

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КВ-РАДИОВОЛН  
В ПЕРИОД ВНЕЗАПНОГО СТРАТОСФЕРНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ  
В ЯНВАРЕ 2009 г. И ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 26 СЕНТЯБРЯ 2011 г.**

<sup>1,2</sup>Д.С. Котова, <sup>2</sup>М.В. Клименко, <sup>2</sup>В.В. Клименко, <sup>1</sup>В.Е. Захаров, <sup>2</sup>Ю.Н. Кореньков, <sup>2</sup>Ф.С. Бессараб

**MATHEMATICAL MODELING OF HF RADIO WAVE PROPAGATION DURING JANUARY 2009  
SUDDEN STRATOSPHERIC WARMING  
AND 26 SEPTEMBER 2011 GEOMAGNETIC STORM**

<sup>1,2</sup>D.S. Kotova, <sup>2</sup>M.V. Klimenko, <sup>2</sup>V.V. Klimenko, <sup>1</sup>V.E. Zakharov, <sup>2</sup>Yu.N. Korenkov, <sup>2</sup>F.S. Bessarab

Представлены результаты совместного использования двух моделей: 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 сильного внезапного стратосферного потепления (ВСП), наблюдавшегося 23–27 января 2009, и геомагнитной бури 26–29 сентября 2011. Рассматривается трехмерное распространение в экваториальной, среднеширотной и высокоширотной областях ионосферы. Проводится исследование поведения интегрального и дифференциального затуханий вдоль лучевых траекторий.

We present the results obtained by joint using of two models: 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 a strong sudden stratospheric warming (SSW), which took place on January 23–27, 2009 and geomagnetic storms on 26–29 September 2011. We consider the three-dimensional propagation in the equatorial, mid- and high-latitude regions of the ionosphere. We study of integral and differential attenuation along the ray paths.

**Введение**

На заре ракетных измерений было показано, что стратосферные потепления не ограничиваются стратосферой, а влияют и на верхние слои атмосферы. Недостаток экспериментальных данных затрудняет исследование основных физических процессов взаимосвязи ВСП и изменчивости ионосферы, исследование которой имеет огромное значение для решения прикладной задачи распространения радиоволн (РРВ) в ионосфере [Клименко и др., 2014]. Для исследования было выбрано сильное ВСП, наблюдавшееся 23–27 января 2009 и геомагнитная буря 26–29 сентября 2011. Эти периоды характеризовались низкой солнечной (F10.7~70–100) активностью. Пик потепления приходился на 23–24 января (рис. 1). Исследование влияния извинившейся среды на распространение коротких радиоволн стало возможным благодаря развитию модели по расчету радиотрасс [Захаров и Черняк, 2007] путем замены описания модели среды [Котова и др., 2014в]. Ранее модель ГСМ ТИП [Намгаладзе и др., 1990] успешно применялась для задач РРВ в период геомагнитных бурь [Котова и др., 2013, 2014а,б,в]. В данной работе мы изучим влияние ВСП и геомагнитной бури сентября 2011 г. на распространение радиоволн и их поглощение в сравнении со спокойными условиями.

Результаты модельных расчетов и обсуждение Экспериментальному и модельному исследованию ВСП 2009 г. посвящено много работ. Попытки моделирования эффектов ВСП в ионосфере неоднократно предпринимались различными исследователями

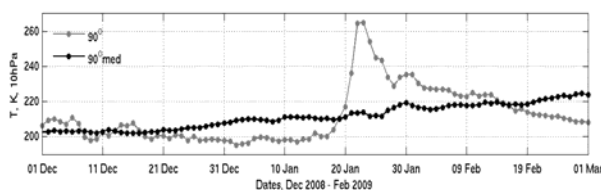


Рис. 1. Стратосферная нейтральная температура (10 гПа) в январе 2009. Черными кружками отмечены медианные значения.

[Fuller-Rowell et al., 2011; Liu et al., 2010] с использованием трехмерных глобальных моделей атмосферы и ионосферы. Тем не менее, несмотря на существующий прогресс модельных разработок, имеются разногласия между модельными расчетами и наблюдениями отклика верхней атмосферы на ВСП из-за пространственных и временных ограничений моделей и пренебрежения нелинейным взаимодействием между стационарными планетарными волнами, атмосферными приливами и гравитационными волнами. В модели ГСМ ТИП при задании дополнительного электрического потенциала удалось получить возмущения ТЕС качественно и количественно более близкие к наблюдениям [Клименко и др., 2014]. Полученная таким образом среда использовалась далее для распространения коротких радиоволн. На рис. 2 представлено распределение электронной концентрации для 15 января 2009 г. (невозмущенные условия) и для 25 января 2009 г. (отклик на ВСП).

На рис. 3 представлены результаты модельных расчетов от гипотетической низкоширотной передающей станции с географическими координатами  $\phi$  и  $\lambda$ . Излучение обыкновенной моды волны происходит в двух направлениях – на север и на юг. Верхний ряд в сочетании с нижним – отражает трехмерный характер распространения. Рисунок построен в геомагнитной декартовой системе координат долгота-широта. Во время потепления (в сравнении со спокойными условиями) траектории радиоволн изменили направления по долготе. Траекториям с различными частотами и углами места излучения для 15 числа соответствуют аналогично полученные 25 числа. Видно, что количество проходящих через ионосферу лучей стало больше. Увеличилась дальность распространения радиоволн и высота отражения, наблюдается преломление в слое F1 и отражение от слоя F2. Т. к. для радиосвязи важны только приходящие лучи, можно сделать вывод, что в период ВСП условия радиоприема ухудшаются.

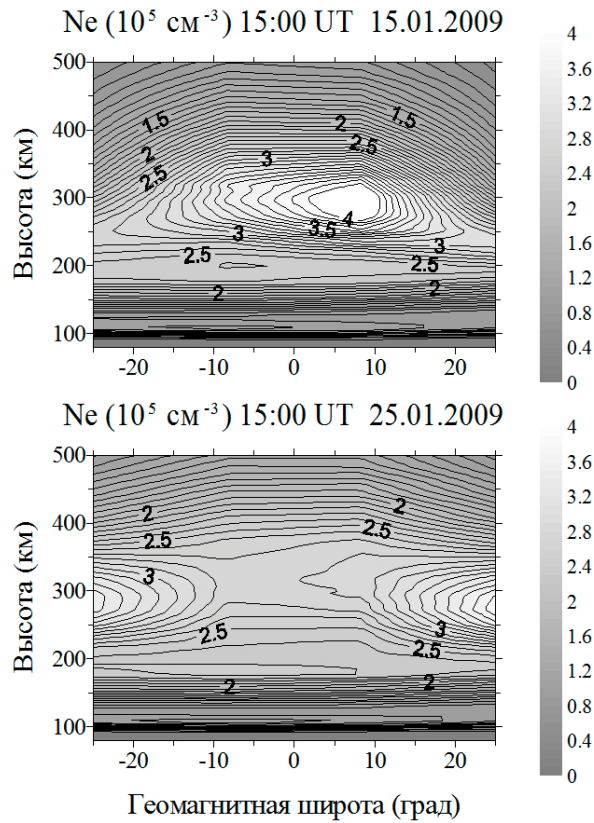


Рис. 2. Широтно-высотный разрез электронной плотности в экваториальной ионосфере для двух выбранных дней. Геомагнитная долгота  $\Lambda=0^\circ$ .

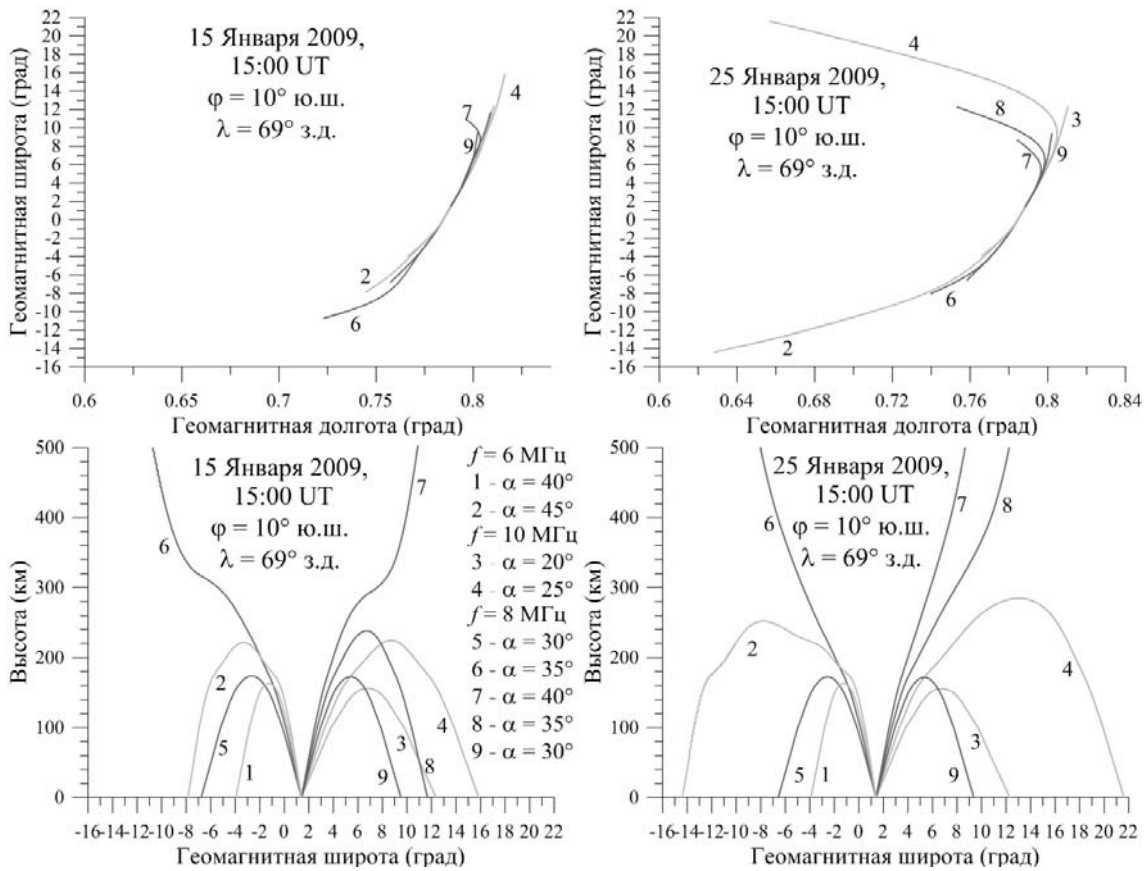


Рис. 3. Распространение радиоволн с различной частотой от гипотетической низкоширотной передающей станции с географическими координатами  $(\varphi, \lambda)$ , для которой  $\alpha$  – угол места излучения передающей антенны. Внизу представлены графики в декартовой геомагнитной системе координат долгота-высота, вверху – в координатах долгота-широта.

Для сентябрьской бури 2011 г. были проведены модельные расчеты полулучевой структуры для волны с частотой  $f=13.5$  МГц при изменении угла места передающей антенны ( $\alpha$ ) от  $10^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом  $5^\circ$  (рис. 4). Дополнительные пунктирные и штриховые линии серого цвета в спокойных условиях и в восстановительную фазу бури оставлены для иллюстрации динамики траекторий радиоволн в зависимости от малого изменения угла места передающей антенны.

### Заключение

При совместном использовании моделей ГСМ ТИП и распространения радиоволн были проведены численные эксперименты по исследованию влияния геомагнитных бурь и ВСП на распространение КВ радиоволн. Изменение среды в главную и восстановительную фазы бури в сравнении со спокойными условиями сказывается на РРВ: уменьшается число проходящих через ионосферу лучей, сокращается мертвая зона, возможно образование лучей Педерсена, увеличение дальности односкачковой траектории. В период ВСП произошло падение электронной концентрации в северном гребне экваториальной аномалии, что сказалось в увеличении уходящих в ионосферу радиоволн. Как следствие – ухудшение условий радиоприема. Наблюдалось незначительное усиление затухания (на 5 %) во время ВСП, которое, прежде всего, связано с изменением нейтральной термосферы во время потепления. Исследовано затухание радиоволн, которое имеет следующие особенности: наиболее сильно радиоволны затухают в Е области; несмотря на уменьшение электронной концентрации во время рассматриваемых событий, рост поглощения наблюдается из-за увеличения дальности распространения радиоволн; с понижением рабочей частоты поглощение растет. Полученные

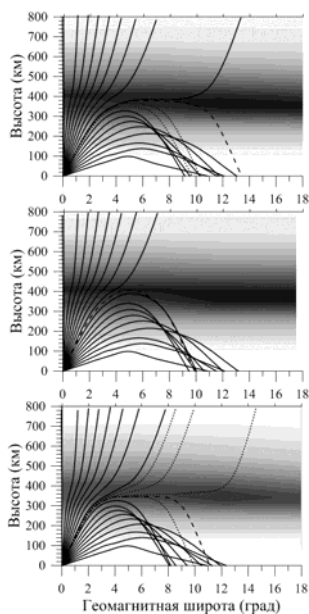


Рис. 4. Лучевые траектории волны с частотой  $f=13.5$  МГц, полученные в спокойных условиях (сверху), главную (26 сентября, посередине) и восстановительную (29 сентября, снизу) фазы бури на фоне изолиний электронной концентрации вдоль траектории наибольшей протяженности.

результаты численных расчетов позволили описать трехмерное отражение и преломление КВ от неоднородностей электронной концентрации. Показано, что гребни экваториальной аномалии, дополнительный F3 слой в экваториальной ионосфере и его изменчивость во время геомагнитных бурь влияют на ход радиолучей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (проект МК-4866.2014.5, Клименко М.В., Котова Д.С.), РФФИ (проект 14-05-00578, Клименко В.В.), 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).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

Клименко М.В., Клименко В.В., Кореньков Ю.Н. и др. Ионосферные эффекты и электродинамические возмущения во время внезапных стратосферных потеплений и их влияние на распространение радиоволн // Сборник докладов XXIV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». 2014. Т. 1. С. 189–193.

Котова Д.С., Захаров В.Е., Клименко М.В., Клименко В.В. Влияние выбора модели среды на решение задачи распространения КВ-радиоволн // Сборник докладов XXIV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». 2014а. Т. 4. С. 121–125.

Котова Д.С., Клименко М.В., Клименко В.В., Захаров В.Е. Математическое моделирование распространения КВ радиоволн в трехмерно-неоднородной ионосфере // Сборник трудов БШФФ-2013 и XIII Конференции молодых ученых. 2013. С. 242–244.

Котова Д.С., Клименко М.В., Клименко В.В., Захаров В.Е. Численное моделирование влияния геомагнитной бури 2–3 мая 2010 г. на распространение коротких радиоволн в ионосфере // Известия вузов. Радиофизика. 2014б. Т. 57, № 7. С. 519–530.

Котова Д.С., Клименко М.В., Клименко В.В., Захаров В.Е. Численное моделирование влияния ионосферных эффектов геомагнитной бури 2–3 мая 2010 г. на распространение КВ-радиоволн в низкоширотной области // Вестник БФУ им. И. Канта. Калининград: 2014в. Вып. 4. С. 55–60.

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

Fuller-Rowell T., Wang H., Akmaev R., et al. Forecasting the dynamic and electrodynamic response to the January 2009 sudden stratospheric warming // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. L13102.

Liu H.-L., Wang W., Richmond A.D., Roble R.G. Ionospheric variability due to planetary waves and tides for solar minimum conditions // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A00G07.

<sup>1</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

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