

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВЫСОКОШИРОТНЫЕ КВ ТРАССЫ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ

Д.С. Котова^{1,2}, М.В. Клименко^{1,2}, В.В. Клименко¹, В.Е. Захаров²

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

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

e-mails: darshu@yandex.ru, maksim.klimenko@mail.ru, vvk_48@mail.ru, vezakharov@kantiana.ru

Аннотация. Ранее был описан комплекс прикладных программ вместе с численным алгоритмом проведения вычислительных экспериментов с использованием моделей среды и распространения радиоволн. С помощью этого комплекса проведен анализ поведения угла между векторами импульса и индукции геомагнитного поля в зависимости от выбора частоты и положения передатчика, направления излучения и геофизических условий. Показано, что наибольшая скорость уменьшения этого угла достигается в окрестности точки поворота траектории.

Введение

Для данного исследования использовался комплекс прикладных программ и численный алгоритм проведения вычислительных экспериментов с использованием моделей среды и распространения радиоволн. Этот разработанный ранее комплекс использовался нами для изучения влияния геомагнитных бурь на лучевые траектории и поглощение коротких радиоволн (Котова и др., 2014, 2015; Kotova et al., 2015). Для описания распространения коротких радиоволн в ионосфере широко применяется приближение геометрической оптики (Кравцов и Орлов, 1980). При этом среда распространения считается слабо неоднородной и поглощающей. В исследованиях, результаты которых представлены в настоящей работе, среда задавалась на основе Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП, КФ ИЗМИРАН) (Namgaladze et al., 1988; Клименко и др., 2006). Использование динамической модели ГСМ ТИП позволило учесть изменение среды при переходе от спокойных условий к возмущенным во время геомагнитной бури. Используемая при этом численная модель распространения коротких радиоволн в ионосфере (Захаров и Черняк, 2007) позволяет на каждом шаге вдоль рассчитываемой лучевой траектории оценить не только поглощение, но и изменения углов между лучевым вектором \mathbf{s} и вектором импульса \mathbf{p} , а также между вектором импульса \mathbf{p} и внешним геомагнитным полем \mathbf{V} . В данной работе приведены результаты анализа поведения этих углов в зависимости от положения передатчика, направления излучения, геофизических условий и выбора частоты.

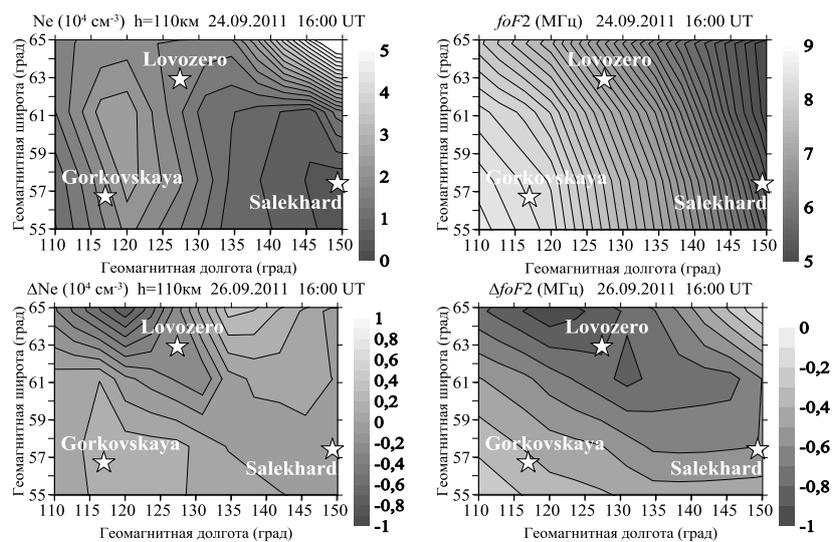


Рисунок 1. Карты изолиний электронной концентрации на высоте 110 км (слева) и критической частоты F2 слоя (справа) в спокойных условиях (вверху) и возмущений этих параметров (внизу) 26 сентября 2011 г

Использование динамической модели ГСМ ТИП позволило учесть изменение среды при переходе от спокойных условий к возмущенным во время геомагнитной бури. Используемая при этом численная модель распространения коротких радиоволн в ионосфере (Захаров и Черняк, 2007) позволяет на каждом шаге вдоль рассчитываемой лучевой траектории оценить не только поглощение, но и изменения углов между лучевым вектором \mathbf{s} и вектором импульса \mathbf{p} , а также между вектором импульса \mathbf{p} и внешним геомагнитным полем \mathbf{V} . В данной работе приведены результаты анализа поведения этих углов в зависимости от положения передатчика, направления излучения, геофизических условий и выбора частоты.

Постановка задачи

Зависимость между направлением распространения радиоволны и геомагнитным полем входит в дисперсионные соотношения для двух нормальных волновых мод (Брюнелли и Намгаладзе, 1988), а также в формулу Эпплтона-Хартри. Угол ζ между векторами \mathbf{p} и \mathbf{s} можно найти из соотношения

$\cos \zeta = \frac{P}{s} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\partial n / \partial p)^2}}$ (Кравцов и Орлов, 1980). В качестве спокойных условий был выбран

магнитоспокойный день 24 сентября 2011 г., а в качестве возмущенных условий – главная фаза геомагнитной бури 26 сентября 2011 г. в 16:00 UT. Для выбранных периодов времени было получено качественное и количественное согласие результатов модельных расчетов основных параметров ионосферы с данными наблюдений в высоких широтах (Клименко и др., 2015). Для проведения данного исследования мы выбрали три высокоширотные станции: Горьковскую ($\varphi = 60.27^\circ$ с. ш., $\lambda = 29.38^\circ$ в. д.), Ловозеро ($\varphi = 68.00^\circ$ с. ш., $\lambda = 35.02^\circ$ в. д.) и Салехард ($\varphi = 66.52^\circ$ с. ш., $\lambda = 66.67^\circ$ в. д.), где φ и λ — географические широта и долгота соответственно.

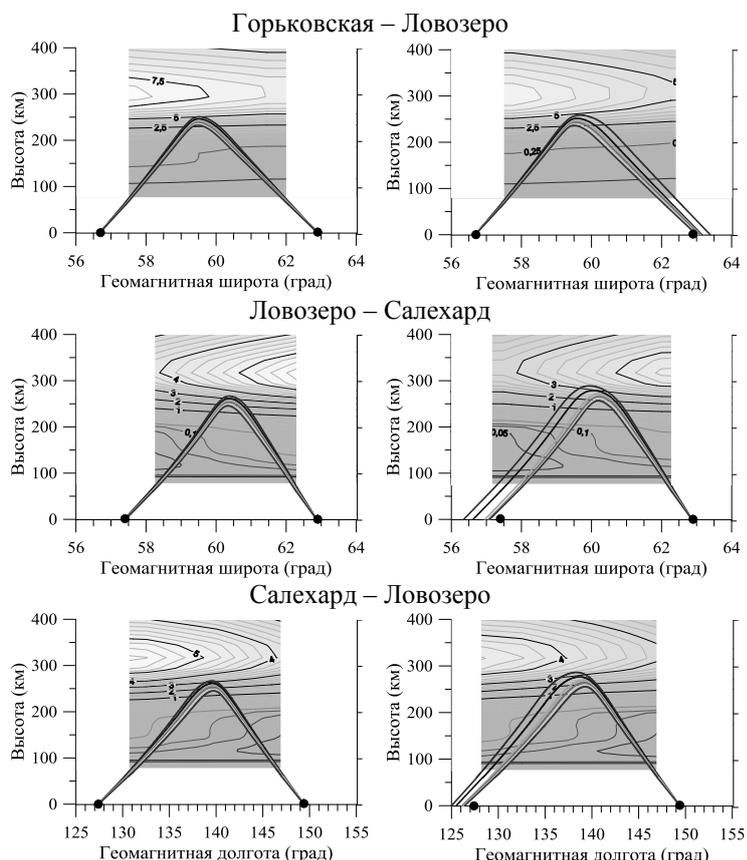


Рисунок 2. Лучевые траектории радиоволн с различными частотами на фоне изолиний электронной концентрации в координатах геомагнитная широта-высота (вверху и посередине) и геомагнитная долгота-высота (внизу). Слева показаны спокойные условия, справа – главная фаза бури. Расчеты для возмущенных условий были проведены с теми же углами места и азимута, что и для спокойных условий.

причем это отличие зависит от выбора станции излучения, что связано с изменениями среды (рис. 1). Рост высоты отражения во время бури по сравнению со спокойными условиями связан с подъемом $F2$ слоя и уменьшением его концентрации.

На рис. 4 показаны результаты расчетов изменения углов между векторами \mathbf{s} и \mathbf{p} , \mathbf{p} и \mathbf{V} в зависимости от частоты излучения передатчика (минимальная частота f 8.5 МГц, максимальная – 11 МГц) и условий распространения. Из этого рисунка видно усиление неоднородности радиоволны, которая проявляется в нарастании различия между направлением лучевого вектора и направлением вектора импульса по мере распространения радиоволны вглубь ионосферы, говорящем о том, что в каждой точке направление распространения фазы и направление распространения энергии в волне различаются. Это усиление неоднородности радиоволны наблюдается при ее распространении в областях неотклоняющего и отклоняющего поглощений за счет увеличения угла ζ по мере погружения волны в E и $F2$ слои ионосферы. Напротив, при попадании радиоволны в окрестность точки поворота происходит резкое ослабление неоднородности волны (угол ζ падает до 0°), после чего опять следует рост неоднородности. Причем, для

Рассматривались три направления излучения между станциями Горьковская – Ловозеро; Ловозеро – Салехард и Салехард – Ловозеро. На рис. 1 в геомагнитных координатах долгота-широта показаны абсолютные значения электронной концентрации на высоте 110 км и критической частоты слоя $F2$, а также возмущения этих параметров в главную фазу геомагнитной бури в выбранной области распространения радиоволн. Видно, что во время бури во всей рассматриваемой области наблюдается отрицательный эффект – падение электронной концентрации.

Результаты траекторных расчетов

На рис. 2 показаны лучевые траектории радиоволн с частотами от 8.5 МГц до 11 МГц с шагом 0.5 МГц, полученные для спокойных условий методом пристрелки. Для возмущенных условий показаны лучевые траектории радиоволн с теми же частотами и для тех же углов излучения, что и в спокойных условиях. Из этого рисунка хорошо видно падений электронной концентрации в $F2$ слое ионосферы во время геомагнитной бури, которое приводит к росту высоты отражения и увеличению длины односкачковой трассы, что хорошо согласуется с результатами расчетов, представленными на рис. 3. Для станций Ловозеро и Салехард можно отметить, что длина оптического пути, полученная для возмущенных условий, отличается от полученной в спокойных условиях,

радиоволны с меньшей частотой этот эффект проявляется сильнее, как и в случае с затуханием, когда радиоволна с меньшей частотой поглощается сильнее. Проведя анализ изменения среды, можно увязать резки роста угла ζ с распространением в областях, с растущей электронной концентрацией. Это хорошо видно из рис. 1, где трасса между станциями Горьковская – Ловозеро проходит в среде с большими значениями критической частоты $foF2$, а значит и N_e , чем на трассе Ловозеро – Салехард. Поэтому угол ζ в первом случае достигает максимального значения 7° , а во втором – 4° .

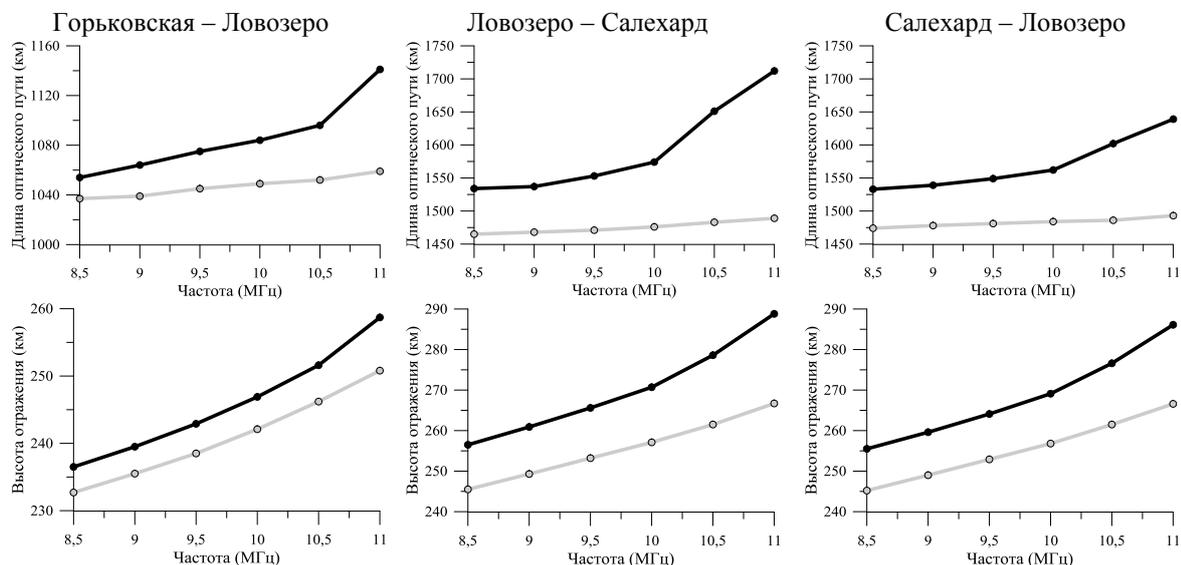


Рисунок 3. Зависимость длины оптического пути и высоты отражения односкачковых трасс от частоты излучения. Серым цветом показаны результаты расчетов для спокойных условий, черным – в главную фазу бури.

Можно также отметить, что наибольшая скорость падения угла θ между вектором импульса и геомагнитным полем достигается в окрестности точки поворота траектории. Причем, чем больше радиус кривизны в окрестности точки поворота лучевой траектории, что имеет место во время геомагнитной бури, тем меньше эта скорость. В спокойных условиях изменение угла $\theta = \mathbf{p} \wedge \mathbf{V}$ в окрестности точки поворота происходит более резко. Для трех выбранных направлений излучения угол θ в окрестности точки поворота изменяется от 40° до 65° , причем, большей частоте радиоволны соответствует большее изменение этого угла. После прохождения окрестности точки поворота траектории наблюдается незначительный рост угла θ . Все рассмотренные зависимости в равной степени отражаются и в поведении луча: чем сильнее изменяются углы ζ и θ в главную фазу бури, тем сильнее лучевая траектория отличается от полученной в спокойных условиях по таким характеристикам, как высота отражения и длина оптического пути.

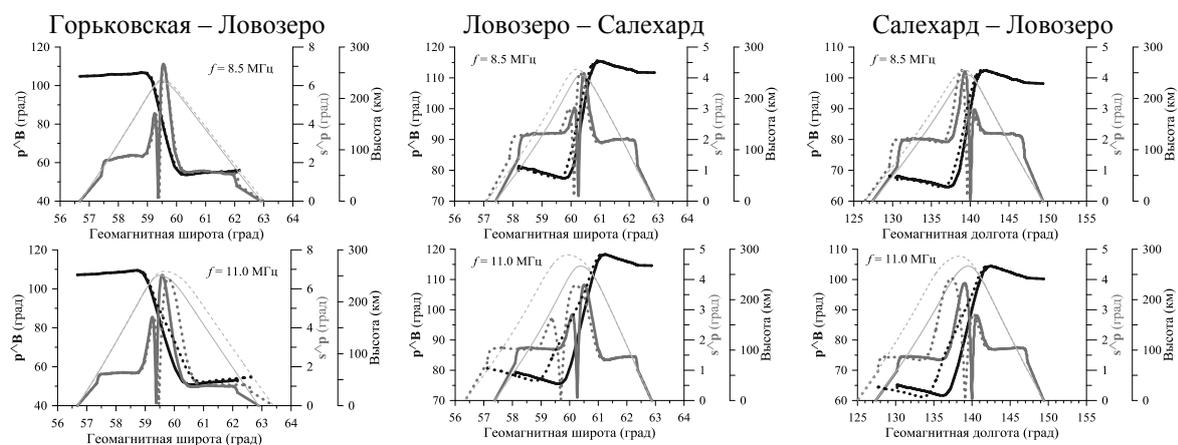


Рисунок 4. Поведение угла $\theta = \mathbf{p} \wedge \mathbf{V}$ между векторами импульса и индукции геомагнитного поля (черные кривые, ось ординат слева) и угла $\zeta = \mathbf{s} \wedge \mathbf{p}$ между лучевым вектором и вектором импульса (серые кривые, ось ординат справа) вдоль лучевой траектории (тонкие светло-серые кривые, вспомогательная ось ординат справа) в спокойных условиях (сплошные кривые) и во время бури (пунктирные кривые).

Заключение

Проведено исследование поведения углов между векторами импульса и индукции геомагнитного поля и между лучевым вектором и вектором импульса как в спокойных условиях, так и в главную фазу геомагнитной бури. Показано, что в областях отклоняющего и неотклоняющего поглощений при погружении радиоволны вглубь ионосферы происходит усиление неоднородности волны. При попадании в окрестность точки поворота происходит резкое ослабление неоднородности радиоволны, отраженных к Земле. Затем опять наблюдается рост неоднородности волны при ее распространении в среде с увеличивающейся электронной концентрацией. Причем, чем меньше частота радиоволны, тем сильнее проявляется ее неоднородность.

В окрестности точки поворота происходит максимальное уменьшение угла между направлением распространения волны и геомагнитным полем. В спокойных условиях скорость этого уменьшения больше, чем в главную фазу бури, что связано с большим радиусом кривизны в окрестности точки поворота траектории во время бури. Чем выше частота, тем значительнее уменьшение этого угла в окрестности точки поворота.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00590 мол_а и 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

- Брюнелли Б.Е., Намгалдзе А.А. (1988). Физика ионосферы. М.: Наука, 528 с.
- Захаров В.Е., Черняк А.А. (2007). Численная модель распространения радиотрасс коротких радиоволн в ионосфере, Вестник РГУ им. И. Канта, Калининград, Вып. 3, 36–40.
- Клименко М.В. и др. (2006). Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – Динамо поле и экваториальный электроджет, Геомагнетизм и аэрномия, **46**(4), 485–494.
- Клименко М.В. и др. (2015). Влияние геомагнитных бурь 26-30 сентября 2011 года на ионосферу и распространение КВ радиоволн. I – ионосферные эффекты, Геомагнетизм и Аэрномия, **55**(6), 769-789.
- Котова Д.С. и др. (2015). Развитие модели распространения коротких радиоволн в ионосфере, Химическая физика, **34**(12), 62-71.
- Котова Д.С. и др. (2014). Численное моделирование влияния геомагнитной бури 2-3 мая 2010 года на распространение коротких радиоволн в ионосфере, Известия вузов. Радиофизика, **57**(7), 519–530.
- Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. (1980). Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 304 с.
- Kotova D.S. et al. (2015). Using IRI and GSM TIP model results as environment for HF radio wave propagation model during geomagnetic storms on September 26-29, 2011, Advances in Space Research, **56**, 2012–2029.
- Namgaladze A.A. et al. (1988). Global Model of the Thermosphere–Ionosphere–Protonosphere System, PAGEOPH, **127**(2/3), 219–254.