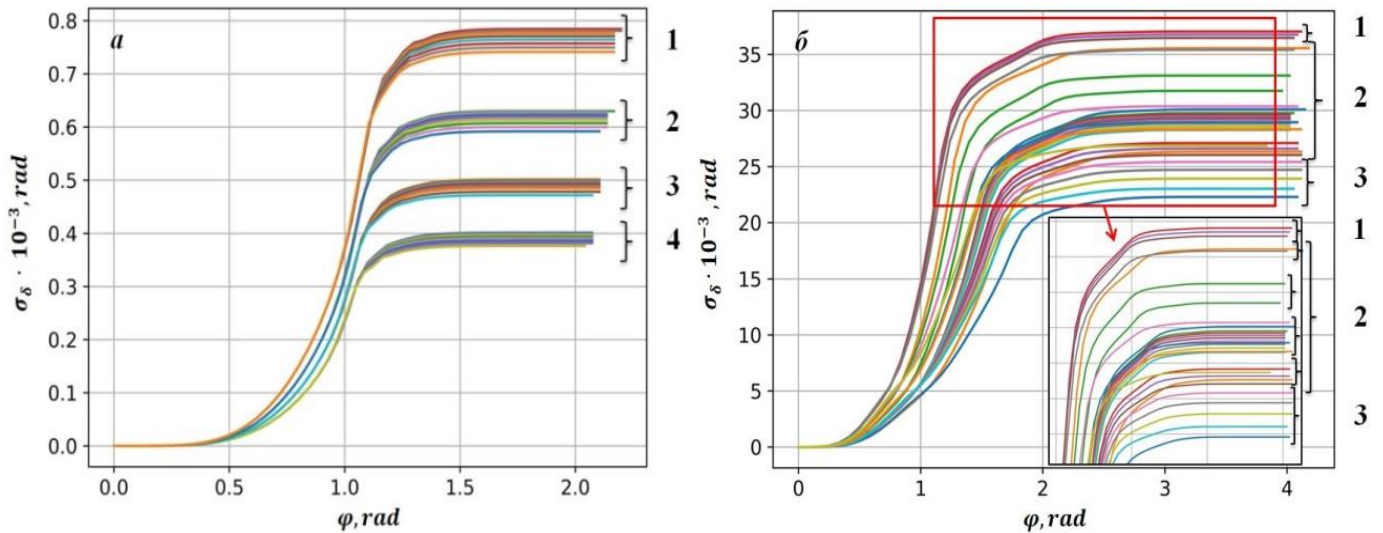


Рисунок 3 — СКО боковых отклонений луча  $\sigma_\delta$  в области фокусировки при распространении в сложной гравитационной линзе со стороны одиночного объекта (а) и со стороны трех объектов (б) при наличии гравитационного шума.

Заметим, что восстановление конфигурации гравитационно-линзовой системы по распределениям только  $\sigma_\delta$  представляет большую проблему. Для этой цели в работе предлагается учесть стохастический эффект Шапиро. Для расчета флуктуаций групповой задержки излучения использовалось уравнение:

$$\frac{d\tilde{\tau}}{d\varphi} = \frac{\tilde{n}\tilde{R}}{c \sin \tilde{\beta}} \sqrt{1 + \sin^2 \tilde{\beta} \operatorname{tg}^2 \tilde{\alpha}}, \quad (10)$$

— которое было решено в приближении метода возмущений. Полагая  $\tilde{\tau} = \tau_0 + \tilde{\tau}_1$ , где  $\tau_0$  — задержка в регулярной гравитационно-линзовой системе,  $\tilde{\tau}_1$  — дополнительная задержка за счет влияния гравитационно-шумового «облака», и, проводя аналогичные аналитические преобразования, что и при выводе системы (8), получим уравнение для расчета дисперсии групповой задержки  $\sigma_\tau^2$ :

$$\frac{d\sigma_\tau^2}{d\varphi} = \mu \sqrt{\frac{\pi}{Q}} \frac{R_0^2}{c^2 \sin^2 \beta_0} \sqrt{1 + \sin^2 \beta_0 \operatorname{tg}^2 \alpha_0}. \quad (11)$$

Заметим, что при выводе выражения (11) дополнительно использовано предположение о малых значениях боковых отклонений луча. Численный расчет уравнения (11) показал, что структура распределения для  $\sigma_\tau$  частично изменяется за счет дополнительных эффектов, возникающих при многопутевости распространения излучения (рисунок 4б). Таким образом, совместный расчет уравнений (8) и (11) позволяет переходить к постановке обратной задачи по восстановлению структуры гравитационно-линзовой системы.

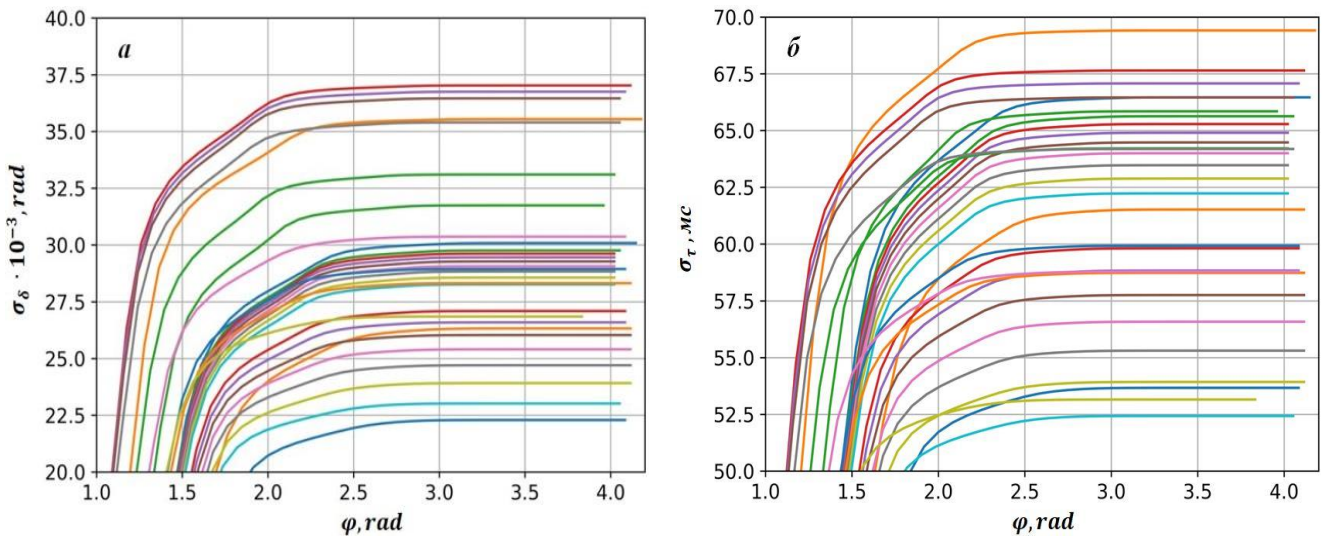


Рисунок 4 — СКО боковых отклонений  $\sigma_\delta$  (а) и групповой задержки  $\sigma_\tau$  (б) в области фокусировки при распространении сквозь гравитационно-линзовую систему со стороны трех астрофизических объектов в присутствии гравитационного шума.

Также отметим, что с помощью численно-аналитического синтеза лучевой структуры изображения (рисунок 2) для различных конфигураций гравитационно-линзовых систем, можно проводить качественную оценку значений энергий в области фокусировки парциальным подходом.

Для такого подхода характерно разбиение общего потока энергии  $U_0$  на некоторое количество лучей  $N$ , регулируемое шагом между значениями углов  $\alpha_n, \beta_n$ . Тогда оценка значения энергии  $U_F$  в области фокусировки будет соответствовать количеству  $N_F$  входящих в нее лучей. Соответственно, регулирование шага между значениями углов  $\alpha_n, \beta_n$  дает возможность повысить точность определения значения энергии в области фокусировки.

В **Главе 3** исследованы эффекты сильной регулярной рефракции электромагнитного излучения различных диапазонов при распространении в звездной короне. В **разделе 3.1** представлены литературные сведения об активности звезд и их влиянии на окружающую космическую среду.

В **разделе 3.2** приведены результаты решения прямой задачи просвечивания спокойной звездной короны радиоизлучением метрового и декаметрового диапазонов. Для простоты был использован частный случай системы лучевых дифференциальных уравнений (8):

$$\frac{dR}{d\varphi} = R \operatorname{ctg} \beta, \quad \frac{d\beta}{d\varphi} = \frac{1}{2\varepsilon} \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi} \operatorname{ctg} \beta - R \frac{\partial \varepsilon}{\partial R} \right) - 1. \quad (12)$$

Результаты расчетов представлялись в виде дистанционно-угловых, дистанционно-частотных и частотно-временных характеристик. Показано, что с ростом частоты излучения уменьшается влияние плазмы на направление распространения радиоволн. Это выражается переходом сформированных характеристик в область насыщения, когда значения рефракционных характеристик практически не изменяются.

**Раздел 3.3** посвящен численным экспериментам по радиопросвечиванию возмущенной звездной короны в условиях коронального выброса массы (КВМ). Проведен анализ влияния КВМ различных типов на рефракционные характеристики радиоизлучения. В **подразделах 3.3.1** и **3.3.2**, рассмотрены упрощенные модели плазменного возмущения. Диэлектрическая проницаемость короны представлена в виде:  $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1$ , где  $\varepsilon_0$  описывает диэлектрическую проницаемость регулярной звездной короны. Корональное возмущение задано зависимостью:

$$\varepsilon_1 = \mu \left( \frac{f_{pl}}{f} \right)^2 \exp \left[ -a_R (R - R_L)^2 - a_\varphi (\varphi - \varphi_L)^2 \right], \quad (13)$$

где  $\mu, R_L, \varphi_L, a_R, a_\varphi$  — соответственно интенсивность, координаты центра локализация и масштабы коронального плазменного возмущения. Результаты расчетов показали существенные отличия рефракционных характеристик радиоизлучения в зависимости от параметров модели возмущения. При распространении излучения в присутствии высококонцентрированного образования (**подраздел 3.3.1**) возникает резкое изменение в значениях дистанции распространения, связанное с отражением от неоднородности с внешней стороны, либо с внутренней (между КВМ и фотосферой). В случае полости КВМ (**подраздел 3.3.2**) увеличение дистанции распространения связано с проникновением радиоизлучения в неоднородность. Также отмечено, что низкочастотное

радиоизлучение может проникать на дальние расстояния (относительно  $\varphi_k$ ). Такое явление возникает при формировании волноводного механизма распространения.

В подразделе 3.3.3 рассмотрена сложная модель плазменного возмущения, сформированного суммой двух частей: высококонцентрированного фронта и области пониженной электронной концентрации, — описываемые моделью (13). Отмечено, что под влиянием такого типа КВМ дистанция распространения радиоизлучения увеличивается незначительно, а диапазоны углов падения излучения, где проявляется влияние корональной неоднородности, возрастает. Здесь также возможен волноводный эффект распространения.

В разделе 3.4 проведены расчеты пространственного ослабления потока радиоизлучения в задаче просвечивания звездной короны в присутствии КВМ. Отмечено, что в зависимостях значения фактора фокусировки от угловой переменной интегрирования  $\varphi$  возникают экстремумы. Такой эффект проявляется вследствие пересечения лучей в свободном пространстве и возмущенной среде. Также следует отметить, что количество экстремумов фактора фокусировки при волноводном эффекте зависит от количества периодов осцилляций траекторий лучей в окрестностях неоднородности.

Раздел 3.5 посвящен вопросам восстановления характеристик плазменного возмущения типа КВМ. Для диагностики звездного КВМ по данным многочастотного просвечивания сигналами дискретных космических источников получены функциональные соотношения, учитывающие значительные искривления траекторий просвечивания, что позволяет в совокупности с данными оптических и рентгеновских наблюдений определить параметры звездного выброса с большим градиентом переднего фронта. Для восстановления параметров коронального выброса используется лучевое дифференциальное уравнение для оценки групповой задержки сигнала на различных рабочих частотах:

$$\frac{d\tau}{d\varphi} = \frac{R}{c\sqrt{\varepsilon(R, \varphi)} \sin \beta}. \quad (14)$$

Вариацию групповой задержки сигнала космического источника, вызванную воздействием плазменного выброса, можно определить в приближении метода возмущений. Полагая, что  $R = R_0 + R_1$ ,  $\beta = \beta_0 + \beta_1$ ,  $\tau = \tau_0 + \tau_1$ ,  $\varepsilon(R, \varphi) = \varepsilon_0(R_0) + R_1(d\varepsilon_0(R_0)/dR_0) + \varepsilon_1(R_0)$ , из уравнения (14) путем интегрирования с учетом краевых условий на вариацию траектории  $R_1(\varphi)$  в пунктах излучения и приема:  $R_1(\varphi_n = 0) = R_1(\varphi_k) = 0$ , — получим выражение для оценки  $\tau_1$ :

$$\tau_1 = \int_0^{\varphi_k} \left( \frac{2R_1 \sin \beta_0}{c\sqrt{\varepsilon_0(R_0)}} \left[ 1 + \frac{d\beta_0}{d\varphi} \right] - \frac{R_0 \varepsilon_1(R_0, \varphi)}{\varepsilon_0^{3/2}(R_0) \sin \beta_0} \right) d\varphi, \quad (15)$$

где  $\varphi_n, \varphi_k$  — угловые координаты источника и приемника, соответственно. Из выражения (15) видно, что для расчета вариации групповой задержки необходимо учитывать изменение траектории  $R_1(\varphi)$ . Эта добавка находится с помощью метода возмущений из системы (12):

$$R_1(\varphi) = Y_1(\varphi) \int_{\varphi}^{\varphi_k} \frac{D(\varphi') Y_2(\varphi')}{Y_1(\varphi_k)} \frac{R_n}{R_0} d\varphi' + Y_2(\varphi) \int_0^{\varphi} \frac{D(\varphi') Y_1(\varphi')}{Y_1(\varphi_k)} \frac{R_n}{R_0} d\varphi', \quad (16)$$

где  $D = \frac{1}{2} \left[ \text{ctg} \beta_0 \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{\varepsilon_1(R_0, \varphi)}{\varepsilon_0(R_0)} \right) - R_0 \frac{\partial}{\partial R_0} \left( \frac{\varepsilon_1(R_0, \varphi)}{\varepsilon_0(R_0)} \right) \right]$ ;  $Y_1 = \frac{\partial R_0}{\partial \beta_n}(\varphi)$ ;  $Y_2 = \frac{\partial R_0}{\partial \beta_n}(\varphi_k - \varphi)$ ,  $\beta_n$  — угол падения луча на звездную корону;  $R_n$  — радиальная координата космического источника. Полагая, что пространственные масштабы плазменной среды между космическим источником и приемником значительно превосходят масштабы звездного КВМ, интеграл (15) с учетом (16) можно приближенно вычислить методом Лапласа:

$$\tau_1 \approx \frac{\mu}{c} [M_1(\varphi_s) + 2a_R M_2(\varphi_s)(R_s - R_L)] \exp[-a_R(R_0 - R_L)^2 - a_\varphi(\varphi - \varphi_L)^2] \times \sqrt{\frac{\pi}{\left( a_\varphi + a_R \left( \frac{dR_0}{d\varphi} \right)^2 + a_R(R_0 - R_L) \frac{d^2 R_0}{d\varphi^2} \right) \Big|_{\varphi=\varphi_s}}, \quad (17)$$

где  $\varphi_s$  — угловая координата наибольшего вклада;

$$M_1(\varphi) = F + P V(\varphi), \quad M_2(\varphi) = -\frac{V(\varphi)}{2\varepsilon_0(R_0)} \frac{R_0}{\sin^2 \beta_0}, \quad P = \frac{R_0}{2\varepsilon_0^2(R_0)} \frac{\partial \varepsilon_0(R_0)}{\partial R_0}, \quad F = -\frac{R_0}{2\varepsilon_0^{3/2}(R_0) \sin \beta_0};$$

$$V(\varphi) = \frac{Y_2(\varphi)}{Y_1(\varphi_k)} \frac{R_n}{R_0} \int_0^{\varphi} 2 \sin \beta_0 \left[ 1 + \frac{d\beta_0}{d\varphi} \right] Y_1(\varphi) d\varphi' + \frac{Y_1(\varphi)}{Y_1(\varphi_k)} \frac{R_n}{R_0} \int_{\varphi}^{\varphi_k} 2 \sin \beta_0 \left[ 1 + \frac{d\beta_0}{d\varphi} \right] Y_2(\varphi) d\varphi'.$$

Входящие в выражение (17) пространственные параметры КВМ можно определить на основе данных наблюдений в оптическом и рентгеновском диапазонах. Тогда просвечивание выброса сигналами на различных частотах радиодиапазона позволяет по разности групповых задержек определить параметр  $\mu$ , характеризующий максимальное возмущение выброса. В условиях сильного градиента передней части выброса эта разность не будет нулевой, поскольку волны радиодиапазона испытывают значительную рефракцию на фронте возмущения. Что касается характеристик невозмущенных траекторий, входящих в (17), то они могут быть рассчитаны с помощью лучевых уравнений (12) при заданной модели невозмущенной звездной короны (1). Из формулы (17) следует, что вариация времени группового запаздывания уменьшается с ростом рабочей частоты. На более низких частотах возникают максимальные вариации  $\tau_1$ , соответствующие траекториям, проходящим вблизи переднего фронта коронального выброса. Рост вариаций групповой задержки непосредственно следует из формулы (15), куда входит возмущение траектории  $R_1(\varphi)$  и функция диэлектрической проницаемости выброса  $\varepsilon_1(R_0, \varphi)$ . Интеграл по траектории от возмущения  $\varepsilon_1$  зависит от длины пути луча внутри плазменного выброса и растет при ее увеличении. Поправка  $R_1(\varphi)$  зависит от функции  $D(\varphi)$ , которая, в свою очередь, определяется пространственными градиентами  $\varepsilon_1(R_0, \varphi)$ . Для модели коронального возмущения (13) наибольшая вариация  $R_1(\varphi)$

возникает в случае просвечивания выброса вблизи его переднего фронта, а не внутри его, где градиент диэлектрической проницаемости существенно меньше.

**Глава 4** посвящена сравнению результатов численно-аналитического моделирования рефракционных эффектов гравитационных и плазменных неоднородностей в структуре электромагнитного излучения космических источников с известными экспериментальными данными. В **разделах 4.1** и **4.2** представлены результаты численных расчетов максимального угла отклонения (эффект Эйнштейна) и дополнительной групповой задержки (эффект Шапиро) при распространении излучения вблизи Солнца. Значение максимального угла отклонения в ходе первого численного эксперимента (**раздел 4.1**) составило  $1'',768521$ , что хорошо соответствует натурному эксперименту [4, 12]. Во втором эксперименте (**раздел 4.2**) дополнительная групповая задержка излучения под воздействием гравитационного поля Солнца имеет значение  $112.28 \text{ мкс}$ , что также согласуется с экспериментальными данными [4, 12].

В **разделе 4.3** приведены результаты моделирования рефракции низкочастотного солнечного радиовсплеска в короне в присутствии КВМ (рисунок 5). Показано, что регистрация в пункте приема низкочастотного радиоизлучения источника, локализованного глубоко в залимбовой области возможна в случае волноводного механизма распространения. В качестве волноводного канала может выступать область пониженной электронной концентрации с плотным фронтом. Отмечено, что диапазон рабочих частот, проникающих на дальние расстояния, соответствует известным экспериментальным данным [3].

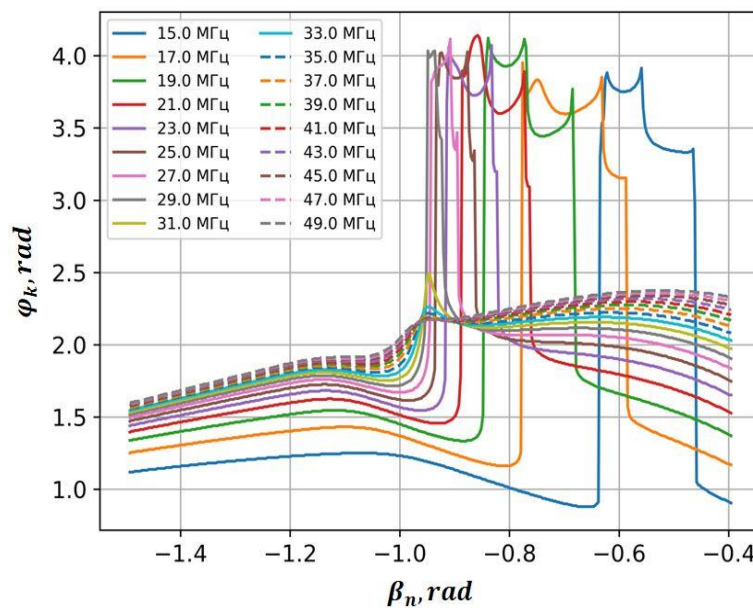


Рисунок 5 — Дистанционно-угловая характеристика низкочастотного радиоизлучения радиовсплеска при распространении в солнечной короне в присутствии сложной модели плазменного возмущения.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Предложен численно-аналитический метод моделирования распространения электромагнитного излучения космических источников с учетом рефракционных эффектов плазменных неоднородностей и окружающих гравитационных полей, заданных моделью эффективного показателя преломления вакуума, выраженного через потенциалы тяготения.

2. Разработан программный вычислительный комплекс для расчета направления распространения, групповой задержки и пространственного ослабления потока электромагнитного излучения различных частотных диапазонов в поле тяготения группы астрофизических объектов в присутствии гравитационного шума и флуктуаций показателя преломления космической плазмы.

3. Для тестирования созданных программ расчета получены аналитические решения для рефракционных характеристик излучения в случае простых моделей показателя преломления космической среды. Сравнение результатов аналитических и численных расчетов показали высокую степень совпадения, что позволило эффективно использовать разработанные программы для исследования распространения электромагнитного излучения в среде с гравитационными и плазменными неоднородностями.

4. С помощью разработанных программ проведены расчеты максимального отклонения направления распространения (эффект Эйнштейна) и дополнительной групповой задержки (эффект Шапиро) электромагнитного излучения в гравитационном поле Солнца. Результаты расчетов показали высокую степень соответствия реальным экспериментальным данным.

5. Выполнено математическое моделирование рефракционных характеристик электромагнитного излучения при распространении в поле тяготения группы астрофизических объектов в условиях гравитационного линзирования. Для различных конфигураций гравитационно-линзовой системы и положений источника излучения синтезированы уникальные распределения лучевой структуры изображения в картинной плоскости наблюдателя. Показано, что под воздействием многокомпонентного флуктуирующего поля тяготения группы объектов происходит сепарация излучения в картинной плоскости наблюдателя.

6. Сделана оценка эффекта стохастического замыкания области гравитационной фокусировки при распространении излучения сквозь сложную гравитационно-линзовую систему в присутствии неоднородностей космической плазмы. Показано, что метровый диапазон длин волн можно считать условной низкочастотной границей, при которой еще наблюдается выраженная фокусировка и возникает сепарация излучения.

7. Получены функциональные соотношения, связывающие групповые задержки сигналов радиопросвечивания на различных рабочих частотах с параметрами звездного коронального выброса. Показана возможность определения плотности регулярной фронтальной части выброса по данным многочастотных измерений групповых задержек сигналов просвечивания.

8. Проведено численное моделирование распространения метровых и дециметровых радиовсплесков в солнечной короне в условиях коронального выброса массы (КВМ). В возмущенных условиях показана возможность волноводного распространения радиоизлучения в пункт наблюдения при расположении источника глубоко в залимбовой области. Рассчитанный диапазон рабочих частот, соответствующий данному эффекту, находится в соответствии с известными экспериментальными данными. На основе результатов моделирования показано, что залимбовые источники метровых и дециметровых радиовсплесков можно рассматривать в качестве естественных зондов для мониторинга солнечных КВМ. Разработанный аппарат моделирования универсален и может быть использован для интерпретации экспериментальных данных залимбового просвечивания солнечных КВМ с космических аппаратов, сигналами планетарных радаров и радиоизлучением дискретных космических источников.

### СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты по теме диссертации представлены в следующих работах:

1. Лукьянцев Д. С. Математическое моделирование рефракционных характеристик электромагнитного излучения в стохастическом поле тяготения / Д. С. Лукьянцев, Н. Т. Афанасьев, Е. И. Калашникова, А. Б. Танаев // Математическая физика и компьютерное моделирование. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 48–60.
2. Лукьянцев Д. С. Численно-аналитическое моделирование гравитационного линзирования электромагнитных волн в случайно-неоднородной космической плазме / Д. С. Лукьянцев, Н. Т. Афанасьев, А. Б. Танаев, С. О. Чудаев // Компьютерные исследования и моделирование. – 2024. – Т. 16, № 2. – С. 433–443.
3. Лукьянцев Д. С. Численно-аналитическое моделирование рефракции низкочастотных солнечных радиовсплесков в возмущенной короне / Д. С. Лукьянцев, Н. Т. Афанасьев, А. Б. Танаев, С. О. Чудаев // Математическая физика и компьютерное моделирование. – 2023. – № 4. – С. 43–54.
4. Афанасьев Н. Т. Дециметровая радиодиагностика тонкой структуры ионосферы с высокоорбитальных ИСЗ / Н. Т. Афанасьев, Д. С. Лукьянцев, А. Б. Танаев, С. О. Чудаев // 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.
5. Чудаев С. О. Диагностика флуктуаций групповой задержки высокочастотного сигнала в ионосферном канале связи / С. О. Чудаев, Н. Т. Афанасьев, Д. С. Лукьянцев, А. Б. Танаев // Техника радиосвязи. – 2022. – Т. 54, № 3. – С. 21–30.

6. **Lukyantsev D. S.** Mathematical modeling of refraction of light in asymmetrical gravitational field / **D. S. Lukyantsev**, N. T. Afanasiev, A. B. Tanaev // *Technical Physics*. – 2023. – V. 68, № 12. – P. 1625–1627.
7. **Лукьянцев Д. С.** Математическое моделирование влияния локализованного гравитационного шума на распространение электромагнитного излучения в поле тяготения / **Д. С. Лукьянцев**, Н. Т. Афанасьев, Е. И. Калашникова, А. Б. Танаев // *Журнал технической физики*. – 2024. – Т. 94, № 12. – С. 1990–1993.
8. Танаев А. Б. Многочастотное просвечивание возмущенной звездной короны сигналами дискретных космических источников / А. Б. Танаев, Н. Т. Афанасьев, **Д. С. Лукьянцев** // *Журнал технической физики*. – 2024. – Т. 94, № 12. – С. 2005–2007.
9. **Lukyantsev D. S.** Mathematical modeling of effects of plasma and gravitational inhomogeneities in structure of electromagnetic signals / **D. S. Lukyantsev**, N. T. Afanasiev, A. B. Tanaev // *St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics*. – 2023. – V. 16, № 1.2. – P. 377–382.
10. Chudaev S. O. The diagnostics of the CME cavity using data of multiwave measurements of behind-the-limb solar radio bursts / S. O. Chudaev, N. T. Afanasiev, **D. S. Lukyantsev** // *St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics*. – 2023. – V. 16, № 1.2. – P. 383–388.
11. Chudaev S. O. Diagnostics of the integral parameters of the upper atmosphere's thin structure from radio-beacons' data / S. O. Chudaev, N. T. Afanasiev, D. S. Lukyantsev, A. B. Tanaev // *29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Proceeding SPIE*. – V. 12780, article № 1278078. – 5 p.
12. Ким Д. Б. Рефракционные искажения характеристик сигнала в возмущенном информационном канале с конечной кривизной / Д. Б. Ким, Н. Т. Афанасьев, **Д. С. Лукьянцев**, И. С. Ситов, А. Б. Танаев, С. О. Чудаев // *Современные наукоемкие технологии*. – 2023. – № 12 (Ч. 2). – С. 203–209.
13. Ким Д. Б. Математическое моделирование групповой задержки сигнала в возмущенном канале с конечной кривизной / Д. Б. Ким, Н. Т. Афанасьев, **Д. С. Лукьянцев**, И. С. Ситов, А. Б. Танаев // *Современные наукоемкие технологии*. – 2024. – №8. – С. 49–55.
14. **Лукьянцев Д. С.** Стохастическое замывание эффектов гравитации при распространении электромагнитных волн в межзвездной среде / **Д. С. Лукьянцев**, Н. Т. Афанасьев, А. Б. Танаев, С. О. Чудаев // *Сборник докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» : Секция 1 «Дистанционное зондирование верхней атмосферы, ионосферы и космического пространства» (г. Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 г.)*. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2023. – С. 143–146.

15. Афанасьев Н. Т. Влияние корональных возмущений на радиоизлучение удаленных космических источников / Н. Т. Афанасьев, **Д. С. Лукьянцев** // Материалы 15 научной конференции «Физика плазмы в солнечной системе» (10–14 февраля 2020 г.). – Москва: ИКИ РАН, 2020 – С. 204.

16. Афанасьев Н. Т. Математическое моделирование потока энергии электромагнитной волны в сложном гравитационном поле / Н. Т. Афанасьев, **Д. С. Лукьянцев**, А. Б. Танаев // Материалы 18 научной конференции «Физика плазмы в солнечной системе» : Секция «Волновые явления в космической плазме» (г. Москва, 6–10 февраля 2023 г.). – Москва: ИКИ РАН, 2023. – С. 440.

17. Афанасьев Н. Т. Влияние хаотических плазменных неоднородностей на рефракцию электромагнитных волн в поле тяготения / Н. Т. Афанасьев, **Д. С. Лукьянцев**, А. Б. Танаев // Материалы 19 научной конференции «Физика плазмы в солнечной системе» : Секция «Волновые явления в космической плазме» (г. Москва, 5–9 февраля 2024 г.). – Москва: ИКИ РАН, 2024. – С. 344.

18. **Лукьянцев Д. С.** Рефракционные эффекты плазменных и гравитационных неоднородностей при распространении электромагнитного излучения удаленных космических источников / **Д. С. Лукьянцев**, Н. Т. Афанасьев, А. Б. Танаев // Материалы 20 научной конференции «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, 10–14 февраля 2025 г.): Секция «Волновые явления в космической плазме». – Москва: ИКИ РАН, 2025. – С. 304.

19. **Лукьянцев Д. С.** Определение интегральных параметров тонкой структуры ионосферы по данным радиозондирования с геостационарных космических аппаратов / **Д. С. Лукьянцев**, Н. Т. Афанасьев, А. Б. Танаев, С. О. Чудаев // Материалы XXX Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Санкт-Петербург, 1–5 июля, 2024 г.): Секция Е «Физика средней и верхней атмосферы». – Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2024. – С. 102–105.

20. **Лукьянцев Д. С.** Моделирование гравитационного линзирования электромагнитного излучения внегалактических источников / **Д. С. Лукьянцев**, Н. Т. Афанасьев, А. Б. Танаев // Материалы ежегодной Всероссийской астрофизической конференции «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (г. Москва, 18–21 декабря 2023 г.). – Москва: ИКИ РАН, 2023. – С. 63.

21. **Лукьянцев Д. С.** Гравитационное микролинзирование света в динамической системе экзопланета-звезда / **Д. С. Лукьянцев**, И. А. Зотова, Н. Т. Афанасьев, А. Б. Танаев // Материалы 5-й Международной конференции «Динамические системы и компьютерные науки: теория и приложения» (г. Иркутск, 18–23 сентября 2023 г.). – Иркутск : Издательство ИГУ, 2023. – С. 205–208.

22. **Лукьянцев Д. С.** Численное моделирование эффекта Шапиро в поле тяготения группы астрофизических объектов / **Д. С. Лукьянцев**, Н. Т. Афанасьев, А. Б. Танаев // Материалы 6-й Международной конференции «Динамические системы и компьютерные науки: теория и приложения» (г. Иркутск, 16–20 сентября 2024 г.). – Иркутск : Издательство ИГУ, 2024. – С. 213–216.

23. **Лукьянцев Д. С.** Гравитационное линзирование электромагнитных волн в хаотической космической плазме / **Д. С. Лукьянцев** // Труды XVII Конференции молодых ученых

«Взаимодействие полей и излучения с веществом» : Секция А «Астрофизика и физика Солнца» (Иркутск, 5–10 сентября 2022 г.). – Иркутск : Издательский отдел ИСЗФ СО РАН, 2022 г. – С. 82–84.

### ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов А. И. Исследование плазменных образований сверхкороны Солнца методом радиозондирования / А. И. Ефимов, В. К. Рудаш // Зарубежная радиоэлектроника. – 2002. – №9. – С. 28–30.
2. Ефимов А. И. Исследование корональных выбросов массы методом двухпозиционного радиозондирования / А. И. Ефимов [и др.] // Солнечно-земная физика. – 2008. – Т. 1, № 12. – С. 114–118.
3. Станиславский А. А. Роль эффектов распространения радиоволн в солнечной короне для интерпретации залимбовых всплесков / А. А. Станиславский // Радиоастрономия и астрофизика. – 2016. – Т. 21, № 1. – С. 3–13.
4. Блюх П. В. Гравитационные линзы / П. В. Блюх, А. А. Минаков. – Киев : Наукова думка, 1989. – 240 с.
5. Ougolnikov O. S. A search for possible mesolensing of cosmic gamma-ray bursts. II. Double and triple bursts in the BATSE catalog / O. S. Ougolnikov // Cosmic Research. – 2003. – V. 41, № 2. – С. 141–146.
6. Райков А. А. Квазары ультравысокой светимости как проявление гравитационного мезолинзирования / А. А. Райков, В. В. Орлов // Астрофизический бюллетень. – 2016. – Т. 71, № 2. – С. 163–166.
7. Гершман Б. Н. Волновые явления в ионосфере и космической плазме / Б. Н. Гершман, Л. М. Ерухимов, Ю. Я. Яшин. – М. : Наука, 1984. – 392 с.
8. Колосов М. А. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса / М. А. Колосов, А. В. Шабельников. – М.: Советское радио, 1976. – 220 с.
9. Захаров А. Ф. Гравитационные линзы и микролинзы / А. Ф. Захаров. – М. : Янус-К, 1997. – 328 с.
10. Бялко А. В. Фокусировка излучения гравитационным полем / А. В. Бялко // Астрономический журнал. – 1969. – Т. 46, № 5. – с. 998.
11. Shapiro I. I. Fourth test of General Relativity / I. I. Shapiro // Physics review letters. – 1964. – V. 13, №. 26. – P. 789–791.
12. Вайнберг С. Гравитация и космология. Принципы и приложения общей теории относительности / С Вайнберг. – М. : Мир, 1975. – 696 с.
13. Сурдин В. Г. Темная сторона Вселенной / В. Г. Сурдин. – М.: Дискурс, 2022. – 368 с.
14. Многоканальная астрономия / Ред.-сост. А. М. Черепашук. – Фрязино : Век 2, 2019. – 528 с.