УДК: 550.388.2 DOI: 10.26907/rwp29.2025.290-293

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЛУЧЕВЫХ ТРАЕКТОРИЙ КОРОТКИХ ВОЛН В ИОНОСФЕРЕ СРЕДНИХ И ВЫСОКИХ ШИРОТ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

В.Е. Захаров, К.В. Раубо

ОНК «Институт высоких технологий»
Балтийского Федерального университета им. И. Канта,
ул. А. Невского, 14, Калининград, 236041 Российская Федерация

E-mail: VEZakharov@kantiana.ru; Tatarinova180@bk.ru

Аннотация. Численно исследуются особенности формирования лучевых траекторий коротких волн в ионосфере в зависимости от выбора геофизических условий, положения передатчика и угловых характеристик излучения.

Ключевые слова: ионосфера; короткие волны; лучевые характеристики.

SURCH ON THE RAY FORMATION WHILE SHORT WAVES PROPAGATE IN THE MIDDLE AND HIGH LATITUDE IONOSPHERE IN DEPENDENCE ON GEOPHYSICAL CODITIONS

V.E. Zakharov, K.V. Raubo

Abstract. The features of the ray formation investigated in dependence on a choice of geophysical conditions while short waves propagate in the ionosphere.
Keywords: ionosphere, short waves, path and field characteristics, non-uniform structure of waves.

Введение

Метод геометрической оптики широко применяется при решении задач распространения коротких волн в ионосфере [1]. В [2] представлен метод расширенной би-характеристической системы уравнений для моделирования лучевых траекторий. Изменчивость геофизических условий, трехмерная неоднородность и анизотропия плазмы ионосферы в геомагнитном поле в сочетании с необходимостью прогноза радиосвязи делает актуальным моделирование распространения радиоволн в ионосфере. Для каналов радиосвязи с постоянными параметрами оправдано применение экспериментальных моделей среды распространения, таких как IRI2012 [3] для ионосферы и MSIS86 [4]) для нейтральной атмосферы. Эти модели определяют сами параметры среды, но не скорости их изменения.

Целью данной работы является исследование особенностей формирования лучевых траекторий коротких волн в ионосфере посредством численных экспериментов.

Постановка задачи

Нами использована численная модель расчета лучевых и полевых характеристик нормальных мод коротких волн в ионосфере [5].

Для описания среды распространения радиоволн использовались эмпирическая модель ионосферы IRI-2012 [3] и модель нейтральной атмосферы MSIS-86 [4], Высота h = 60 км принимается за нижнюю границу ионосферы.

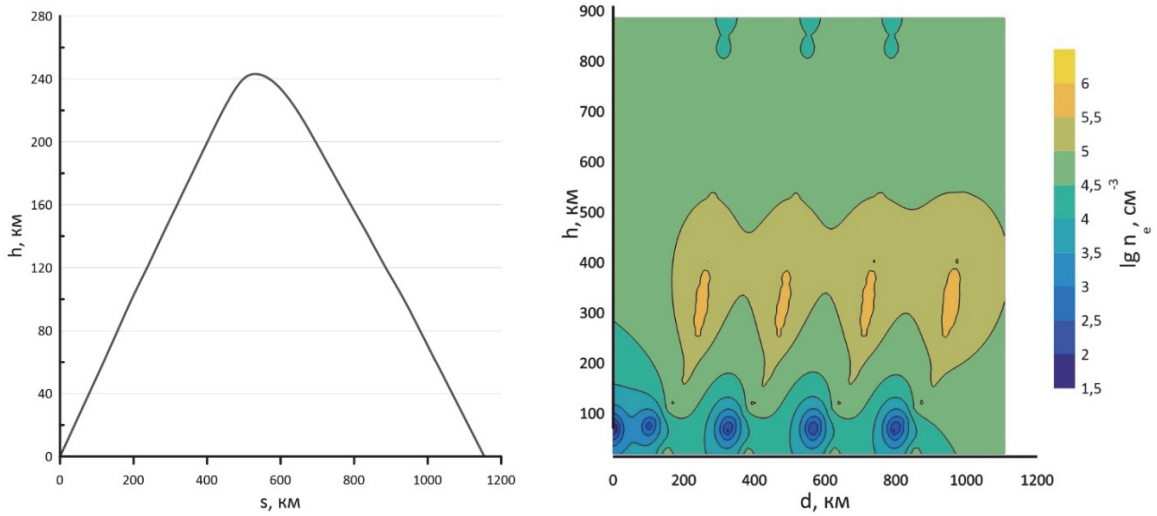
Для расчета функции ионизации плазмы ионосферы применялась эмпирическая модель [6] распределения плотности потока энергии высыпающихся авроральных электронов в зависимости от *AE* индекса авроральной геомагнитной активности и уравнение баланса процессов ионизации и рекомбинации в ионосферной плазме.

При необходимости ввода входных данных по индексам солнечной и геомагнитной активности и для контроля их соответствия фактически используемым в IRI2012 при проведении расчетов использовались данные [7, 8].

Положение точечного излучателя гармонического сигнала и направление излучения опорного луча считаются заданными. Излучение источника рассматривается в пучке с узкой угловой апертурой вблизи опорного луча.

Результаты численных расчетов и выводы

Результаты расчетов показаны на рис. 1–5. Рис. 1 получен для следующего выбора значений параметров. Задан 1969 год высокой солнечной активности, номер дня в году N = 86 – условия весеннего равноденствия, момент мирового времени UT = 4,65 час. В таких условиях индексы солнечной активности $F_{10,7}$ = 154 и геомагнитной активности A_p=13. Высокая авроральная активность – 300 <AE <600. Географические координаты передатчика на поверхности Земли – широта $\varphi = 55^0$, и долгота $\lambda = 110^0$. Заданы угол места $\beta = 30^0$, и азимут $\gamma = 60^0$ излучения для опорного луча передатчика, частота f = 10 МГц, обыкновенная волна.



а) (б)

Рис. 1. (а) Лучевая траектория в координатах длина s, км и высота h, км над поверхностью Земли; (б) Изолинии концентрации электронов lg n_e $см^{-3}$ в ионосфере в координатах d, км длины проекции луча на поверхность Земли и высота h, км над поверхностью Земли

Рис. 2, в отличие от рис. 1, получен для условий низкой солнечной активности. Задан 1965 год низкой солнечной активности, $F_{10,7}$ = 66 и геомагнитной активности A_p = 23. Низкая авроральная активность – AE <100, угол места $\beta = 15^0$. При $\beta = 30^0$ траектория тем более проходит сквозь ионосферу.

Рис. 3, в отличие от рис. 1, получен для условий высокоширотной, а не среднеширотной ионосферы. Задан 1969 год высокой солнечной активности, номер дня в году N= *356* – условия зимнего солнцестояния, момент мирового времени UT = 16,65 час. В таких условиях индексы солнечной активности $F_{10,7}$ = 125 и геомагнитной активности A_p = 2. Высокая авроральная активность – 300 <AE <600. Географические координаты передатчика на поверхности Земли – широта $\varphi = 75^0$, и долгота $\lambda = 110^0$. Заданы угол места $\beta = 30^0$, и азимут $\gamma = 60^0$ излучения для опорного луча передатчика, частота f = 10 МГц, обыкновенная волна.

Рис. 4, в отличие от рис. 3, получен для 1965 года низкой солнечной активности, $F_{10,7}$ = 68 и геомагнитной активности A_p = 2. Низкая авроральная активность – AE <100, угол места $\beta = 10^0$, частота f = 5 МГц

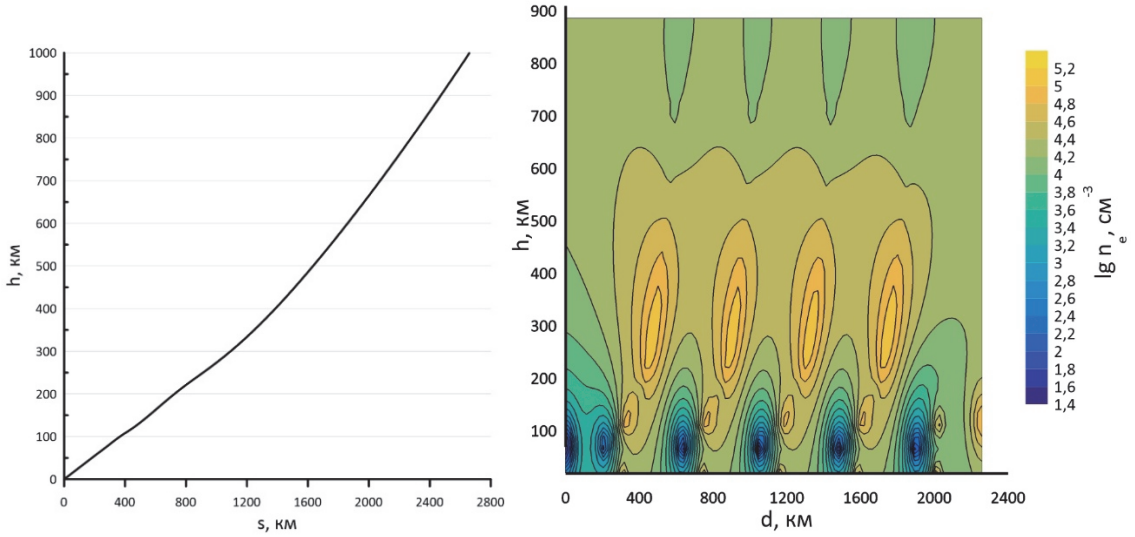


Рис. 2. То же, что и на Рис.1, но для условий низкой солнечной активности

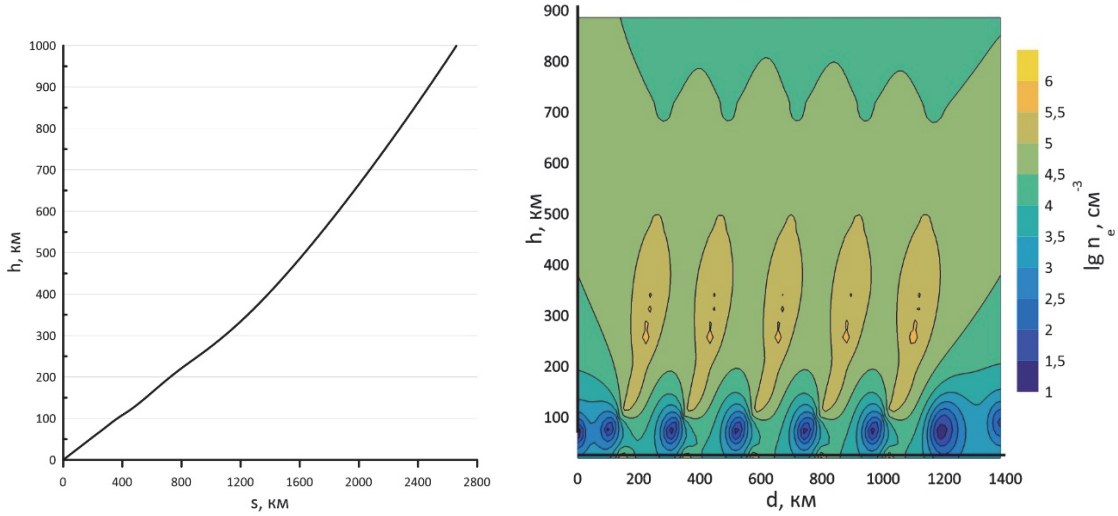


Рис. 3. То же, что и на Рис.1, но для условий высокоширотной ионосферы

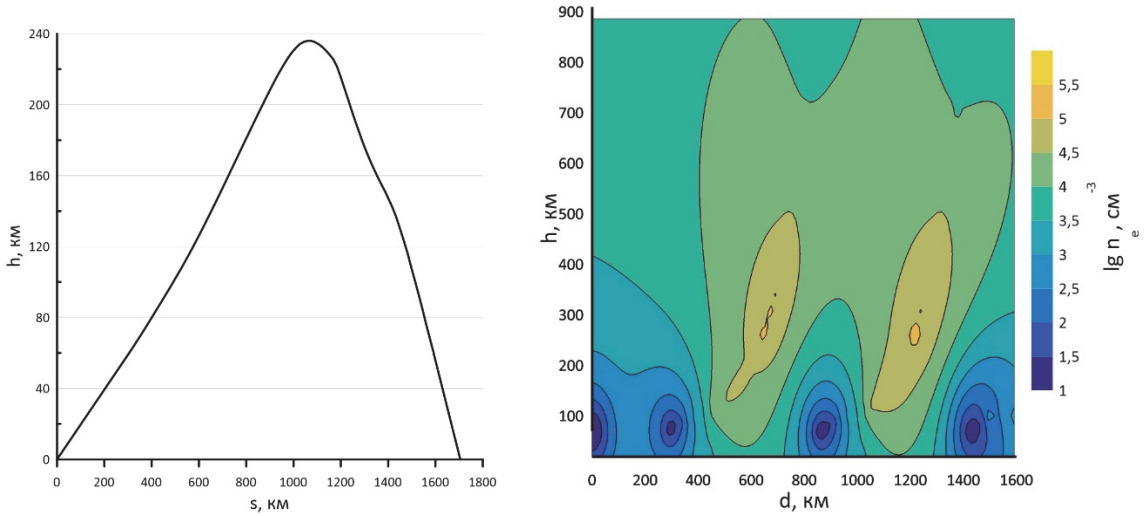


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, но для условий низкой солнечной активности, угол места $\beta = 10^0$, частота $f = 5$ МГц

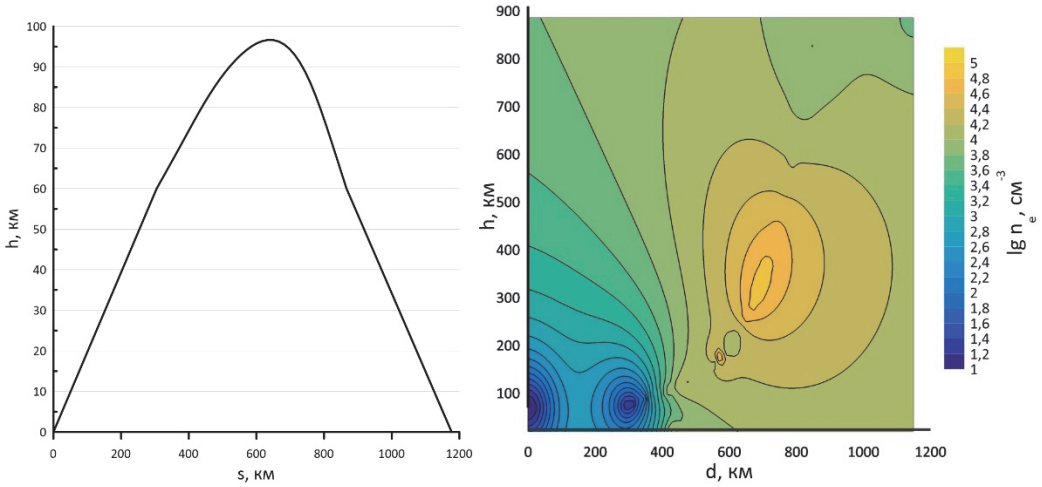


Рис. 5 получен для следующего выбора значений параметров. Задан 1965 год низкой солнечной активности, номер дня в году *N=356* – условия зимнего солнцестояния, момент мирового времени *UT* = 4,65 час. В таких условиях индексы солнечной активности $F_{10,7}$ = 68 и геомагнитной активности A_p = 2. Низкая авроральная активность – *AE* <100. Географические координаты передатчика на поверхности Земли – широта $\varphi = 75^0$, и долгота $\lambda = 110^0$. Заданы угол места $\beta = 10^0$, и азимут $\gamma = 60^0$ излучения для опорного луча передатчика, частота *f* = 5 МГц, необыкновенная волна.

Для сравнения с рис. 5 проведен расчет для следующего выбора значений параметров. Задан 1969 год высокой солнечной активности, номер дня в году *N=356* – условия зимнего солнцестояния, момент мирового времени *UT* = 4,65 час. В таких условиях индексы солнечной активности $F_{10,7}$ = 125 и геомагнитной активности A_p = 2. Высокая авроральная активность – 300 <*AE* <600. Географические координаты передатчика на поверхности Земли – широта $\varphi = 75^0$, и долгота $\lambda = 110^0$. Заданы угол места $\beta = 30^0$, и азимут $\gamma = 60^0$ излучения для опорного луча передатчика, частота *f* = 10 МГц, необыкновенная волна. Получена траектория луча, проходящего сквозь ионосферу.

Список литературы

1. Лукин Д.С., Палкин Е.А., Ипатов Е.Б., Крюковский А.С., Растягаев Д.В. Развитие математического моделирования распространения радиоволн в ионосфере земли на основе волновой теории катастроф и канонического оператора Маслова // Сборник докладов XXV Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн». – Томск, 4–9 июля 2016 г. – Т. 1. – С. 40–50.
2. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Кирьянова К.С. Метод расширенной би-характеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57. – № 9. – С. 1028–1034.
3. Bilitza D. The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration / D. Bilitza, D. Altadill, Y. Zhang et al. // Journal of Space Weather and Space Climate. – 2014. – V. 4. – A07.
4. Hedin A.E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere // J. Geophys. Res. – 1991. – V. 96. – A1. – P. 1159–1172.
5. Захаров В. Е. Формирование амплитудных и поляризационных характеристик коротких волн при распространении в ионосфере // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64. – № 6. – С. 525–534.
6. Spiro R.W., Reiff P.H., Maher L.J. Precipitating electron energy flux ana auroral zone conductivities – an empirical model // J. Geophys. Res. – 1982. – V. 87. – A10. – P. 8215–8227.
7. Мировой Центр Данных (wdcb.ru).
8. ISGI – International Service of Geomagnetic Indices (unistra.fr).