

Моделирование лучевой и каустической структуры, возникающей при рикошетирующем распространении радиоволн в ионосфере Земли

Крюковский А.С., Лукин Д.С., Михалева Е.В., Растягаев Д.В.

*Российский новый университет
105005, г. Москва, ул. Радио, 22.
E-mail: rdy@rosnou.ru*

*Представлены результаты моделирования методом бихарактеристик лучевых и каустических структур радиоволн, возникающих при рикошетирующем ионосферном распространении от приподнятого источника излучения. Рассмотрены каустики и лучевые осцилляции, возникающие при кругосветном канализированном распространении радиосигнала.
Ключевые слова: ионосфера, распространение, лучи, каустики, рикошет*

Modeling of the caustic structure arising from the ricocheting propagation of radio waves in the Earth's ionosphere

Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Mikhaleva E.V., Rastyagaev D.V.

¹ *Russian New University.*

*The results of modeling by the method of bicharacteristics of ray and caustic structures of radio waves arising during ricocheting ionospheric propagation from an elevated radiation source are presented. Caustics and ray oscillations arising from round-the-world canalized propagation of a radio signal are considered.
Keywords: ionosphere, propagation, rays, caustics, ricochet*

Введение

При исследовании распространения радиоволн коротковолнового (декаметрового) диапазона могут возникнуть условия, когда электромагнитное излучение распространяется на значительные расстояния, не касаясь поверхности земли [1,2]. Такой вид распространения называется рикошетирующим и объясняется последовательным отражением радиоволны от ионосферы, кривизна которой повторяет кривизну земной поверхности. Актуальность исследования такого распространения определяется возможностью применения такого эффекта для организации связи между космическими аппаратами (КА). Настоящая статья является продолжением исследований, выполненных методом бихарактеристик [3] в работах [4-6].

Постановка задачи

В работе рассмотрена изотропная модель электронной концентрации ионосферы, содержащая три ионосферных слоя: слой E, F1 и F2. На рис. 1 показано распределение электронной концентрации в координатах (ψ , ρ). В легенде 1 (единица) соответствует 10^6 см^{-3} . Величина ρ – это расстояние от поверхности земли по нормали, а ψ – азимутальный угол. Жёлтым цветом показана электронная концентрация в главном максимуме в дневной области. Между ними – ночь ($\psi = -90^\circ$). Угол $\psi = 90^\circ$ в правой части рисунка соответствует углу $\psi = -270^\circ$ в левой части рисунка. В нижней части рисунка с распределением электронной концентрации просматривается слой E.

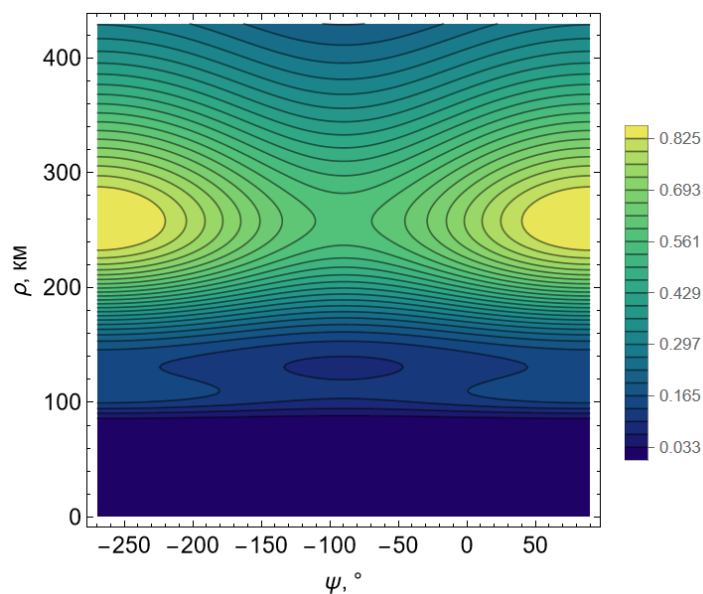


Рис. 1. Распределение электронной концентрации

Источник излучения расположен на высоте 100 км от поверхности земли при угле $\psi = 90^\circ$, то есть в дневной области. Частота излучения 30 МГц. Излучение осуществляется в диапазоне углов $\alpha = \pm 5^\circ$ по часовой стрелке. Расчеты лучевых траекторий выполнялись с помощью бихарактеристической системы Гамильтона-Лукина [3].

Результаты моделирования

На рис. 2 и 3 приведены результаты моделирования лучевого рикошетирующего распространения радиоволн вокруг Земли. На рис. 2 показаны «нижние» лучи, вышедшие из источника излучения под углами от -5° до $0,84^\circ$.

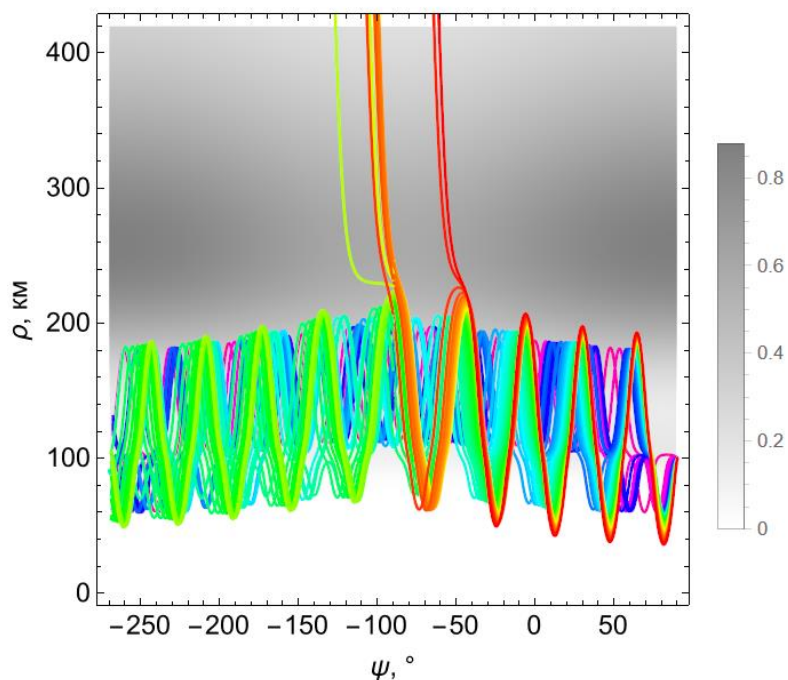


Рис. 2. Лучевая структура для «нижних» лучей

Они названы «нижними» потому, что из источника излучения эти лучи направляются к поверхности Земли. На рис. 3. показаны «верхние» лучи, то есть лучи, излучаемые в диапазоне углов от $0,85^\circ$ до 5° и первоначально распространяющиеся вверх, от поверхности Земли.

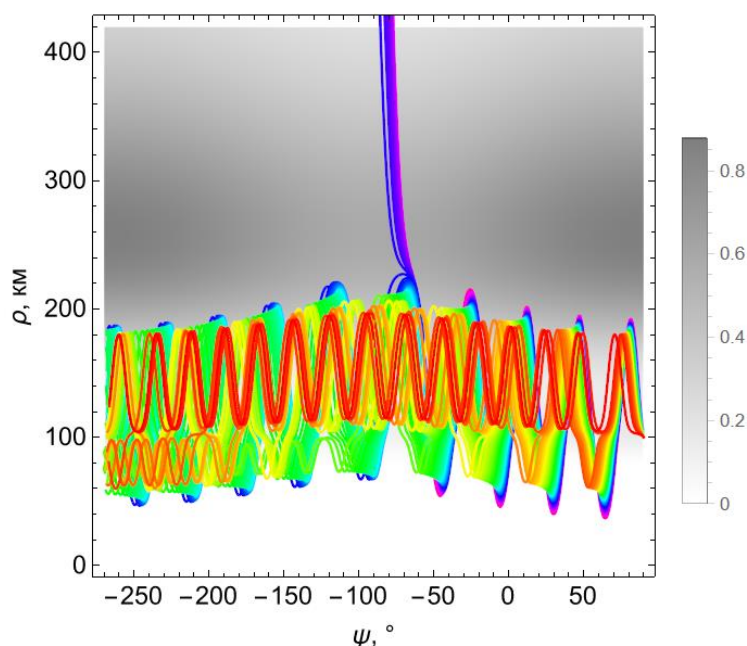


Рис. 3. Лучевая структура для «верхних» лучей

На обоих рисунках разными цветами показаны лучи с различными углами выхода, причем красный цвет соответствует минимальному углу выхода. Далее цвет луча меняется по спектральному закону (К-О-Ж-З-Г-С-Ф). В построении лучевых траекторий принимал участие 51 луч.

Полное время расчета всей лучевой структуры составляет 0,137 с, что прекрасно согласуется с экспериментальными данными о времени, затраченном сигналом на обгибание земного шара (от 0,13760 до 0,13805 с) по данным работы [1, стр. 282].

Анализируя рис. 2 и 3, видим, что распространение радиосигнала носит (по высоте) осциллирующий характер. Например, зеленые лучи на рис. 2 и синие лучи на рис. 3 имеют 9 периодов за всё время распространения вокруг Земли.

Для выбранных нами предельных углов имеет место небольшое просачивание энергии сквозь ионосферные слои (красные и жёлтые лучи на рис. 2 и синие и фиолетовые лучи на рис. 3). Просачивание возникает на ночной стороне, когда значения максимумов электронной концентрации ионосферных слоёв уменьшаются. Следует отметить, что как для «нижних», так и «верхних» лучей «гребенка» осцилляций поднимается в «ночной области». Для «верхних» и для «нижних» лучей (рис. 3) размах осцилляций увеличивается с увеличением по модулю угла выхода α . После прохождения ночной зоны у «верхних» лучей появляются нижние осцилляции.

К сожалению, построение лучевых траекторий в координатах (ψ, ρ) не даёт полного наглядного представления о характере распространения радиоволн. Граница Земли распрямляется в линию, начало и конец траекторий не встречаются и т.д. Построение же лучей в декартовых координатах затруднено, поскольку радиус Земли много больше ширины слоя, в котором осуществляется рикошетирующее распространение и различить траектории не удастся. Поэтому на рис. 4-7 показаны фрагменты траекторий для «нижних» и «верхних» лучей по-отдельности. Коричневым

цветом показана Земля. Левые рисунки (а) соответствуют «нижним» лучам, а правые (б) – «верхним».

На рис. 4 мы видим источник излучения и волну, уходящую, не касаясь земли, в правую область. Хорошо видно, как лучевая трубка при этом перекручивается, образуя каустики.

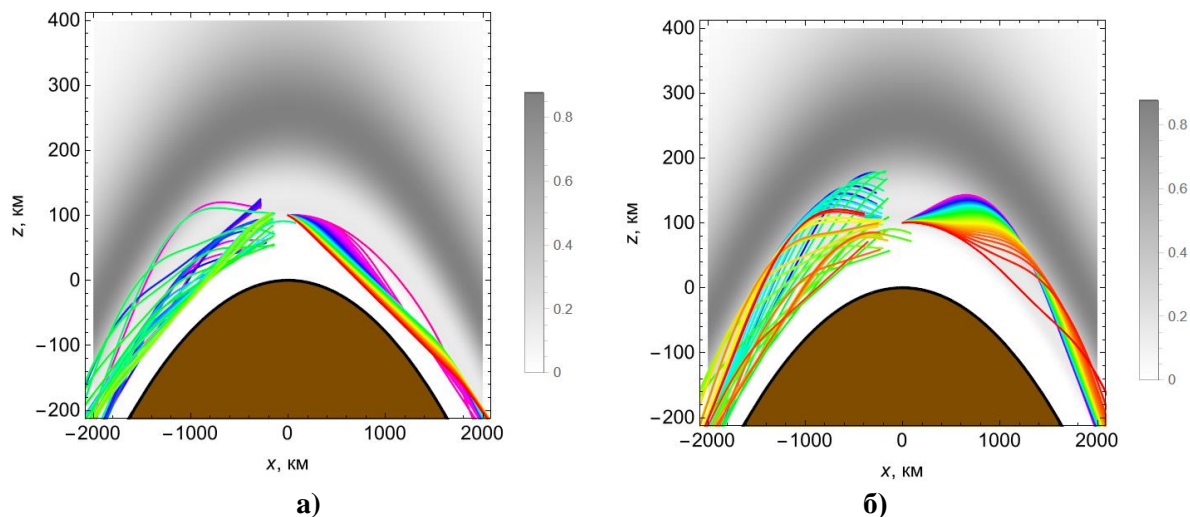


Рис. 4. Лучевая структура под источником в декартовых координатах; а – «нижние лучи», б – «верхние лучи»

Максимум электронной концентрации, которая показана серым цветом, расположен над источником. Слой F виден хорошо, а слой E слаб и плохо различим.

Рис. 5 является продолжением рис. 4. Лучевые трубки огибают Землю справа. Видно, что верхняя граница лучевой трубки практически совпадает с нижней границей слоя F.

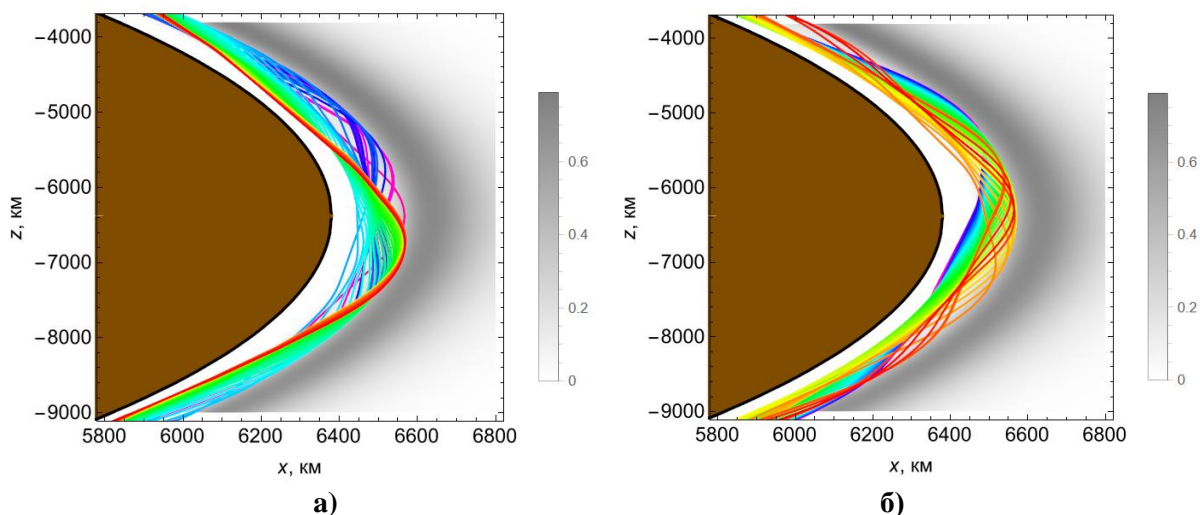


Рис. 5. Лучевая структура справа от источника в декартовых координатах; а – «нижние лучи», б – «верхние лучи»

На рис. 6 показано как лучевые трубки огибают ночную сторону Земли. При этом они теряют часть лучей за счет просачивания через слой F. Это жёлтые, оранжевые и красные нижние лучи (рис. 6 а) и синие и фиолетовые «верхние» лучи. Оставшиеся лучи огибают Землю слева (рис. 7) и появляются в правой части рис. 4. Видно, что лучевая трубка значительно расширилась, причём разные лучи преодолели разное

расстояние за одно и тоже время. Более подробно этот фрагмент показан на рис. 8 а одновременно и для «нижних», и для верхних лучей. На рис. 8 б показан такой же фрагмент в боковой плоскости.

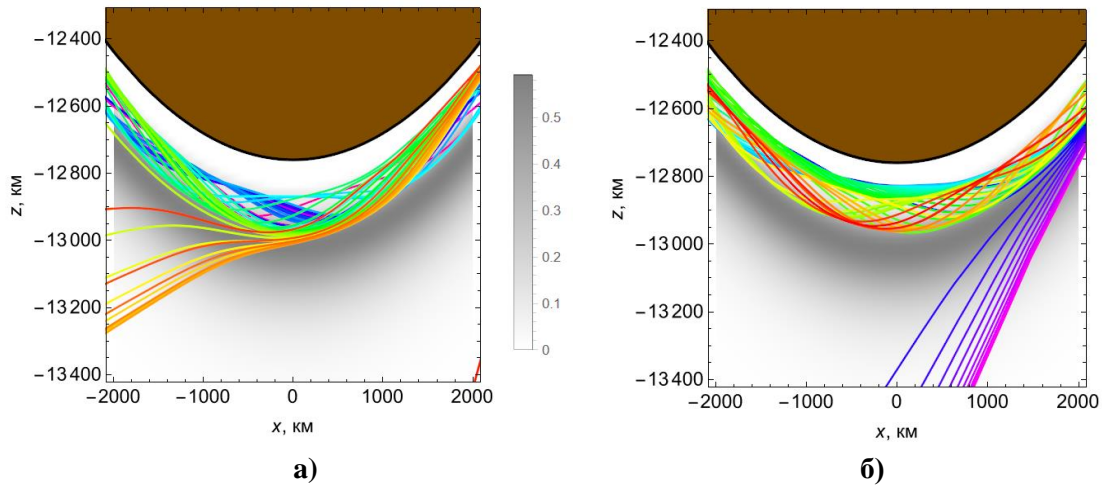


Рис. 6. Лучевая структура под источником в декартовых координатах; а – «нижние лучи», б – «верхние лучи»

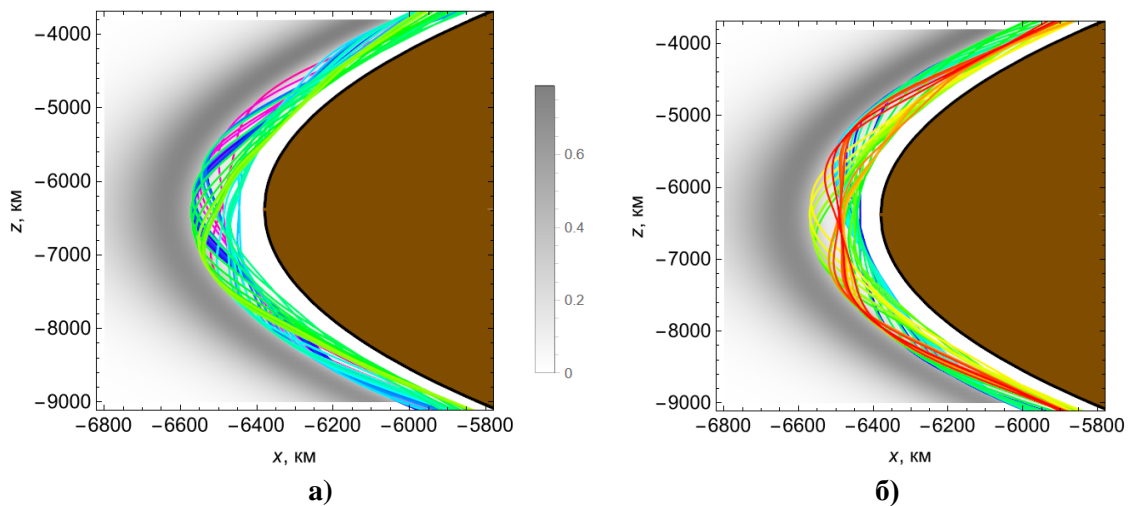


Рис. 7. Лучевая структура слева от источника в декартовых координатах; а – «нижние лучи», б – «верхние лучи»

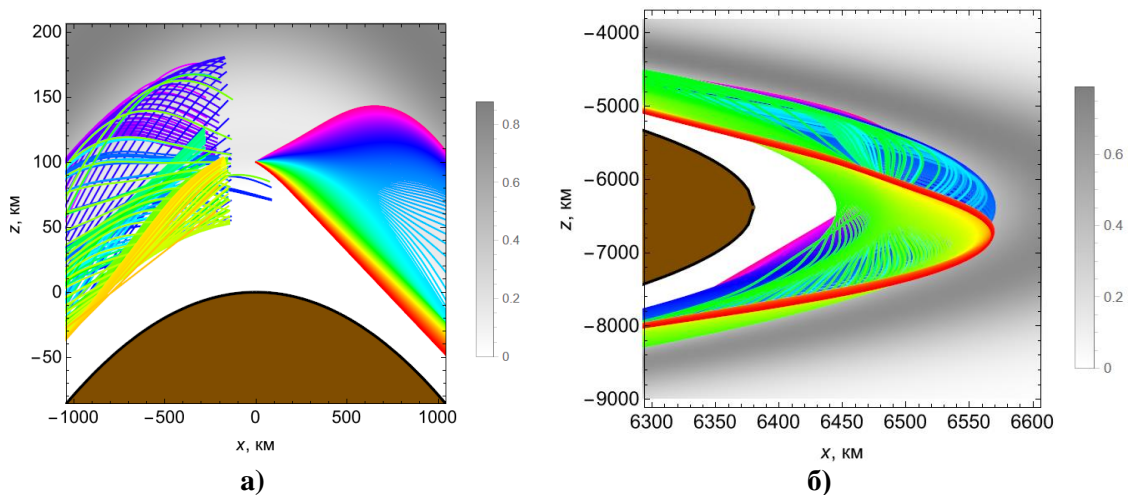


Рис. 8. Лучевая структура: а – в области источника излучения, б – в боковой области (фрагмент, 301 луч)

Хорошо видны огибающие лучевых семейств – каустики. Причем видно, что для «верхних» и «нижних» лучей они сдвинуты относительно друг друга.

Выводы

Таким образом, в работе исследованы особенности рикошетирующего распространения радиоволн в ионосфере Земли. Рикошет возникает за счет влияния двух факторов: отражения радиоволны от ионосферного слоя F и кривизны ионосферного слоя, повторяющего кривизну Земли. Рассмотрена изотропная модель ионосферной плазмы, учитывающая изменение электронной концентрации в зависимости от времени суток. Методом бихарактеристик построены лучевые траектории в сферических координатах (ψ , ρ), а также в декартовых координатах. Показано, что в случае, когда источник излучения приподнят на высоту 100 км, в диапазоне углов $\pm 5^\circ$ возникает канализированное кругосветное распространение, ограниченное каустиками, причем часть лучей высвечивается из канала при прохождении ночной области. Внутри канала трубки лучей перекручиваются, образуя сложные каустические структуры.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда РФ № 20-12-00299.

Литература

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн – М.: Связь, 1972. 336 с.
2. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. – М.: Мир, 1973. 502 с.
3. Казанцев А.Н., Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. Метод исследования распространения радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере. // Космические исследования, 1967. Т. 5. Вып. 4. С. 593–600.
4. Бова Ю.И., Крюковский А.С., Лукин Д.С. Распространение частотно-модулированного излучения электромагнитных волн в ионосфере Земли с учетом поглощения и внешнего магнитного поля // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. № 1. С. 3-14.
5. Крюковский А.С., Растягаев Д.В., Скворцова Ю.И. Исследование распространения частотно-модулированных пространственно-временных сигналов в неоднородной анизотропной ионосфере // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2013. № 4. С. 47-52.
6. Крюковский А.С., Скворцова Ю.И. Математическое моделирование распространения радиоволн в нестационарной плазме с учетом кривизны поверхности земли и ионосферных слоев // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2016. № 1-2. С. 34-40.