
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН НА СОСТОЯНИЕ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ В ПЕРИОД ВНЕЗАПНОГО СТРАТОСФЕРНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

MODELING OF THE EFFECT OF INTERNAL GRAVITY WAVES ON UPPER ATMOSPHERIC CONDITIONS DURING SUDDEN STRATOSPHERIC WARMING

П.А. Васильев

*Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Калининград, Россия, pvasiliev93@gmail.com*

И.В. Карпов

*Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Калининградский филиал ИЗМИРАН,
Калининград, Россия, ivkarpov@inbox.ru*

С.П. Кшевецкий

*Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Калининград, Россия, spkshev@gmail.com*

P.A. Vasilyev

*I. Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russia, pvasiliev93@gmail.com*

I.V. Karpov

*I. Kant Baltic Federal University,
WD IZMIRAN,
Kaliningrad, Russia, ivkarpov@inbox.ru*

S.P. Kshevetskii

*I. Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russia, spkshev@gmail.com*

Аннотация. Представлены результаты моделирования влияния стратосферных внутренних гравитационных волн (ВГВ), возбуждаемых в области развития внезапного стратосферного потепления (ВСП), на состояние верхней атмосферы. В численном эксперименте использовалась двумерная модель распространения атмосферных волн, учитывающая диссипативные и нелинейные процессы, сопровождающие распространение волн. В качестве источника возмущений рассматривались возмущения температуры и плотности в стратосфере в периоды ВСП. Амплитудные и частотные характеристики источника возмущений оценивались из результатов наблюдений и теории ВГВ. Результаты численных расчетов показали, что волны, возникающие в периоды развития ВСП на стратосферных высотах, могут порождать изменения температуры в верхней атмосфере. Максимальные относительные возмущения, создаваемые такими волнами по отношению к невозмущенным условиям, отмечаются на высотах 100–200 км. Возмущения верхней атмосферы, в свою очередь, оказывают влияние на динамику заряженной компоненты в ионосфере и вносят вклад в наблюдаемые ионосферные эффекты ВСП.

Ключевые слова: внутренние гравитационные волны, внезапные стратосферные потепления, моделирование.

Abstract. We present results of modeling of the effect of internal gravity waves (IGW), excited in the region of development of a sudden stratospheric warming (SSW), on upper atmospheric conditions. In the numerical experiment, we use a two-dimensional model of propagation of atmospheric waves, taking into account dissipative and nonlinear processes accompanying wave propagation. As a source of disturbances we consider temperature and density disturbances in the stratosphere during SSWs. Amplitude and frequency characteristics of the source of disturbances are estimated from observations and IGW theory. Numerical calculations showed that waves generated at stratospheric heights during SSW can cause temperature changes in the upper atmosphere. Maximum relative disturbances, generated by such waves, with respect to quiet conditions are observed at 100–200 km. Disturbances of the upper atmosphere in turn have an effect on dynamics of a charged component in the ionosphere and can contribute to observable ionospheric effects of SSW.

Keywords: internal gravity waves, sudden stratospheric warmings, modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) являются важным механизмом связи процессов в нижней и верхней атмосфере. Распространение ВГВ из нижних слоев существенно влияет на многие явления в атмосфере и ионосфере [Pancheva, Mukhtarov, 2011]. Одним из примеров реализации таких связей между

динамикой нижних и верхних атмосферных слоев являются ионосферные возмущения в периоды внезапных стратосферных потеплений (ВСП).

ВСП — явление резкого, до 80° за несколько дней, повышения температуры стратосферы в области высоких широт. Характерный масштаб нагретой области может достигать 4000 км вдоль долготы. ВСП наблюдаются в зимнее время преимуще-

ственно в Северном полушарии [Harada, et al., 2010]. На сегодняшний день накоплено большое количество данных о потеплениях. В то же время до сих пор нет полного теоретического описания механизма возникновения и эволюции ВСП. Наиболее распространенной является гипотеза о взаимодействии зонального ветра и планетарных волн в стратосфере [Labitzke, Kunze, 2009].

Важной особенностью ВСП является их воздействие на атмосферные процессы вне области потепления. В частности, в исследованиях [Pancheva, Mukhtarov, 2011; Polyakova et al., 2014; Шпынев и др., 2013] было отмечено влияние ВСП на различные ионосферные параметры, такие как критическая частота F2-слоя (f_oF2), высота его максимума (h_mF2) и полное электронное содержание (ПЭС). Особый интерес представляют сведения об изменениях параметров ионосферы на нижних широтах, удаленных от области ВСП на тысячи километров [Sumod et al., 2012]. На основании анализа длительных наблюдений было выдвинуто предположение, что причиной реакции верхней атмосферы и ионосферы на ВСП является усиление приливной активности на высотах нижней термосферы, которое приводит к изменению электрических полей в динамо-области ионосферы и соответствующим эффектам в ионосфере. Результаты модельных исследований в целом показывают, что различные схемы усиления приливных вариаций в нижней термосфере в периоды ВСП позволяют качественно воспроизвести пространственно-временные особенности ионосферных возмущений, однако теоретические амплитудные характеристики оказываются значительно меньше наблюдаемых.

Наблюдения показывают, что временная задержка в возникновении возмущений в нижней атмосфере и ионосфере весьма незначительна в сравнении с длительностью существования ВСП и периодами планетарных волн. Можно предположить, что в качестве физического процесса, обеспечивающего быструю реализацию связей динамики нижней и верхней атмосферы, могут выступать ВГВ, возбуждаемые в области возникновения ВСП. В экспериментальных исследованиях действительно приводятся данные наблюдений, свидетельствующие об усилении волновой активности ВГВ в условиях ВСП [Wang, Alexander, 2009]. В теоретическом исследовании [Карпов, Кшевецкий, 2014] показана высокая эффективность таких волн, распространяющихся из нижней атмосферы, в формировании крупномасштабных возмущений верхней атмосферы.

Цель настоящей работы заключается в исследовании возможности возбуждения ВГВ, способных распространяться в верхнюю атмосферу, вследствие возмущений параметров стратосферы в периоды ВСП.

ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Численный эксперимент проводился с использованием двумерной негидростатической модели нейтральной атмосферы, основанной на решении нестационарных гидродинамических уравнений для волновых возмущений с учетом нелинейных и диссипативных процессов при распространении волн, а

также взаимодействия между ними [Kshevetskii, 2001]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} &= \\ &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\xi(z) \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \xi(z) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} &= \\ &= -\frac{\partial P}{\partial z} - \rho g + \frac{\partial}{\partial z} \left(\xi(z) \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \xi(z) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \\ \frac{1}{\gamma - 1} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial P u}{\partial x} + \frac{\partial P w}{\partial z} \right) &= -P \nabla \mathbf{v} + \frac{\partial}{\partial z} K(z) \frac{\partial T}{\partial z} + \\ &+ K(z) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_{vis \cos} + Q(z), \\ Q_{vis \cos} &= \xi(z) \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right\}, \\ Q(z) &= -\frac{\partial}{\partial z} K(z) \frac{\partial T_0}{\partial z}. \end{aligned} \quad (1)$$

где x, z — горизонтальная и вертикальная координаты; ρ — плотность; u, w — горизонтальная и вертикальная компоненты вектора скорости; P — давление; g — ускорение свободного падения; γ — показатель адиабаты; $\xi(z), K(z)$ — коэффициенты вязкости и теплопроводности; $T_0(z)$ — вертикальное распределение температуры в начальном условии; $Q(z)$ параметр, учитывающий дополнительный приток тепла, который обеспечивает стационарность неизотермической атмосферы в отсутствие возмущений; Q_p — источник возмущения плотности.

Численное решение уравнений для параметров атмосферы производилось в области размером 2000 км по горизонтали и 500 км по вертикали от поверхности Земли.

Для моделируемых параметров на нижней границе заданы следующие условия:

$$\begin{aligned} u(x, z=0, t) &= w(x, z=0, t) = 0, \\ T(x, z=0, t) &= T_0(z=0), \\ \rho(x, z=0, t) &= \rho_0(z), \end{aligned}$$

где $\rho_0(z)$ — вертикальное распределение плотности в начальном условии, заданное так же, как и $T_0(z)$, по эмпирической модели [Picone et al, 2002]. На верхней границе ($h=500$ км) заданы условия

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0; \quad w = 0; \quad z = h.$$

На горизонтальных границах области интегрирования ($x=0, 2000$ км) производные моделируемых параметров по координате x равны нулю.

В качестве источника возмущения было задано возмущение температуры и плотности, соответствующее наблюдательным данным о потеплении в январе 2009 г. В период развития этого ВСП, происходившего при низкой солнечной активности и в спокойных геомагнитных условиях, был выполнен

большой объем работ по экспериментальным исследованиям вариаций параметров атмосферы и ионосферы. В частности, имеются данные лидарного зондирования, позволяющие восстановить температурный профиль над ВСП и его отклонение от невозмущенного [Куркин и др., 2011; Шпынев и др., 2013]. На основании этих сведений, данных о временной изменчивости температуры на различных высотах [Jin et al., 2012] и теории распространения ВГВ [Григорьев, 1999] была разработана модель температурных возмущений в стратосфере в период ВСП.

С помощью анализа наблюдений в стратосфере [Шпынев и др., 2013] в вариациях температуры были выделены две зависящие от времени компоненты — долгопериодическая с периодом 20 дней и амплитудой 80 К, и короткопериодическая с амплитудой 7 К, периодом 30 мин, локализованные на высоте $z \sim 35$ км в области с вертикальным масштабом 10 км.

В численном эксперименте модельный источник локализован в горизонтальном направлении x . Амплитуда возмущений максимальна при $x=0$ и уменьшается с удалением от левой границы области моделирования. Такой выбор расположения источника соответствует моделированию широтной структуры южной половины области потепления. В соответствии с теорией ВГВ поляризационные соотношения для крупномасштабных волн с частотой, значительно меньшей частоты Брента — Вьяйсяля, позволяют определить возмущение плотности, связанное с ВГВ:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta \rho}{\rho}, \quad (2)$$

где ΔT и $\Delta \rho$ — возмущения температуры и плотности соответственно, T и ρ — их фоновые значения.

Таким образом, источник возмущений в (1) описывается следующими выражениями:

$$\Delta T = \exp\left(-\frac{x^2}{x_s^2}\right) \times \left[A_1 \frac{T_1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_1}\right) + A_2 \frac{T_2}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_2}\right) \sin\left(\frac{2\pi z}{T_z}\right) \right] \times \exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{z_s^2}\right), \quad (3)$$

$$Q_\rho = \frac{\rho}{T} \frac{\partial \Delta T}{\partial t},$$

где $A_1=80$, $A_2=7$, $x_s=500$ км, $z_0=35$ км, $z_s=7$ км, $T_1=20$ сут, $T_2=30$ мин, $T_z=10$ км.

Из (3) следует, что амплитуда источника быстро падает в горизонтальном направлении и к 800 км составляет несколько процентов от максимума. Эту область можно условно считать горизонтальной границей источника.

В начальный момент проведения численного расчета динамические параметры соответствуют невозмущенному состоянию атмосферы, заданному по эмпирической модели [Picone et al., 2002]. Источник возмущения работал непрерывно во время численного эксперимента на протяжении 12 ч.

Модельный источник стратосферных возмущений определяет частоту колебаний параметров ат-

мосферы в локализованной области. Пространственная и временная структура возникающих возмущений будет определяться широким спектром волн, возбуждаемых таким колебательным процессом в неоднородной атмосфере, а также их взаимодействием при распространении в верхнюю атмосферу. Амплитудные возмущения параметров стратосферного источника, определяемые долгопериодическим и короткопериодическим процессами, на временном интервале, равном длительности численного эксперимента, сопоставимы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 показаны пространственные распределения возмущений температуры по отношению к начальному состоянию атмосферы в различные моменты времени после начала численного эксперимента. На начальном этапе расчетов в течение первого часа моделирования наблюдался переходный процесс, выражавшийся в нагреве области непосредственно над источником у левой границы моделируемого пространства (рис. 1, а). Через 2.5 ч после начала расчета на высотах более 100 км можно отметить волновой процесс, направленный к расширению области возмущений в горизонтальном направ-

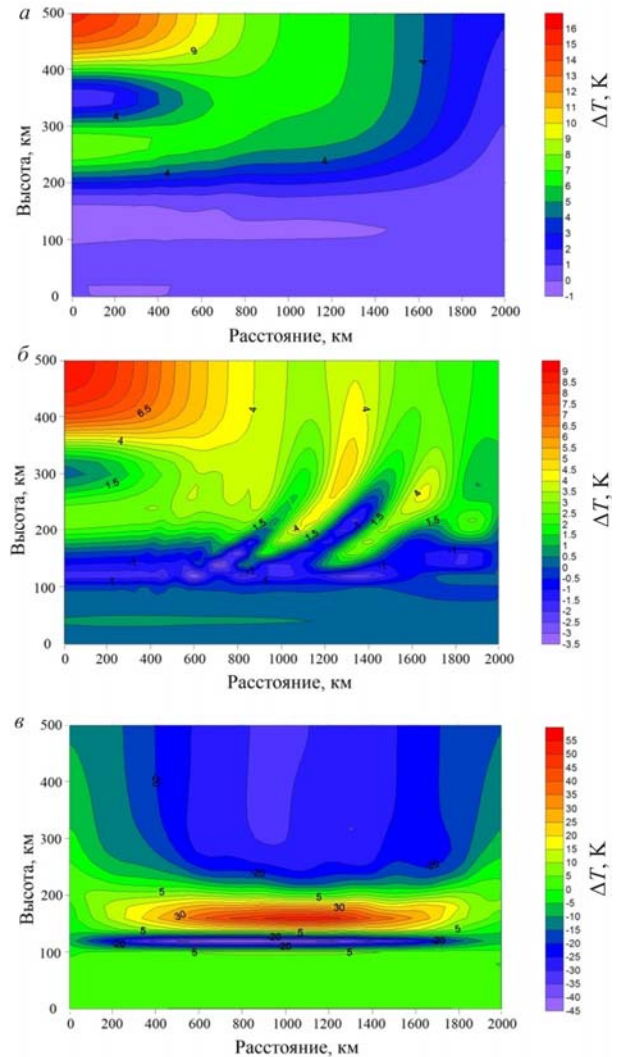


Рис. 1. Распределение возмущений температуры через 1 (а), 2.5 (б) и 10 ч (в) после начала расчета

лении и формированию области максимальных возмущений над горизонтальной границей источника в стратосфере.

По мере продолжения расчета амплитуда возмущения растет в интервале высот от 100 до 200 км, при этом максимум возмущения смещается к горизонтальной границе источника. После 10 ч расчетов амплитуда возмущений достигает 50 К (рис. 1, в). На рис. 2 показаны пространственные распределения температуры верхней атмосферы для двух моментов времени после начала численного эксперимента. Видно, что развивающийся волновой процесс отражается в вариациях температуры верхней атмосферы. Максимальные амплитуды возмущения фоновой температуры составляют ~40–60 К и отмечаются над горизонтальной границей источника (рис. 2), а их период составляет ~3 ч.

Таким образом, результаты проведенного численного эксперимента показывают, что возмущения температуры и плотности, возникающие на стратосферных высотах в периоды развития ВСП, быстро, в течение нескольких часов, распространяются на высоты верхней атмосферы и порождают изменения состояния среды. Максимальные относительные возмущения температуры по отношению к спокойным условиям наиболее выражены в области высот 100–200 км над горизонтальной границей источника. Как следует из результатов расчетов, периоды возмущений верхней атмосферы не совпадают с периодами колебаний, генерируемых стратосферным источником. Это связано с тем, что колебательный процесс в стратосфере возбуждает широкий спектр волновых возмущений, определяемый частотой вынужденных колебаний и пространственными размерами источника, а также нелинейными и диссипативными процессами, сопровождающими распространение волн в верхнюю атмосферу.

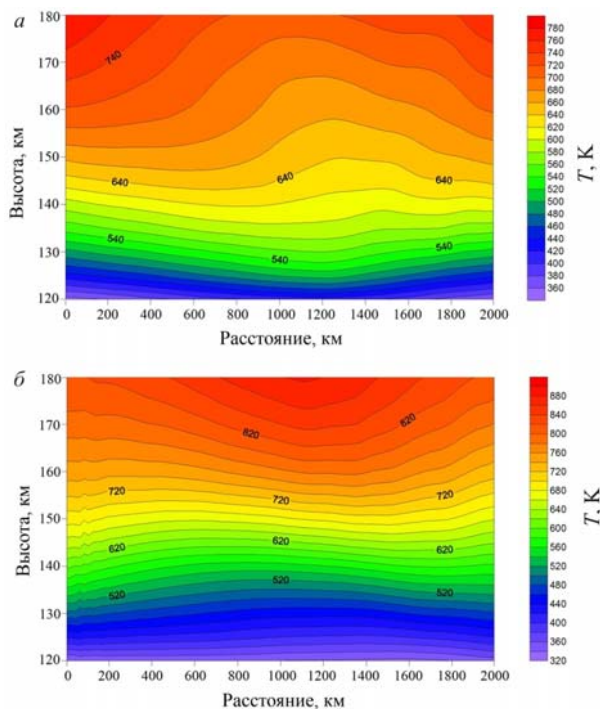


Рис. 2. Распределение фоновой температуры через 10 (а) и 12 ч (б) после начала расчета

Очевидно, что такие возмущения верхней атмосферы, в свою очередь, будут оказывать воздействие на динамику заряженной компоненты ионосферы. Предлагаемый механизм возмущения верхней атмосферы действует независимо от возмущений приливных вариаций которые, как правило, рассматриваются в моделировании ионосферных эффектов ВСП. Следовательно, ионосферные возмущения, инициированные ВГВ от стратосферных источников, можно рассматривать как дополнительный вклад в наблюдаемые ионосферные эффекты ВСП. Следует отметить, что численный эксперимент был проведен с двумерной моделью, и, таким образом, его результаты не могут в полной мере отражать динамику реальной атмосферы, поскольку при таком времени существования крупномасштабной неоднородности необходимо учитывать действие силы Кориолиса, т. е. переходить к трехмерному рассмотрению. В то же время влияние стратосферного источника ВГВ на состояние и волновую активность верхней атмосферы регистрируется в наблюдениях и подтверждается результатами численного моделирования.

Работа выполнена при поддержке гранта ГЗ МОН РФ № 3.1127.2014/К и гранта РФФИ № 15-05-01665.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Григорьев Г.И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 1. С. 3–25.

Карпов И.В., Кшевецкий С.П. Механизм формирования крупномасштабных возмущений в верхней атмосфере от источников АГВ на поверхности земли // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54, № 4. С. 553–562.

Куркин В.И., Черниговская М.А., Марычев В.Н. и др. Особенности проявления зимних внезапных стратосферных потеплений в период 2008–2010 гг. над регионами Сибири и Дальнего Востока России по данным лидарных и спутниковых измерений температуры // Солнечно-земная физика. 2011. Вып. 17. С. 166–173.

Шпынев Б.Г., Панчева Д., Мухтаров П. и др. Отклик ионосферы над регионом Восточной Сибири во время внезапного стратосферного потепления 2009 г. по данным наземного и спутникового радиозондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 1. С. 153–163.

Narada Y., Goto A., Hasegawa H., Fujikawa N. A major stratospheric sudden warming event in January 2009 // J. Atmos. Sci. 2010. V. 67. P. 2052–2069. DOI: 10.1175/2009JAS3320.1.

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. N A10323. DOI: 10.1029/2012JA017650.

Kshevetskii S.P. Modeling of propagation of internal gravity waves in gases // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2001. V. 41, N 2. P. 273–288.

Labitzke K., Kunze M. On the remarkable Arctic winter 2008/2009 // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. N D00102. DOI: 10.1029/2009JD012273.

Pancheva D., Mukhtarov P. Stratospheric warmings: The atmosphere-ionosphere coupling paradigm // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2011. V. 73. P. 1697–1702.

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N A12. P. 1468–1483. DOI: 10.1029/2002JA009430.

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.

Sumod S.G., Pant T.K., Lijo J., et al. Signatures of sudden stratospheric warming on the equatorial ionosphere–thermosphere system // *Planetary and Space Sci.* 2012. V. 63–64. P. 49–55.

Wang L., Alexander M.J. Gravity wave activity during stratospheric sudden warmings in the 2007–2008 Northern Hemisphere winter // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. N D18108. DOI: 10.1029/2009JD011867.

REFERENCES

Grigoriev G.I. Acoustic-gravity waves in the Earth's atmosphere (review). *Izvestiya Vuzov. Radiophysica* [Radio Physics and Quantum Electronics] 1999, vol. XLII, no. 1, pp. 3–25. (In Russian).

Harada Y., Goto A., Hasegawa H., Fujikawa N. A major stratospheric sudden warming event in January 2009. *J. Atm. Sci.* 2010, vol. 67, pp. 2052–2069. DOI: 10.1175/2009JAS3320.1.

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.

Karpov I.V., Kshevetskii S.P. Mechanism of formation of large-scale disturbances in the upper atmosphere by acoustic gravity wave sources on the Earth's surface. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2014, vol. 54, no. 4, pp. 553–562. (In Russian).

Kshevetskii S.P. Modeling of propagation of internal gravity waves in gases. *Computational Mathematics and Mathematical Physics.* 2001, vol. 41, no 2. pp. 273–288.

Kurkin V.I., Chernigovskaya M.A., Marychev V.N., Nikolashkin S.V., Bychkov V.V. Effects of winter sudden stratospheric warmings over Siberia and Russian Far East in 2008–2010 according to lidar and satellite measurements of temperature. *Solnechno-Zemnaya Fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2011, vol. 17, pp. 166–173. (In Russian).

Labitzke K., Kunze M. On the remarkable Arctic winter 2008/2009. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, no. D00102. DOI: 10.1029/2009JD012273.

Pancheva D., Mukhtarov P., Stratospheric warmings: The atmosphere-ionosphere coupling paradigm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011, vol. 73, pp. 1697–1702.

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C., NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, no. A12, pp. 1468–1483. DOI: 10.1029/2002JA009430.

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.

Shpynev B.G., Pancheva D., Mukhtarov P., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Stepanov A.E. Ionosphere response over Eastern Siberia during the 2009 sudden stratospheric warming from data of ground-based and satellite radio sounding. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa* [Current problems in remote sensing of the earth from space]. 2013, vol. 10, no 1, pp. 153–163. (In Russian).

Sumod S.G., Pant T.K., Lijo J., Hossain M.M., Kumar K.K. Signatures of sudden stratospheric warming on the equatorial ionosphere–thermosphere system. *Planetary and Space Sci.* 2012, vol. 63–64, pp. 49–55.

Wang L., Alexander M.J. Gravity wave activity during stratospheric sudden warmings in the 2007–2008 Northern Hemisphere winter. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, no. D18108. DOI: 10.1029/2009JD011867.