УДК 550.338.2
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-198
ORCID: 0009-0006-1153-1394

ШИРОТНО-ДОЛГОТНАЯ И СЕЗОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОТКЛИКА ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ НА ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ

К.В. Белюченко[1, 2, 3], М.В. Клименко[1], К.Г. Ратовский[3], В.В. Клименко[1], Ф.С. Бессараб[1], А.В. Тимченко[1], И.С. Янковский[1]

[1]Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. А.С. Пушкова РАН, Калининград, Россия,
kdei@list.ru
[2]Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия
[3]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

LATITUDINAL, LONGITUDINAL, AND SEASONAL DEPENDENCE OF THE RESPONSE OF THE ELECTRON CONCENTRATION IN THE IONOSPHERE TO GEOMAGNETIC STORMS

K.V. Belyuchenko[1, 2, 3], M.V. Klimenko[1], K.G. Ratovsky[3], V.V. Klimenko[1], F.S. Bessarab[1], A.V. Timchenko[1], I.S. Yankovsky[1]

[1]West Department of the Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia, kdei@list.ru
[2]Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia
[3]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Работа посвящена исследованию отклика ионосферы на сильные магнитосферные возмущения с использованием Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП). Актуальность работы обусловлена значительным влиянием ионосферных возмущений на работу спутниковых и радионавигационных систем. Было проведено исследование влияния локального времени начала бури на возмущения параметров термосферы и ионосферы, которое показало, что локальное время начала бури является ключевым фактором, определяющим ионосферные эффекты на главной фазе, тогда как эффекты последействия зависят от долготы и практически не зависят от момента начала геомагнитной бури. Также был проведен расчет для сильной «эталонной» геомагнитной бури, по результатам которого выявили сезонные вариации отклика REC, демонстрирующие максимальные положительные возмущения зимой и отрицательные — в период равноденствий.

Ключевые слова: ГСМ ТИП, геомагнитная буря, ионосфера, UT – эффект, численное моделирование.

Abstract. The paper is devoted to the study of the ionospheric response to strong magnetospheric disturbances using the Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere, and Protonosphere (GSM TIP). The relevance of the work is due to the significant influence of ionospheric disturbances on the operation of satellite and radio navigation systems. A study was conducted on the influence of the local time of the storm onset on the disturbances of the thermosphere and ionosphere parameters, which showed that the local time of the storm onset is a key factor in determining the ionospheric effects during the main phase, while the after-effects depend on the longitude and are almost independent of the time of the geomagnetic storm onset. Additionally, a calculation was performed for a strong “reference” geomagnetic storm, which revealed seasonal variations in the REC response, with maximum positive disturbances during winter and negative disturbances during the equinoxes.

Keywords: GSM TIP, geomagnetic storm, ionosphere, UT – effect, numerical modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Влияние геомагнитной активности на параметры ионосферы является важным фактором при решении практических задач навигации и связи. На данный момент известны общие характеристики суточно-сезонной и широтной зависимости ионосферных возмущений на главной фазе геомагнитных бурь [Buonsanto, 1999]. Благодаря развитию современных космических систем по исследованию ионосферы становятся доступны новые данные позволяющие исследовать глобальную структуру влияние геомагнитной активности на ионосферу. Часто можно встретить работы, основанные на глобальной структуре ионосферных эффектов геомагнитных бурь в полном электронном содержании [Mendillo, 2006]. Это позволило в том числе исследовать долготную зависимость распределения полного электронного содержания (TEC) в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях [Yasyukevich et al., 2018].

Ионосферные возмущения на фазе восстановления, эффекты последействия, UT-эффект и долготная зависимость ионосферных бурь остаются открытыми вопросами. Ранее на основе Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы, протоносферы (ГСМ ТИП) были выполнены исследования ионосферных эффектов различных геомагнитных бурь [Belyuchenko et al., 2025; Ратовский и др., 2025].

Целью данной работы является изучение долготной, широтной и сезонной зависимости ионосферных эффектов геомагнитных бурь, по результатам, полученным с использованием модели ГСМ ТИП.

МЕТОДЫ

Основой данного исследования являются результаты расчетов проведенные на Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы,

Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП). Было проведено моделирование для 2 событий.

Для геомагнитной бури 17 - 23 марта 2015 года с различными моментами начала по UT. Геомагнитная буря началась в 12 UT, при реализации модельных расчетов эффектов геомагнитных бурь с другими моментами начала по UT мы использовали поведение AE и AL индексов со смещением на 6 и 12 часов назад по времени (бури с началом в 00 и 06 UT), а также на 6 часов вперед по времени (буря с началом в 18 UT). Таким образом, нами были рассмотрены 4 сценария абсолютно одинаковых геомагнитных бурь с моментами начала в 00, 06, 12 и 18 UT.

На основе работы соавторов, которыми был использован статистический подход для анализа ионосферных откликов на геомагнитные события [Ратовский и др., 2020]. Мною была использована модель ГСМ ТИП для моделирования сильной эталонной геомагнитной бури, полученной путем усреднения вариаций индекса AE с использованием метода наложенных эпох для ключевых моментов, соответствующих максимуму индекса AE. Была рассчитана реакция регионального электронного содержания ионосферы (REC). Модельный отклик REC сравнивался с наблюдаемым эталонным откликом REC, который рассчитывался по следующей схеме: 1) вычисление REC по картам общего электронного содержания; 2) расчет возмущений REC (ΔREC) как процентных отклонений наблюдаемых значений от 27-дневного скользящего среднего REC; и 3) расчет референсного отклика REC путем усреднения возмущений с использованием метода наложенных эпох для ключевых моментов, соответствующих максимуму индекса AE в пределах ±5 дней относительно времени максимума AE.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для начала рассмотрим результаты, полученные для бури марта 2015 года. Для упрощения анализа результатов нами были выбраны бури и долготы таким образом, чтобы главная фаза геомагнитной бури проходила в освещенное и не освещенное время, а конкретно в 06 и 18 часов по локальному времени (LT). На рисунке 1 (для 06 LT) и рисунке 2 (для 18 LT) представлены возмущения концентрации в максимуме F2 слоя ионосферы (NmF2) и возмущения отношения атомарного кислорода к молекулярному азоту (n(O)/n(N2)) для 2 долготных секторов, Американского (270°E) и Тихоокеанского (180°E).

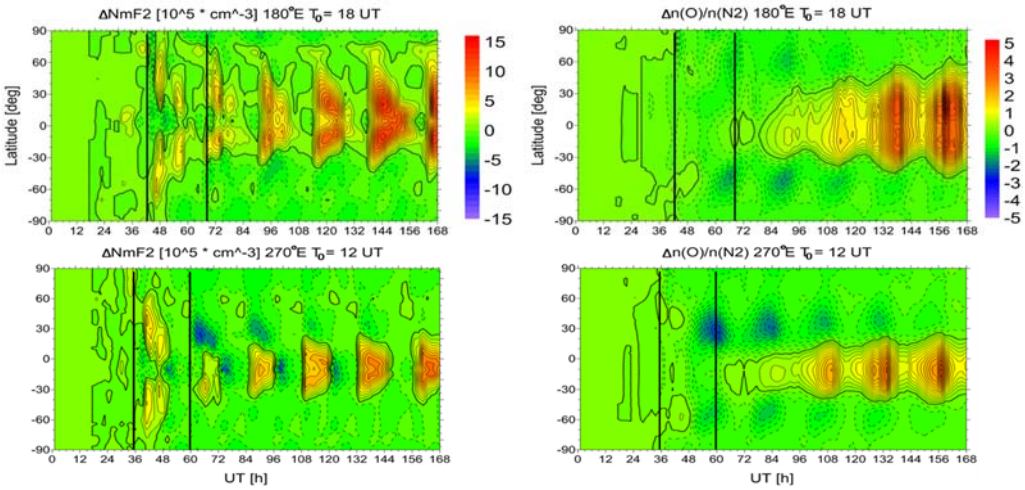

Рис. 1. Возмущения NmF2 и n(O)/n(N2) для Тихоокеанского сверху и Американского долготных снизу долготных секторов, для расчетов со временем начала бури в 06 LT

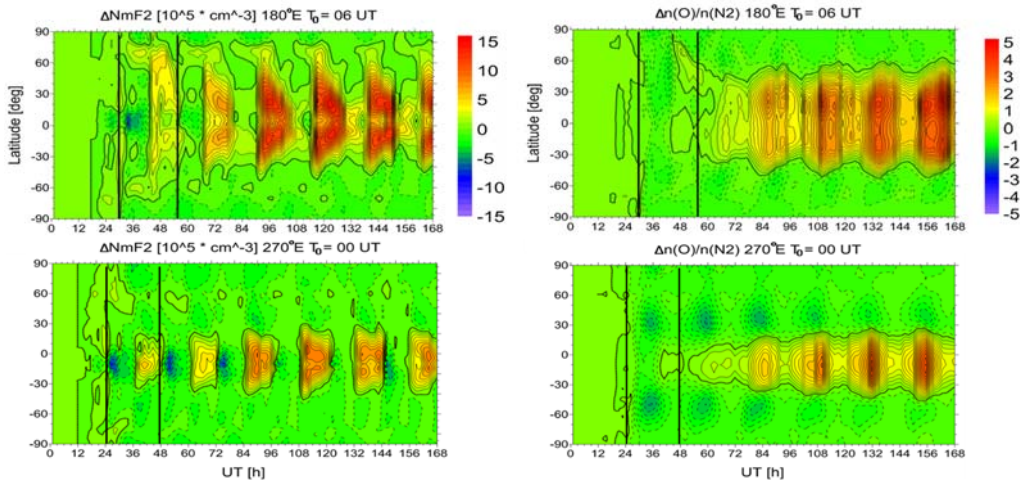

Рис. 2. Возмущения NmF2 и n(O)/n(N2) для Тихоокеанского сверху и Американского долготных снизу долготных секторов, для расчетов со временем начала бури в 18 LT.

Рассматривая возмущения NmF2 на главной фазе бури были получены следующие результаты: 1) Присутствуют положительные возмущения в субавроральных и средних широтах на всех рассматриваемых картах для случая 06 LT, возмущения на ранней стадии главной фазы преимущественно отрицательные для всех рассматриваемых карт для случая 18 LT; 2) Наиболее интенсивные возмущения приходятся на долготы соответствующие Американскому (270°E) и Тихоокеанскому (180°E) секторам.

Рассматривая возмущения NmF2 на фазе восстановления бури были получены следующие результаты: 1) Интенсивность и широтная протяженность возмущений больше для Азиатского (90°E) и Тихоокеанского (180°E) секторов, при этом картина возмущений смещена в северное полушарие; 2) Для Европейского (0°E) и Американского (270°E) секторов возмущения сконцентрированы на экваторе, но также имеют смещение, в северное полушарие для 0°E и в южное для 270°E; 3) На фазе восстановления возмущения в n(O)/n(N2) имеют схожую широтно-долготную структуру, что и у NmF2.

Таким образом можно сделать вывод о том, что время начала бури является важным фактором при рассмотрении эффектов на главной фазе бури. Возмущения на фазе восстановления от времени начала бури не зависят, они в большей степени зависят от долготы.

На рисунке 3 представлены эталонные ионосферные отклики на сильные геомагнитные бури, полученные методом наложенных эпох (наблюдения), и результаты моделирования ионосферных откликов с использованием модели ГСМ ТИП в рамках концепции эталонной бури (модель).

В первую очередь можно отметить качественное соответствие между моделью и наблюдениями: отклики начинаются с положительного возмущения, которое через несколько часов переходит в отрицательную фазу (исключения из этой закономерности будут отмечены ниже). Для Южного полушария модель хорошо описывает амплитуду положительного возмущения для лета (локальная зима), весны и осени. Зимой (локальное лето) модель завышает наблюдаемую амплитуду. В случае отрицательного возмущения модель согласуется с наблюдениями для весны, занижает их для зимы (локальное лето) и осени, а для лета (локальная зима) не дает отрицательного отклика. Для Северного полушария наблюдаются количественные различия как для положительных, так и для отрицательных возмущений. Модель завышает амплитуду положительного возмущения зимой и занижает ее весной и осенью. В наблюдениях для лета четкий положительный отклик отсутствует. В случае отрицательного возмущения модель согласуется с наблюдениями для весны и занижает их для осени. Модель не дает отрицательного отклика зимой и летом.

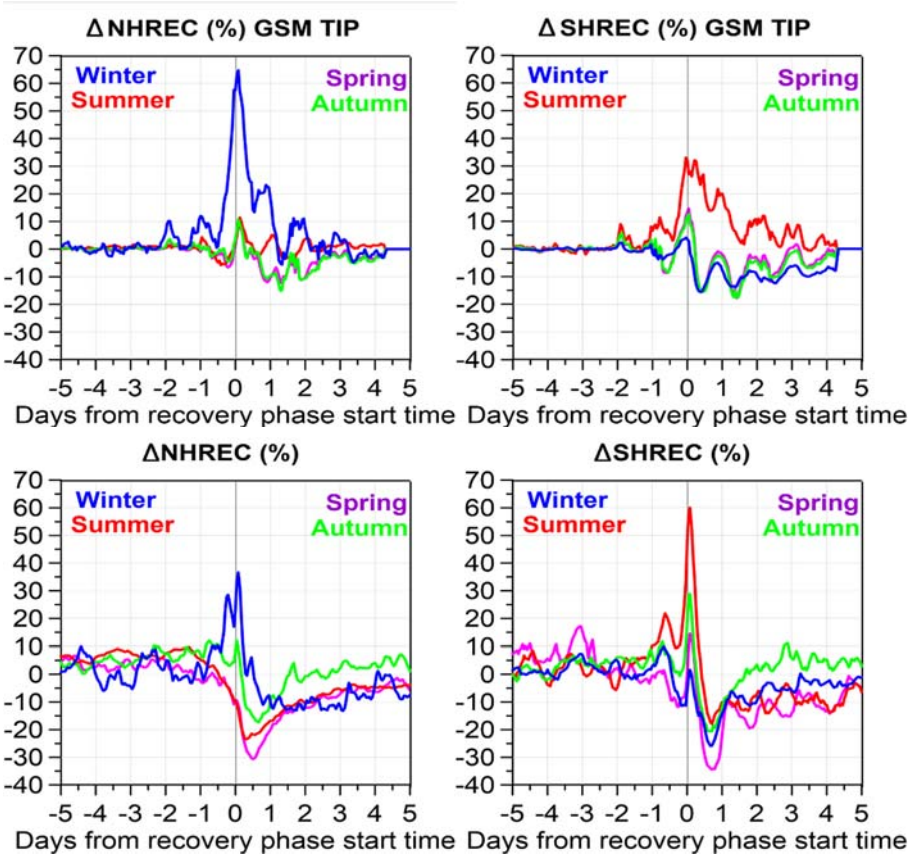

Рис. 3. Модельные расчеты процентных ионосферных возмущений во время бури на верхней панели, ионосферные отклики во время бури, полученные методом наложения эпох на нижней панели (для Северного/Южного полушарий слева/справа)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

— Изучена зависимость ионосферных возмущений от времени начала геомагнитной бури по UT (мировое время) и LT (локальное время), и от рассматриваемой долготы на разных фазах геомагнитной бури. Показано, что местное время начала бури является важнейшим фактором, определяющим ионосферные эффекты на главной фазе геомагнитной бури. Ионосферные эффекты последействия зависят от долготы и практически не зависят от момента начала геомагнитной бури.

— Была выявлена сезонная зависимость отклика высокоширотного регионального электронного содержания (REC) на сильную эталонную геомагнитную бурю. Положительные возмущения высокоширотного REC формируются на главной фазе бури с максимумом в местную зиму. Отрицательные возмущения высокоширотного REC образуются на фазе восстановления бури с наибольшей амплитудой в период равноденствий. UT определяет величину возмущений, но не меняет их сезонный характер.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00217, https://rscf.ru/project/25-27-00217/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ратовский К.Г., Клименко М.В., Ясюкевич Ю.В., и др. Статистический анализ ионосферного отклика на геомагнитные бури с использованием данных глобальных ионосферных карт // Химическая физика. 2020. Т. 39, № 10. С. 57–68.

Ратовский К.Г., Клименко М.В., Веснин А.М., Белюченко К.В. Отклик регионального электронного содержания на геомагнитные события в высоких, средних и экваториальных широтах, полученные методом наложенных эпох с использованием AE-индекса // Солнечно-земная физика. 2025. Т. 11, № 2. С. 79–88.

Buonsanto M. J. Ionospheric storms—a review // Space Science Reviews. 1999. V. 88, N 3. P. 563-601.

Belyuchenko K.V., Klimenko M.V., Klimenko V.V., et al. Statistical and modeling study of the response of high-latitude regional electron content to a reference geomagnetic storm // Advances in Space Research. 2025. V. 75, N 6. P. 4850-4861.

Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content // Reviews of Geophysics. 2006. V. 44, N 4.

Yasyukevich Y.V., Yasyukevich A.S., Ratovsky K.G., et al. Winter anomaly in NmF2 and TEC: when and where it can occur // Journal of Space Weather and Space Climate. 2018. V. 8, P. A45.