

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КВ-РАДИОВОЛН В ТРЕХМЕРНО-НЕОДНОРОДНОЙ ИОНОСФЕРЕ

^{1,2}Д.С. Котова, ²М.В. Клименко, ²В.В. Клименко, ¹В.Е. Захаров

MATHEMATICAL MODELING OF HF RADIO WAVE PROPAGATION THROUGH THREE-DIMENSIONAL INHOMOGENEOUS IONOSPHERE

^{1,2}D.S. Kotova, ²M.V. Klimenko, ²V.V. Klimenko, ¹V.E. Zakharov

Представлены результаты совместного использования модели распространения КВ-радиоволн и глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП). Получены результаты модельных расчетов различных радиотрасс КВ-диапазона в трехмерно-неоднородной ионосфере в периоды геомагнитных бурь 2–3 мая 2010 и 26–29 сентября 2011 г. Исследовано поведение обыкновенной и необыкновенной мод радиоволны, а также влияние слоев F1 и F3 на характер КВ-радиотрасс и интегральное поглощение.

We present the results obtained by joint using of HF radio propagation model and the Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere and Protonosphere (GSM TIP). We obtained the model simulation results of various HF radio ray-traces in three-dimensional inhomogeneous ionosphere during geomagnetic storms on 2–3 May 2010 and 26–29 September 2011. We investigated the behavior of the ordinary and extraordinary modes of radio waves as well as the influence of F1 and F3 layers on the HF radio ray-traces and the integral absorption.

Введение

Появление вычислительной техники способствовало возникновению современного направления в решении радиофизических задач – численного моделирования распространения радиоволн (РРВ), работы приборов, среды распространения радиосигналов и т. д. Большинство имеющихся сейчас программ либо не учитывают трехмерность среды, либо рассматривают распространение в идеализированной эмпирической среде [Zhbankov et al., 2010; Карпачев и др., 2011; Крюковский и др., 2010; Андреева и др., 2011]. Преимуществом данного исследования является совмещение работы программ по расчету радиотрасс [Захаров, Черняк, 2007] в среде, рассчитанной с помощью глобальной теоретической модели системы термосфера–ионосфера–протоносфера (ГСМ ТИП) [Namgaladze et al., 1988; Намгаладзе и др., 1990; Клименко и др., 2006 а, б]. Адаптация двух моделей успешно апробирована в докладах на Региональной конференции по распространению радиоволн, СПбГУ, Санкт-Петербург 2012; а также на российских и международных конференциях «Физика плазмы в Солнечной Системе», ИКИ, Москва 2013; «Физика авроральных явлений», ПГИ, Апатиты 2013; EGU-2013, Vienna, Austria; IRI-2013, Olsztyn, Poland; BSS-2013, Bath, England; IAGA-2013, Merida, Mexico.

Результаты модельных расчетов и обсуждение

В данной работе проводится сравнение КВ-радиотрасс в спокойных условиях и во время геомагнитных бурь 2–3 мая 2010 и 26–29 сентября 2011 г. На рис. 1 показано поведение D_{st} -индекса геомагнитной активности в рассматриваемые периоды. На картах изолиний критической частоты F-слоя foF в выбранных пространственных областях ионосферы для соответствующих дней двух бурь показаны положения передающих гипотетических КВ-радиостанций и соответствующие направления распространения, для которых рассчитывались радиотрассы (рис. 2).

Наиболее интересные результаты модельных расчетов различных радиотрасс КВ-диапазона и их интегрального затухания в трехмерно-неоднородной

ионосфере для первой гипотетической высокоширотной передающей станции представлены на рис. 3. Расчеты соответствуют обыкновенной моде волны.

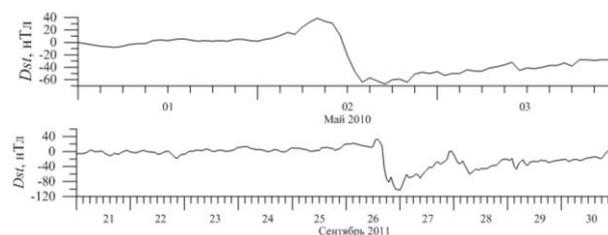


Рис. 1. Поведение D_{st} -индекса геомагнитной активности во время бурь 2–3 мая 2010 (вверху) и 26–30 сентября 2011 г.

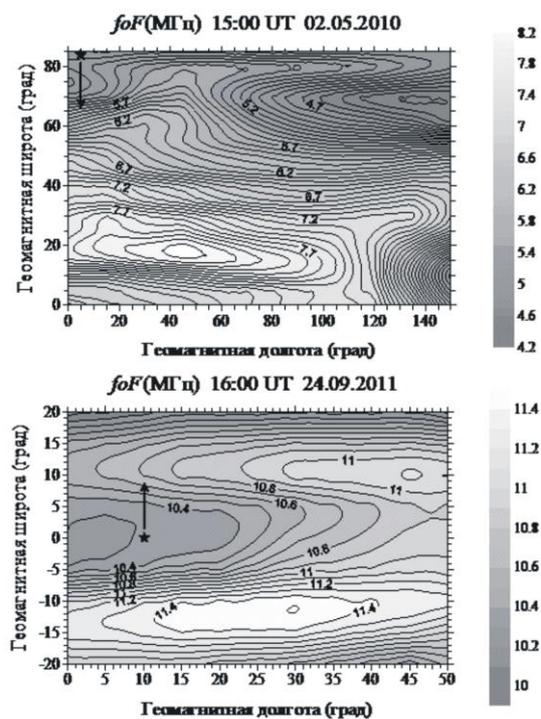


Рис. 2. Положение гипотетических передающих станций, показанных звездочками, и направление распространения КВ-радиоволн, показанное стрелкой, на картах изолиний критической частоты F-слоя foF в рассматриваемых областях для двух бурь.

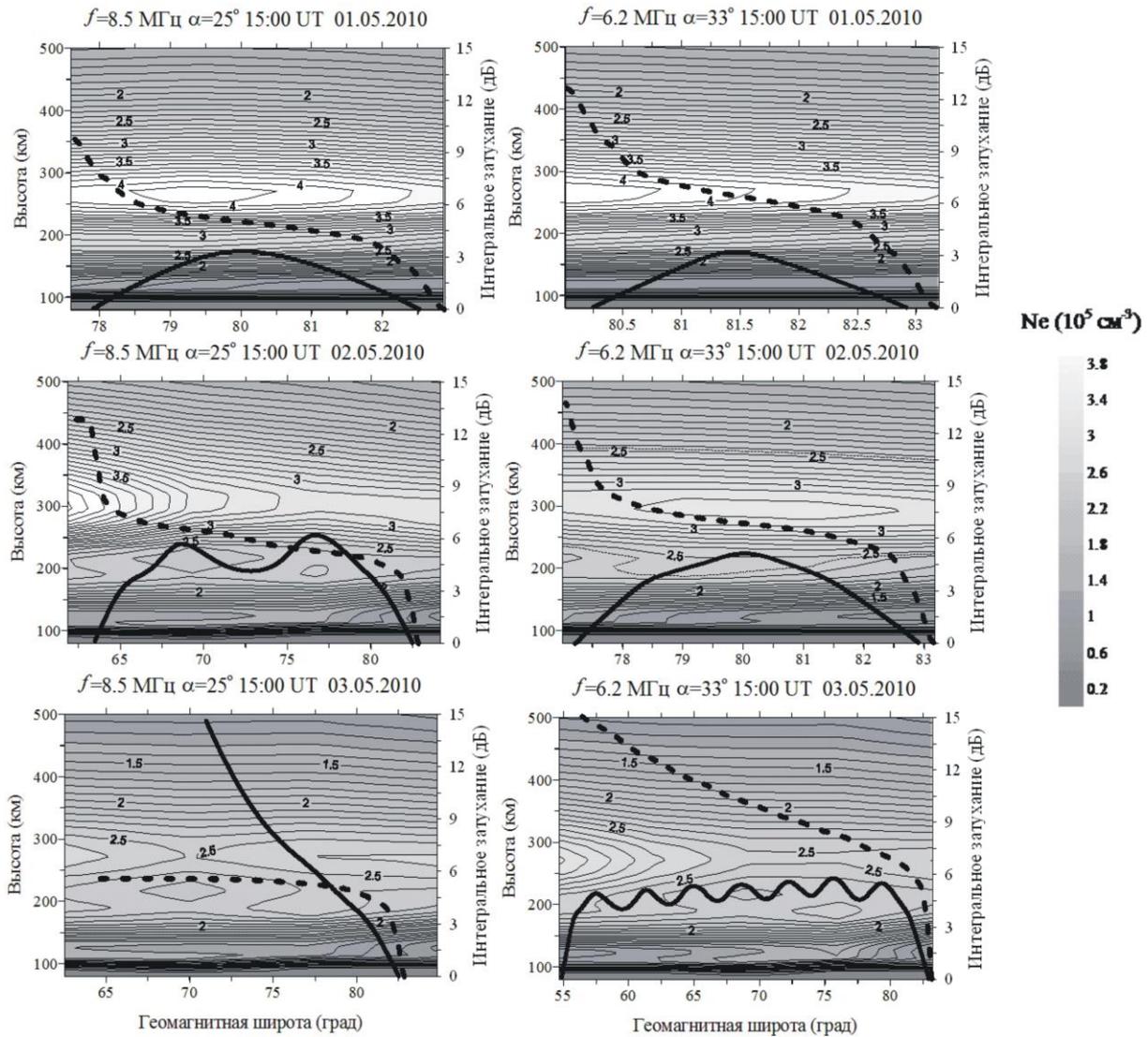


Рис. 3. КВ-радиотрассы (сплошные линии) с соответствующим интегральным затуханием (штриховые линии) для случая геомагнитной бури в мае 2010 г. на фоне изолиний электронной концентрации для частоты $f=8.5$ МГц и угла места $\alpha=25^\circ$ (слева) и частоты $f=6.2$ МГц и угла места $\alpha=33^\circ$.

Для двух выбранных частот с заданными азимутом передающей антенны $\beta=180^\circ$ и углом места α рассмотрено РРВ на фоне изолиний электронной концентрации вдоль трассы в спокойных условиях в положительную и отрицательную фазы бури. Хорошо видно влияние пространственных неоднородностей электронной плотности на характер распространения. Высокая плотность ионосферной плазмы в спокойных условиях 1 мая приводит к тому, что отражение рассматриваемых радио-волн от ионосферы к Земле происходит на небольших высотах в нижней части F2-области ионосферы (170–180 км). Понижение плотности плазмы в высоких широтах 2 мая примерно на 23 % и наличие неоднородностей в ее распределении вдоль направления распространения приводит к виду осциллирующей трассы радиоволны с $f=8.5$ МГц в области ионосферной долины между слоями F1 и F2, а для волны с $f=6.2$ МГц происходит преломление в области F1 и отражение от F2. Значительное падение плотности (примерно на 36 %) на фазе восстановления бури приводит к тому, что появляется трасса ($f=6.2$ МГц)

с наибольшей протяженностью. Область ее осцилляций находится несколько ниже (примерно на 30–40 км), чем в активную фазу бури для частоты $f=8.5$ МГц, но тоже в области долины. В свою очередь, последняя волна 3 мая проходит сквозь ионосферу, не отражаясь от нее, испытывая лишь некоторое преломление. Усиление поглощения в отклоняющей области сопровождается уменьшением вещественной части показателя преломления среды по сравнению с единицей и ростом его мнимой части. Видно, что с понижением рабочей частоты радиоволны поглощение возрастает на 3 дБ (особенно 1 мая).

Для сентябрьской бури 2011 г. были проведены модельные расчеты полулучевой структуры для волны с частотой $f=12.65$ МГц. Результаты для $\alpha=60^\circ$ представлены на рис. 4, где хорошо видны рост интегрального поглощения волны с увеличением дальности распространения, а также зависимость от неоднородной структуры среды. Поскольку вторая гипотетическая станция расположена в экваториальной области ионосферы, можно заметить влияние F3-слоя

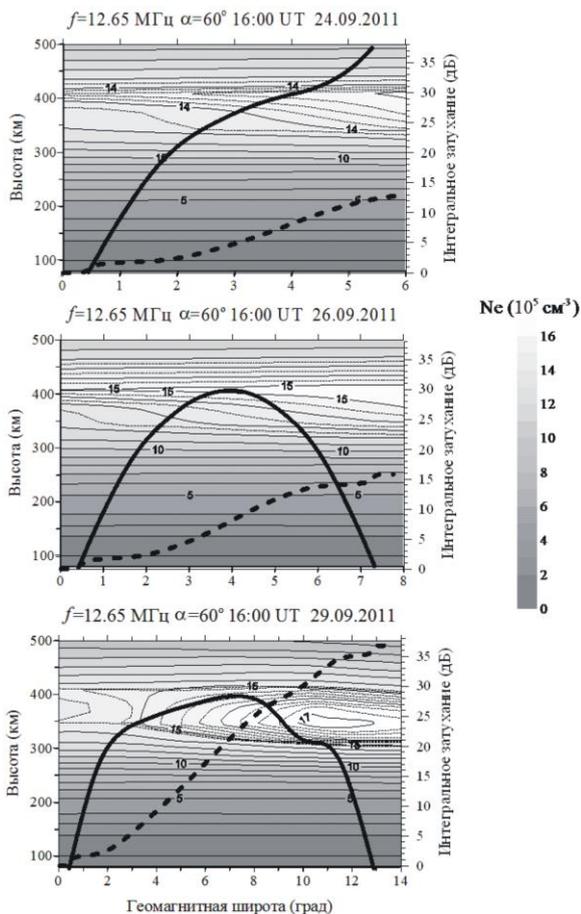


Рис. 4. КВ-радиотрассы (сплошные линии) с соответствующим интегральным затуханием (штриховые линии) для случая геомагнитной бури в сентябре 2011 г. на фоне изолиний электронной концентрации для частоты $f=12.65$ МГц и угла места $\alpha=60^\circ$.

на распространение радиоволн. В спокойных условиях преломление волны происходит на высотах верхней границы F2-слоя. В активную фазу бури значение электронной концентрации становится приблизительно на 3 % больше, чем в спокойных условиях, поэтому волна испытывает большее затухание и происходит ее отражение уже от F3-слоя. В восстановительную фазу бури электронная плотность N_e увеличивается примерно на 12 % и возникает неоднородная структура, которую огибает волна, в связи с чем увеличивается длина трассы и поглощение волны.

Заключение

Проведена серия численных экспериментов по распространению КВ-радиоволн в областях с ионосферными неоднородностями. Рассмотрены особенности формирования радиотрасс в условиях магнитных бурь 2–3 мая 2010 и 26–30 сентября 2011 г. для экваториальной и высокоширотной области ионосферы и показано, что наличие F1-слоя в высокоширотной и F3-слоя в низкоширотной ионосфере приводит к изменению характера распространения радиоволн. Результаты показывают, что происходит отражение радиоволн от неоднородностей в высотном, широтном и долготном направлениях. Также были проведены расчеты трасс необыкновенной моды волны. Согласно теории, магнитное поле Земли

влияет только на распространение обыкновенной моды, вследствие чего ее отражение происходит на больших высотах и волна глубже проникает в слой. Необыкновенная мода испытывает сильное затухание из-за циклотронного поглощения электронами. Проведенное сравнение радиотрасс КВ-диапазона для обыкновенной и необыкновенной мод радиоволны соответствует теоретическим представлениям.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант №12-05-31217 и Программы 22 РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреева Е.С., Крюковский А.С., Куницын В.Е. и др. Моделирование лучевой и каустической структуры электромагнитных полей по данным радиотомографии ионосферы в окрестности экваториальной аномалии // XXIII Всероссийская научная конференция по распространению радиоволн: Сб. докладов. 2011. Т. 3. С. 288–291.

Захаров В.Е., Черняк А.А. Численная модель распространения радиотрасс коротких радиоволн в ионосфере // Вестник РГУ им. И. Канта. Калининград: 2007. Вып. 3. С. 36–40.

Карпачев А.Т., Жбанков Г.А., Телегин В.А. Удаленные земные отражения на ионограммах ИСЗ «Интеркосмос-19», связанные с градиентами ионосферной плазмы // XXIII Всероссийская научная конференция по распространению радиоволн: Сб. докладов. 2011. Т. 1. С. 366–369.

Клименко В.В., Клименко М.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – постановка задачи и тестовые расчеты // Математическое моделирование. 2006а. Т. 18, № 3. С. 77–92.

Клименко М.В., Клименко В.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – динамо-поле и экваториальный электроджет // Геомагнетизм и аэронаука. 2006б. Т. 46, № 4. С. 485–494.

Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В. Моделирование лучевой и каустической структуры электромагнитных полей по данным радиотомографии ионосферы в окрестности экваториальной аномалии // Электромагнитные волны и электронные системы. 2010. Т. 15, № 8. С. 5–11.

Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В. и др. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // Геомагнетизм и аэронаука. 1990. Т. 30, № 4. С. 612–619.

Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., et al. Global Model of the Thermosphere–Ionosphere–Protonosphere System // Pure App. Geophys. 1988. V. 127, N 2/3. P. 219–254.

Zhbankov G.A., Karpachev A.T., Telegin V.A., Tsybulya K.G. Specific propagation of radiowaves from the Intercosmos-19 satellite in the region of the nighttime equatorial anomaly crest // Geomagnetism and Aeronomy. 2010. V. 50, N 1. P. 119–126.

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

²Западное отделение Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Калининград, Россия