

УДК 550.388.2

Д. С. Котова, М. В. Клименко, В. В. Клименко, В. Е. Захаров

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 2 – 3 МАЯ 2010 ГОДА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОВОЛН В НИЗКОШИРОТНОЙ ОБЛАСТИ

55

*Впервые при моделировании распространения радиоволн для описания неоднородной анизотропной среды используется глобальная трехмерная теоретическая модель системы термосфера-ионосфера. Показано, что результаты, полученные при совместном использовании моделей распространения радиоволн и глобальной теоретической модели системы термосфера-ионосфера (ГСМ ТИП), адекватно описывают КВ-радиотрассы в ионосфере Земли в спокойных условиях и на фазе восстановления геомагнитной бури.*

*For the first time we used a global three-dimensional theoretical model of the thermosphere-ionosphere system for the description of inhomogeneous anisotropic medium in the simulation of radio wave propagation. It is shown that the results obtained with joint using GSM TIP model and radio wave propagation model adequately describe HF radio paths in the Earth's ionosphere in quiet conditions and at the recovery phase of geomagnetic storm.*

**Ключевые слова:** распространение радиоволн, неоднородная анизотропная среда, низкоширотная ионосфера, геомагнитная буря, модель.

**Key word:** propagation of radio waves, inhomogeneous anisotropic medium, the low-latitude ionosphere, geomagnetic storm, model.

В [1] была проведена работа по совмещению модели расчета трасс радиоволн и модели среды. В качестве численной модели распространения радиоволн с разными несущими частотами использовалась модель Захарова В.Е. и др. (БФУ им. И. Канта) [2]. Параметры среды на ионосферных высотах от 80 до 1000 км, используемые для расчета показателей преломления радиоволн, впервые рассчитывались на основе глобальной теоретической модели системы термосфера-ионосфера (ГСМ ТИП), разработанной в лаборатории моделирования ионосферных процессов Западного отделения ИЗМИРАН [3; 4]. Предварительный анализ результатов представлен в [1; 5].

Целью работы является проведение сравнения радиотрасс распространяющихся волн КВ-диапазона в неоднородной анизотропной дисперсной области низкоширотной ионосферы, полученной для спокойных условий и на фазе восстановления геомагнитной бури. Новизна



определяется совместным использованием численной модели среды и модели распространения радиоволн для исследования особенностей построения радиотрасс в трехмерно-неоднородной ионосфере в период геомагнитных возмущений.

В [1] рассмотрены результаты модельных расчетов распространения радиоволн для двух гипотетических низкоширотных передающих станций в условиях геомагнитной бури. На рисунке 1 представлены результаты, полученные для первой гипотетической низкоширотной передающей станции для спокойных условий 1 мая 2010 г. (сверху). Для удобства проведения анализа рассмотрим также результаты во время возмущений (рис. 1, снизу). Слева представлены графики в декартовой геомагнитной системе координат долгота-высота, а справа — в координатах долгота-широта.

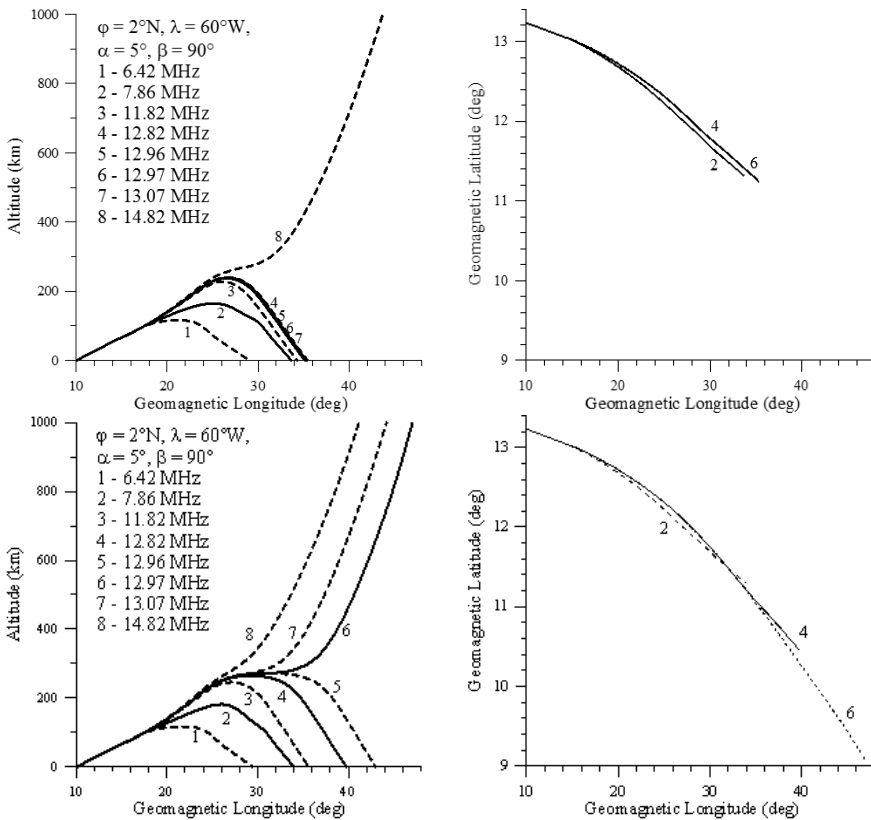


Рис. 1. Распространение радиоволн с различной частотой от первой гипотетической низкоширотной передающей станции с географическими координатами ( $\varphi, \lambda$ ), для которой  $\alpha$  и  $\beta$  — угол места и азимут излучения передающей антенны соответственно. Наверху для спокойных условий 1 мая, внизу — в отрицательную фазу бури 3 мая

Более подробно рассмотрим влияние изменившейся среды на примере распространения радиоволны с частотой 12,96 МГц (№5 на рис. 1). На рисунке 2 для наглядности лучевая траектория волны представлена



на фоне высотного распределения электронной концентрации вдоль радиотрассы. В спокойных условиях (слева) волна отражается на меньших высотах, так как значение электронной концентрации достигает больших значений. В возмущенных условиях (справа) можно видеть не только неоднородную структуру среды, но и распространение вдоль луча Педерсена на большее расстояние.

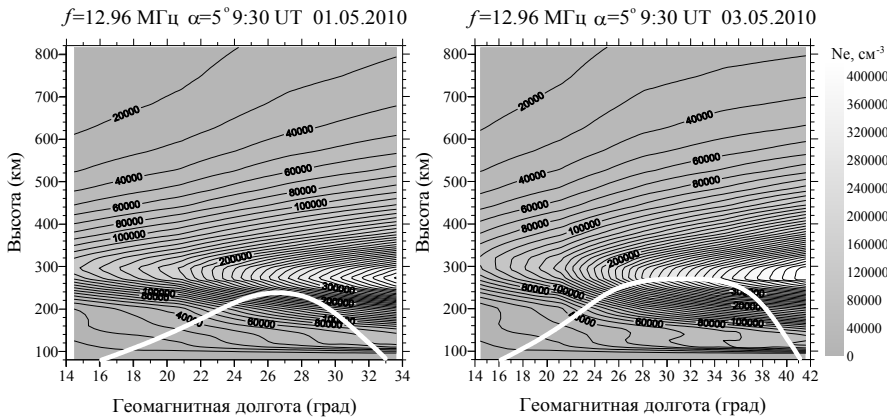


Рис. 2. Распространение радиоволны с частотой 12,96 МГц на фоне изолиний электронной концентрации. Слева для спокойных условий 1 мая 2010 г., справа для отрицательной фазы бури 3 мая 2010 г.

Для этой же частоты на рисунке 3 дано распространение волны обыкновенной (сплошная линия) и необыкновенной (пунктирная) моды во время фазы восстановления геомагнитной бури.

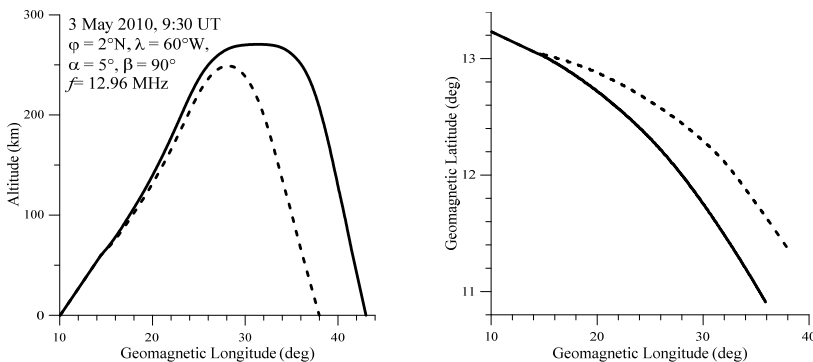


Рис. 3. Распространение радиоволны с частотой 12,96 МГц от гипотетической станции с географическими координатами  $\varphi$  и  $\lambda$  ( $\alpha$  и  $\beta$  – угол места и азимут излучения передающей антенны) для отрицательной фазы бури 3 мая 2010 г.

Из теории известно, что магнитное поле Земли влияет только на распространение обыкновенной волны, вследствие чего отражение этой моды происходит на больших высотах по сравнению с необыкновенной



венной модой, которая испытывает сильное затухание из-за циклотронного поглощения электронами.

На рисунке 4 представлены результаты модельных расчетов распространения радиоволн от второй передающей станции с углом места передающей антенны  $\alpha = 45^\circ$  для спокойных условий (сверху) и возмущенных условий (снизу). Станция находится ближе к экватору, поэтому мы можем наблюдать влияние F3-слоя на распространение радиоволн. Далее мы рассмотрим два наиболее интересных случая, представленных здесь. На рисунке 5 показана траектория волны с частотой 2,82 МГц, на рисунке 6 – 2,86 МГц на фоне высотного распределения электронной концентрации вдоль трассы в спокойных условиях (слева), где видно гораздо более сильное изменение градиента электронной концентрации с высотой, чем во время бури (справа), что отражается на распространении выбранной радиоволны, которая глубже проникает в слой. Хорошо видно, как волна в спокойных условиях (слева) отражается от F2-слоя, а во время бури (справа) – преломляется в F2-слое, отражается от F3-слоя, вновь испытывает преломление в слое F2.

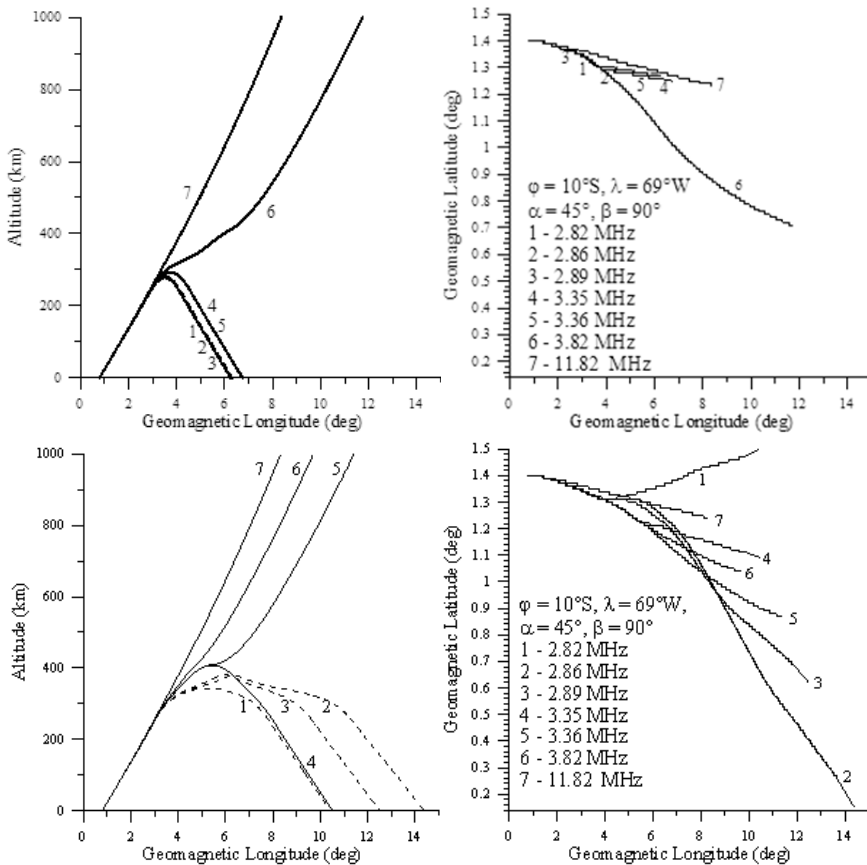


Рис. 4. То же, что и на рисунке 1 – для второй гипотетической низкоширотной передающей станции

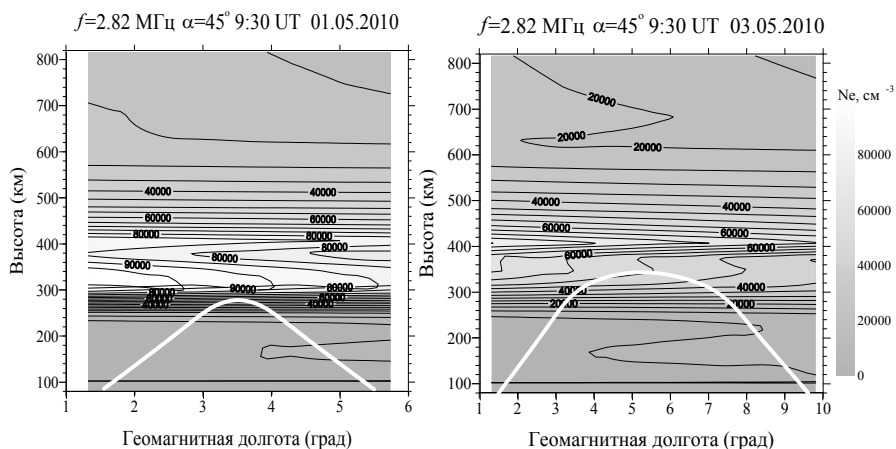


Рис. 5. То же, что и на рисунке 2 — для волны с частотой 2,82 МГц для второй гипотетической станции

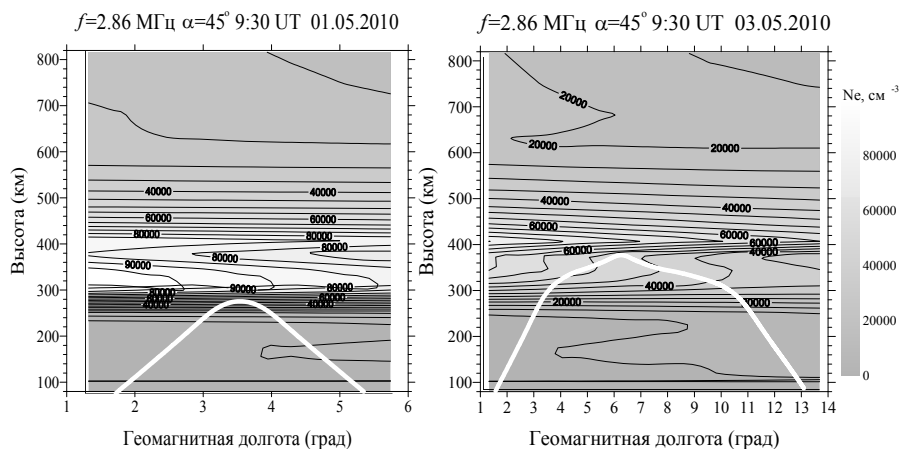


Рис. 6. То же, что и на рисунке 5 — для волны с частотой 2,86 МГц

В ходе выполнения данной работы была проведена серия численных экспериментов по распространению радиоволн в областях неоднородностей низкоширотной ионосферы. Были рассмотрены особенности формирования радиотрасс на фазе восстановления геомагнитной бури 2–3 мая 2010 г. Показано, что наличие F3-слоя в низкоширотной ионосфере приводит к изменению характера распространения радиоволн. Проведено сравнение радиотрасс КВ-диапазона для обыкновенной и необыкновенной мод радиоволны. Полученный при этом результат соответствует теоретическим представлениям. Во время отрицательной фазы ионосферной бури происходит уменьшение электронной концентрации на ~20–45% по сравнению со спокойными условиями. Это приводит к понижению максимально допустимой частоты радиоволны.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №12-05-31217, №14-05-00578 и Программы 22 РАН.



### Список литературы

1. Котова Д. С., Клименко М. В., Клименко В. В. и др. Численное моделирование распространения радиоволн в приэкваториальной области ионосферы во время геомагнитной бури 1–3 мая 2010 г. // Распространение радиоволн: сб. науч. тр. СПб., 2012. С. 72–75.

2. Захаров В. Е., Черняк А. А. Численная модель распространения радиотрасс коротких радиоволн в ионосфере // Вестник Российский государственный университет им. И. Канта. 2007. Вып. 3. С. 36–40.

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

4. 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 аэронавигация. 2006. Т. 46, №4. С. 485–494.

5. Носиков И. А., Клименко М. В., Клименко В. В. и др. Поведение F3 слоя над станцией Jсаматса в период геомагнитной бури в сентябре 2011 г. и его влияние на распространение радиоволн КВ-диапазона // Сб. тез. докладов XVI Всероссийской научной конференции студентов-радиофизиков. СПб. 2012. С. 70–73.

### Об авторах

Дарья Сергеевна Котова – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: Darshu@yandex.ru

Максим Владимирович Клименко – канд. физ.-мат. наук, науч. сотр. ЗО ИЗМИРАН, Калининград.

E-mail: maksim.klimenko@mail.ru

Владимир Викторович Клименко – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. ЗО ИЗМИРАН, Калининград.

E-mail: vvk\_48@mail.ru

Вениамин Ефимович Захаров – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: vezakharov@kantiana.ru

### About the authors

Daria Kotova – PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: Darshu@yandex.ru

Maxim Klimenko – PhD, Research Fellow W. O. IZMIRAN, Kaliningrad.

E-mail: maksim.klimenko@mail.ru

Vladimir Klimenko – PhD, Senior Research Fellow W. O. IZMIRAN, Kaliningrad.

E-mail: vvk\_48@mail.ru

Veniamin Zakharov – Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: vezakharov@kantiana.ru