УДК: 550.388.2 DOI: 10.26907/rwp29.2025.278-281

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ АМПЛИТУДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКИХ ВОЛН В ИОНОСФЕРЕ ВЫСОКИХ И СРЕДНИХ ШИРОТ

К.В. Раубо, В.Е. Захаров

ОНК «Институт высоких технологий»
Балтийского Федерального университета им. И. Канта,
ул. А. Невского, 14, Калининград, 236041 Российская Федерация
E-mail: Tatarinova180@bk.ru, VEZakharov@kantiana.ru

Аннотация. Для анализа и обработки полученных данных были проведены численные эксперименты, в ходе которых выявлены закономерности изменения амплитуд и поляризации сигналов, зависимых от различных геофизических факторов, включая солнечную активность, геомагнитное поле и температуру атмосферы. Результаты исследования могут быть использованы для повышения точности прогнозирования связи на коротких волнах, что имеет важное значение для множества научных и технических сфер, таких как радиосвязь, навигация и спутниковые системы

Ключевые слова: ионосфера; короткие волны; амплитудные характеристики.

COMPARATIVE STUDY OF THE FORMATION OF AMPLITUDE CHARACTERISTICS OF SHORT WAVES IN THE IONOSPHERE AT HIGH AND MID LATITUDES

K.V. Raubo, V.E. Zakharov

Abstract. Numerical experiments were conducted to analyze and process the obtained data, revealing patterns in the variation of signal amplitudes and polarization depending on various geophysical factors, including solar activity, the geomagnetic field, and atmospheric temperature. The results of the study can be used to improve the accuracy of shortwave communication forecasting, which is crucial for various scientific and technical fields such as radio communication, navigation, and satellite systems.

Keywords: ionosphere; short waves; amplitude characteristics.

Введение

Методы геометрической оптики широко используются для исследования процессов распространения коротковолновых сигналов в ионосфере [1]. В работе [2] представлен подход, основанный на расширенной би-характеристической системе уравнений, который позволяет более точно моделировать траектории распространения лучей. Учитывая сложность геофизических условий, трехмерную неоднородность и анизотропию плазмы ионосферы в геомагнитном поле, а также значимость прогноза радиосвязи, актуальной задачей остается моделирование распространения радиоволн в ионосферной среде.

Для моделирования каналов радиосвязи с фиксированными параметрами целесообразно использовать экспериментально верифицированные модели среды распространения, такие как IRI2012 [3] для ионосферы и MSIS86 [4] для нейтральной атмосферы. Однако данные модели описывают физические параметры среды, но не учитывают динамику их изменения, что ограничивает их применение при прогнозировании условий радиосвязи в реальном времени.

Целью данной работы является сравнительное исследование формирования амплитудных характеристик коротких волн в ионосфере высоких и средних высот.

Постановка задачи

В данном исследовании использована численная модель расчета лучевых и полевых характеристик нормальных мод коротких волн в ионосфере [5]. Для описания среды распространения радиоволн применялись эмпирическая модель ионосферы IRI-2012 [3] и модель нейтральной атмосферы MSIS-86 [4]. Нижняя граница ионосферы принята на высоте h = 60 км.

Для моделирования процессов ионизации плазмы ионосферы использовалась эмпирическая модель [6], описывающая распределение плотности потока энергии высыпающихся авроральных электронов в зависимости от AE-индекса авроральной геомагнитной активности. Дополнительно

учитывались уравнения баланса процессов ионизации и рекомбинации, что позволило более точно определить вариации электронной концентрации в зависимости от внешних условий.

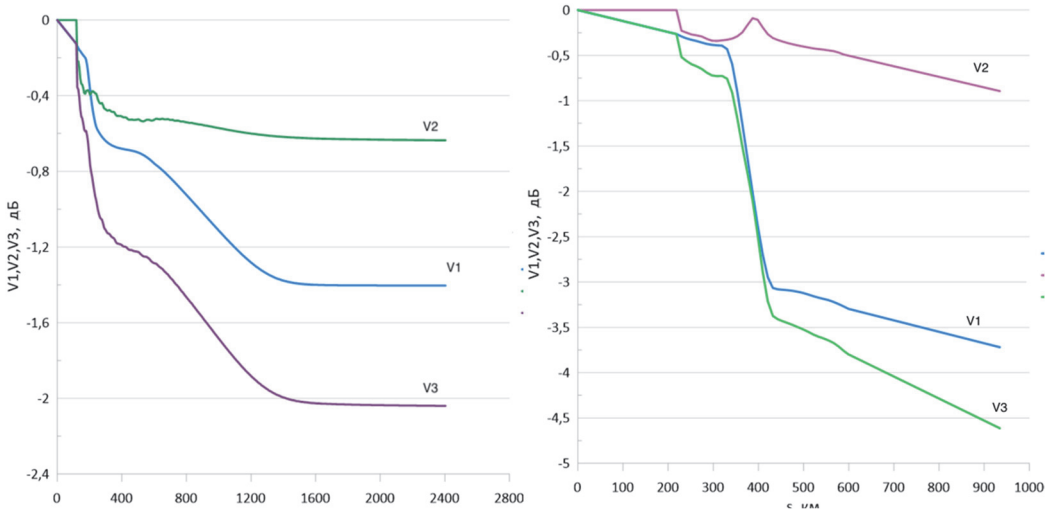
Для ввода и верификации данных о солнечной и геомагнитной активности применялись значения из [7, 8]. Это обеспечивало согласованность расчетов с моделью IRI-2012, минимизируя возможные расхождения между теоретическими и эмпирическими данными.

Положение точечного излучателя гармонического сигнала и направление излучения опорного луча принимались заданными. Излучение источника рассматривалось в виде узконаправленного пучка с малой угловой апертурой, сосредоточенного вблизи опорного луча. В модели также учитывались эффекты дифракции и рассеяния, что позволяло описывать особенности распространения радиоволн в неоднородной анизотропной среде.

Дополнительно в расчетах учитывалось влияние вариаций электронной концентрации, обусловленных динамическими изменениями в ионосфере. Это позволило получить более детализированную картину распространения коротковолновых сигналов, что особенно важно для задач прогноза радиосвязи и навигации.

Результаты численных расчетов и выводы

Результаты расчетов приведены на рис. 1–5. На рис.1а приведен график с заданными параметрами: а именно, задан год -1969 с средней солнечной активности, номер дня в году N = 86 – условия весеннего равноденствия, момент мирового времени UT = 4,65 час. В таких условиях индексы солнечной активности $F_{10,7}$ = 80 и геомагнитной активности A_p=27 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. На рисунке 1б заданы такие же характеристики, но UT = 16,65 час. Заданы угол места $\beta = 15^0$, и азимут $\gamma = 60^0$ излучения для опорного луча передатчика, частота f = 10 МГц, обыкновенная волна. Географические координаты передатчика соответствуют рис.1а

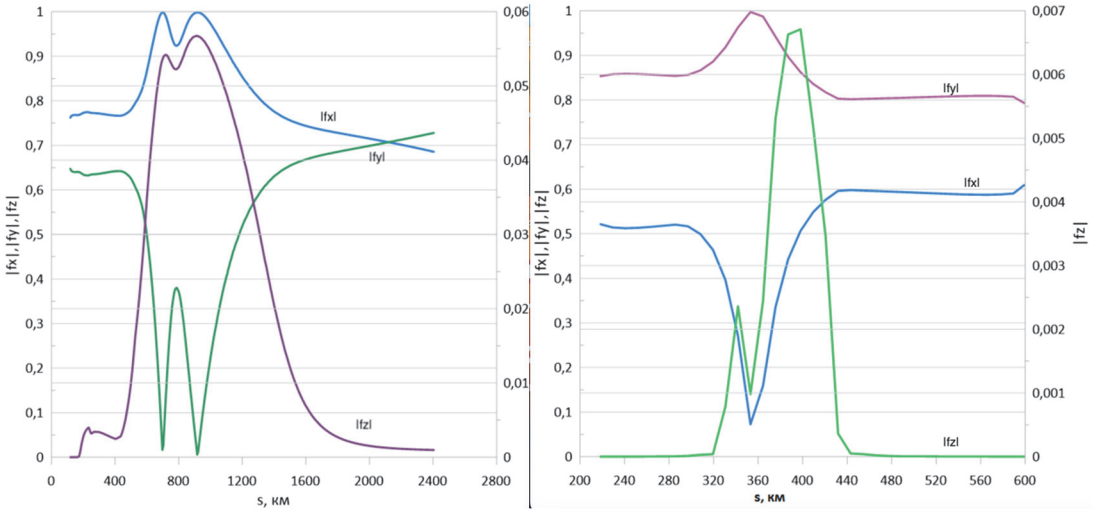


а) (б)

Рис. 1. Результаты расчетов множителя ослабления обыкновенной волны; кривая V1 – вклад от поглощения, V2 – вклад от расходимости лучей, и V3 – множитель полного ослабления (а – обыкновенная волна, б – необыкновенная волна)

Различия объясняются тем, что необыкновенная волна, испытывая большее влияние магнитного поля и ионосферы, теряет энергию быстрее, что проявляется в резком ослаблении. Обыкновенная волна распространяется стабильнее, с меньшим поглощением и расходимостью лучей.

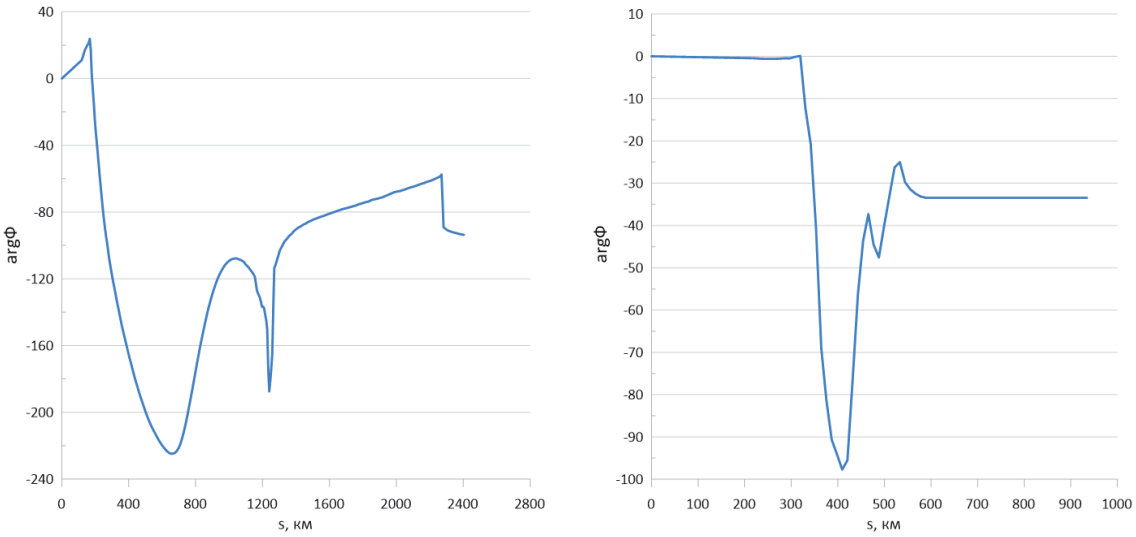
На рис. 2(а и б) показан модуль декартовой проекции.



а) (б)

Рис. 2. Модуль декартовой проекции $|f_x|$-1, $|f_y|$-2, $|f_z|$-3 вектора поляризации (а – обыкновенной волны, б – необыкновенной волны)

В каждой точке наблюдения вводится локальная система координат, где ось z направлена вдоль вектора импульса. При распространении обыкновенной волны компонент |fy| увеличивается, а |fx| уменьшается, что связано с изменением структуры волны. Величина |fz| минимальна при достижении поперечного режима, но затем возрастает из-за неоднородности. В нижней ионосфере поляризация волн близка к линейной, но с углублением она становится эллиптической: обыкновенная волна имеет левое вращение, а необыкновенная — правое. Обыкновенная волна со временем становится однородной, тогда как необыкновенная сохраняет эллиптическую поляризацию. Развитие неоднородности приводит к изменению угла между векторами импульса и групповой скорости.



а) (б)

Рис. 3. Зависимость фазы комплексной волны от координат длины вдоль траектории (а – обыкновенной волны, б – необыкновенной волны)

На рис. 3 приведены графики зависимости фазы комплексной волны от координат длины вдоль траектории для обыкновенной и необыкновенной волны. Рисунок 3а показывает значительные колебания фазы комплексной волны на протяжении всей траектории, что может быть связано с неоднородностями сред.

Рисунок 3б демонстрирует более резкое падение фазы в начальной части траектории, после чего изменения становятся более сглаженными, что может свидетельствовать о различии в механизме распространения необыкновенной волны.

Оба графика зависят от свойств среды (плотность, преломление, проводимость), геометрии распространения и возможных внешних факторов, влияющих на фазу комплексной волны.

В первом случае фаза меняется более плавно, но с большими колебаниями, тогда как во втором графике присутствует резкое изменение в начальной стадии, а затем стабилизация.

Это может указывать на различие в физических характеристиках обычной и необыкновенной волны – возможно, необыкновенная волна сильнее зависит от условий генерации и внешнего воздействия.

В целом, отличие двух графиков объясняется разной природой волн и их взаимодействием со средой – обычная волна испытывает больше изменений на протяжении всей траектории, а необыкновенная – концентрированные скачки в начале пути.

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. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
8. Кравцов, Ю.А. Геометрическая оптика неоднородных сред / Ю.А. Кравцов, Ю.И. Орлов. – М.: Наука, 1980. – 304 с.