Вариации электронной концентрации ионосферы в периоды внезапных стратосферных потеплений в Арктическом регионе

А.С. Полякова

Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, Россия, Иркутск E-mail: annpol@iszf.irk.ru

Проведено исследование динамики ионосферы в Арктическом регионе России в периоды внезапных стратосферных потеплений (ВСП). Рассмотрено двенадцать случаев ВСП, произошедших в Северном полушарии в период с 2006 г. по 2013 г. Для анализа состояния ионосферы использовались данные вертикального зондирования, полученные на ионозонде в Норильске (88,0° в.д., 69,2° с.ш.). Для выявления возможной реакции ионосферы на события ВСП проведен анализ отклонений максимальной электронной концентрации F2-слоя ионосферы ($N_m F2$) от фонового уровня. На примере большого числа событий показано, что, несмотря на спокойную геомагнитную обстановку, в периоды внезапных стратосферных потеплений наблюдаются существенные изменения состояния ионосферы. Во время фазы развития и максимума ВСП отмечается уменьшение значений $N_m F2$ на 5–10% относительно фонового уровня. После максимума ВСП в течение 10–20 дней, напротив, регистрируется существенное превышение $N_m F2$ над среднемесячными значениями. Причем данные изменения электронной концентрации наблюдаются как в период сильных, так и слабых стратосферных потеплений и регистрируются преимущественно в дневное время. Предположено, что наблюдаемые эффекты ВСП в полярной ионосфере могут быть связаны с изменениями нейтрального состава на высотах термосферы, влияющими на электронную концентрацию в максимуме F2-слоя.

Ключевые слова: внезапные стратосферные потепления, ионосферные возмущения

Одобрена к печати: 03.11.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-175-184

Введение

Ионосфера представляет собой сложную динамическую систему, поведение которой связано не только с изменениями магнитного поля Земли и процессами на Солнце, но и с состоянием нейтральной атмосферы. Результаты современных исследований убедительно показывают, что степень воздействия источников, располагающихся в приземных слоях атмосферы (тропосфере, стратосфере), на состояние ионосферной плазмы может быть существенной (Kazimirovsky, 2002; Lastovicka, 2006; Черниговская и др., 2014), что обуславливает все возрастающий интерес к анализу атмосферно-ионосферных связей.

Внезапными стратосферными потеплениями (ВСП) называют сильные непредсказуемые повышения температуры (\geq 50°) в зимней полярной и околополярной стратосфере, продолжающиеся в течение нескольких суток или недель и охватывающие большую часть полушария. В периоды ВСП происходит разрушение и/или смещение зимнего циркумполярного вихря и формируется стратосферный полярный антициклон (Charlton, Polvani, 2007). Стратосферные потепления подразделяют на слабые, типа «minor», и значительные, или сильные, типа «major» (Schoeberl, 1978). Сильные потепления характеризуются сменой знака меридионального градиента температуры над полушарием и направления зональной стратосферной циркуляции на высоте 10 гПа с западного на восточное. Характерная особенность сильных потеплений состоит также в интенсификации горизонтальных градиентов давления, с которой связаны очень сильные ветры, до 120–200 м/с. Усиление ветра обычно на 8–10 дней предшествует потеплению. Возвращение стратосферы к нормальному режиму (т.н. стадия восстановления) происходит медленнее, чем развитие потепления. В мезосфере во время ВСП наблюдается остывание воздуха над зоной потепления в стратосфере (Labitzke, 1972). В результате происходит глобальное изменение динамики полярной и околополярной атмосферы в диапазоне высот от стратосферы до нижней термосферы (Medvedeva et al., 2015).

Развитие ВСП обусловливается интенсификацией и проникновением из тропосферы планетарных волн и их взаимодействием с западным стратосферным потоком. Результатом такого взаимодействия является диссипация волн с выделением большого количества волновой энергии, что приводит к увеличению температуры стратосферы (Matsuno, 1971). В свою очередь, усиление волновой активности и существенные изменения атмосферной циркуляции в периоды ВСП могут оказывать влияние на состояние ионосферной плазмы.

Так, наличие корреляции между стратосферной температурой и вариациями электронной плотности нижней ионосферы (D-слой) во время сильных стратосферных потеплений показано в работе (Kazimirovsky, 2002). Анализ поведения полного электронного содержания (ПЭС) выявил присутствие крупномасштабных волновых вариаций в экваториальной ионосфере во время ВСП (Goncharenko et al., 2010a, b; Chau et al., 2012). Авторы работы (de Paula et al., 2015) зарегистрировали существенное уменьшение интенсивности мерцаний сигналов навигационной системы GPS на низких широтах в периоды ВСП. Уменьшение суточного максимума ПЭС и интенсивности дневного свечения атмосферы в длине волны 630 нм в экваториальном регионе во время ВСП 2008 г. зарегистрировано в (Sumod et al., 2012).

На основе данных профилей электронной плотности спутника COSMIC во время ВСП 2009 г. авторы работы (Yue et al., 2010) выявили увеличение максимальной частоты и высоты максимума F-слоя ионосферы в утренние часы и уменьшение указанных параметров в послеполуденные часы относительно значений, регистрируемых в спокойные дни. Отрицательные отклонения f_oF2 порядка 0,7–0,8 МГц, а также высоты главного максимума ионизации в ионосфере экваториальных и средних широт в период ВСП 2007/2008 и 2008/2009 годов зарегистрированы в работе (Pancheva, Mukhtarov, 2011).

Результаты исследования динамики среднеширотной ионосферы в периоды сильных ВСП на сети ионозондов (Shpynev et al., 2015) показали, что интенсивность и знак эффектов ВСП зависит от местоположения пункта наблюдения относительно зоны стратосферной циркуляции, при этом максимальные вариации параметров F2-слоя наблюдаются вблизи тех границ между циклоном и антициклоном, где циркуляция направлена к северу. В работе (Polyakova et al., 2014) выявлено, что в течение сильных ВСП в ионосфере средних широт регистрируется уменьшение суточной амплитуды ПЭС.

Однако, несмотря на большое количество обнаруженных ранее эффектов ВСП, особенности поведения ионосферы во время стратосферных потеплений в высокоширотном регионе в области, располагающейся непосредственно над очагом (центром) ВСП, изучены в значительно меньшей степени. В данной работе исследуются вариации ионосферных параметров в арктическом регионе России во время стратосферных потеплений, произошедших с 2006 г. по 2013 г.

Внезапные стратосферные потепления в 2006-2013 гг.

В период с 2006 г. по 2013 г. рассмотрено 12 внезапных стратосферных потеплений, произошедших в Северном полушарии (*табл. 1*). Среди указанных событий шесть потеплений относилось к типу «major», т.е. во время данных событий на широте 60° с.ш. было зарегистрировано изменение направления среднезонального зонального ветра с западного на восточное на высоте 10 гПа (~ 30 км).

N₂	зимний период	максимум ВСП	mun ВСП	центр ВСП	$T_{102\Pi a}, \circ C$	$\left< AE \right>,$ HT	F _{10.7} , c.e.n.
1	2005/2006	21.01.2006	major	30,0° в.д., 65,0° с.ш.	-17,2	126	90,9
2	2007/2008	05.02.2007	minor	107,5° в.д., 67,5° с.ш.	-24,1	43	80,7
3	2007/2008	24.02.2007	major	82,5° в.д., 62,5° с.ш.	-23,5	74	73,9
4	2008/2009	24.01.2008	minor	112,5° в.д., 77,5° с.ш.	-7,9	109	69,1
5	2008/2009	05.02.2008	minor	102,5° в.д., 77,5° с.ш.	-11,5	75	68,5
6	2008/2009	16.02.2008	minor	127,5° в.д., 77,5° с.ш.	-27,9	110	68,6
7	2008/2009	22.02.2008	major	45,0° в.д., 65,0° с.ш.	-2,0	66	70,1
8	2009/2010	24.01.2009	major	-17,5° в.д., 77,5° с.ш.	-3,7	12	66,6
9	2010/2011	30.01.2010	major	80,0° в.д., 60,0° с.ш.	-14,8	68	72,8
10	2010/2011	01.02.2011	minor	157,5° в.д., 70,0° с.ш.	-20,5	28	89,0
11	2011/2012	11.01.2012	minor	120,0° в.д., 62,5° с.ш.	-12,0	76	116,1
12	2012/2013	06.01.2013	major	105,0 в.д., 67,5° с.ш.	-12,1	30	137,5

Таблица 1. Параметры внезапных стратосферных потеплений

В *табл. 1* перечислены дни максимумов ВСП, значения максимальной температуры стратосферы в соответствующие дни, а также координаты центров ВСП. Для сильных потеплений максимумом считался день, когда на уровне 10 гПа зарегистрировано изменение направления среднезонального ветра. Для слабых потеплений за максимум принимался день, когда на широте $\geq 60^{\circ}$ с.ш. на уровне 10 гПа наблюдалась наибольшая температура. Область, в которой регистрировалось максимальное значение температуры стратосферы, считалась центром ВСП. Высотные распределения зонально-усредненной скорости зонального ветра на широте 60° с.ш. по данным ассимиляционного метеорологического архива UK Met Office (http://badc.nerc.ac.uk/home/index.html) для рассматриваемых событий показаны на *puc. 1*.

Анализ вариаций стратосферной температуры проводился на основе данных метеорологического архива NCEP/NCAR Reanalysis (http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/ reanalysis/). Пространственные распределения стратосферной температуры на уровне 10 гПа в дни максимумов потеплений показаны на *рис. 2*. Для всех случаев в полярном регионе отчетливо наблюдается формирование области повышенных температур. Наиболее высокие значения температур регистрировались для ВСП в 2007/2008, 2008/2009 и 2012/2013 годах. (*рис. 2в, г, з*), наименьшие – для ВСП 2006/2007 и 2010/2011 годов (*puc. 26, e*). За исключением стратосферного потепления 2008/09 гг., центр всех рассмотренных ВСП располагался в азиатском регионе России. Центр потепления 2008/2009 гг. находился над северной частью Атлантического океана и был наиболее удален от Норильска (*puc. 2г*).



Рис. 1. Высотные распределения среднезонального зонального ветра на широте 60° с.ш. Максимумы ВСП отмечены вертикальными пунктирами: сильных – красным, слабых – синим



Рис. 2. Распределения температуры стратосферы на уровне 10 гПа (~30 км) в дни максимумов ВСП

Выбранные для исследования годы характеризовались относительно низкой солнечной и геомагнитной активностью. В *табл. 1* приведены величины среднесуточного значения индекса *AE* (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp), характеризующего возмущенность геомагнитного поля на высоких широтах, а также потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см ($F_{10.7}$, ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/) в дни максимумов ВСП. Видно, что в периоды максимального развития всех рассматриваемых потеплений геомагнитных возмущений не регистрировалось (геомагнитная обстановка считалась спокойной, когда *AE* не превышал 600 нТл). Следует отметить, что в течение события 2012/2013 гг. произошел значительный рост уровня солнечной активности более чем на 50%. (с 29 декабря по 11 января). Однако авторы работ (Goncharenko et al., 2013; Polyakova et al., 2014) показали, что наблюдаемые в данный период вариации экваториальной и среднеширотной ионосферы не могут объясняться полностью изменениями гелиофизических условий и требуют другой интерпретации.

2. Динамика N_mF2 в Норильске

Для исследования поведения полярной ионосферы в периоды ВСП использовались данные вертикального зондирования, полученные на дигизонде в Норильске (88,3° в.д., 69,3° с.ш.). Из исходных данных максимальной электронной концентрации F2-слоя (*N_mF2*) рассчитывались ряды отклонений от фонового уровня:

$$dN_m F2_i(t) = N_m F2_i(t) - \langle N_m F2 \rangle_i(t).$$
⁽¹⁾

Фоновые величины $\langle N_m F2 \rangle(t)$ вычислялись путем усреднения значений $N_m F2$ за 15 геомагнитно-спокойных дней до и 15 – после каждого текущего дня:

$$\langle N_m F2 \rangle_i(t) = \frac{1}{30} \sum_{j=i-15}^{i+15} N_m F2_j(t).$$
 (2)

Суточно-временная динамика полученных отклонений в зимние периоды 2006–2013 гг. показана на *рис. 3*. На каждой панели по вертикали отложено местное время, по горизонтали – дни с января по февраль каждого года (с декабря по февраль для зимы 2012/2013 гг., *рис. 33*). Черными кривыми показаны вариации индексов *AE* и *F*₁₀₇.

Видно, что на протяжении фазы развития потеплений (10–15 дней до максимума ВСП) регистрируются отрицательные отклонения N_mF2 в дневные часы, т.е. значения электронной концентрации в F2-слое были пониженными относительно фона в этот период. Для большинства событий в вечерние и утренние часы отклонения N_mF2 , напротив, положительные. После максимумов ВСП (как типа «major», так и «minor») в околополуденные часы на протяжении 10–15 дней регистрируются значительные положительные отклонения N_mF2 , что говорит о существенном превышении максимальной электронной концентрации относительно фонового уровня. Величина наблюдаемых отклонений составляет порядка от 5% до 10% от уровня ионизации в данный период суток. Подобное поведение dN_mF2 наблюдается для всех рассмотренных событий ВСП, за исключением потепления зимы 2008/09 гг. В период развития этого ВСП значения dN_mF2 в дневные часы были положительными, а интенсивность отклонений была заметно ниже в сравнении с величинами, регистрируемыми в периоды других ВСП (puc. 3c). Это может быть связано с отличиями данного события, описанными в разделе 1.



Рис. 3. Динамика отклонений NmF2 от фонового уровня, пунктирами показаны максимумы ВСП типа «major» (MSSW) и «minor» (mSSW). Черной кривой на каждой панели нанесены вариации индекса AE, а также потока радиоизлучения Солнца F₁₀₇

Следует также отметить, что во всех случаях не наблюдается корреляции указанных вариаций электронной концентрации с поведением гелио- и геомагнитных индексов. В том числе это относится и к стратосферному потеплению 2012/2013 гг., максимум которого совпал с периодом значительного роста уровня солнечной активности. Видно, что существенное превышение электронной концентрации в дневные часы продолжает наблюдаться в течение более 20 дней после того, как $F_{10.7}$ уменьшился до среднего уровня. А согласно *рис.* 13, возмущения динамического режима средней атмосферы, связанные с этим событием ВСП, наблюдались до начала февраля, что соответствует продолжительности наблюдаемых ионосферных вариаций.

Для ВСП типа «major», произошедших в конце зимы (2007 г., 2008 г., *puc. 16, в*) реакция ионосферы не выражена. Это может быть связано с тем, что в конце зимы состояние полярной нейтральной атмосферы существенно изменяется, переходя к весенним условиям, а фоновая электронная концентрация ионосферы возрастает относительно уровня, характерного в зимний период. Все это может являться причиной отсутствия ионосферных эффектов, связанных с данными стратосферными событиями.

3. Обсуждение и заключение

Анализ поведения высокоширотной ионосферы в зимние месяцы 2006–2013 гг. показал, что, несмотря на спокойную геомагнитную обстановку, в периоды внезапных стратосферных потеплений наблюдаются существенные изменения состояния ионосферы. На примере большого числа событий показано, что во время фазы развития и максимума ВСП отмечается уменьшение дневных значений N_mF2 на 5–10% относительно фонового уровня ионизации, ночные значения, напротив, увеличиваются. После максимума ВСП в течение 10–20 дней регистрируется существенный рост N_mF2 .

Усиление интенсивности стационарных планетарных волн (СПВ), сопровождающее события ВСП, является основным источником глобальных изменений в атмосфере в периоды стратосферных потеплений. Так, моделирование, выполненное в работе (Bessarab et al., 2012), показало, что отклонения электронной плотности в F2-области ионосферы во время ВСП могут быть вызваны возмущениями на нижней границе термосферы в форме СПВ, распространяющихся от нижележащих слоев. Установлено, что изменения электрических полей, возникающие в результате нелинейного взаимодействия СПВ с атмосферными приливами (Pedatella, Forbes, 2010) в периоды ВСП, являются основным механизмом формирования возмущений в экваториальной ионосфере (Chau et al., 2010; Klimenko et al., 2013). Кроме того, в работе (Gardner, Liu, 2010) выявлены изменения состава нейтральной атмосферы, которые также могут отражаться на электронной концентрации.

Результаты модельных расчетов (Klimenko et al., 2013) показали, что в области потепления происходит глобальная перестройка температурного режима термосферы. Увеличение температуры на высотах нижней термосферы приводит к уменьшению соотношения

 $\binom{n(O)}{n(N_2)}$, что в свою очередь приводит к уменьшению электронной концентрации

в максимуме F2-слоя, подобно процессам, происходящим во время геомагнитных бурь. Следует заметить, что данный механизм хорошо описывает выявленное в настоящей работе уменьшение N_mF2 в период максимальной фазы потеплений. Однако для интерпретации наблюдаемого увеличения N_mF2 после максимумов ВСП требуется проведение дальнейших исследований.

Автор выражает благодарность Ратовскому К.Г за предоставленные данные вертикального зондирования станции Норильск, Центру изучения атмосферы National Centers for Environmental Prediction (NCEP) за метеоданные архива NCEP/NCAR Reanalysis, а также Центру UK Met Office service за данные архива UKMO Reanalysis и British Atmospheric Data Centre за предоставление доступа к этим данным.

Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 16-35-60018 и гранта № НШ-6894.2016.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

Литература

- 1. Черниговская М.А., Сутырина Е.Н., Ратовский К.Г. Метеорологические эффекты ионосферной возмущенности над Иркутском по данным вертикального радиозондирования // Современные проблемы дис-
- танционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. \mathbb{N}_2 2. С. 264–274. Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpov I.V., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A. 2 Modeling the effect of sudden stratospheric warming within the thermosphere–ionosphere system // J. of Atmos. and Solar-Terr. Phys. 2012. Vol. 90-91. P. 77-85
- *Charlton A.J., Polvani L.M.* A New look at stratospheric sudden warmings. Part I: climatology and modeling benchmarks // J. Climate. 2007. Vol. 20. P. 449–469. 3
- Chau J.L., Aponte N.A., Cabassa E., Sulzer M.P., Goncharenko L.P., Gonzalez S.A. Quiet time ionospheric variabi-4. lity over Arecibo during sudden stratospheric warming events // J. of Geophys. Res.: Space Phys. 2010. Vol. 115. Issue A9.
- Chau J.L., Goncharenko L.P., Fejer B.G., Liu H.L. Equatorial and low latitude ionospheric effects during sudden 5 stratospheric warming events // Space Sci. Rev. 2012. Vol. 168. P. 385-417.
- Gardner C.S., Liu A.Z. Wave-induced transport of atmospheric constituents and its effect on the mesospheric Na layer // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. D20302. DOI:10.1029/2010JD014140.
- Goncharenko L.P., Chau J.L., Condor P., Coster A., Benkevitch L. Ionospheric effects of sudden stratospheric war-7. ming during moderate-to-high solar activity: Case study of January 2013 // Geophys. Res. Lett. 2013. Vol. 40. P. 1-5.
- Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.L., Coster A.J. Unexpected connections between the stratosphere and iono-8 sphere // Geophys. Res. Lett. 2010a. Vol. 37. L10101.
- *Goncharenko L.P., Coster A.J., Chau J.L., Valladares C.E.* Impact of sudden stratospheric warmings on equatorial ionization anomaly // J. Geophys. Res. 2010b. Vol. 115. Issue A10. 9
- 10. Kazimirovsky E.S. Coupling from below as a source of ionospheric variability: a review // Ann. of Geophys. 2002. Vol. 45. No. 1. P. 1–29.
- 11. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Koren'kov Y.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 Research. 2013. Vol. 51. No. 1. P. 54-63. DOI: 10.1134/S001095251301005X.
- 12. *Labitzke K*. Temperature changes in the mesosphere and stratosphere connected with circulation changes in winter // J. Atm. Sci. 1972. Vol. 29. P. 756–766.
- 13. Lastovicka J. Forcing of the ionosphere by waves from below // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2006. Vol. 68. P. 479-497
- 14. *Matsuno T.* A dynamical model of the Stratospheric Sudden Warming // J. Atm. Sci. 1971. Vol. 28. P. 1479–1494. 15. *Medvedeva I., Medvedev A., Ratovsky K., Shcherbakov A., Tolstikov M.* Comprehensive study of disturbances of
- Medvedev I., Medve
- Solar-Terr. Phys. 2011. Vol. 73. P. 1697-1702.
- 17. de Paula E.R., Jonah O.F., Moraes A.O., Kherani E.A., Fejer B.G., Abdu M.A., Muella M.T.A.H., Batista I.S., Dutra S.L.G., Paes R.R. Low-latitude scintillation weakening during sudden stratospheric warming events // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. Vol. 120. P. 2212–2221. DOI:10.1002/2014JA020731.
 Pedatella N.M., Forbes J.M. Evidence for stratosphere sudden warming ionosphere coupling due to vertically
- propagating tides // Geophys. Res. Lett. 2010. Vol. 37. L11104.
- Polyakova A.S., Chernigovskaya M.A., Perevalova N.P. Ionospheric Effects of Sudden Stratospheric Warmings in Eastern Siberia Region // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2014. Vol. 120. P. 15–23. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.08.011.
- 20. Schoeberl M.R. Stratospheric warmings: Observations and theory // Rev. Geophys. 1978. Vol. 16 (4). P. 521–538. DOI: 10.1029/RG016i004p00521.
- 21. 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 majorstratospheric warming // Earth Planets and Space. 2015. Vol. 67. No.18. DOI: 10.1186/s40623-015-0187-1.
- 22. Sumod S.G., Pant T.K., Jose Lijo, Hossain M.M., Kumar K.K. Signatures of Sudden Stratospheric Warming on the Equatorial Ionosphere-Thermosphere System // Planet. Space Sci. 2012. Vol. 63–64. P. 49–55.

Ionospheric electron density variations during sudden stratospheric warming in the Arctic region

A.S. Polyakova

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, 664033 Irkutsk, Russia *E-mail: annpol@iszf.irk.ru*

The ionospheric dynamic in the Russia's Arctic region during the periods of sudden stratospheric warming (SSW) is studied. The analysis was performed based on the vertical sounding data from the ionosonde in Norilsk (88.0°E. 69.2°N). I considered twelve SSW events that occurred in the Northern Hemisphere 2006 through 2013. To identify a possible ionospheric response to the SSW events, I analyzed the F2-layer maximum electron density (N_F2) deviations from the background level. For a large number of events, it is shown that, despite quiet geomagnetic conditions, a significant decrease in the N_mF2 values (by 5-10% relative to the background level) is observed during the SSW evolution and maximum phases. On the contrary, for 10-20 days after the SSW maxima, N_mF2 significantly exceeds the monthly averaged values. Moreover, these electron density changes are observed for both "strong and weak stratospheric warmings, and are recorded mainly during daytime. The observed SSW effects in the polar ionosphere are assumed to be probably associated with the changes in the neutral composition at the thermospheric heights that affect the electron density at the F2-layer maximum.

Keywords: sudden stratospheric warming, ionospheric disturbances

Accepted: 03.11.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-175-184

References

- 1. Chernigovskaya M.A., Sutyrina E.N., Ratovsky K.G., Meteorologicheskie effekty ionosfernoi vozmushchennosti nad Irkutskom po dannym vertikal'nogo radiozondirovaniya (Meteorological effects of ionospheric disturbances over Irkutsk according to vertical radio sounding data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 264–274 (in Russian). Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpov I.V., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A.,
- 2. Modeling the effect of sudden stratospheric warming within the thermosphere-ionosphere system, J. of Atmos.
- and Solar-Terr. Phys., 2012, Vol. 90–91, pp. 77–85. Charlton A.J., Polvani L.M., A New look at stratospheric sudden warmings. Part I: climatology and modeling benchmarks, J. Climate, 2007, Vol. 20, pp. 449–469. 3.
- Chau J.L., Aponte N.A., Cabassa E., Sulzer M.P., Goncharenko L.P., Gonzalez S.A., Quiet time ionospheric 4. variability over Arecibo during sudden stratospheric warming events, J. of Geophys. Res.: Space Phys., 2010, Vol. 115, Issue A9.
- 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.*, 2012, Vol. 168, pp. 385–417. 5.
- Gardner C.S., Liu A.Z., Wave-induced transport of atmospheric constituents and its effect on the mesospheric Na layer, *J. Geophys. Res.*, 2010, Vol. 115, D20302. DOI:10.1029/2010JD014140. 6
- 7. Goncharenko L.P., Chau J.L., Condor P., Coster A., Benkevitch L., Ionospheric effects of sudden stratospheric warming during moderate-to-high solar activity: Case study of January 2013, Geophys. Res. Lett., 2013, Vol. 40,
- pp. 1–5. Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.L., Coster A.J., Unexpected connections between the stratosphere and iono-8. sphere, Geophys. Res. Lett., 2010a, Vol. 37, L10101.
- Goncharenko L.P., Coster A.J., Chau J.L., Valladares C.E., Impact of sudden stratospheric warmings on equatorial ionization anomaly, *J. Geophys. Res.*, 2010b, Vol. 115, Issue A10. 9
- Kazimirovsky E.S., Coupling from below as a source of ionospheric variability: a review, Ann. of Geophys., 2002, 10 Vol. 45, No. 1, pp. 1–29.
 11. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Koren'kov Y.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 Research., 2013, Vol. 51, No. 1, pp. 54–63. DOI: 10.1134/S001095251301005X.
- Labitzke K., Temperature changes in the mesosphere and stratosphere connected with circulation changes in win-ter // J. Atm. Sci., 1972, Vol. 29. pp. 756–766.
- 13. Lastovicka J., Forcing of the ionosphere by waves from below, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2006, Vol. 68, pp. 479-497
- 14. Matsuno T., A dynamical model of the Stratospheric Sudden Warming, J. Atm. Sci., 1971, Vol. 28, pp. 1479–1494.
- 15. Medvedeva I., Medvedev A., Ratovsky K., Shcherbakov A., Tolstikov M., Comprehensive study of disturbances of the neutral atmosphere and ionosphere parameters over Eastern Siberia during the 2013 January major sudden stratospheric warming, Adv. in Space Res., 2015, Vol. 56, pp. 1877-1885. DOI: 10.1016/j.asr.2015.06.008.
- 16. Pancheva D., Mukhtarov P., Stratospheric warmings: The atmosphere-ionosphere coupling paradigm, J. Atm. Solar-Terr. Phys., 2011, Vol. 73, pp. 1697–1702.

- 17. de Paula E.R., Jonah O.F., Moraes A.O., Kherani E.A., Fejer B.G., Abdu M.A., Muella M.T.A.H., Batista I.S., Dutra S.L.G., Paes R.R., Low-latitude scintillation weakening during sudden stratospheric warming events, J. Geophys. Res. Space Phys., 2015, Vol. 120, pp. 2212–2221. DOI: 10.1002/2014JA020731.
 Pedatella N.M., Forbes J.M., Evidence for stratosphere sudden warming ionosphere coupling due to vertically propagating tides, Geophys. Res. Lett., 2010, Vol. 37, L11104.

- Polyakova A.S., Chernigovskaya M.A., Perevalova N.P., Ionospheric Effects of Sudden Stratospheric Warmings in Eastern Siberia Region, *J. Atm. Solar-Terr. Phys.*, 2014, Vol. 120, pp. 15–23. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.08.011.
 Schoeberl M.R., Stratospheric warmings: Observations and theory, *Rev. Geophys.*, 1978, Vol. 16 (4), pp. 521–538. DOI: 10.1029/RG016i004p00521.
- 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 majorstratospheric warming, *Earth, Planets and Space*, 2015, Vol. 67, No. 18. DOI: 10.1186/s40623-015-0187-1.
- Sumod S.G., Pant T.K., Jose Lijo, Hossain M.M., Kumar K.K., Signatures of Sudden Stratospheric Warming on the Equatorial Ionosphere-Thermosphere System, *Planet. Space Sci.*, 2012, Vol. 63–64, pp. 49–55.