

УДК 551.510.535

МОДЕЛИРОВАНИЕ УТ-ЭФФЕКТА ЗОНАЛЬНО-УСРЕДНЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ НА ПРИМЕРЕ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ В МАРТЕ 2015

© 2024 г. К. В. Белюченко^{1, 2, *}, М. В. Клименко^{1, 2}, В. В. Клименко², К. Г. Ратовский¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени “Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук”, Иркутск, Россия

²Калининградский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки “Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова Российской академии наук”, Калининград, Россия

*E-mail: kdei@list.ru

Поступила в редакцию 24.08.2023

После доработки 13.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

На основе глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП) ранее нами была дана интерпретация ионосферных эффектов геомагнитной бури в марте 2015 г., выявлены и проанализированы положительные эффекты последствия. Дальнейший анализ результатов численного моделирования показал, что положительные эффекты последствия по-разному проявляются в различных долготных секторах. Представлены результаты исследования зависимости возмущений параметров верхней атмосферы от времени начала геомагнитной бури по УТ. Показано, что существующие отличия в среднезональных эффектах на главной фазе бури в $N_m F_2$ бурь с различными моментами начала связаны с различиями возмущений ветра и состава термосферы и проявляются главным образом после 12 ч с момента начала геомагнитной бури. Время начала формирования среднезональных эффектов последствия, их амплитуда и широтная протяженность зависят от времени УТ начала геомагнитной бури.

DOI: 10.31857/S0367676524030032, EDN: QNGCIL

ВВЕДЕНИЕ

Ионосферные эффекты геомагнитных бурь являются наиболее изученным видом ионосферных возмущений. Согласно обзорам [1, 2] знак и интенсивность возмущений электронной концентрации в F-области ионосферы во время геомагнитных бурь зависят не только от амплитуды и продолжительности геомагнитных возмущений, но и от рассматриваемой широты, местного времени и сезона. Эти зависимости были подтверждены и по данным полного электронного содержания на довольно внушительном массиве данных [3, 4].

В настоящее время существует два сравнительно новых направления в исследованиях ионосферных эффектов бурь: 1) положительные эффекты последствия в F-области ионосферы, которые были выявлены по результатам моделирования [5] и подтверждены на основе статистического анализа данных наблюдений [6, 7]; 2) долготная, а точнее УТ-зависимость ионосферных эффектов геомагнитных бурь, которую пытались изучать как на основании статистической обработки данных

наблюдений [3, 7], так и с помощью результатов моделирования [8, 9]. Попытка исследований обоих этих направлений предпринималась в [10]. Однако следует отметить, что выявление долготной зависимости ионосферных эффектов бурь по данным наблюдений одной бури невозможно, поскольку это не будет отражать одну долготную зависимость, а будет содержать еще зависимость от локального времени на рассматриваемых долготах. Попытки статистического анализа ионосферных эффектов бурь сталкиваются с проблемой значительных различий в развитии геомагнитных бурь от случая к случаю. Это в совокупности с различным влиянием солнечной активности и атмосферно-ионосферных связей приводит к значительному разбросу ионосферных возмущений, даже во время схожих по интенсивности бурь, отсортированных по сезонам.

Поэтому представляется актуальным подход по использованию результатов моделирования ионосферных эффектов бурь с различными моментами начала, который был реализован в [8]. Такой подход позволит исследовать зависимость от времени

начала по УТ ионосферных эффектов как на главной фазе, так и эффектов последствий. Для краткости изложения в данной статье, так же как и в работе [11], рассматриваются среднезональные возмущения параметров верхней атмосферы. Таким образом, целью данной работы является исследование зависимости поведения зонально-усредненных возмущений параметров верхней атмосферы Земли от времени начала геомагнитной бури по УТ.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой данного исследования являются результаты расчетов в рамках глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП) для геомагнитной бури 17–23 марта 2015 г. с различными моментами начала по УТ. Исторически геомагнитная буря 17 марта 2015 г. началась в 12 УТ. Ионосферные возмущения этой геомагнитной бури с использованием результатов расчетов на модели ГСМ ТИП исследовались ранее и представлены в [5, 6, 12–14]. В модели ГСМ ТИП учет геомагнитных возмущений осуществлялся с использованием модели высыпаний авроральных электронов (входным параметром которой является AL-индекс), разработанной в Полярном геофизическом институте [15], а также эмпирической зависимости разности потенциалов через полярные шапки $\Delta\Phi$ [16] и широтного положения продольных токов второй зоны от AE-индекса геомагнитной активности [17].

Таким образом, индексы AE и AL с одноминутным временным разрешением являются управляющими параметрами модели ГСМ ТИП для учета эффектов геомагнитных бурь. При реализации модельных расчетов эффектов геомагнитных бурь с другими моментами начала по УТ мы использовали поведение индексов AE и AL (рис. 1) со смещением на 6 и 12 ч назад по времени (бури с началом в 00 и 06 УТ), а также на 6 ч вперед по времени (буря с началом в 18 УТ). Таким образом, нами были рассмотрены четыре сценария абсолютно одинаковых геомагнитных бурь с моментами начала в 00, 06, 12 и 18 УТ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлены зонально-усредненные возмущения электронной концентрации в максимуме F2 слоя ионосферы, $N_m F2$, для бурь с выбранными моментами начала по УТ. Прежде всего следует отметить то, что для всех представленных бурь положительные эффекты на фазе восстановления сосредоточены в экваториальной зоне с частичным смещением в северное полушарие. Интенсивность и широтная протяженность эффектов последствий больше для бурь с временем начала в 00 и 06 УТ. В главную фазу всех рассматриваемых бурь можно выделить следующие сходства в поведении зонально-усредненных возмущений $N_m F2$: 1) отрицательные $\Delta N_m F2$ в экваториальной зоне в период 0–12 ч после начала бурь; 2) положительные $\Delta N_m F2$ на средних широтах,

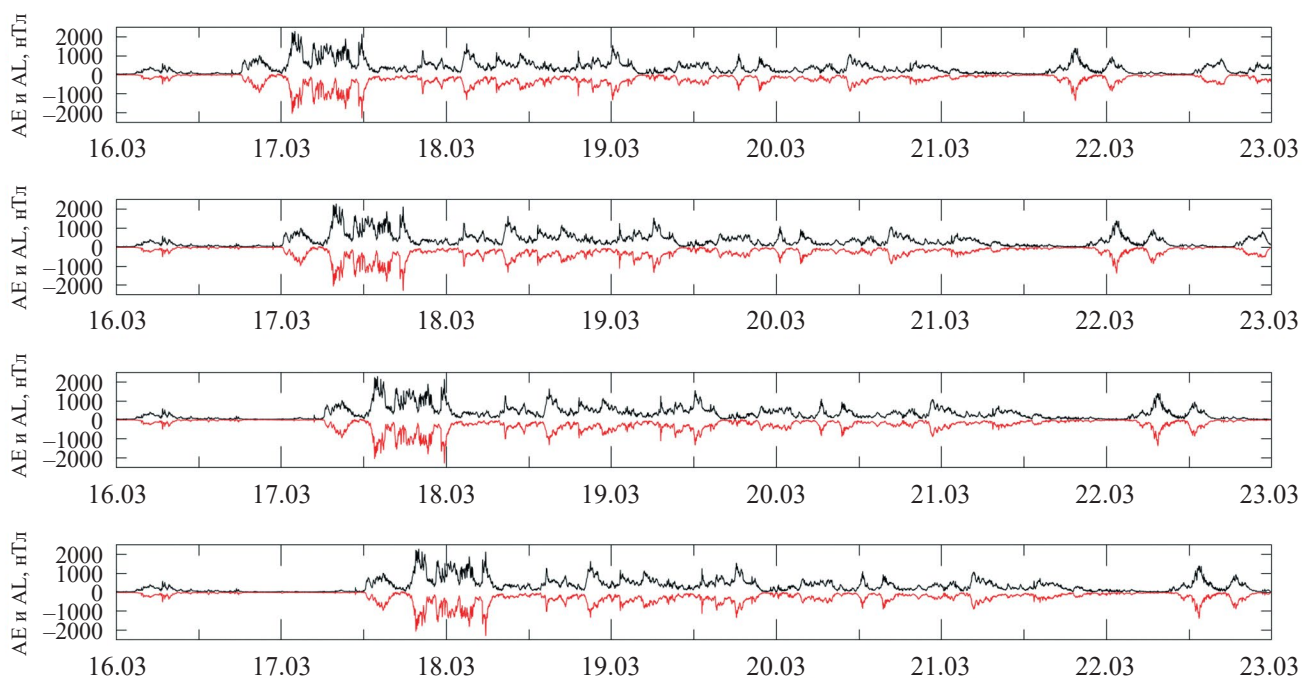


Рис. 1. Вариации индексов геомагнитной активности AE и AL для смещенных по времени моментов начала бурь, сверху вниз для 00 УТ, 06 УТ, 12 УТ, 18 УТ соответственно.

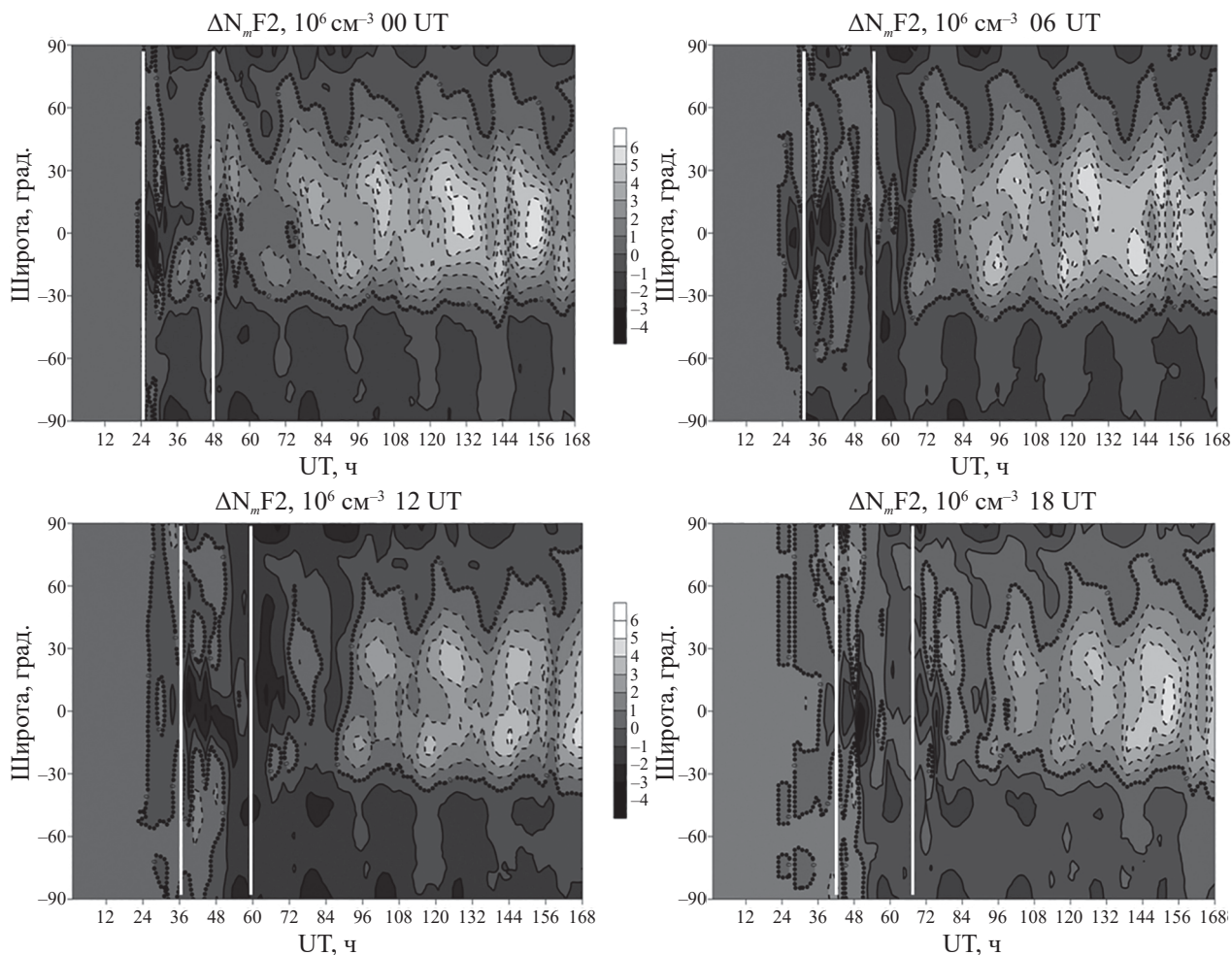


Рис. 2. Широтно-временные карты зонально-усредненных возмущений $N_m F2$ для бурь с временем начала 00, 06, 12, 18 UT. Белыми линиями выделена главная фаза бури.

возникающие в течение первых 7 ч после начала бурь. Основными различиями в возмущениях $N_m F2$ на главной фазе бури являются: 1) в период от 0 до 10 ч после начала бури для бурь с временем начала в 12 и 18 UT присутствие положительных возмущений в высоких и средних широтах, которые отсутствуют для бурь с моментами начала в 00 и 06 UT (при этом длительность и интенсивность этих возмущений больше для бури с началом в 12 UT); 2) на более поздних этапах бурь с моментами начала в 00 и 06 UT происходит формирование положительных возмущений в экваториальной зоне и на средних широтах северного полушария, тогда как для бурь с моментами начала в 12 и 18 UT формируются отрицательные возмущения; 3) в высокоширотных областях во время бурь с моментами начала в 00 и 06 UT формируются отрицательные возмущения в течение практически всей главной фазы, тогда как для бурь с моментами начала в 12 и 18 UT формируются положительные возмущения в течение первых 12 ч, после чего следует отрицательная фаза.

Эффекты геомагнитных бурь в верхней атмосфере являются следствием нагрева термосферы, вызывающего появление дополнительного термосферного ветра к экватору и перестройку нейтрального состава термосферы, а также усиления электрического поля магнитосферной конвекции в главную фазу геомагнитной бури. Наши расчеты показали, что зонально-усредненные возмущения компонент электрического поля в ионосфере пренебрежимо малы вследствие усиления как восточного, так и западного электрического поля во время бури. Поэтому в данной работе мы не приводим результатов модельных расчетов зонально-усредненных возмущений электрического поля в ионосфере, а показываем результаты расчетов зонально-усредненных возмущений термосферных параметров для всех рассмотренных бурь. На рис. 3 представлены зонально-усредненные возмущения T_n для бурь с разными моментами начала. В зависимости от времени начала бурь изменяются как широтная протяженность, так и интенсивность этих возмущений. Самые слабые возмущения

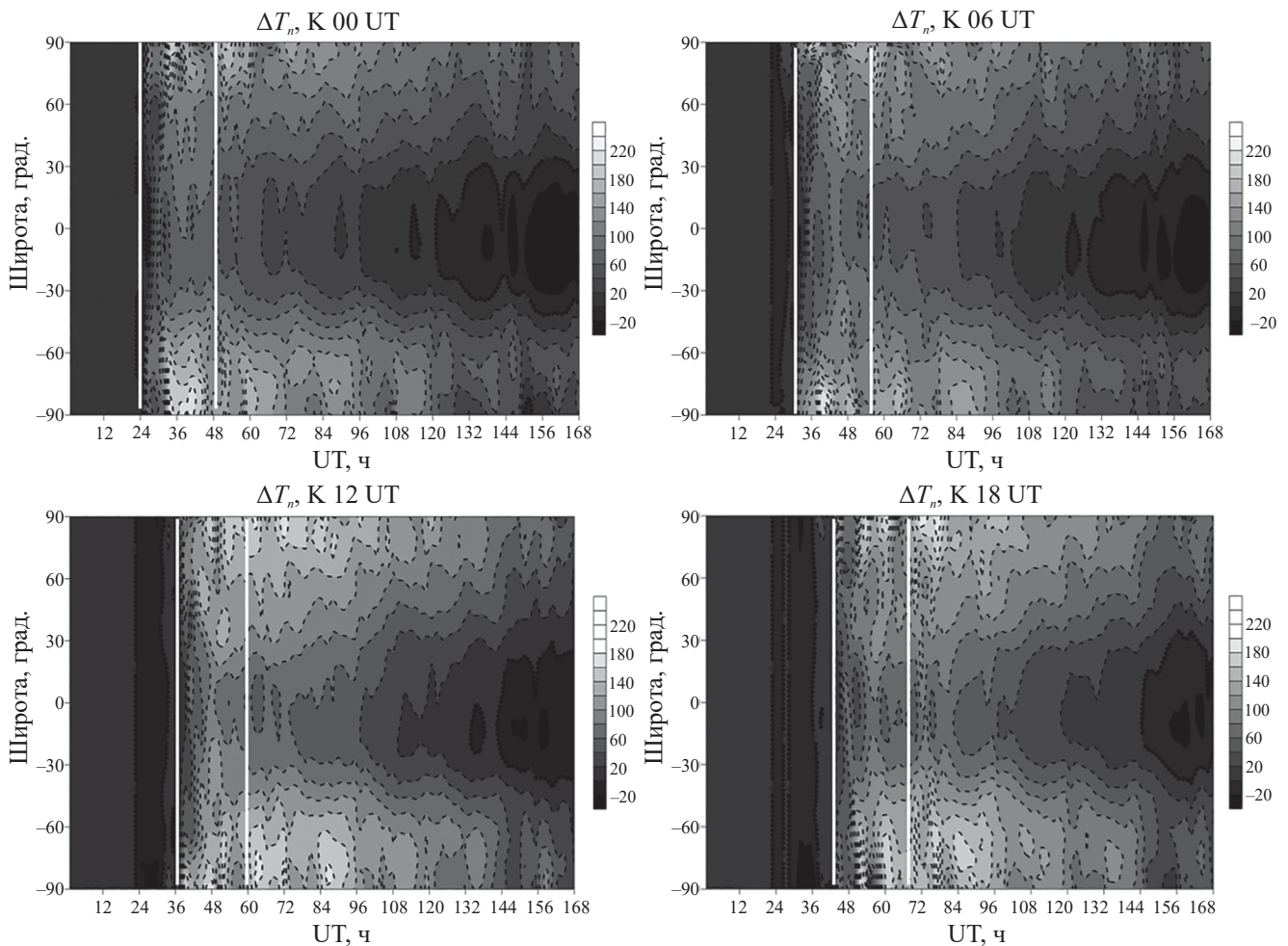


Рис. 3. То же, что и на рис. 2 для возмущений T_n .

приходится на бурю с моментом начала в 06 UT, а самый сильный разогрев термосферы в главную фазу бури происходит при начале бури в 00 UT. Во время бурь с моментами начала в 12 и 18 UT формируются наиболее интенсивные возмущения T_n на вторые и третьи сутки фазы восстановления. Такое поведение возмущений T_n для разных бурь определяет различия в появлении положительных/отрицательных возмущений $N_m F2$ на вторые и третьи сутки фазы восстановления.

Следует отметить, что именно возмущения зонально-усредненной температуры термосферы являются основной причиной вариаций нейтрального состава и скорости термосферного ветра, которые играют определяющую роль в формировании зонально-усредненных возмущений $N_m F2$. Известно, что буревое усиление ветра к экватору приводит к возникновению положительных возмущений в $N_m F2$ на средних и низких широтах, а отрицательные возмущения в $n(O)/n(N_2)$ приводят к возникновению отрицательных возмущений в $N_m F2$ на высоких и средних широтах [1, 18]. На

рис. 4 представлены зонально-усредненные возмущения меридиональной компоненты скорости термосферного ветра $V_{n\theta}$ (с положительным направлением к экватору) для бурь с разными моментами начала. Для всех рассматриваемых бурь положительные возмущения в $V_{n\theta}$ на главной фазе сосредоточены в периоды времени с 0 до 12 ч после начала бури. Самые интенсивные возмущения в северном полушарии приходятся на бурю с моментом начала в 12 UT, а самые интенсивные возмущения в южном полушарии приходятся на бурю с моментом начала в 00 UT. Также для бурь с моментами начала в 00 и 06 UT видны два схожих по амплитуде пика возмущений ветра к экватору: с 0 до 6 ч после начала бури и с 6 до 12 ч после начала бури. Этим двум пикам в дополнительном ветре к экватору соответствуют два пика в возмущениях $N_m F2$ в тех же временных промежутках. Для бурь с моментами начала в 12 и 18 UT второй пик в ветре к экватору значительно слабей первого, что приводит к отсутствию четкого второго пика в положительных возмущениях $N_m F2$ для этих бурь. Для всех геомагнитных бурь формирование

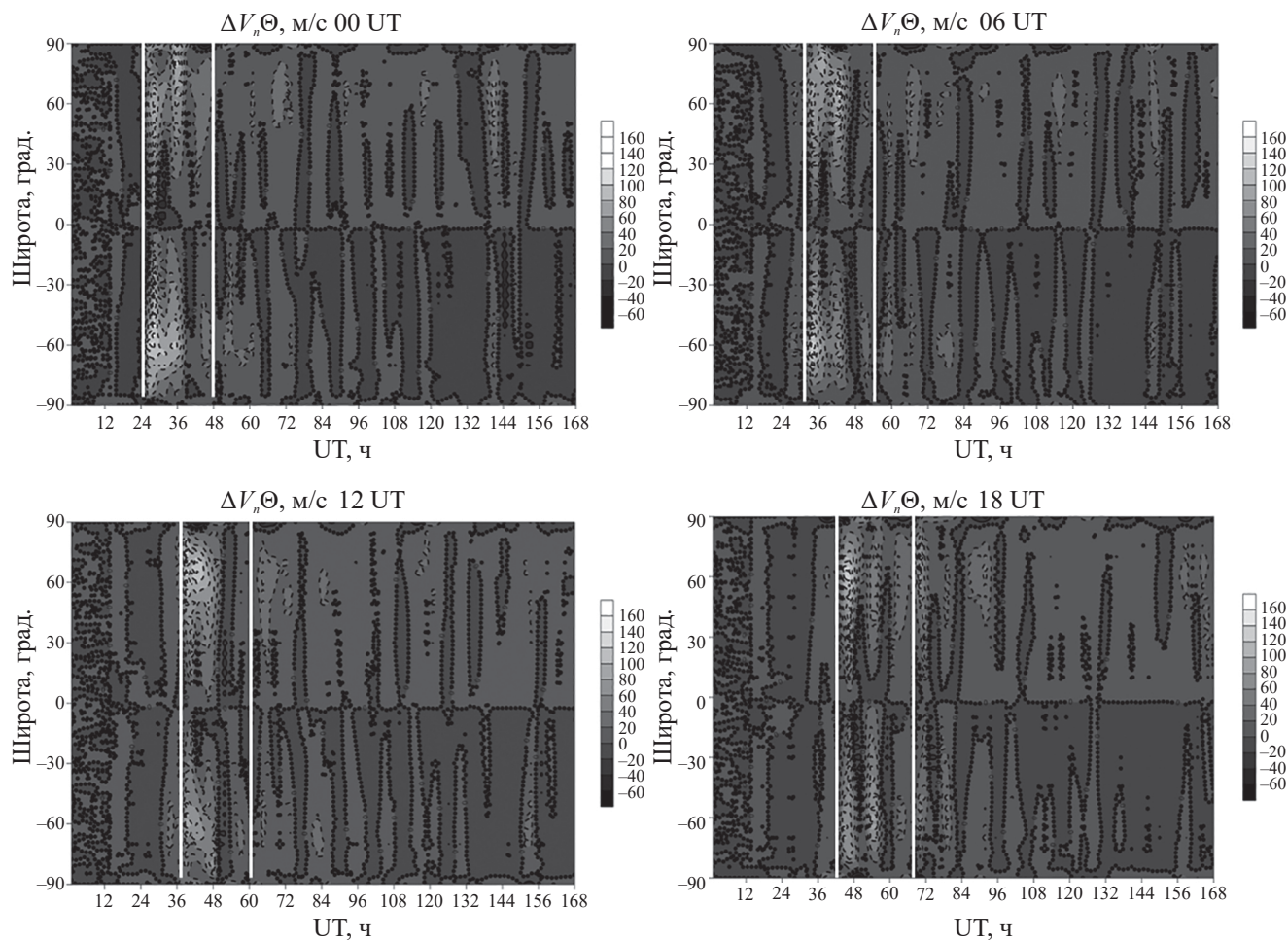


Рис. 4. То же, что и на рис. 2 для возмущений $V_{n\Theta}$ (положительное направление выбрано к экватору).

положительных возмущений $N_m F2$ в субавроральных и средних широтах в главную фазу бури связано с дополнительным ветром к экватору.

На рис. 5 представлены зонально-усредненные возмущения $n(O)/n(N_2)$ для бурь с разными моментами начала. В главную фазу всех рассматриваемых бурь формируются отрицательные возмущения $n(O)/n(N_2)$ с наименьшими отрицательными возмущениями в области экватора и максимальными отрицательными возмущениями в области широт 30° – 60° с.ш. и ю.ш. Формирование отрицательных возмущений $N_m F2$ в интервале от 12 до 23 ч после начала бурь с моментами начала в 12 и 18 UT связано с отрицательными возмущениями $n(O)/n(N_2)$. Положительные возмущения на фазе восстановления сосредоточены на экваторе и низких широтах. В целом, для всех бурь положительные возмущения $N_m F2$ на фазе восстановления связаны с возмущениями $n(O)/n(N_2)$, как отмечалось ранее [6]. При этом интенсивность и широтный охват этих возмущений несколько больше для бурь с временем начала в 00 и 06 UT, что связано

с пространственно-временным распределением возмущений нейтральной температуры, рассмотренным выше. Это объясняет соответствующую картину эффектов последствия в $N_m F2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были рассмотрены основные физические процессы, которые играют важную роль в формировании ионосферных эффектов на разных фазах развития геомагнитной бури, для бурь с разными моментами начала. Возмущения зонально-усредненной температуры термосферы являются основной причиной различий возмущений нейтрального состава и скорости термосферного ветра для бурь с различными моментами начала. Показано, что для рассматриваемого семейства бурь эффекты термосферного ветра являются существенными в формировании возмущений $N_m F2$ на главной фазе бури в первые 2–10 ч после начала бури. Следует отметить, что существующие отличия в среднезональных эффектах на главной фазе бури в $N_m F2$ бурь

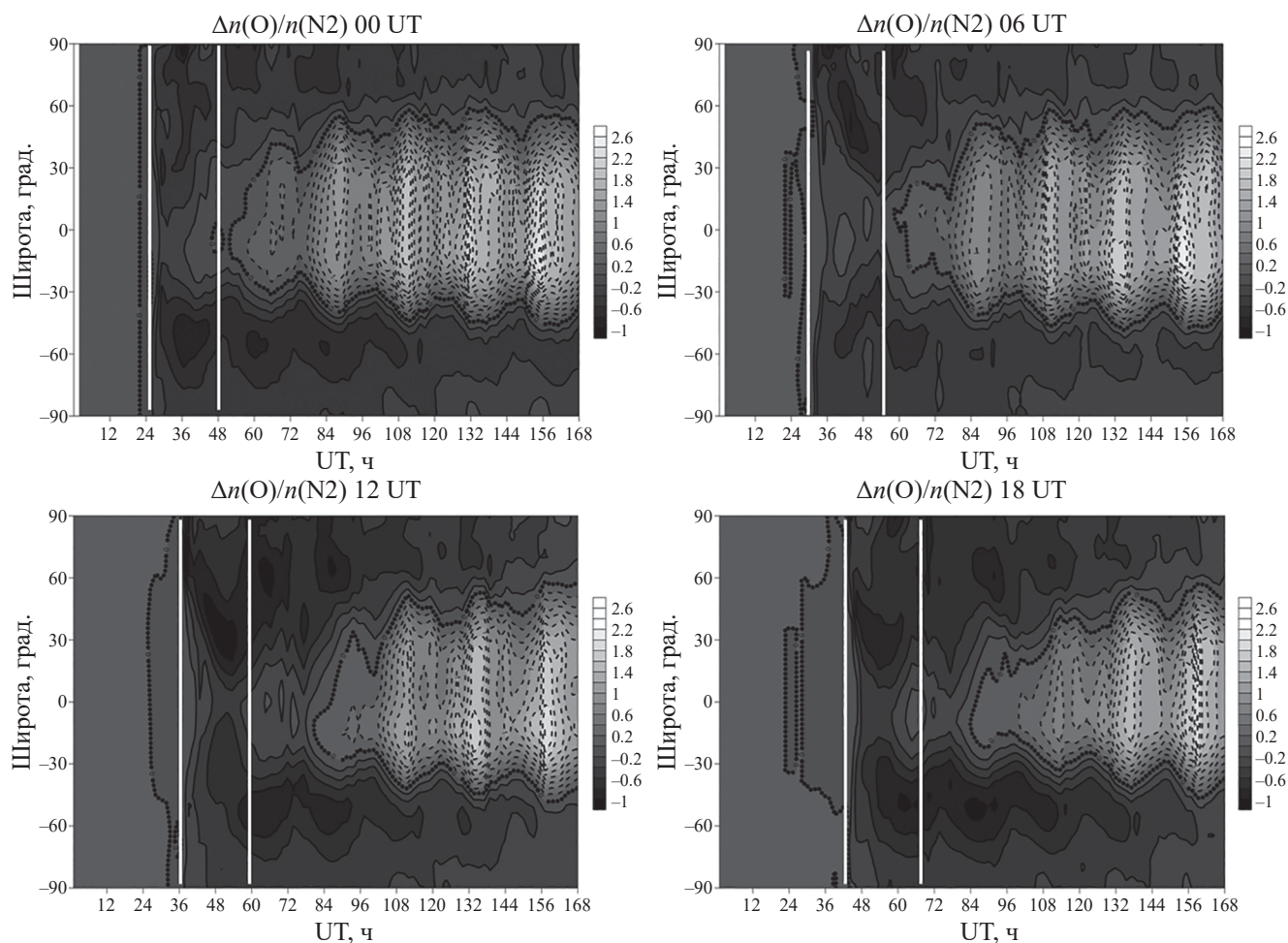


Рис. 5. То же, что и на рис. 2 для возмущений $n(O)/n(N_2)$.

с различными моментами начала связаны с различиями возмущений ветра и состава термосферы и проявляются главным образом после 12 ч с момента начала геомагнитной бури.

Для всех рассматриваемых бурь механизмом формирования ионосферных эффектов последствия в виде положительных возмущений $N_m F2$ являются возмущения $n(O)/n(N_2)$ на высотах F-области ионосферы. Время начала формирования эффектов последствия зависит от времени начала геомагнитной бури. Показано, что амплитуда и широтная протяженность среднезональных эффектов последствия зависят от времени UT начала бури. Это объясняется различиями в возмущениях нейтральной температуры и $n(O)/n(N_2)$ для бурь с разными моментами начала по UT.

Различия в возмущениях среднезональных параметров для разных бурь указывает на то, что ионосферные эффекты одинаковых бурь с одинаковыми моментами начала по LT (соответственно с различными по UT) на разных долготах могут значительно отличаться. В дальнейшем планируется

рассмотреть термосферно-ионосферные эффекты бурь с различными моментами начала на разных долготах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-17-00208).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mayr H.G., Harris I., Spencer N.W.* // Rev. Geophys. 1978. V. 16. No. 4. P. 539.
2. *Buonsanto M.J.* // Space Sci. Rev. 1999. V. 88. No. 3-4. P. 563.
3. *Immel T.J., Mannucci A.J.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2013. V. 118. No. 12. P. 7928.
4. *Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Yasyukevich Y.V. et al.* // Atmosphere. 2020. V. 11. No. 12. P. 1308.
5. *Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V. et al.* // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2018. V. 180. P. 78.

6. Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В. и др. // Солн.-земн. физ. 2018. Т. 4. № 4. P. 32; Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V. et al. // Solar-Terr. Phys. 2018. V. 4. No. 4. P. 26.
7. Borries C., Berdermann J., Jakowski N., Wilken V. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120. No. 4. P. 3175.
8. Greer K.R., Immel T., Ridley A. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122. No. 4. P. 4512.
9. Liu W., Xu L., Xiong C., Xu J. // Adv. Space Res. 2017. V. 59. No. 2. P. 603.
10. Шпынев Б.Г., Золотухина Н.А., Полех Н.М. и др. // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2017. Т. 14. №. 4. С. 235.
11. Chang L.C., Liu J.Y., Palo S.E. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2011. V. 116. Art. No. A10.
12. Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Klimenko M.V. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122. No. 2. P. 2398.
13. Klimenko M.V., Zakharenkova I.E., Klimenko V.V. et al. // Space Weather. 2019. V. 17. No. 7. P. 1073.
14. Белюченко К.В., Клименко М.В., Клименко В.В., Ратовский К.Г. // Солн.-земн. физ. 2022. Т. 8. № 3. С. 41; Belyuchenko K.V., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G. // Solar-Terr. Phys. 2022. V. 8. No. 3. P. 38.
15. Vorobjev V.G., Yagodkina O.I. // JASTP. 2008. V. 70. No. 2—4. P. 654.
16. Feshchenko E.Yu., Maltsev Yu.P. // Proc. XXVI Ann. Sem. "Physics of Auroral Phenomena" (Apatity, 2003). P. 59.
17. Sojka J.J., Schunk R.W., Denig W.F. // J. Geophys. Res. Space Phys. 1994. V. 99. No. A11. P. 21341.
18. Prölss G.W. // Rev. Geophys. 1980. V. 18. No. 1. P. 183.

Modeling the UT effect of zonal-averaged perturbations in the parameters of the upper atmosphere for the example of a geomagnetic storm in march 2015

K. V. Belyuchenko^{1, 2, *}, M. V. Klimenko^{1, 2}, V. V. Klimenko², K. G. Ratovsky¹

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033 Russia

²West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, 236016 Russia

*e-mail: kdei@list.ru

Using the Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere, and Protonosphere (GSM TIP), we previously gave an interpretation of the ionospheric effects of the March 2015 geomagnetic storm, identified and analyzed the positive aftereffects. Further analysis of the numerical simulation results showed that the positive aftereffects manifest themselves differently in different longitudinal sectors. This paper presents the results of studying the dependence of disturbances in the parameters of the upper atmosphere on the time of the onset of a geomagnetic storm in UT. For this, additional calculations of geomagnetic storms were carried out, identical to the considered storm in March 2015, which began on March 17 at 12 UT, with a start time of the geomagnetic storm shifted by 00, 06, and 18 UT. It is shown that for the family of storms under consideration, the effects of the thermosphere wind are significant in the formation of $N_m F2$ disturbances in the main phase of the storm. The mechanism for the formation of ionospheric aftereffects in the form of positive $N_m F2$ disturbances are $n(O)/n(N_2)$ disturbances at heights F of the ionospheric region.

Keywords: geomagnetic storm, ionospheric disturbances, UT effect, GSM TIP model