

Изменение характеристик радиотрасс при наклонном зондировании высокоширотной ионосферы во время геомагнитных бурь

КОТОВА Д. С.^{1,2}, КЛИМЕНКО М. В.^{1,2}, КЛИМЕНКО В. В.¹, ЗАХАРОВ В. Е.²

¹ Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
г. Калининград, Россия

² Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта
г. Калининград, Россия

e-mail: darshu@ya.ru maksim.klimenko@mail.ru vvk_48@mail.ru vezakharov@kantiana.ru

Введение

За последние десятилетия достигнуты успехи в развитии спутниковой, радиорелейной и сотовой связи. Несмотря на это роль коротковолновой связи остается существенной как для радиосвязи, так и в вопросах исследования ионосферы. Многие отечественные и зарубежные авторы занимались вопросом моделирования распространения коротких волн в ионосфере, однако до сих пор остается актуальным исследование влияния геомагнитных бурь на особенности распространения коротких волн в ионосфере. Цель данной работы – показать посредством численного моделирования влияние геомагнитной бури на характеристики высокоширотной трассы.

Постановка задачи

Для достижения цели исследования использовался комплекс прикладных программ, включающий численный алгоритм проведения вычислительных экспериментов по моделям среды (эмпирическим, ассимиляционным и теоретическим) и распространения радиоволн, который был дополнен блоком для нахождения трасс между фиксированными точками на поверхности Земли. В приближении слабонеоднородной среды для описания коротких волн применимо приближение геометрической оптики [1]. Используемая численная модель распространения коротких волн [2] построена в этом приближении. Показатели преломления для обыкновенной и необыкновенной волн выводятся из дисперсионного соотношения для анизотропной плазмы ионосферы [3]. Для расчета комплексных показателей преломления требуются знание параметров ионосферы и нейтральной атмосферы. В данном исследовании искомые параметры на высотах от 80 км рассчитывались по Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП, КФ ИЗМИРАН) [4]. Нами использовались результаты модельных расчетов отклика ионосферы по ГСМ ТИП на последовательность геомагнитных бурь в период с 26 по 29 сентября 2011 г. Максимальное значение трехчасового K_p индекса геомагнитной активности в рассматриваемый период не превышало 6. В работе [5] представлено сравнение результатов модельных расчетов с данными наблюдений для данного события, которое показало, что модель ГСМ ТИП можно использовать в качестве среды при решении задач распространения радиоволн в ионосфере во время геомагнитных бурь.

В качестве высокоширотной трассы рассматривается реально существующая трасса по наклонному зондированию ионосферы Lovozero – Salekhard [6]. В таблице 1 приведены координаты рассматриваемых станций. Момент мирового времени 16:00 UT. В качестве спокойных условий выбран магнитоспокойный день 24 сентября. Главная фаза бури наблюдалась 26 сентября, 29 сентября была фаза восстановления.

Таблица 1. Координаты станций

Code	Name	Lat	Long	GMLat	GMLong
LOZ	Lovozero	68.00	35.02	62.9	127.4
SAH	Salekhard	66.52	66.67	57.4	149.4

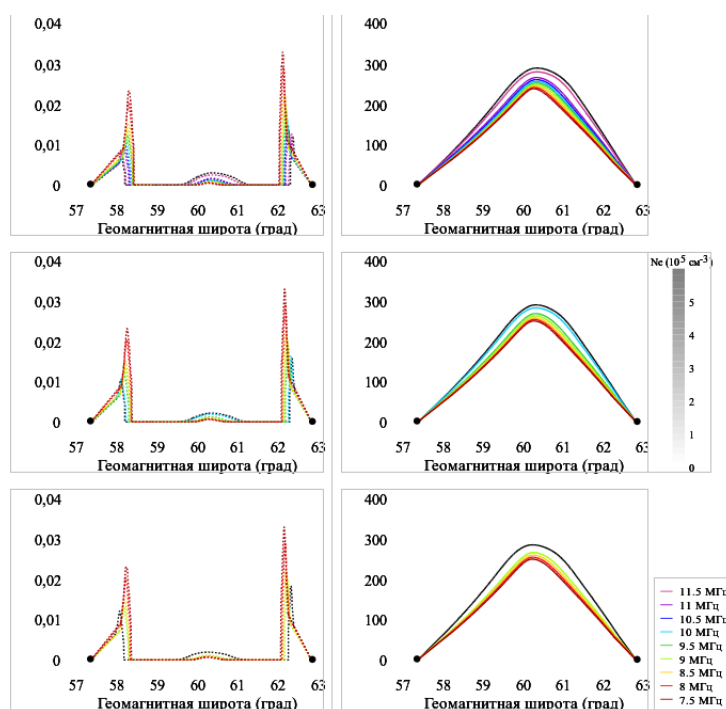


Рис. 1. Трассовый расчет (справа) на фоне изолиний электронной концентрации (шкала справа) между двумя высокоширотными станциями, а также поведение дифференциального затухания (слева) при изменении частоты волны. Вверху для спокойных условий, посередине – для главной и снизу – для восстановительной фазы бури. Цветом показаны различные частоты излучения от 7.5 МГц до 11.5 МГц, черным цветом для трех рассматриваемых дней показана МПЧ.

Результаты численных экспериментов

При изменении угла места, азимута и частоты излучения были получены результаты, представленные на рис.1. На рисунках справа показаны проекции лучевых траекторий для набора частот на фоне изолиний электронной концентрации в координатах геомагнитная широта-высота. Хорошо видно, что во время бури наблюдается падение электронной концентрации в рассматриваемой области распространения. Это приводит к падению максимально применимой частоты (МПЧ) с 11.7 МГц в спокойный условиях до 10.2 МГц в главную фазу и до 9.4 МГц в восстановительную фазу бури. Рисунок 2 позволяет заключить, что во время бури в среднем на 10 км увеличивается высота отражения, волны на тех же частотах глубже проникают в слой из-за уменьшения градиента электронной концентрации. Это в свою очередь приводит к увеличению длины оптического пути рассматриваемых односкачковых трасс. В восстановительную фазу бури из-за дальнейшего уменьшения электронной плотности с приближением к МПЧ растет высота отражения и длина оптического пути в сравнении с результатами во время главной фазы бури.

На рис. 1 также представлено поведение дифференциального затухания в течение

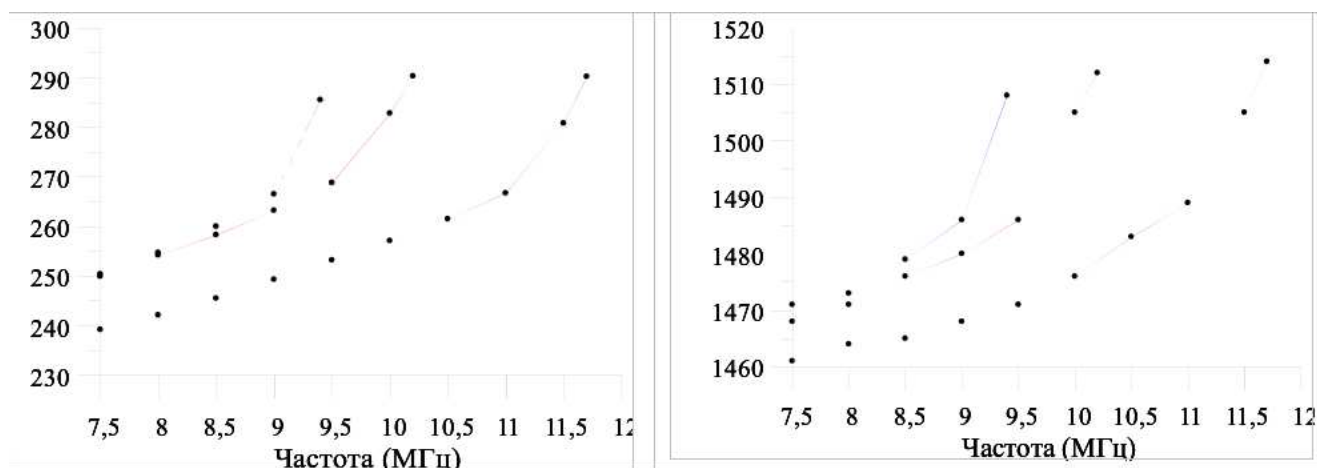


Рис. 2. Зависимость высоты отражения (слева) и длины оптического пути (справа) от частоты для спокойных условий (линия зеленого цвета) и главной (красного цвета) и восстановительной (синего цвета) фазы бури.

трех рассматриваемых дней для того же набора частот. В спокойных условиях затухание несколько больше, чем во время бури. В целом изменения не значительны, интегральное затухание достигает относительно малых максимальных значений в 2.5 дБ, и рассматриваемая трасса удобна для радиосвязи. Хорошо видна зависимость значения интегрального затухания от частоты и от распространения волны в слое с изменением градиента электронной концентрации: чем меньше частота, тем сильнее поглощается волна при распространении в неотклоняющей области [3], и чем ближе частота волны к МПЧ, тем сильнее поглощение в отклоняющей области. Для МПЧ (черная линия) получаем максимальный рост в области точки поворота.

Заключение

Использование динамической модели ГСМ ТИП позволило учесть изменение среды при переходе от спокойных условий к возмущенным во время геомагнитной бури. Это позволило провести исследование влияния геомагнитной бури 26-29 сентября 2011 г на характеристики реально существующей высокоширотной радиотрассы Lovozero – Salekhard. Показано, что произошло падение МПЧ с 11.7 МГц в спокойных условиях, до 9.4 МГц на фазе восстановления бури. Также в результатах модельных расчетов во время бури наблюдается рост высоты отражения и длины оптического пути по сравнению со спокойными условиями. В поведении дифференциального затухания не отмечено особых изменений. Это связано с тем, что в рассматриваемой области максимальные эффекты бури наблюдались на высотах F области ионосферы. D и E слои практически не изменились. На сайте [6] регулярно выкладываются наклонные ионограммы для рассматриваемой трассы в режиме реального времени. Однако мы не располагаем данными, чтобы провести сравнение наших результатов модельных расчетов с наблюдениями за рассматриваемый период.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00590 мол_а, гранта РФФИ №14-05-00578. Работа проводилась в рамках проекта "Физические механизмы формирования реакции верхней атмосферы и ионосферы на процессы в нижней атмосфере и на поверхности Земли" (Государственное задание Министерства образования и науки РФ, конкурсная часть, задание № 3.1127.2014/К).

Литература

1. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. — Москва: Наука, 1980. 304 с.

2. Захаров В.Е., Черняк А.А. Численная модель расчета радиотрасс коротких радиоволн в ионосфере // Вестник РГУ им. И. Канта. — 2007. — Вып. 3. — С. 36–40.
3. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. — Москва: Наука, 1988. 528 с.
4. Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V. et al. Global Model of the Thermosphere–Ionosphere–Protonosphere System // Ionospheric Modelling. — Birkhäuser Basel, 1988. — Т. 55. — № 6. — С. 769–789.
5. Клименко М.В., Клименко В.В., Бессараб Ф.С., Ратовский К.Г., Носиков И.А., Захаренкова И.Е., Степанов А.Е., Котова Д.С. Влияние геомагнитных бурь 26-30 сентября 2011 года на ионосферу и распространение КВ радиоволн. I – ионосферные эффекты // Геомагнетизм и Аэронавигация – 2015. — V. 127. — No 2/3. — P. 219–254.
6. Department of Geophysics. Ionograms. — URL <http://geophys.aari.ru/ionograms.html> (дата обращения: 06.05.2016)