

ВЛИЯНИЕ ВНЕЗАПНОГО СТРАТОСФЕРНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ В ЯНВАРЕ 2009 г. НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОРОТКИХ РАДИОВОЛН В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ

INFLUENCE OF JANUARY 2009 STRATOSPHERIC WARMING ON HF RADIO WAVE PROPAGATION IN THE EQUATORIAL IONOSPHERE

Д.С. Котова

Калининградский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН,
Калининград, Россия
Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Калининград, Россия, darshu@ya.ru

М.В. Клименко

Калининградский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН,
Калининград, Россия,
Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Калининград, Россия, maksim.klimenko@mail.ru

В.В. Клименко

Калининградский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН,
Калининград, Россия, vvk_48@mail.ru

В.Е. Захаров

Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Калининград, Россия, VEZakharov@kantiana.ru

Ф.С. Бессараб

Калининградский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН,
Калининград, Россия
Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Калининград, Россия, FBESSARAB@kantiana.ru

Ю.Н. Кореньков

Калининградский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН,
Калининград, Россия, kor_yu@mail.ru

D.S. Kotova

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism,
Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia
I. Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russia, darshu@ya.ru

M.V. Klimenko

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism,
Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia
I. Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russia, maksim.klimenko@mail.ru

V.V. Klimenko

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism,
Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia, vvk_48@mail.ru

V.E. Zakharov

I. Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russia, VEZakharov@kantiana.ru

F.S. Bessarab

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism,
Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia
I. Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russia, FBESSARAB@kantiana.ru

Yu.N. Korenkov

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism,
Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia, kor_yu@mail.ru

Аннотация. Впервые рассмотрено влияние внезапного стратосферного потепления (ВСП) 23–27 января 2009 г. на распространение коротких радиоволн в экваториальной ионосфере. Выбранное нами событие происходило на фоне низкой солнечной и геомагнитной активности. Для моделирования изменения среды во время ВСП использовались результаты расчетов, полученные с помощью Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП). Удалось качественно и количественно воспроизвести возмущения полного электронного содержания, полученные по данным наземной сети приемников сигналов навигационных спутников GPS, посредством задания дополнительного электрического потенциала, а также выходных данных модели TIME-GCM на высоте 80 км.

Abstract. For the first time, we consider the effect of the January 23–27, 2009 sudden stratospheric warming (SSW) event on HF radio wave propagation in the equatorial ionosphere. This event took place during extremely low solar and geomagnetic activity. We use the simulation results obtained with the Global Self-consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere and Protonosphere (GSM TIP) for simulating environmental changes during the SSW event. We both qualitatively and quantitatively reproduce total electron content disturbances obtained from global ground network receiver observations of GPS navigation satellite signals, by setting an additional electric potential and TIME-GCM model output at a height of 80 km. In order to study the influence of this SSW event on HF radio wave propagation and attenuation, we use the numerical model of radio wave propagation based on geometrical

Для моделирования изменения лучевых траекторий и поглощения радиоволн использовалась численная модель распространения радиоволн, построенная в приближении геометрической оптики. Показано, что ВСП приводит к ухудшению радиосвязи в экваториальной ионосфере в дневное время.

Ключевые слова: внезапное стратосферное потепление, КВ-радиосвязь, поглощение радиосигнала, экваториальная аномалия, трехмерное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Внезапным стратосферным потеплением (ВСП) называется сильное и внезапное повышение температуры взрывного характера, иногда на 50 К и более, в течение нескольких суток в полярной и субполярной стратосфере зимой. ВСП представляет собой огромное по своим масштабам метеорологическое событие, связанное с глобальными аномалиями, происходящими в диапазоне высот от тропосферы и стратосферы до мезосферы и нижней термосферы. Влияние стратосферных потеплений на распределение метеопараметров в тропосфере и приземном атмосферном слое, а, следовательно, и на погоду, имеет экспериментальное и теоретическое обоснование [Woollings et al., 2010; Кочеткова и др., 2014; Погорельцев и др., 2014]. Имеется ряд наблюдений поведения параметров мезосферы и нижней термосферы во время ВСП, например [Mbatha et al., 2010]. Однако такие наблюдения достаточно редки.

Длительный затянувшийся минимум солнечной ($F_{10.7\sim 70}$) и геомагнитной ($K_p < 3$) активности в 2007–2009 гг. позволяет тщательно изучить взаимосвязи между процессами в средней и верхней атмосфере, поскольку в этот период изменения солнечной активности и магнитосферных источников оказывают минимальное влияние на изменчивость верхних слоев атмосферы. В январе 2009 г. произошло сильное ВСП, уникальность которого состояла в его большой продолжительности. Для этого события имеются непрерывные измерения мировой сети радаров некогерентного рассеяния в течение одиннадцати дней, а также большой массив данных наблюдений ионозондов. Ионосферные эффекты в Азиатском регионе России во время ВСП зимой 2008–2009 гг. были представлены в работах [Polyakova et al., 2014; Shrynev et al., 2015]. Неоднократно также рассматривался глобальный и среднеширотный отклик ионосферы на это событие [Yue et al., 2010; Pancheva, Mukhtarov, 2011; Bessarab et al., 2012; Fagundes et al., 2015]. Однако наибольшее количество работ было посвящено отклику низкоширотной ионосферы на ВСП 2009 г. [Chau et al., 2010; Goncharenko et al., 2010b] и попытке объяснить причины такого отклика [Goncharenko et al., 2010a; Chau et al., 2011; Fejer et al., 2011; Pedatella et al., 2015; Yigit et al., 2015]. Чтобы проверить обоснованность и важность каждого из предлагаемых механизмов наблюдаемого утреннего усиления экваториальной аномалии и дневного уменьшения электронной концентрации в экваториальной и низкоширотной обла-

сти ионосферы во время ВСП 2009 г., многочисленными научными группами и коллективами были проведены теоретические исследования с использованием глобальных моделей средней и верхней атмосферы, которые включают в себя систему термосфера—ионосфера [Fuller-Rowell et al., 2010, 2011; Liu et al., 2010, 2013; Bessarab et al., 2012; Jin et al., 2012]. Во всех этих исследованиях в той или иной степени качественно (но не количественно) был воспроизведен низкоширотный отклик ионосферы на ВСП 2009 г. Различие между теоретическими и экспериментальными данными может объясняться как неоднозначным выбором входных данных моделей, так и упрощенным описанием некоторых физических процессов. Для того чтобы добиться количественного согласия результатов расчетов с данными наблюдений, некоторые исследователи использовали ассимиляцию данных наблюдений на различных стадиях моделирования параметров средней и верхней атмосферы [Wang et al., 2014]. Тем не менее, несмотря на несомненный прогресс в моделировании ионосферных эффектов ВСП, существуют расхождения между результатами моделирования и данными наблюдений отклика низкоширотной ионосферы на ВСП 2009 г. [Klimenko et al., 2015; Peddatela et al., 2016]. Отчасти поэтому до сих пор не было исследований, посвященных опосредованному влиянию ВСП (через изменения параметров ионосферы) на распространение коротких радиоволн. Авторам работы [Klimenko et al., 2015] с помощью введения источника дополнительного электрического поля в экваториальной области удалось качественно и количественно воспроизвести отклик экваториальной аномалии на ВСП 2009 г., что позволило нам в данной работе впервые провести исследование изменения лучевых траекторий и поглощения радиоволн в период ВСП 2009 г. Ниже мы приводим результаты такого исследования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве модели для описания трехмерно неоднородной и анизотропной среды распространения коротких радиоволн нами использовалась Глобальная самосогласованная модель термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП). В этой модели осуществляется численное интегрирование системы квазигидродинамических уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для многокомпонентной смеси газов, состоящей из нейтральных (O_2 , N_2 , O , H) и заряженных (молекулярные ионы O_2^+ ,

NO^+ , атомарные ионы O^+ , H^+ и электроны) частиц. ГСМ ТИП рассчитывает при заданных входных параметрах глобальные распределения температуры T_n , концентраций O_2 , N_2 , O и векторов среднemasсовой скорости нейтральной составляющей верхней атмосферы Земли, концентраций, температур и скоростей атомарных (O^+ , H^+) и молекулярных ионов, а также двумерное распределение электрического потенциала ионосферного и магнитосферного происхождения. Используется пространственная сетка 5° по широте и 15° по долготе в сферической геомагнитной системе координат с переменным шагом по высоте. Подробное описание ГСМ ТИП можно найти в [Намгаладзе и др., 1990]. Ранее ГСМ ТИП неоднократно использовалась для исследований отклика ионосферы на ВСП [Bessarab et al., 2012; Korenkov et al., 2012; Клименко и др., 2013, 2016; Klimentko et al., 2015]. Для моделирования глобального отклика ионосферы на рассматриваемое событие ВСП 23–27 января 2009 г. [Klimentko et al., 2015; Клименко и др., 2016] использовали выходные данные модели TIME-GCM [Liu et al., 2010], такие как давление, температура, плотность, зональная и меридиональная скорости ветра на высоте 80 км в качестве нижних граничных условий в ГСМ ТИП. Кроме того, задавался дополнительный электрический потенциал таким образом, чтобы воспроизвести зональное электрическое поле на геомагнитном экваторе, вызывающее вертикальный электромагнитный дрейф со скоростями, наблюдавшимися в обл. Джикамарка (Jicamarca). Были получены результаты модельных расчетов возмущений полного электронного содержания (ПЭС), качественно и количественно близкие наблюдениям (рис. 1). Видно, что максимальные возмущения ПЭС в американском долготном секторе формируются в экваториальной области в 15:00–17:00 UT. Область максимума приходится на гребни экваториальной аномалии (ЭА), где амплитуда возмущения ПЭС достигает ~ 4 TECU ($1 \text{ TECU} = 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$). Согласие с данными наблюдений явилось обоснованием выбора ГСМ ТИП в качестве модели среды распространения радиоволн во время ВСП 2009 г. Результаты модельных расчетов для 15:00 UT в области ЭА использовались для изучения влияния ВСП на радиосвязь по сравнению со спокойными условиями по причине максимальных возмущений ПЭС в это время в этом регионе. В качестве спокойных условий был выбран невозмущенный день 15 января 2009 г.

Для проведения такого исследования использовался ранее созданный согласованный алгоритм численных расчетов радиотрасс с использованием моделей среды и распространения радиоволн (РРВ), описанный в [Котова и др., 2014; Kotova et al., 2015], где этот алгоритм использовался при проведении исследований влияния геомагнитных бурь на распространение коротких радиоволн. Этот алгоритм состоит из интерполяции ионосферных и термосферных параметров на высотах от 80 до 800 км на трехмерной пространственной сетке, используемой в ГСМ ТИП, в узлы рассчитываемых лучевых траекторий

в численной модели распространения коротких радиоволн. Эти параметры термосферы и ионосферы необходимы для расчета в модели РРВ комплексных показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной волн. Среда от поверхности Земли до высоты 60 км считалась однородной и непреломляющей, в интервале высот от 60 до 80 км параметры среды рассчитываются по эмпирическим моделям ионосферы IRI [Bilitza, 2001] и нейтральной атмосферы MSIS [Hedin, 1991]. Решения на высоте 80 км сшиваются с решениями, полученными в ГСМ ТИП. Выражения для комплексных показателей преломления выводятся из дисперсионного соотношения для анизотропной ионосферной плазмы, полученного из выражения для тензора диэлектрической проницаемости холодной плазмы [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Среда во всем интервале высот считается слабонеоднородной, поэтому для описания распространения коротких радиоволн применимо приближение геометрической оптики. Описание трехмерной численной модели РРВ и ее развитие представлено в работе [Котова и др., 2015]. Модель позволяет, помимо расчета лучевых траекторий, интегрального и дифференциального поглощений, оценить изменение угла между лучевым вектором \mathbf{s} и вектором импульса \mathbf{p} , который служит мерой развития неоднородности волны при погружении ее вглубь ионосферных слоев в каждой точке рассчитываемых лучевых траекторий.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для того чтобы выбрать положения станций на поверхности Земли, направления и углы излучения, были построены карты изолиний электронной концентрации N_e широтно-высотных разрезов для трех различных долгот как для спокойных условий, так и для периода ВСП (рис. 2). Кроме того, для тех же областей были построены карты возмущений. Видно, что наиболее существенные возмущения N_e наблюдаются на высотах F-области. Во время ВСП происходит усиление экваториальной аномалии: падение N_e на экваторе, смещение гребней ЭА от экватора и увеличение N_e в гребнях ЭА. Причем при движении на восток этот эффект в области провала уменьшается и нарушается симметрия гребней (южный гребень проявляется сильнее, чем северный). Модельные изменения N_e на высотах ниже 200 км во время ВСП практически отсутствуют, что не может соответствовать действительности. Именно поэтому в расчетах без задания источника дополнительного электрического поля не удалось воспроизвести эффекты в ПЭС.

На карте изолиний возмущения критической частоты F2-слоя во время потепления 25 января 2009 г. в 15:00 UT в экваториальной области показаны положения двух гипотетических станций и направления излучения (рис. 3). Хорошо видно, что во время ВСП наблюдается увеличение критической частоты на 1 МГц в гребнях ЭА на геомагнитных широтах $\pm 21^\circ$, что свидетельствует о росте в этих областях N_e в максимуме F2-слоя. На рис. 3 видна также расши-

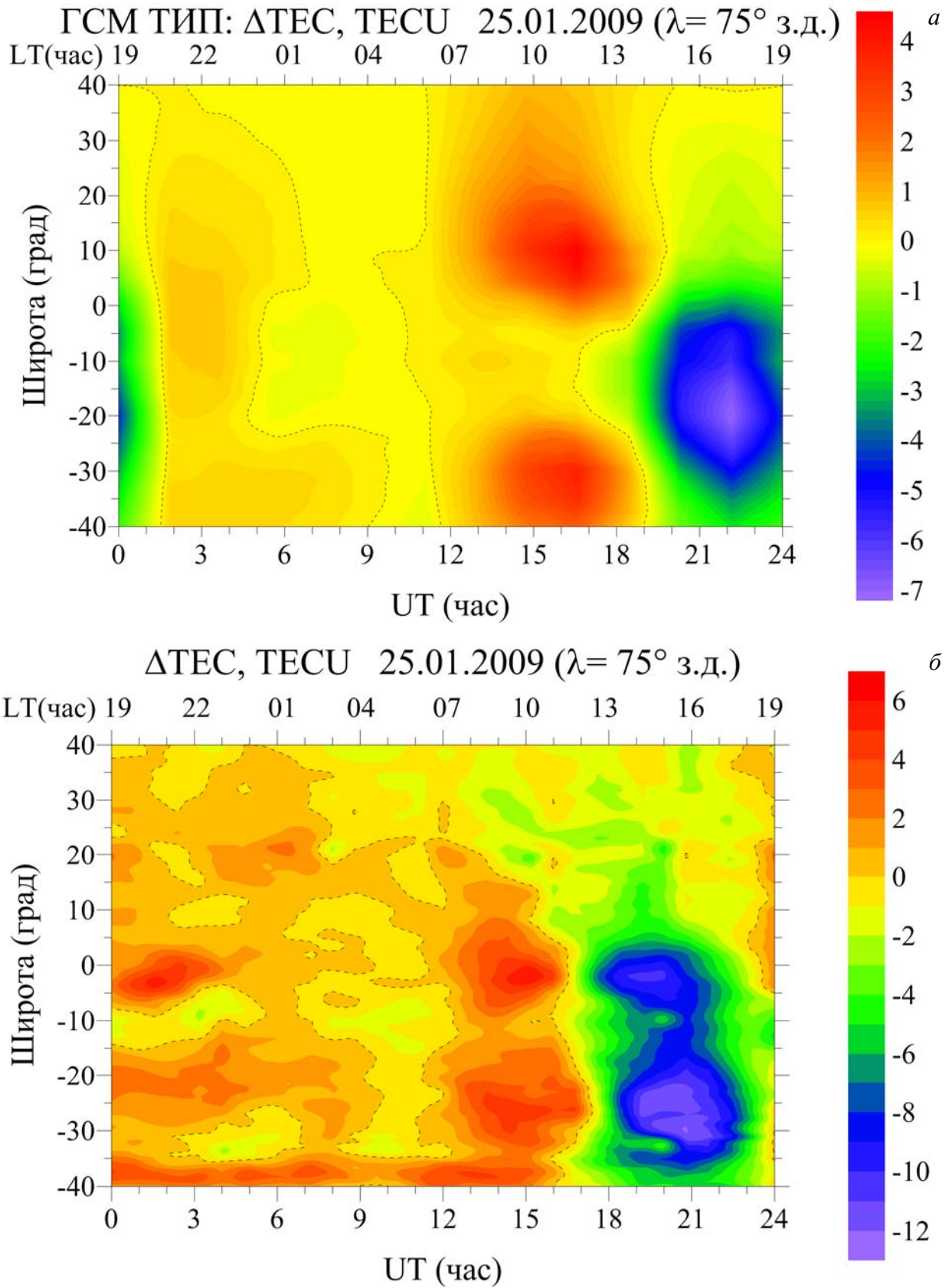


Рис. 1. Возмущение полного электронного содержания в американском долготном секторе (75° E) в течение дня в диапазоне географических широт от -40° до 40° , полученное по результатам расчетов с использованием ГСМ ТИП (a) и по данным наблюдений спутниковых навигационных систем (b)

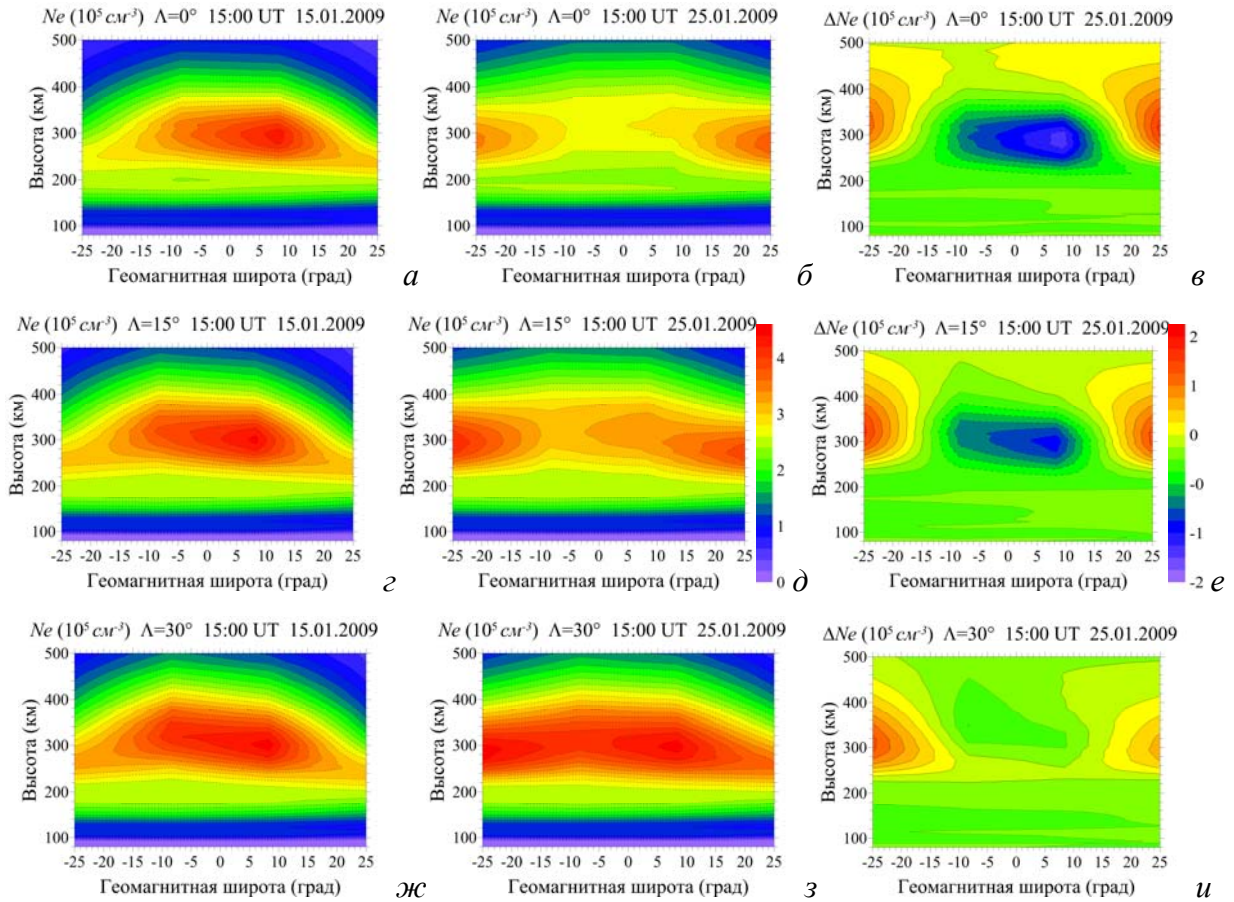


Рис. 2. Высотно-широтные разрезы профилей электронной концентрации на геомагнитных долготах 0° (а–в), 15° (г–е) и 30° (ж–и) в интервале геомагнитных широт от -25° до 25° . Профили N_e рассчитаны по ГСМ ТИП для 15:00 UT 15 января (а, г, ж), 25 января (б, д, з). Возмущения электронной концентрации 25 января относительно 15 января (в, е, и)

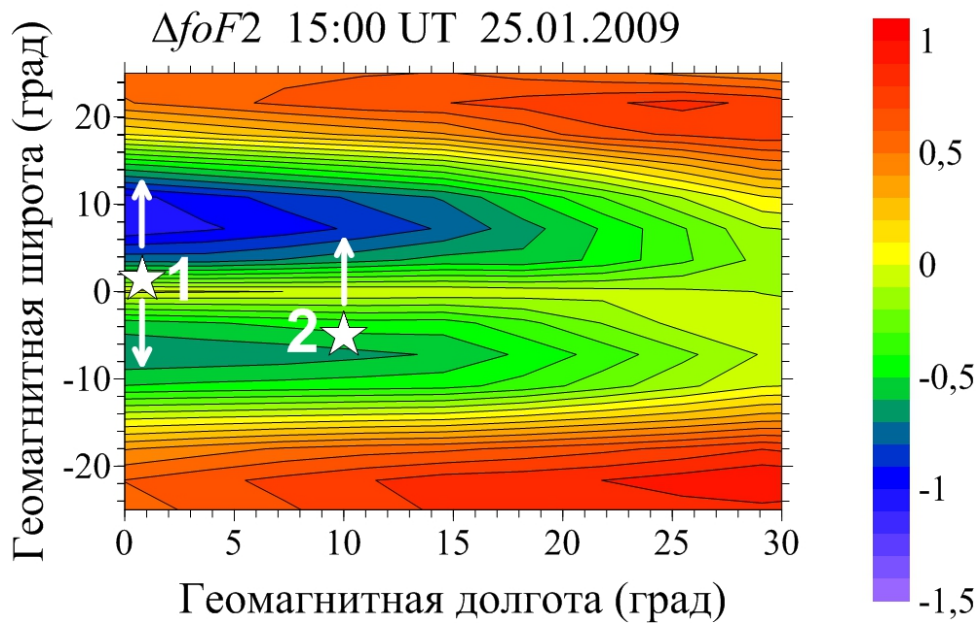


Рис. 3. Карта изолиний возмущения f_oF2 в декартовой геомагнитной системе координат долгота–широта в экваториальной ионосфере во время ВСП 25 января 2009 г. по сравнению со спокойным днем 15 января 2009 г. для 15:00 UT. Расчеты распространения радиоволн проводились от гипотетических передающих станций (звездочки). Стрелками показаны выбранные направления распространения радиоволн

ряющаяся во время ВСП область провала N_c на геомагнитном экваторе и в его окрестности вплоть до геомагнитных широт $\pm 15^\circ$, где формируются отрицательные изменения f_oF_2 до -1 МГц, в то время как изменения критической частоты на самом геомагнитном экваторе практически отсутствуют.

Первая станция излучает под различными углами места α различный набор частот в направлении на север и юг (азимут $\beta=0^\circ$ и 180°). Ее координаты составляют $\varphi=10^\circ$ S, $\lambda=69^\circ$ E, $\Phi=1.4^\circ$, $\Lambda=0.8^\circ$, где φ , λ , Φ , Λ — географические и геомагнитные широта и долгота соответственно. Вторая станция с координатами $\varphi=16.2^\circ$ S, $\lambda=59.4^\circ$ E, $\Phi=-5^\circ$, $\Lambda=10^\circ$ излучает только на север. Такой выбор связан с тем, что нас интересовало влияние смещения гребней ЭА на характер РРВ.

На рис. 4 и 5 представлены результаты модельных расчетов изменения лучевых траекторий КВ-радиоволн для первой станции, полученные для набора частот и углов возвышения α в спокойных условиях, и их изменение во время ВСП. Расчеты проводились для 15 и 25 января с одинаковыми частотами и углами места излучения. Все приведенные графики относятся к односкачковым трассам радиоволн обыкновенной моды. На рис. 4 траектории показаны в координатах геомагнитная широта — высота, а рис. 5 — в геомагнитных координатах широта—долгота. Это позволяет увидеть трехмерный характер РРВ.

Из рис. 4 видно, что 25 января число траекторий, уходящих в ионосферу, увеличивается по сравнению с 15 января. При этом уходящие траектории испытывают преломление на высотах F2-слоя (~320 км). Изменяется дальность распространения радиоволн и растет высота отражения от 30 км для 6 МГц до 42.5 км для 8.5 МГц. Можно отметить, что лучевые траектории, отраженные в области высот ниже 180 км, не претерпевают изменений. Вполне вероятно, это не соответствует действительности. Почему так происходит? Можно попытаться объяснить это тем, что, задав дополнительный электрический потенциал, мы воспроизвели в модельных расчетах наблюдавшиеся скорости электромагнитного дрейфа на высотах F-области ионосферы, но не эффекты электрического поля в нижней термосфере и ионосфере из-за отсутствия учета переноса молекулярных ионов. И, наконец, исходя из современного уровня наших знаний о формировании ионосферных эффектов ВСП и учитывая недостаточное количество имеющихся экспериментальных данных на высотах стратосферы, мезосферы и нижней термосферы вообще и во время ВСП в частности, пока нельзя сказать, какие именно изменения параметров нейтральной атмосферы на этих высотах приводят к таким изменениям параметров термосферы на высоте 80 км, учет которых в качестве нижних граничных условий в модели верхней атмосферы Земли позволил бы адекватно описать низкоширотные ионосферные эффекты ВСП на высотах F-области.

Рисунок 5 наглядно демонстрирует влияние динамики гребней ЭА на изменение лучевых траекто-

рий. Проекция лучевых траекторий на поверхность Земли загибаются в сторону уменьшения градиента N_c (на запад) при приближении к границам гребней на геомагнитных широтах $\Phi=\pm 10^\circ$. Видно, что потепление приводит к гораздо большему отклонению траекторий радиоволн от дуги большого круга, чем в спокойных условиях. Эти отклонения не превышают 0.15° по долготе. Однако, переходя от углов в градусах к расстояниям в километрах, мы получаем отклонение ~17 км.

Рассмотрим подробнее некоторые лучи, распространяющиеся в направлении на север (рис. 6) и юг (рис. 7), представив их на фоне изолиний N_c , профили которой были получены вдоль каждой лучевой траектории. На рис. 6 показаны проекции рассчитанных траекторий радиоволн с частотой 8.5 МГц и углом места $\alpha=30^\circ$ в плоскости геомагнитная широта — высота на фоне N_c для 15 и 25 января. На этих рисунках штриховыми линиями показаны изменения интегрального затухания в дБ вдоль трассы. Рисунок 6, в показывает поведение дифференциального затухания (штриховые линии) для двух рассматриваемых дней вдоль лучевых траекторий, которые приведены для наглядности. Видно, что N_c в северном гребне экваториальной аномалии во время ВСП уменьшается. Гребень смещается в сторону от экватора. Максимум F2-слоя поднимается на ~30 км. Это способствует более отчетливому проявлению слоя F1. И, если в спокойных условиях мы наблюдаем отражение на высоте ~220 км, то во время потепления — на высоте 261 км. Как в спокойных условиях, так и во время ВСП происходит преломление в слое F1 и отражение от слоя F2. 25 января по сравнению с 15 января происходит смещение на 4° по широте точки прихода на поверхности Земли. Анализ рисунков с затуханием позволяет заметить, что во время потепления наблюдается незначительный рост поглощения. Так, для интегрального затухания на одной и той же геомагнитной долготе 8° во время ВСП происходит рост интегрального затухания на 2 % по сравнению со спокойными условиями. Максимальные значения дифференциального затухания (дБ/км) 25 января на 7 % больше по сравнению с 15 января. Затухание достигает максимальных значений в нижних слоях ионосферы D и E. Эти области связаны с неотклоняющим поглощением, когда затухание велико, а деформация луча мала [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. В области отклоняющего поглощения (возле точки поворота лучевой траектории) ожидаемый рост дифференциального затухания не наблюдается. Это связано с тем, что в обоих случаях радиоволна распространяется не в области максимума F-слоя, она отражается от областей с малым значением N_c .

Для радиоволны с частотой 6 МГц, распространяющейся с азимутом 180° под углом места 45° (рис. 7), также получается рост дифференциального затухания на 7 %. Из-за уменьшения частоты радиоволна поглощается сильнее и максимальное интегральное затухание на 6 дБ больше по сравнению с рис. 6. Если рас-

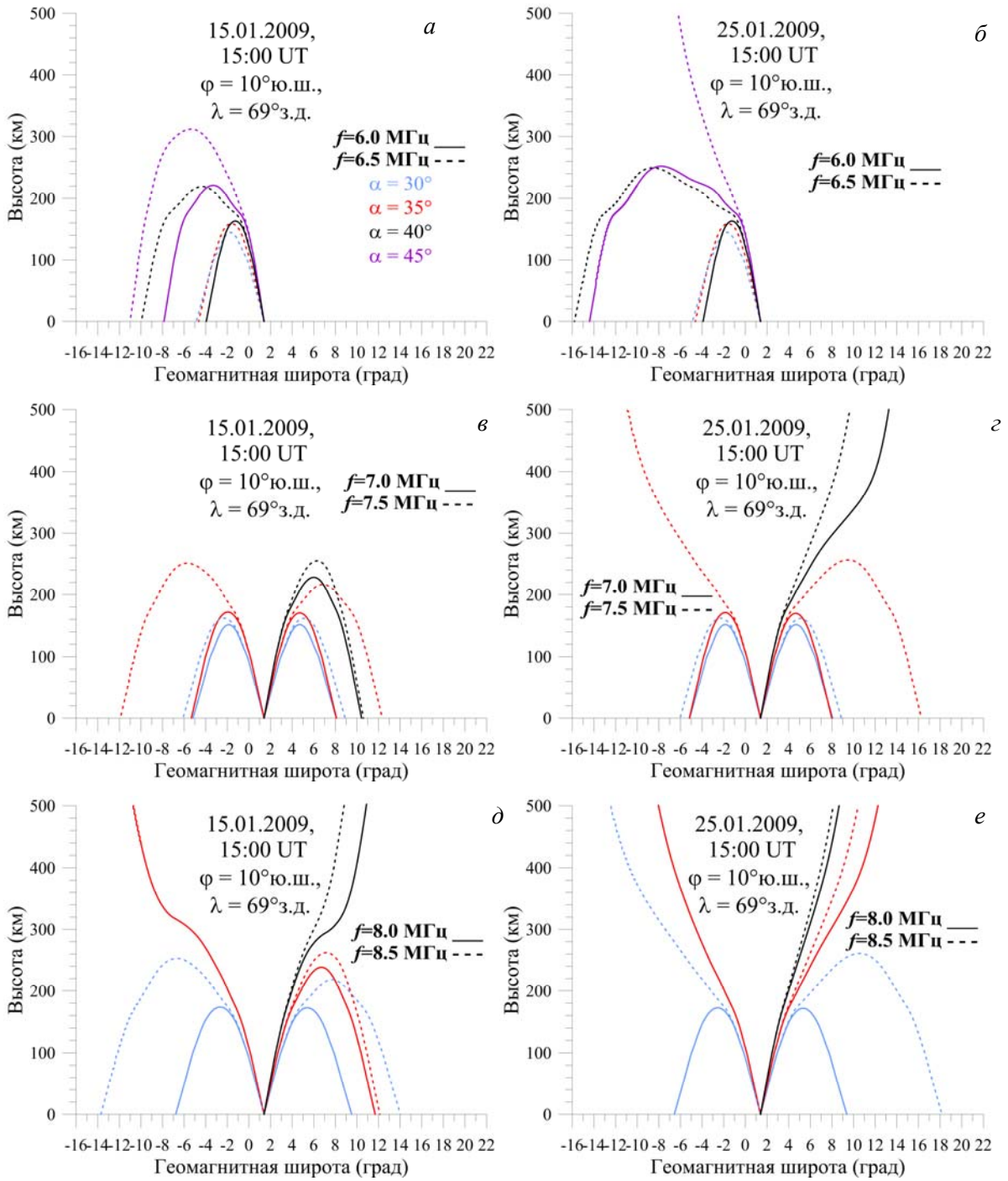


Рис. 4. Лучевые структуры обыкновенной моды, полученные в модельных расчетах для 15 января (а, в, д) и 25 января (б, г, е) при распространении радиоволн с различными частотами и углами возвышения

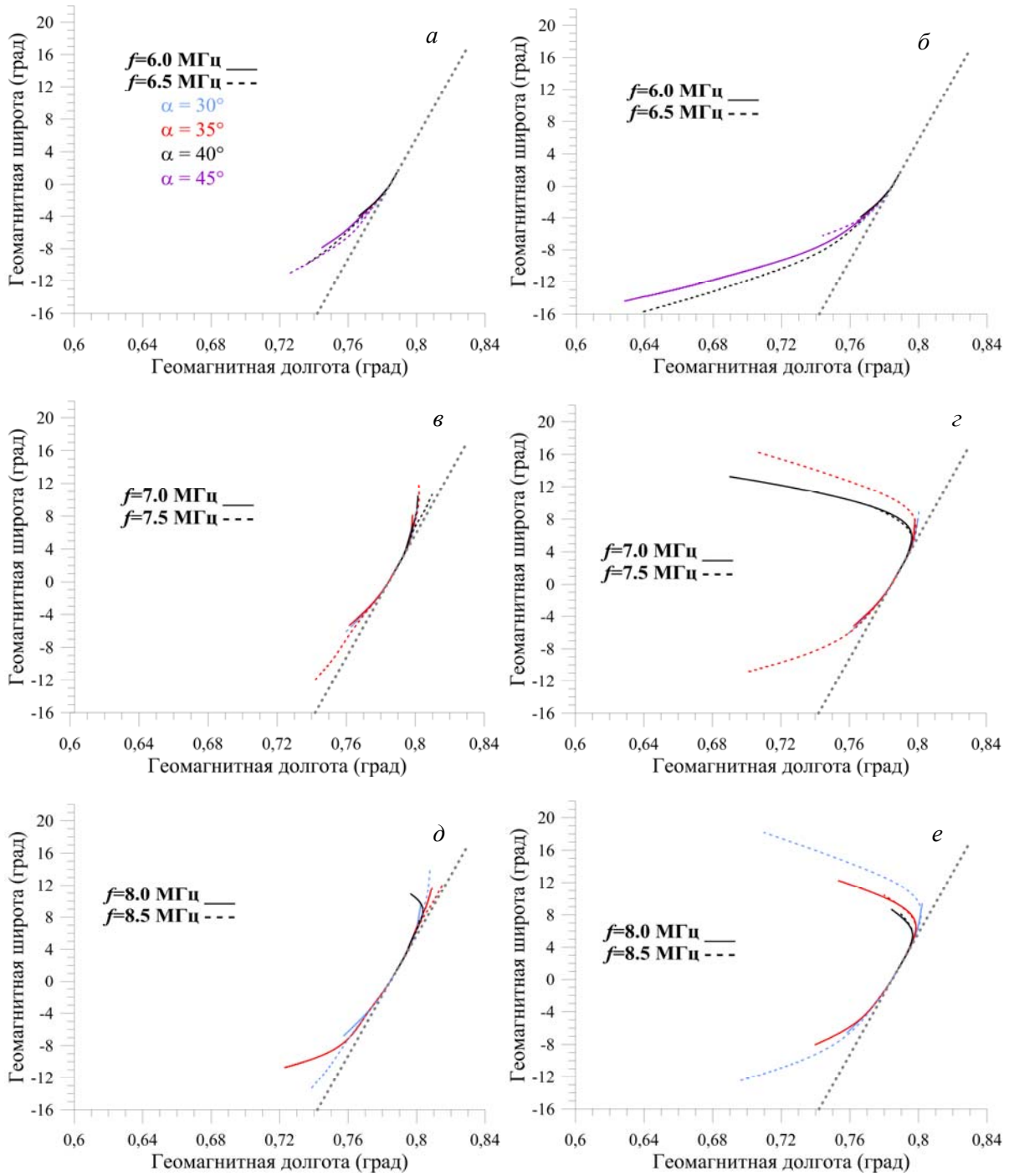


Рис. 5. То же, что на рис. 4, в геомагнитных координатах долгота—широта. Показано долготно-широтное отклонение лучевых траекторий от дуги большого круга (серая пунктирная линия) при заданных азимутах излучения $\beta=0^\circ$ и $\beta=180^\circ$

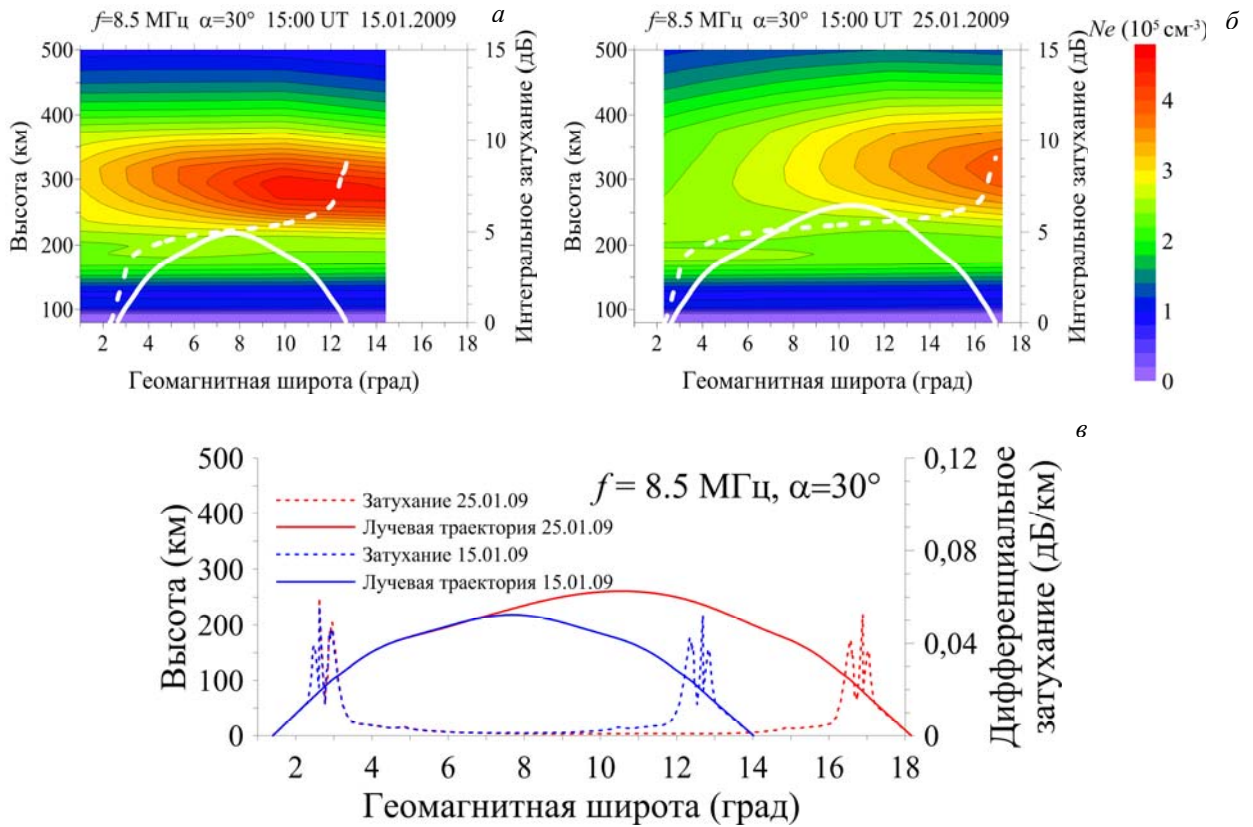


Рис. 6. Рассчитанные лучевые траектории (белые сплошные линии) и интегральные затухания (белые штриховые линии) радиоволны с частотой $f=8.5 \text{ МГц}$ и $\alpha=30^\circ$ в спокойных условиях 15 января (а) и во время потепления 25 января (б). Изолинии N_e построены вдоль траекторий. На панели в показано дифференциальное затухание вдоль каждой лучевой траектории

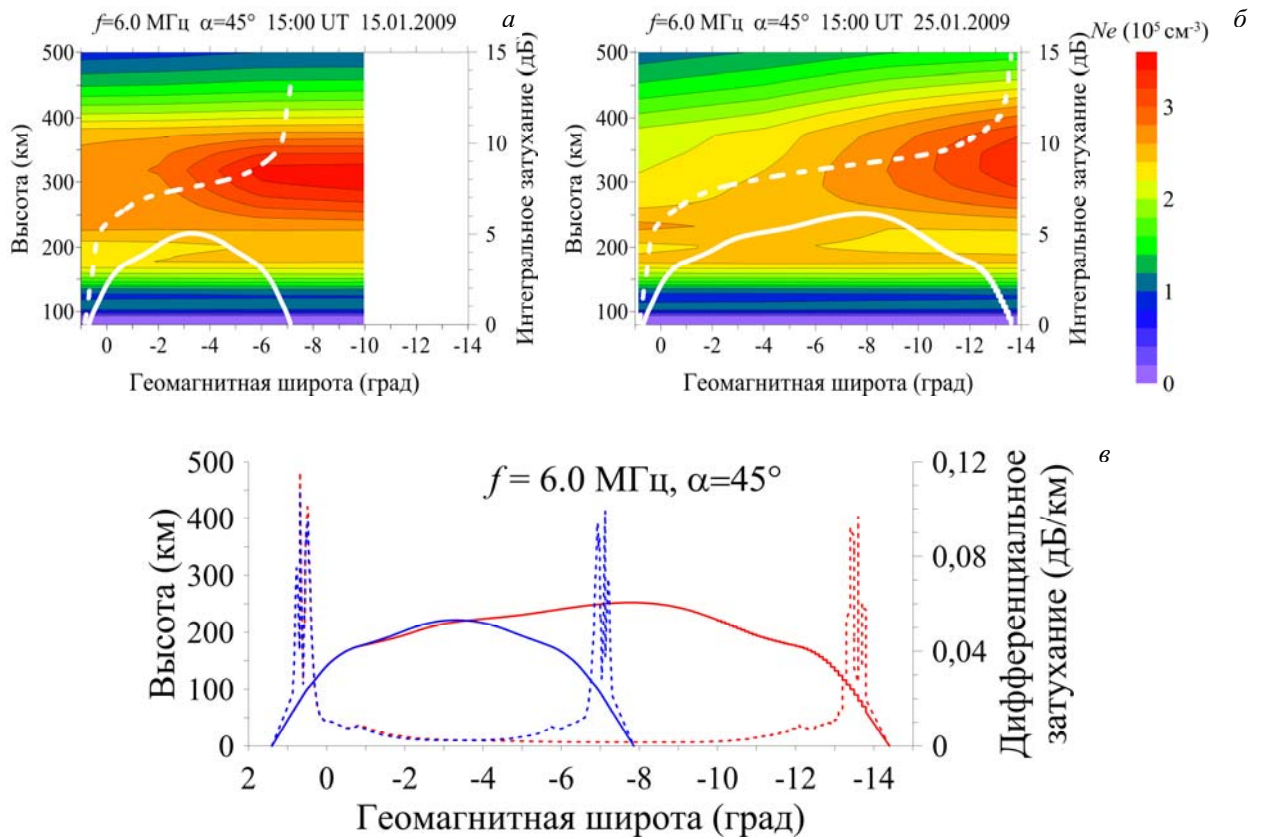


Рис. 7. То же, что на рис. 6, для радиоволны с частотой $f=6 \text{ МГц}$ и $\alpha=45^\circ$

смотреть теперь, так же как и в предыдущем случае, затухание на $\Phi = -3^\circ$, снова получим рост порядка 4 % во время ВСП. В поведении N_e видно, что во время потепления южный гребень ЭА смещается в сторону от экватора, максимум слоя F2 поднимается приблизительно на 15 км, слой F1 лучше проявляется и сильнее сказывается на характере распространения радиоволны: наблюдается преломление на высотах 170 и 210 км и отражение на высоте 250 км, что на 30 км выше, чем в спокойных условиях. Преломление на 170 км отражается и в поведении дифференциального затухания, где можно заметить незначительный рост поглощения (при этом график для 25 января выше, чем для 15 января). Это свидетельствует о распространении радиоволны на этой высоте в области максимума слоя F1. Можно отметить рост дифференциального затухания в области отклоняющегося поглощения (оно отлично от нуля).

Перейдем теперь к рассмотрению результатов, полученных для второй гипотетической станции. Мы не будем рассматривать их столь же подробно, как для первой станции, поскольку для второй были получены те же закономерности: во время потепления уменьшается число приходящих на Землю лучевых траекторий и увеличивается дальность односкачковых трасс. Рассмотрим только один пример для частоты 8.5 МГц и угла места 30° (рис. 8), аналогичный результатам на рис. 6 и 7. Изолинии N_e показывают наличие двух гребней ЭА, которые смещаются от экватора во время потепления. Провал N_e на экваторе углубляется. Это приводит к тому, что рассматриваемая лучевая траектория, приходящая на Землю в спокойных условиях, во время ВСП проходит ионосферу насквозь, испытывая на своем пути преломления в слоях F1 и F2 и, отклоняясь от гребня ЭА, уходит вверх. Видно, что в окрестности $\Phi = 6^\circ$ наблюдается рост дифференциального затухания, который связан с тем, что распространение происходит в области с максимальным по трассе значением N_e . Анализируя график, можно сказать, что максимальное затухание наблюдается в областях неотклоняющихся поглощений. Для этого случая также во время ВСП наблюдается незначительный (~3 %) рост поглощения по сравнению со спокойными условиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы подробно рассмотрели особенности лучевых траекторий коротких радиоволн в ионосфере во время ВСП 23–27 января 2009 г. Во время рассматриваемого события наблюдается уменьшение электронной концентрации в гребнях экваториальной аномалии, что приводит к увеличению числа траекторий, проходящих ионосферу насквозь, и длины одного скачка (порядка 4° по широте). Показано, что во время потепления увеличивается отклонение траекторий от дуги большого круга по сравнению со спокойными условиями. Результаты расчетов показали, что во время рассмотренного ВСП 2009 г. происходит незначительное усиление затухания на 5 %, которое, скорее всего, связано с изменениями состава

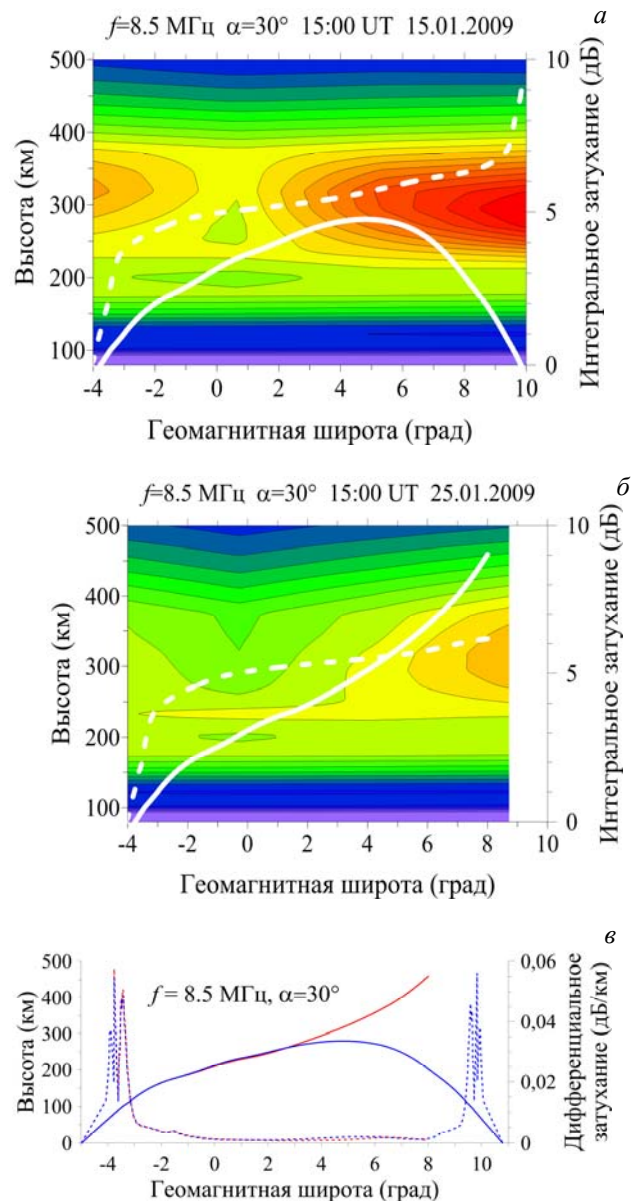


Рис. 8. То же, что на рис. 6, для второй передающей станции, излучающей радиоволны с частотой $f=8.5$ МГц, $\alpha=30^\circ$ и $\beta=0^\circ$

нейтральной атмосферы во время потепления. Однако остается открытым вопрос о корректном моделировании среды во время ВСП на высотах ниже 180 км.

Исследование выполнено при финансовой поддержке 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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
Клименко М.В., Клименко В.В., Кореньков Ю.Н. и др. Моделирование отклика системы термосфера—ионосфера на внезапные стратосферные потепления 2008 и 2009 гг. // Космич. исслед. 2013. Т. 51, № 1. С. 62–72.

Клименко М.В., Клименко В.В., Бессараб Ф.С. и др. Использование моделей средней и верхней атмосферы для описания возмущений полного электронного содержания, вызванных стратосферным потеплением 2009 года // Химическая физика. 2016. Т. 35, № 1. С. 41–48.

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 // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2014. Т. LVII, № 7. С. 519–530.

Котова Д.С., Захаров В.Е., Клименко М.В., Клименко В.В. Развитие модели распространения коротких радиоволн в ионосфере // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 12. С. 62–71.

Кочеткова О.С., Мордвинов В.И., Руднева М.А. Анализ факторов, влияющих на возникновение стратосферных потеплений // Оптика атмосферы и океана. 2014. № 8. С. 719–727.

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.

Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н., Перцев Н.Н. Внезапные стратосферные потепления: роль нормальных атмосферных мод // Геомагнетизм и аэронавигация. 2014. Т. 54, № 3. С. 387–403.

Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko M.V., et al. Modeling the effect of sudden stratospheric warming within the thermosphere—ionosphere system // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2012. V. 90–91. P. 77–85.

Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Sci. 2001. V. 36, N 2. P. 261–275.

Chau J.L., Aponte N.A., Cabossa E. et al. Quiet time ionospheric variability over Arecibo during sudden stratospheric warming events // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A00G06. DOI: 10.1029/2010JA015378.

Chau J.L., Goncharenko L.P., Fejer B.G., Liu H.L. Equatorial and low latitude ionospheric effects during sudden stratospheric warming events // Space Sci. Rev. 2011. DOI: 10.1007/s11214-011-9797-5.

Fagundes P.R., Goncharenko L.P., de Abreu A.J., et al. Ionospheric response to the 2009 sudden stratospheric warming over the equatorial, low, and middle latitudes in the South American sector // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2015. V. 120. P. 7889–7902. DOI: 10.1002/2014JA020649.

Fejer B.G., Tracy B.D., Olson M.E., Chau J.L. Enhanced lunar semidiurnal equatorial vertical plasma drifts during sudden stratospheric warmings // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. L21104. DOI: 10.1029/2011GL049788.

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. DOI: 10.1029/2011GL047732.

Fuller-Rowell T., Wu F., Akmaev R., et al. A whole atmosphere model simulation of the impact of a sudden stratospheric warming on thermosphere dynamics and electrodynamics // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A00G08. DOI: 10.1029/2010JA015524.

Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.-L., Coster A.J. Unexpected connection between the stratosphere and ionosphere // Geophys. Res. Lett. 2010a. V. 37. L10101. DOI: 10.1029/2010GL043125.

Goncharenko L.P., Coster A.J., Chau J.L., Valladares C.E. Impact of sudden stratospheric warming on equatorial ionization anomaly // J. Geophys. Res. 2010b. V. 115. A00G07. DOI: 10.1029/2010JA015400.

Hedin A.E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere // J. Geophys. Res.: Space Phys. 1991. V. 96. A2. P. 1159–1172.

Jin H., Miyoshi Y., Pancheva D., et al. Response of migrating tides to the stratospheric sudden warming in 2009 and their effects on the ionosphere studied by a whole atmosphere—ionosphere model GAIA with COSMIC and TIMED/SABER observations // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A10323. DOI: 10.1029/2012JA017650.

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S., et al. Study of the thermospheric and ionospheric response to the 2009 sudden stratospheric warming using TIME-GCM and GSM TIP models: First results // J. Geophys. Res. 2015. V. 120. N 9. P. 7873–7888. DOI: 10.1002/2014JA020861.

Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Klimenko M.V., et al. The global thermospheric and ionospheric response to the 2008 minor sudden stratospheric warming event // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A10309. DOI: 10.1029/2012JA018018.

Kotova D.S., Klimenko M.V., Klimenko V.V., et al. Using IRI and GSM TIP model results as environment for HF radio wave propagation model during the geomagnetic storm occurred on September 26–29, 2011 // Adv. Space Res. 2015. V. 56. N 9. P. 2012–2029. DOI: 10.1016/j.asr.2015.05.009.

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. DOI: 10.1029/2009JA015188.

Liu H., Jin H., Miyoshi Y., Fujiwara H., Shinagawa H. Upper atmosphere response to stratosphere sudden warming: Local time and height dependence simulated by GAIA model // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40, P. 635–640. DOI: 10.1002/grl.50146.

Mbatha N., Sivakumar V., Malinga S.B., et al. Study on the impact of sudden stratosphere warming in the upper mesosphere — lower thermosphere regions using satellite and HF radar measurements // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10. P. 3397–3404.

Pancheva D., Mukhtarov P. Stratospheric warmings: The atmosphere—ionosphere coupling paradigm // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2011. V. 73. N 13. P. 1697–1702. DOI: 10.1016/j.jastp.2011.03.006.

Pedatella N.M., Fang T.-W., Jin H., et al. Multimodel comparison of the ionosphere variability during the 2009 sudden stratosphere warming // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2016. V. 121. P. 7204–7225. DOI: 10.1002/2016JA022859.

Pedatella N.M., Maute A. Impact of the semidiurnal lunar tide on the midlatitude thermospheric wind and ionosphere during sudden stratosphere warmings // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2015. V. 120. P. 10,740–10,753. DOI: 10.1002/2015JA021986.

Polyakova A.S., Chernigovskaya M.A., Perevalova N.P. Ionospheric effects of sudden stratospheric warmings in eastern Siberia region // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2014. V. 120. P. 15–23. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.08.011.

Shpynev B.G., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., et al. High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming // EPS. 2015. V. 67, N 18. DOI: 10.1186/s40623-015-0187-1.

Wang H., Akmaev R.A., Fang T.-W., et al. First forecast of a sudden stratospheric warming with a coupled whole-atmosphere/ionosphere model IDEA // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119. P. 2079–2089. DOI: 10.1002/2013JA019481.

Woollings T., Charlton-Perez A., Ineson S., et al. Associations between stratospheric variability and tropospheric blocking // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. D6. DOI: 10.1029/2009JD012742.

Yigit E., Medvedev A.S. Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere // *Adv. Space Res.* 2015. V. 55, N 5. P. 983–1003. DOI: 0.1016/j.asr.2014.11.020.

Yue X., Schreiner W.S., Lei J. et al. Global ionospheric response observed by COSMIC satellites during the January 2009 stratospheric sudden warming event // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A00G09. DOI: 10.1029/2010JA015466.

REFERENCES

Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpov I.V., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A. Modeling the effect of sudden stratospheric warming within the thermosphere—ionosphere system. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012, vol. 90–91, pp. 77–85.

Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Sci.* 2001, vol. 36, no. 2, pp. 261–275.

Bryunelli B.E., Namgaladze A.A. *Fizika ionosfery* [Physics of the Ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 528 p. (In Russian).

Chau J.L., Aponte N.A., Cabossa E., Sulzer M.P., Goncharenko L.P., González S.A. Quiet time ionospheric variability over Arecibo during sudden stratospheric warming events. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A00G06. DOI: 10.1029/2010JA015378.

Chau J.L., Goncharenko L.P., Fejer B.G., Liu H.L. Equatorial and low latitude ionospheric effects during sudden stratospheric warming events. *Space Sci. Rev.* 2011. DOI: 10.1007/s11214-011-9797-5.

Fagundes P.R., Goncharenko L.P., de Abreu A.J., Venkatesh K., Pezzopane M., de Jesus R., Gende M., Coster A.J., Pillat V.G. Ionospheric response to the 2009 sudden stratospheric warming over the equatorial, low, and middle latitudes in the South American sector. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 120, pp. 7889–7902. DOI: 10.1002/2014JA020649.

Fejer B.G., Tracy B.D., Olson M.E., Chau J.L. Enhanced lunar semidiurnal equatorial vertical plasma drifts during sudden stratospheric warmings. *Geophys. Res. Lett.* 2011, vol. 38, L21104. DOI: 10.1029/2011GL049788.

Fuller-Rowell T., Wang H., Akmaev R., Wu F., Fang T.W., Iredell M., Richmond A.D. Forecasting the dynamic and electrodynamic response to the January 2009 sudden stratospheric warming. *Geophys. Res. Lett.* 2011, vol. 38, L13102. DOI: 10.1029/2011GL047732.

Fuller-Rowell T., Wu F., Akmaev R., Fang T.W., Araujo-Pradere E. A whole atmosphere model simulation of the impact of a sudden stratospheric warming on thermosphere dynamics and electrodynamics. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A00G08. DOI: 10.1029/2010JA015524.

Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.-L., Coster A.J. Unexpected connection between the stratosphere and ionosphere. *Geophys. Res. Lett.* 2010a, vol. 37, L10101. DOI: 10.1029/2010GL043125.

Goncharenko L.P., Coster A.J., Chau J.L., Valladares C.E. Impact of sudden stratospheric warming on equatorial ionization anomaly. *J. Geophys. Res.* 2010b, vol. 115, A00G07. DOI: 10.1029/2010JA015400.

Hedin A.E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1991, vol. 96, A2, pp. 1159–1172.

Jin H., Miyoshi Y., Pancheva D., Mukhtarov P., Fujiwara H., Shinagawa H. Response of migrating tides to the stratospheric sudden warming in 2009 and their effects on the ionosphere studied by a whole atmosphere—ionosphere model GAIA with COSMIC and TIMED/SABER observations. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, A10323. DOI: 10.1029/2012JA017650.

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Liu H., Goncharenko L.P., Tolstikov M.V. Study of the thermospheric and ionospheric response to the 2009 sudden stratospheric warming using TIME-GCM and GSM TIP models: First results. *J. Geophys. Res.* 2015, vol. 120, no. 9, pp. 7873–7888. DOI: 10.1002/2014JA020861.

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Korenkov Yu.N., Bessarab F.S., Karpov I.V., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A. Modeling of response of the thermosphere—ionosphere system to sudden stratospheric warmings of years 2008 and 2009. *Cosmic Res.* 2013, vol. 51, no. 1, pp. 62–72. DOI: 10.1134/S001095251301005X.

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Rozanov E.V., Reddmann T., Zakharenkova I.E., Tolstikov M.V. Application of the models of the middle and upper atmosphere to simulation of total electron content perturbations caused by the 2009 stratospheric warming. *Rus. J. Phys. Chem. B.* 2016, vol. 10, no. 1, pp. 109–116.

Kochetkova O.S., Mordvinov V.I., Rudneva M.A. Analysis of the factors affecting the occurrence of stratospheric warming. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2014, vol. 27, no. 08, pp. 719–727. (In Russian).

Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Klimenko M.V., Bessarab F.S., Korenkova N.A., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Shcherbakov A.A., Sahai Y., Fagundes P.R., de Jesus R., de Abreu A.J., Condor P. The global thermospheric and ionospheric response to the 2008 minor sudden stratospheric warming event. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, A10309. DOI: 10.1029/2012JA018018.

Kotova D.S., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharov V.E. Numerical simulation of the influence of the May 2–3, 2010 geomagnetic storm on HF radio-wave propagation in the ionosphere. *Izvestiya VUZov. Radiofizika*. [Radiophys. Quant. Electr.]. 2014, vol. 57, no. 7, pp. 519–530. (In Russian).

Kotova D.S., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharov V.E., Ratovsky K.G., Nosikov I.A., Zhao B. Using IRI and GSM TIP model results as environment for HF radio wave propagation model during the geomagnetic storm occurred on September 26–29, 2011. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 56, no. 9, pp. 2012–2029. DOI: 10.1016/j.asr.2015.05.009.

Kotova D.S., Zakharov V.E., Klimenko M.V., Klimenko V.V. Development of the model of HF radiowave propagation in the ionosphere. *Khimicheskaya fizika* [Russ. J. Phys. Chem.]. 2015, vol. 34, no. 12, pp. 62–71. (In Russian).

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, vol. 115, A00G07. DOI: 10.1029/2009JA015188.

Liu H., Jin H., Miyoshi Y., Fujiwara H., Shinagawa H. Upper atmosphere response to stratosphere sudden warming: Local time and height dependence simulated by GAIA model. *Geophys. Res. Lett.* 2013, vol. 40, pp. 635–640. DOI: 10.1002/grl.50146.

Mbatha N., Sivakumar V., Malinga S.B. et al. Study on the impact of sudden stratosphere warming in the upper mesosphere-lower thermosphere regions using satellite and HF radar measurements. *Atmos. Chem. Phys.* 2010, vol. 10, pp. 3397–3404.

Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushchenko T.A., Naumova N.M. Global Numerical Model of the Earth's thermosphere, ionosphere and protonosphere. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1990, vol. 30, no. 4, pp. 612–619. (In Russian).

Pancheva D., Mukhtarov P. Stratospheric warmings: The atmosphere–ionosphere coupling paradigm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011, vol. 73, no. 13., pp. 1697–1702. DOI: 10.1016/j.jastp.2011.03.006.

Pedatella N.M., Fang T.-W., Jin H., Sassi F., Schmidt H., Chau J.L., Siddiqui T.A., Goncharenko L. Multimodel comparison of the ionosphere variability during the 2009 sudden stratosphere warming. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016, vol. 121, pp. 7204–7225. DOI: 10.1002/2016JA022859.

Pedatella N.M., Maute A. Impact of the semidiurnal lunar tide on the midlatitude thermospheric wind and ionosphere during sudden stratosphere warmings. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 120, pp. 10,740–10,753. DOI: 10.1002/2015JA021986.

Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N., Pertsev N.N. Sudden stratospheric warming: the role of normal atmospheric modes. *Geomag. Aeron.* 2014, vol. 54, no. 3, pp. 357–372.

Polyakova A.S., Chernigovskaya M.A., Perevalova N.P. Ionospheric effects of sudden stratospheric warmings in eastern Siberia region. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014, vol. 120, pp. 15–23. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.08.011.

Shpynev B.G., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Grigorieva S.A., Stepanov A.E., Bychkov V.V., Pancheva D., Mukhtarov P. High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming. *EPS.* 2015, vol. 67, no. 18. DOI: 10.1186/s40623-015-0187-1.

Wang H., Akmaev R.A., Fang T.-W., Fuller-Rowell T.J., Wu F., Maruyama N., Iredell M.D. First forecast of a sudden stratospheric warming with a coupled whole-atmosphere/ionosphere model IDEA. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, pp. 2079–2089. DOI: 10.1002/2013JA019481.

Woollings T., Charlton-Perez A., Ineson S., Marshall A.G., Masato G. Associations between stratospheric variability and tropospheric blocking. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, D6. DOI: 10.1029/2009JD012742.

Yiğit E., Medvedev A.S. Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 55, no. 5, pp. 983–1003. DOI: 10.1016/j.asr.2014.11.020.

Yue X., Schreiner W.S., Lei J., Rocken C., Hunt D.C., Kuo Y.-H., Wan W. Global ionospheric response observed by COSMIC satellites during the January 2009 stratospheric sudden warming event. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A00G09. DOI: 10.1029/2010JA015466.