

## СРАВНЕНИЕ ОТКЛИКА F2-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ НА ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ НА СРЕДНИХ И НИЗКИХ ШИРОТАХ

<sup>1</sup>Е.Б. Романова, <sup>1</sup>Г.А. Жеребцов, <sup>1</sup>К.Г. Ратовский, <sup>1</sup>Н.М. Полех,  
<sup>2</sup>Д. Ши, <sup>2</sup>С. Ванг, <sup>2</sup>Г. Ванг

## COMPARING THE IONOSPHERE F2-LAYER RESPONSE TO GEOMAGNETIC STORMS AT MID- AND LOW LATITUDES

<sup>1</sup>E.B. Romanova, <sup>1</sup>G.A. Zherebtsov, <sup>1</sup>K.G. Ratovsky, <sup>1</sup>N.M. Polekh,  
<sup>2</sup>J. Shi, <sup>2</sup>X. Wang, <sup>2</sup>G. Wang

Исследуется отклик ионосферы на две сильные бури 17–19 августа 2003 г. и 22–23 января 2004 г. Использованы данные ионосферных станций Иркутск ( $52.5^{\circ}$  N,  $104^{\circ}$  E) и Хайнань ( $19.5^{\circ}$  N,  $109^{\circ}$  E). Анализ вариаций относительных отклонений критической частоты  $\Delta f_0F2$  показал, что на средних широтах (Иркутск) в летней ионосфере наблюдаются отрицательные возмущения, в зимней ионосфере – положительные на главной фазе бури и отрицательные на фазе восстановления, тогда как на низких широтах (Хайнань) отмечаются положительные возмущения для всех рассмотренных случаев. Для анализа механизмов формирования возмущений использованы эмпирические модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00 и термосферного ветра HWM07. Показано, что на средних широтах основными факторами, определяющими вариации  $\Delta f_0F2$  во время бурь, могут быть следующие: возмущенный термосферный ветер, направленный к экватору и переносящий возмущенный состав атмосферы; возрастание концентрации атомарного кислорода; прохождение внутренних гравитационных волн. На низких широтах эффекты, связанные с вариациями нейтрального состава, малы по сравнению с эффектами, вызываемыми электрическими полями и термосферным ветром.

We study the ionosphere response to two strong storms on 17–19 Aug 2003 and 22–23 Jan 2004. The data from ionospheric stations in Irkutsk ( $52.5^{\circ}$  N,  $104^{\circ}$  E) and in Hainan ( $19.5^{\circ}$  N,  $109^{\circ}$  E) were used. Analysis of the  $\Delta f_0F2$  relative deviation variations showed the following. The negative disturbances were observed at mid-latitudes (Irkutsk) in the summer ionosphere. The positive disturbances were observed in the winter ionosphere during the storm main phase while the negative disturbances were observed during the recovery phase. Whereas the disturbances were positive for all the considered cases at low latitudes (Hainan). To analyze the mechanisms for disturbance formation, we used the NRLMSISE-00 empirical models for the neutral atmosphere and the HWM07 models for thermospheric wind. At midlatitudes, main factors determining the  $\Delta f_0F2$  variation during the storms were shown to be probably the following: equatorward disturbed thermospheric wind transporting the atmosphere disturbed composition; atomic oxygen concentration increase; internal gravity wave passage. At low latitudes, the effects associated with variations of neutral composition are small compared with the effects of electric fields and thermospheric winds.

### Введение

Возмущения F2-области, возникающие как отклик ионосферы на геомагнитную бурю, – явления планетарного масштаба, длительность которых может варьировать от нескольких часов до нескольких дней. Подобные возмущения, затрагивающие как ионизованные, так и нейтральные компоненты верхней атмосферы Земли, – важное звено в сложной цепи солнечно-земных связей. Глобальные эффекты возмущений F2-области очень важны с практической точки зрения, поскольку прямо влияют на орбитальные характеристики спутников, приводят к ошибкам в работе системы глобального позиционирования и навигационных систем, к нарушениям КВ-радиосвязи. Исследование ионосферных бурь проводится в течение многих лет, и в настоящее время уже имеется огромное число публикаций, посвященных морфологии, физике, моделированию и прогнозированию этих явлений [Danilov, Belik, 1991; Buonsanto, 1999; Prolss, Ocko, 2000; Romanova et al., 2006]. Несмотря на это, многие стороны явления до сих пор остаются непонятными, так как отклик F2-области ионосферы на геомагнитную бурю является результатом многих связанных между собой процессов, протекающих в магнитосфере, ионосфере и верхней атмосфере Земли. Изменение характеристик F2-области во время бури происходит в широком интервале высот (200–1000 км) и зависит от сезона, интенсивности возмущения, широты и

долготы точки наблюдения, местного (LT) и мирового (UT) времени начала возмущения. Так как отклик ионосферы на конкретную бурю в значительной степени зависит от последовательности и интенсивности воздействия различных факторов в ходе развития данного геомагнитного возмущения, то интерпретация результатов наблюдения, проводимых в периоды ионосферных бурь, является сложной задачей и не теряет своей актуальности.

Целью данной работы является сравнение отклика ионосферы средних и низких широт Восточно-Азиатского региона на геомагнитные бури, наблюдавшиеся в разные сезоны.

### Анализ данных

В работе использованы вручную обработанные данные двух ионосферных станций, оснащенных дигизондами DPS-4: ст. Иркутск ( $52.5^{\circ}$  N,  $104^{\circ}$  E), Россия, Институт солнечно-земной физики СО РАН, и ст. Хайнань ( $19.5^{\circ}$  N,  $109^{\circ}$  E), Китай, Центр космических и прикладных исследований КАН. Для исследования выбраны бури 17–19 августа 2003 г. и 22–23 января 2004 г., для которых минимальное значение  $D_{st}$ -индекса наблюдалось примерно в одно время. Обычно возмущения ионосферы рассматривают в терминах «отрицательное» и «положительное», под которыми понимается уменьшение или увеличение критической частоты F2-области ( $f_0F2$ ) по отношению к медианному значению. Для анализа

вариаций  $f_0F2$  во время бурь были рассчитаны отклонения высоты максимума слоя ( $\Delta h_mF2$ ) и относительные отклонения критической частоты ( $\Delta f_0F2$ ) от медианы. Отклонения критической частоты рассчитывались по формуле

$$\Delta f_0F2 = (f_0F2 - f_{0F2\text{med}})/f_{0F2\text{med}} \cdot 100 \%,$$

где  $f_0F2$  – текущее значение критической частоты области F2,  $f_{0F2\text{med}}$  – медиана. Значения  $\Delta h_mF2$  рассчитывались как

$$\Delta h_mF2 = h_mF2 - h_{mF2\text{med}}$$

*Буря 17–19 августа 2003 г.*

На рис. 1, а показаны вариации индексов геомагнитной активности с 16 по 19 августа 2003 г. Сильная буря класса G3 наблюдалась 17–18 августа. Внезапное начало бури (SSC) произошло в 14:00 UT 17 августа 2003 г. В ходе бури  $D_{st}$ -индекс имел два минимума. Первый наблюдался в 23:00 UT 17 августа:  $D_{st} = -63$  нТл, а значение  $K_p$ -индекса достигало 5.3, после чего произошло увеличение  $D_{st}$  до  $-27$  нТл в 01:00 UT 18 августа. Второй минимум наблюдался в 15:00 UT 18 августа, когда величина  $D_{st}$ -индекса понижалась до  $-148$  нТл, а значение  $K_p$ -индекса достигало 7.3. Эта буря имеет продолжительную главную фазу (ГФ) (~15 ч) и длительную фазу восстановления (ФВ).

На рис. 1, б, в показаны вариации  $\Delta f_0F2$  и  $\Delta h_mF2$  на ст. Иркутск с 16 по 19 августа 2003 г. Во время начальной фазы бури наблюдались слабые положительные возмущения до 25 %, на ГФ бури с 00:00 до 15:00 UT (07:00–22:00 LT) также отмечались небольшие отрицательные возмущения до  $-20$  %, при этом F2-слой поднимался на 30–40 км. Начало ФВ характеризовалось отрицательными возмущениями до  $-60$  % и кратковременным подъемом F2-слоя на 100 км. Начало ФВ наблюдалось после подъема 15:00 UT (22:00 LT), т. е. в ночное время. На ст. Хайнань (рис. 1, г, д) преобладают положительные возмущения как на ГФ, так и на ФВ с максимальной величиной  $\Delta f_0F2 = 65$  %.

Минимальное значение  $\Delta f_0F2$  на ст. Иркутск и максимальное на ст. Хайнань совпадают по времени с минимумом  $D_{st}$ -индекса в 15:00 UT 18 августа.

*Буря 22–23 января 2004 г.*

На рис. 2, а показаны вариации индексов геомагнитной активности с 21 по 23 января 2004 г. Сильная буря класса G3 наблюдалась 22 января. Внезапное начало бури произошло в 00:50 UT 22 января 2004 г. В ходе бури значение  $K_p$ -индекса достигало 7, а величина  $D_{st}$ -индекса понижалась до  $-150$  нТл в 13:00 UT 22 января.

На рис. 2, б, в показаны вариации  $\Delta f_0F2$  и  $\Delta h_mF2$  на ст. Иркутск с 21 по 23 января 2004 г. На ГФ наблюдались два положительных возмущения: первое – до 50 % около 10:00 UT с повышением F2-слоя на 30 км, второе – до 90 % в 13:00 UT, которому предшествовал кратковременный подъем F2-слоя на 130 км в 12:00 UT. На ФВ наблюдались отрицательные возмущения до  $-45$  %, при этом F2-слой находился выше на 50–60 км средней высоты максимума F2-слоя. Так как 21 января вновь наблюдалась умеренная буря с  $D_{st} \sim -70$  нТл, восстановления ионосферы до спокойного уровня не произошло,

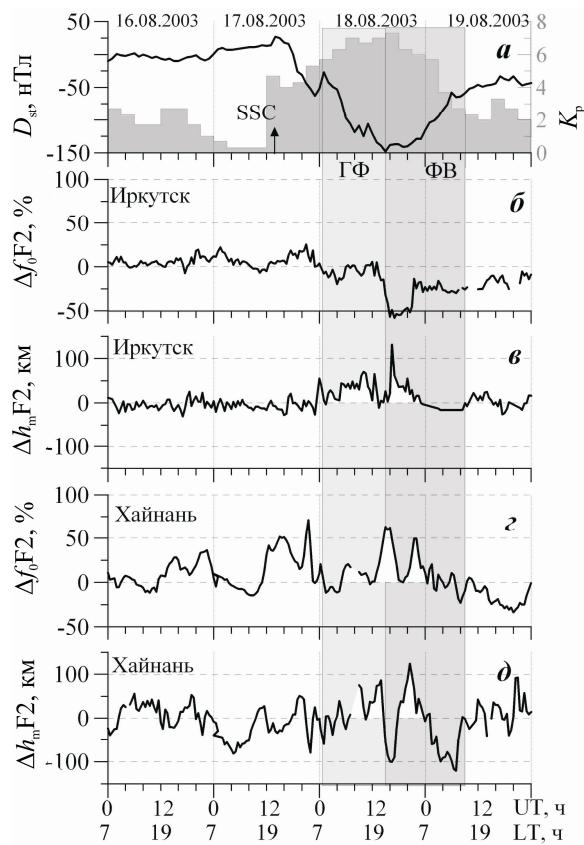


Рис. 1. Вариации параметров ионосферы во время бури 16–19 августа 2003 г.: вариации  $D_{st}$ - и  $K_p$ -индексов (а); относительные отклонения критической частоты  $\Delta f_0F2$  (б, г); отклонения высоты максимума F2-слоя  $\Delta h_mF2$  на ст. Иркутск и Хайнань (в, д).

а вновь наблюдались положительная и отрицательная фазы ионосферной бури. На ст. Хайнань (рис. 2, г, д) преобладали положительные возмущения: умеренные на ГФ (до 30 %) и сильные на ФВ (до 130 %).

## Обсуждение результатов

Общепризнанно, что наиболее важными факторами, определяющими вариации параметров ионосферы во время геомагнитной бури, являются изменения нейтрального состава термосфера и системы циркуляции нейтральных ветров [Danilov, Belik, 1991; Buonsanto, 1999; Prolss, Ocko, 2000]. Но существуют некоторые особенности механизмов формирования возмущений в ночные и дневные часы LT. Обе рассматриваемые бури характеризуются тем, что ГФ бури наблюдалась в послеполуденные и вечерние часы LT, а ФВ – ночью.

## Средние широты

Существуют два типа положительных возмущений: 1) умеренные по амплитуде, но продолжительные и 2) обычно сильные, но кратковременные возмущения, за которыми следует отрицательная фаза ионосферного возмущения [Prolss, Ocko, 2000]. Положительное возмущение первого типа может быть объяснено усилением направленного к экватору (ослаблением направленного к полюсу) термосферного ветра и возрастанием концентрации атомарного кислорода [O] [Danilov, Belik, 1991; Prolss, Ocko, 2000]. Такое возмущение наблюдалось на ст. Иркутск 22 января с 06:00 до 12:00 UT (с 13:00 до 19:00 LT).

## Сравнение отклика F2-области ионосферы на геомагнитные бури на средних и низких широтах

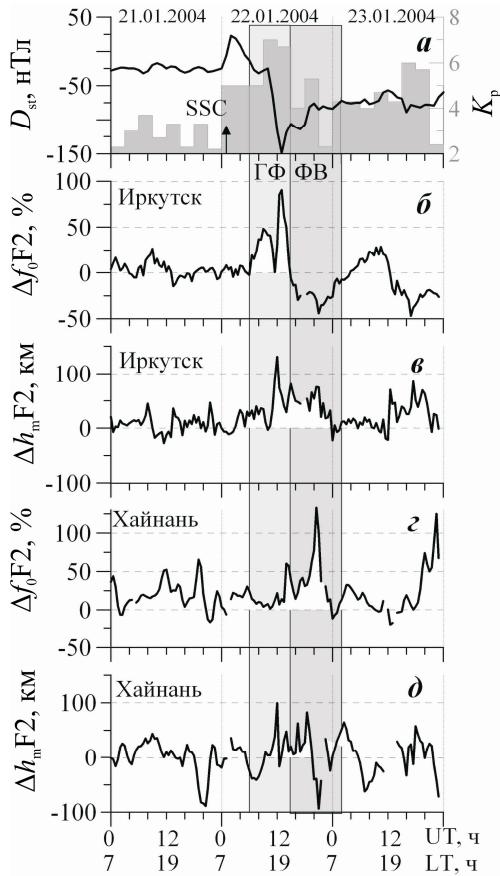


Рис. 2. То же, что на рис. 1, во время бури 21–23 января 2004 г.

На рис. 3 приведены характеристики термосферы, рассчитанные по эмпирической модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002] и по модели горизонтального термосферного ветра HWM07 [Drob et al., 2008; Emmert et al., 2008] на высоте 300 км: концентрация [O] (рис. 3, *a*), широтно-долготное распределение скорости термосферного ветра и  $([O]/[N_2])_{\text{возм.}}$  (рис. 3, *г*, *д*), а также отношение  $([O]/[N_2])_{\text{возм.}}/(O/[N_2])_{\text{спок.}} = R_d/R_q$  (рис. 3, *б*, *в*). Как видно на рисунке, отношение  $R_d/R_q$  (рис. 3, *б*) уменьшилось до 0.88 на главной фазе, но концентрация [O] была выше почти на 10 % относительно спокойного дня (рис. 3, *а*) и ветер был направлен к экватору (рис. 3, *г*), что соответствует представлениям о формировании положительного возмущения такого типа. Положительное возмущение второго типа наблюдалось на ст. Иркутск 22 января с 12:00 до 15:00 UT (с 18:00 до 22:00 LT). Кратковременный подъем F2-слоя более чем на 100 км, который наблюдался в 12:00 UT, обычно связывают с усилением направленного вверх дрейфа, вызванного прохождением внутренних гравитационных волн от аурорального источника нагрева [Afraimovich et al., 2002]. Такая волна представляет собой импульс направленного к экватору ветра, скорость которого зависит от высоты. На высоте 300 км скорость меридионального ветера может достигать 200–250 м/с. За такой волной идет возмущенная термосферная циркуляция, переносящая нейтральный состав с низким отношением [O]/[N<sub>2</sub>] на средние широты. По оценкам, полученным по модели NRLMSISE-00, отношение  $R_d/R_q$  имеет низкие значения, совпадающие по

времени с отрицательным возмущением на ст. Иркутск (с 15:00 UT 22 января до 02:00 UT 23 января). Хотя возмущенная термосферная циркуляция, направленная к экватору, способствует проникновению возмущенного нейтрального состава на средние широты ночью, однако эффект возмущения состава не столь очевиден, как днем. Известно, что уровень ионизации вблизи максимума F2-слоя после захода Солнца контролируется, во-первых, притоком плазмы из плазмосфера и, во-вторых, изменением высоты F2-слоя под действием термосферного ветра. Модельное исследование, выполненное в работе [Romanova et al., 2006], показало, что во время бури в ночные часы поток ионов из плазмосферы в ионосферу значительно ослабевает, что может существенно уменьшить электронную концентрацию на высоте максимума F2-слоя.

В летней ионосфере средних широт (бури 17–19 августа) наблюдались преимущественно отрицательные возмущения. Полагают, что летом изменения [O]/[N<sub>2</sub>], связанные с увеличением температуры атмосферы, должны быть больше, чем зимой, так как температура атмосферы максимальна летом [Fuller-Rower et al., 1996]. Из сопоставления рис. 3, *б* и *в* видно, что изменения [O]/[N<sub>2</sub>] также больше летом, чем зимой. Кроме того, особенностью данной бури является очень продолжительная ГФ и длительная ФВ, причем в течение пяти часов наблюдался  $D_{\text{ст}} \sim -150$  нТл (рис. 1, *а*). Такое длительное сильное воздействие на атмосферу могло вызвать более сильный ее разогрев и, как следствие, более сильные изменения [O]/[N<sub>2</sub>], которые переносятся на средние широты усиленным и направленным к экватору ветром (рис. 3, *д*).

### Низкие широты

Как показывают наблюдения, в низкоширотной ионосфере преобладают положительные возмущения  $\Delta f_0F2$  на ГФ и на ФВ [Romanova et al., 2006]. Известно также, что большинство наблюдаемых особенностей экваториальной ионосферы связано с геометрией геомагнитного поля в низких широтах, где магнитное поле почти параллельно земной поверхности. В работе [Романова, Тацелин, 2011] было показано, что во время бури электромагнитный дрейф и термосферный ветер являются важными управляющими процессами в формировании низкоширотной ионосферы. Вариации зональной компоненты электрического поля  $E_y$ , которая вызывает вертикальный  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  дрейф плазмы, приводят как к увеличению, так и уменьшению  $f_0F2$ . Согласно наблюдениям электрических полей,  $E_y$  восточного направления уменьшается в дневное время суток во время бурь, что влечет за собой увеличение  $f_0F2$  [Fejer, 2011]. Скорость термосферного ветера на низких широтах значительно меньше, чем на средних, но из-за большого наклона силовых линий магнитного поля продольная составляющая термосферного ветра может быть больше, чем на средних широтах. Поэтому термосферный ветер может ослаблять или усиливать воздействие  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  дрейфа во время возмущений [Lin et al., 2005]. Эффекты, связанные с вариациями нейтрального состава, малы по сравнению с эффектами, вызываемыми электрическими полями и ветром. Отношения  $R_d/R_q$ , рассчитанные для

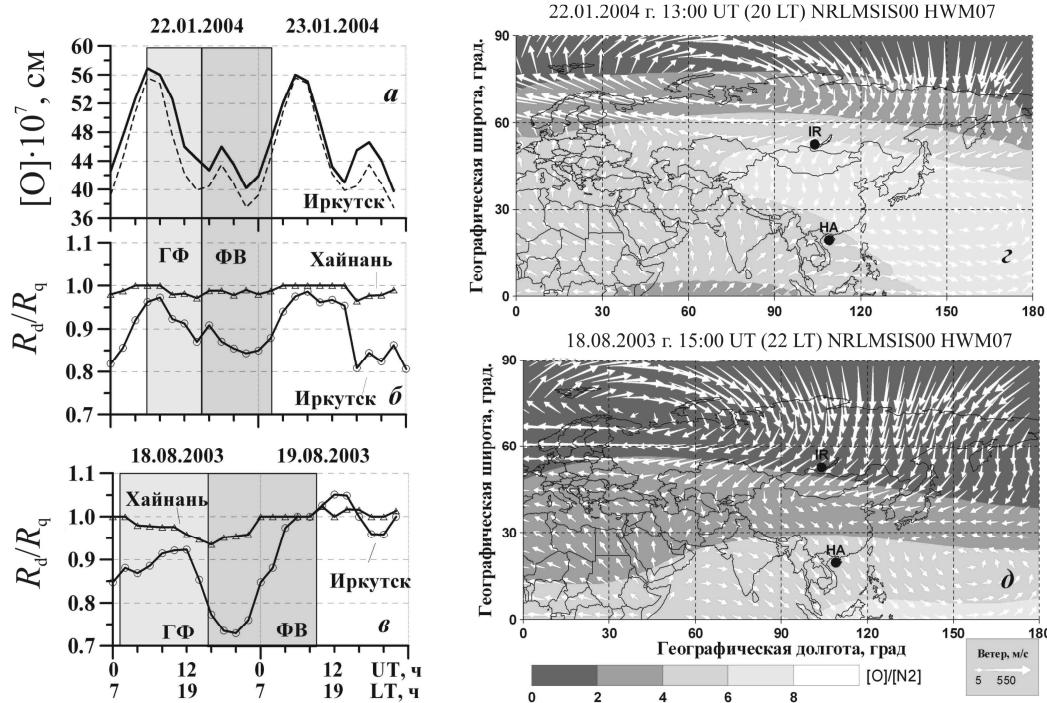


Рис. 3. Вариации параметров атмосферы во время бури 22–23 января 2004 г. и 18–19 августа 2003 г. на высоте 300 км: концентрация атомарного кислорода [O] (толстая линия – во время бури; штриховая линия – в спокойный день) (а); отношение  $R_d/R_q$ , рассчитанное по модели NRLMSISE-00 (б, в); скорость и направление термосферного ветра, рассчитанные по модели HWM07 (стрелки), и отношение [O]/[N<sub>2</sub>], рассчитанное по модели NRLMSISE-00 (серая шкала) (г, д).

ст. Хайнань, приведены на рис. 3, б, в, и видно, что они меняются во время бурь незначительно.

### Заключение

Таким образом, сравнение вариаций  $\Delta f_0 F_2$  показало, что на средних широтах (Иркутск) в летней ионосфере наблюдаются отрицательные возмущения, в зимней ионосфере – положительные на главной фазе бури и отрицательные на фазе восстановления, а на низких широтах (Хайнань) преобладают положительные возмущения. Показано, что на средних широтах основными факторами, определяющими вариации  $\Delta f_0 F_2$  во время бурь, могут быть: возмущенный термосферный ветер, направленный к экватору и переносящий возмущенный состав атмосферы; возрастание концентрации атомарного кислорода; прохождение внутренних гравитационных волн. На низких широтах основными факторами являются электрические поля и термосферный ветер.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант РФФИ № 11-05-91153) и Программой № 8 ОНЗ РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Романова Е.Б., Тащилин А.В. Моделирование отклика низкоширотной ионосферы на геомагнитную бурю 11–12 февраля 2004 г. // XVII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Сборник трудов [Электронный ресурс]. Электрон. текстовые, граф. данные. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2011. Д 107–111.

Afraimovich E.L., Ashkaliev Ya.E., Aushev V.M., et al. Simultaneous radio and optical observations of the mid-latitude atmospheric response to a major geomagnetic storm of 6–8 April 2000 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2002. V. 64, N 18.

П. 1943–1955.

Buonsanto M.J. Ionospheric storms – A review // Space Sci. Rev. 1999. V. 88, N 3. P. 563–601.

Danilov A.D., Belik L.D. Thermospheric interaction during ionospheric storms // Geomagnetism and Aeronomy. 1991. V. 31. P. 209–216.

Drob D.P., Emmert J.T., Crowley G., et al. An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07 // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. A12304. doi:10.1029/2008JA013668.

Emmert J.T., Drob D.P., Shepherd G.G., et al. DWM07 global empirical model of upper thermospheric storm-induced disturbance winds // Ibid. 2008. V. 113. A11319. doi:10.1029/2008JA013541.

Fejer B. Low latitude ionospheric electrodynamics // Space Sci. Rev. 2011. V. 158, N 1. P. 145–166.

Fuller-Rower T.J., Codrescu M.V., Rishbeth H., et al. On the seasonal response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms // J. Geophys. Res. 1996. V. 101, N A2. P. 2343–2353.

Lin C.H., Richmond A.D., Heelis R.A., et al. Theoretical study of the low- and midlatitude ionospheric electron density enhancement during the October 2003 superstorm: Relative importance of the neutral wind and the electric field // Ibid. 2005. V. 110. A12312. doi:10.1029/2005JA011304.

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

Prolss G.W., Ocko M. Propagation of upper atmospheric storm effects towards lower latitudes // Adv. Space Res. V. 26. P. 131–135.

Romanova E.B., Tashchilin A.V., Zhrebtskov G.A., et al. Modeling of the seasonal effects of geomagnetic storms in the Eastern Asia ionosphere // Intern. J. Geomagn. Aeron. 2006. V. 6. GI3003, doi:10.1029/2005GI000119.

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Центр космических и прикладных исследований КАН, Пекин, Китай