

УДК 550.385.44

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 7 НОЯБРЯ 2022 ГОДА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

© 2024 г. И. И. Шагимуратов¹*, М. В. Клименко¹, И. И. Ефишов¹, М. В. Филатов², Г. А. Якимова¹

¹Калининградский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки “Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова Российской академии наук”, Калининград, Россия

²Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Полярный геофизический институт”, Апатиты, Россия

*E-mail: shagimuratov@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2023

После доработки 13.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

На основе глобальных данных измерений полного электронного содержания ионосферы представлен анализ развития умеренной магнитной бури 7 ноября 2022 г. Проведено сравнение эффектов бури в американском и европейском секторах. Во время бури обнаружены проявления в ионосфере крупномасштабных структур SED (storm enhanced density) и TOI (tongue of ionization).

DOI: 10.31857/S0367676524030043, EDN: QNBCOQ

ВВЕДЕНИЕ

Несколько характерных крупномасштабных неоднородностей можно наблюдать в полярной и субавроральной ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. К ним можно отнести главный ионосферный провал (main ionospheric trough, MIT), буревое увеличение ионизации (storm enhanced density, SED), язык ионизации (tongue of ionization, TOI) и пятна повышенной ионизации — патчи (polar cap patches). Сильные градиенты на краях этих структур приводят к генерации неоднородностей, с которыми связаны сцинтилляции/флуктуации навигационных сигналов. Флуктуации сигналов GPS/ГЛОНАСС приводят к увеличению ошибок позиционирования, нарушению навигации и связи в высоких широтах [1–4].

Повышение электронного содержания часто наблюдается после полудня и в предполуденные часы (dusk-effect) во время магнитных бурь на субавроральных и авроральных широтах. Это явление носит название SED [5], источник его формирования расположен в дневной среднеширотной ионосфере. Чаще всего SED-структура регистрировалась в северном полушарии в американском долготном секторе. Наиболее ярко это явление проявляется в измерениях полного электронного содержания (ТЕС). Во время сильных магнитных

бурь под влиянием магнитосферных электрических полей область SED значительно расширяется по широте, что проявляется в дневном увеличении ТЕС на средних широтах. Увеличение может составлять фактор 2 и выше [6]. Повышение может расширяться в солнечном направлении в сторону полюса с формированием по широте узкой полосы подобно шельфу, струе — SED/plume. Во время сильнейшей бури 30–31 октября 2003 г. в американском секторе в 22 UT величина ТЕС в центре шельфа превышала 250 TECU [7]. Структура SED/TOI регистрировалась и во время относительно слабых по интенсивности магнитных бурь, таких как 11 октября 2010 г. [8] и 17 марта 2013 г. [9].

Перемещение SED/plume в полярную шапку может приводить к усилению языка ионизации TOI [10–12]. Структуры TOI показывают зависимость от UT, сезона, долготы [13]. Внутри TOI ионизация может в 2–10 раз превышать фоновую/ночную ионизацию в полярной шапке [7]. При конвекции SED/TOI-структуры через полярную шапку TOI может фрагментироваться на дискретные полярные патчи [14]. На основе трехмерной томографической реконструкции ТЕС-измерений для американского сектора во время бури 17 марта 2013 г. выявлена высотная структура SED-plume и ее пространственно-временная эволюция. Сначала данная структура появилась на высоте около

400 км, затем расширялась вниз до 300 км и вверх до 500 км. Показано, что наибольшее увеличение ионизации наблюдается выше максимума F2 слоя [9].

Благоприятные условия для формирования SED/TOI складываются в североамериканском секторе. Большинство ранее выполненных исследований касалось именно этого сектора. Позже структуры SED/TOI обнаружены в других долготных секторах [8, 15–17].

Механизмы формирования SED/TOI-структуры обсуждаются в многочисленных работах [13, 18–21]. В работе [19] показано, что дрейфы ионов играют важную роль в образовании SED в верхней ионосфере, а нейтральные ветры — ниже максимума F2 слоя. Также установлено, что SED и TOI являются разными структурами, которые проявляются на разных высотах. На основе самосогласованной модели термосферы, ионосферы и проионосферы во время бури 17 марта 2015 г. было установлено, что ветер и изменение нейтрального состава играют важную роль в формировании структуры TOI. Было выявлено, что интенсивность и размер TOI растут с высотой [20].

Большинство исследований, касающихся анализа SED/TOI, сфокусировано на проявлении этих структур во время сильных геомагнитных возмущений. Эти исследования были акцентированы на анализе эффектов SED/TOI в американском долготном секторе. Лишь в нескольких работах пространственно-временное развитие этих аномалий представлено для малых и умеренных бурь. Исключением из общей тенденции можно выделить работу, в которой представлены результаты анализа для бури малой интенсивности 11 октября 2010 г., когда индекс Dst не превышал -80 нТл [8].

В данной работе представлены результаты наблюдений пространственно-временного поведения ТЕС с проявлением SED/TOI-структур для умеренной бури 7 ноября 2022 г. в европейском и американском долготных секторах. Представлены характеристики и пространственно-временная эволюция этих структурных особенностей высокоширотной ионосферы. Проведено сравнение основных характеристик этих структур для рассматриваемого события с другими бурями в разных долготных секторах. Основной целью работы является выявление пространственно-временных особенностей SED/TOI-структур для умеренной бури в период осеннего равноденствия.

Ранее большая часть исследований касалась ограниченного числа событий (сильных бурь). Поэтому представляется интересным расширить анализ проявления эффектов SED/TOI применительно к различным геофизическим условиям. Результаты исследований могут быть полезны для дальнейшего прогнозирования высокоширотных

ионосферных эффектов космической погоды, что особенно актуально в вопросах обеспечения навигации и радиосвязи в Арктике.

ДАННЫЕ И МЕТОДОЛОГИЯ

Для исследования ионосферных эффектов бури использовались измерения полного электронного содержания (ТЕС), которые основываются на GPS/ГЛОНАСС-наблюдениях мировой сети станций. Для анализа пространственно-временной динамики ионосферы во время бури формировались региональные карты ТЕС для европейского и американского секторов. В качестве исходных данных использовались глобальные карты ТЕС (GIM), которые представлены в IONEX-формате на сайте <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/ionex/> (далее — IONEX-карты). Карты представлены в географических координатах с равномерным шагом в долготном диапазоне $\pm 180^\circ$, в диапазоне широт $\pm 87.5^\circ$. Разрешения карт составляют 2.5° по широте и 5° по долготе, единица измерений — $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$. Карты формируются разными ионосферными центрами с различным временным разрешением. Мы использовали карты с 15-минутным разрешением [22]. Карты GIM имеют хорошее пространственное покрытие и широко используются в ионосферных исследованиях.

Детальные характеристики SED/TOI-структур были получены по ТЕС-картам, сформированным по данным базы “Мадригал” (<http://cedar.openmadrigal.org/>) [23]. Разрешение карт “Мадригал” — $1 \times 1^\circ$ по широте и долготе, временное разрешение — 5 мин. Карты “Мадригал” обеспечивают высокое разрешение для регионов, где имеется хорошо развитая сеть GPS/ГЛОНАСС-станций. Карты имеют низкое пространственное покрытие над океанами и, в частности, в восточной части России. Для анализа эффектов бури мы формировали по данным GIM региональные карты для спокойного дня 6 ноября, возмущенного дня 7 ноября и на восстановительной фазе бури 8 ноября. Для анализа эволюции структуры TOI формировались полярные карты в географических координатах.

ГЕОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА

Развитие геомагнитной бури 7 ноября 2022 г. представлено на рис. 1. Солнечно-магнитные параметры сформированы по данным OMNI (https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html). Пропуски на рисунке обусловлены отсутствием данных. Последовательно (сверху вниз) показаны: вариации B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (IMF), скорость солнечного ветра (V_{sw}), планетарный геомагнитный индекс Кр, геомагнитный индекс симметричной компоненты кольцевого тока SYM-H для 6–10 ноября 2022 г. Буря

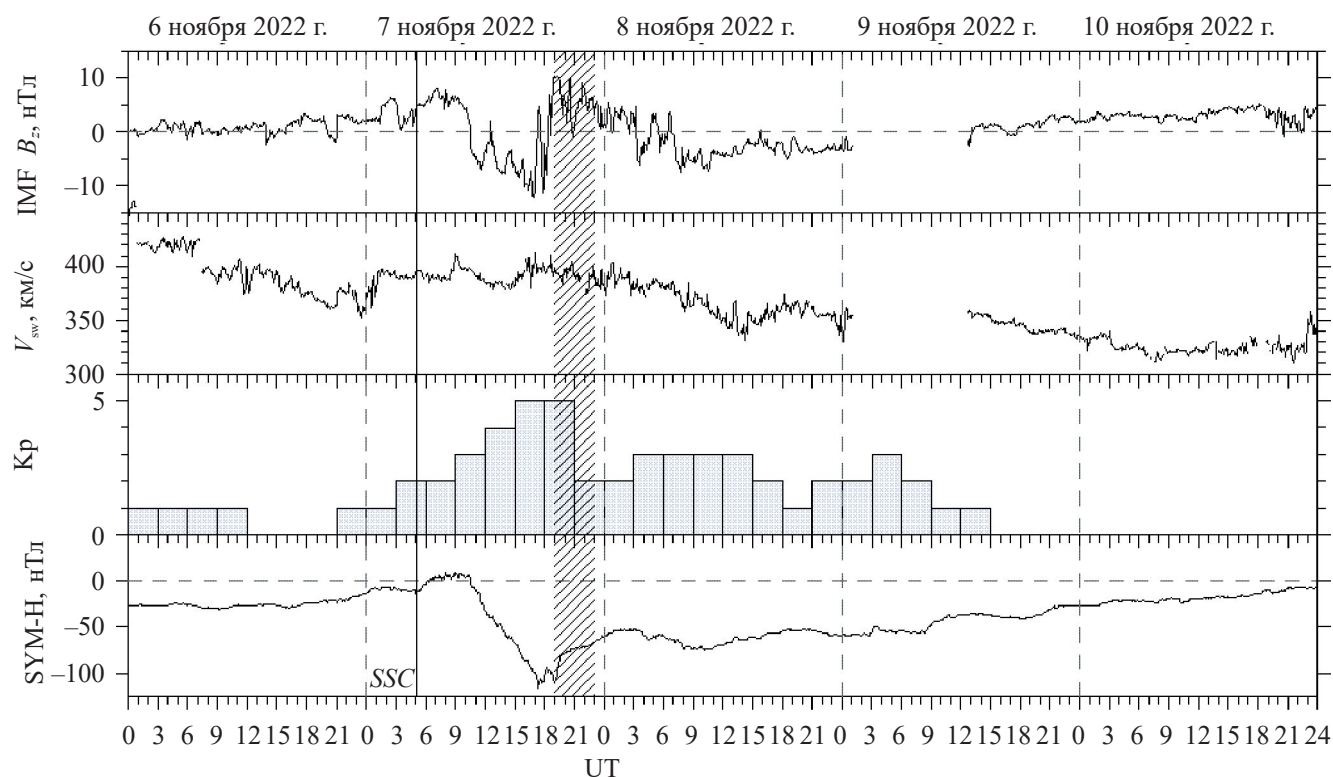


Рис. 1. Солнечно геомагнитные условия за 6—10 ноября 2022 г.

носила изолированный характер с небольшой продолжительностью активной фазы (около 7 ч), без четко выраженного внезапного начала (SSC). Основная фаза бури стартовала после 10:30 UT, затем произошло падение индекса SYM-H до значения ~ 110 нТл примерно в 17:30 UT, далее последовала фаза восстановления. Индекс геомагнитной активности Kp достигал максимального значения 5 в 21 UT 7 ноября. Отрицательная величина B_z достигала -12.1 нТл в 17 UT, после 18 ч B_z -компонента приобрела положительную величину с флуктуацией до 10 нТл. Эффект SED проявился на начальной стадии фазы восстановления. На рис. 1 штриховкой показан интервал, когда проявлялась SED-plume-структура.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нами были сформированы региональные карты ТЕС для европейского и американского секторов для широт выше 50° с.ш.. На рис. 2 представлены карты ТЕС с одночасовым интервалом для спокойного дня (6 ноября) и возмущенного (7 ноября) на интервале 12—23 UT. Здесь также показан фрагмент карт на восстановительной фазе бури 8 ноября 00—03 UT. Локальные области (темные пятна) на картах соответствуют очень низкой концентрации (менее 3 TECU). Проявление таких

пятен в ночной ионосфере отражает точность измерений ТЕС в конкретных условиях.

На рисунке видно, что по сравнению со спокойным днем пространственно-временная структура ионосферы во время бури претерпела существенные изменения. Наиболее значимый эффект бури проявился в дневное время. Увеличение электронной концентрации ярко проявилось в послеполуденное время как в европейском, так и в американском долготном секторах. Такое увеличение концентрации ассоциируется с проявлением эффекта SED, который часто наблюдается на средних и субавроральных широтах. Структура SED может простираться до высоких широт в касп и полярную шапку, с формированием TOI [5].

Европейский сектор

Над Европой положительное возмущение, определяемое как SED-структура, ярко проявилось в интервале 10—19 UT (рис. 2a). На картах видно, что в это время имела место существенная перестройка широтной структуры ионосферы. Из рис. 2a следует, что в высоких широтах в полярной ионосфере с 15 UT сформировалась аномалия в виде области повышенных значений ТЕС. Следует отметить, что подобная аномалия не наблюдалась в спокойный день 6 ноября. Южная граница положения аномалии приходилось на широты около $70\text{--}75^\circ$ с.ш.

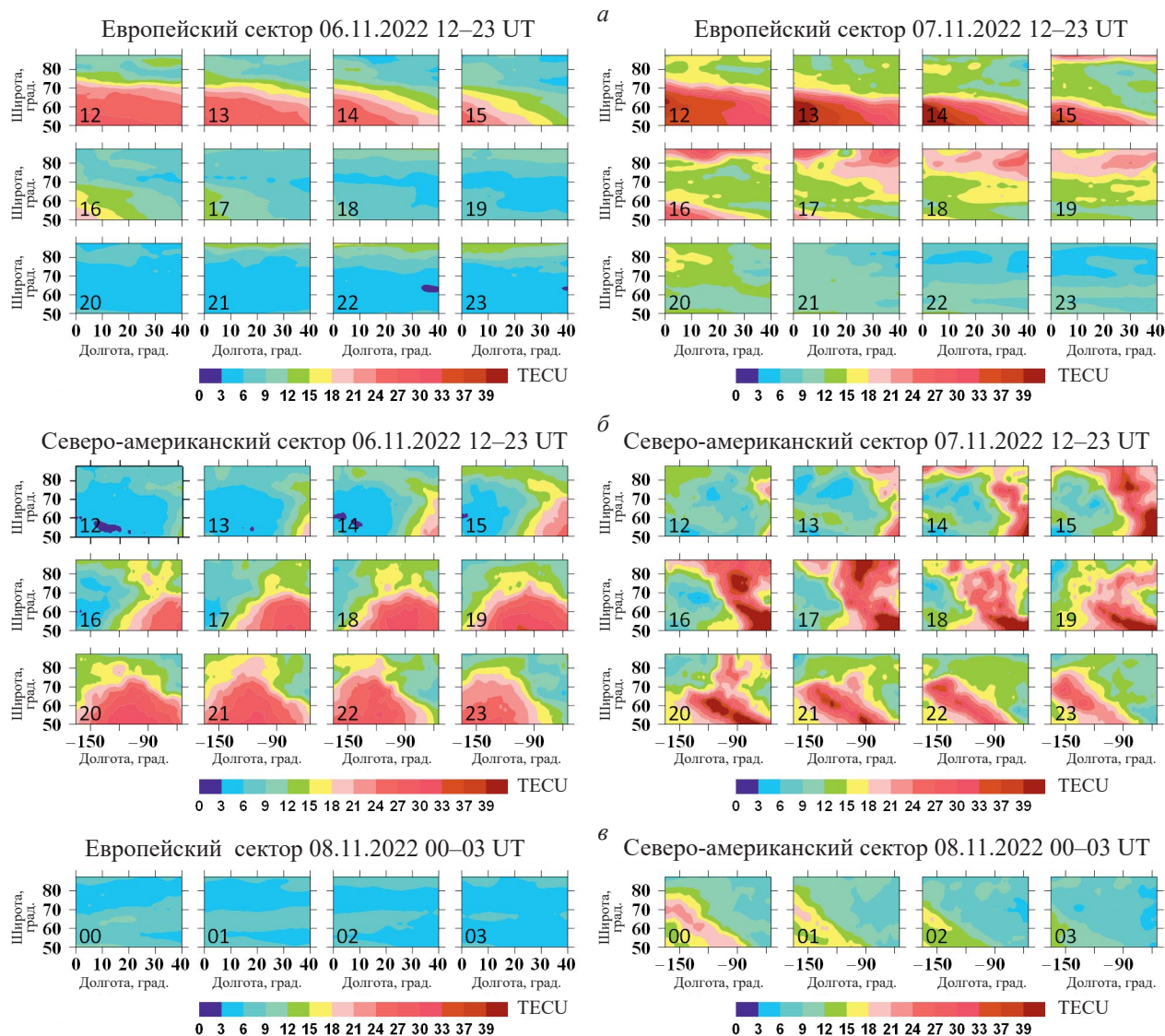


Рис. 2. Карты ТЕС с часовым интервалом для европейского (а) и американского (б) секторов за 6 и 7 ноября 2022 г. Карты для обоих секторов за 8 ноября в интервале 00–03 UT (а).

На широтах выше 75° с.ш. в 15 UT повышение ТЕС было более чем в 2 раза по сравнению со спокойным днем 6 ноября. Выскоширотная аномалия наблюдалась вплоть до 19 UT. Над Азией (здесь не показано) в ночном секторе область повышенной электронной концентрации расширялась и опускалась на более низкие широты. Это можно в дальнейшем наблюдать на полярных картах ТЕС. Мы отмечаем, что данная структура регистрировалась на активной фазе бури, когда B_z -компонента межпланетного магнитного поля IMF приобрела устойчиво положительный характер. Мы определили описываемую аномалию, как проявление языка ионизации TOI. Структура TOI формируется, когда область повышенной электронной концентрации (SED) проникает в полярную шапку и далее за счет конвекции в антисолнечном направлении,

может проявиться в ночной ионосфере. В полярной шапке TOI может фрагментироваться в дискретные пятна повышенной электронной плотности (polar cap patches), с которыми ассоциируются флуктуации ГЛОНАСС/GPS-сигналов в полярной ионосфере [14]. Интенсивные флуктуации во время геомагнитных бурь могут нарушить работу навигационных систем [1].

На рис. 3 приведена детальная картина проявления TOI в европейском долготном секторе для 15 UT. С этого момента времени наблюдалась аномалия в полярной ионосфере в виде положительного возмущения. Здесь представлен фрагмент карты ТЕС (слева) и широтный разрез на долготу 10° в.д. для 7 ноября (справа). Карты построены на основе данных глобальных карт ТЕС с широтным разрешением 2.5° . Данные сети “Мадригал”,

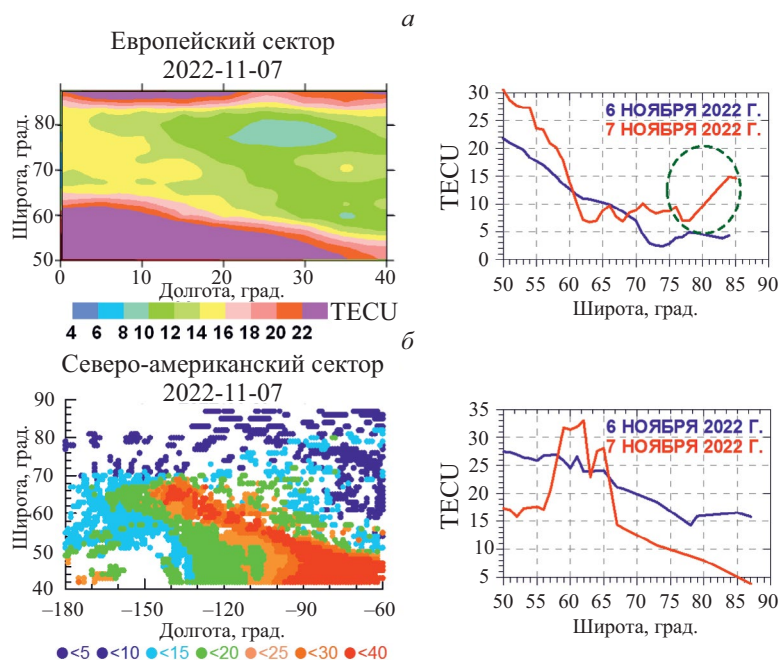


Рис. 3. Карта ТЕС для европейского сектора 7 ноября и соответствующий широтный разрез на долготе 10° в.д. в 15 UT 6 и 7 ноября (а) и карта ТЕС для американского сектора за 7 ноября и соответствующий широтный разрез на долготе 110° з.д. в 21 UT за 6 и 7 ноября (б).

которые обеспечили бы более высокое широтное разрешение, на этих долготах отсутствуют. Для сравнения здесь дан также широтный профиль для 6 ноября. На широтном профиле 7 ноября с географической широты 75°с.ш. четко наблюдается рост ТЕС. Максимальная величина составила 15 TECU на широте 87°с.ш., что в 1.5 раза выше, чем на широтах ниже 75°с.ш.

Американский сектор

Карты ТЕС над Америкой, на долготах от 90° до 180° з.д., представлены на рис. 2б для 6 и 7 ноября и фрагмент для 8 ноября (рис. 2в). На картах для ночного времени 12–15 UT выделяются небольшие области, где величина концентрации ниже 3 TECU. Эффект может быть обусловлен погрешностью измерений при столь низкой величине концентрации. Пространственно-временное распределение ТЕС во время бури существенно отличается от спокойных условий и разительно отличается от поведения в европейском секторе. Существенная перестройка ионосферы наблюдается после 14 UT 7 ноября на стадии активной фазы бури. В целом, аналогично Европе, эффект SED в виде положительного возмущения проявился в дневное время.

Характерной особенностью пространственного поведения ТЕС в американском секторе явилось положительное возмущение в виде узкой полосы, простирающейся в северо-западном направлении до широт выше 60° с.ш. Данная структура

наблюдалась в интервале 20–23 UT 7 ноября. Интересно отметить, что возмущение сохранялось до 03 UT 8 ноября на восстановительной фазе бури.

Часто SED-структура ассоциируется со шлейфом увеличения ТЕС (SED-plume), который наблюдается в районе местного полудня в направлении к полюсу. Область, с которой начинается шлейф (основание), располагается на средних широтах и при вращении земли остается фиксированной в районе местного полудня [16]. В работе представлены примеры развития структуры SED-plume в российском и европейском регионах, затем прослежено ее проявление в Северной Америке. Над Восточной Сибирью и Европой SED структура наблюдалась около местного полудня и сдвигалась к закату в Америке. В Европе структура SED наблюдалась в течение 15–20 ч в диапазоне 61°–63° инвариантной широты. Максимальная интенсивность эффекта приходилась на Северную Америку.

Для выявления общих свойств и различий в структурах SED для разных бурь сравним результаты наших наблюдений для бури 7 ноября 2022 г. с магнитными бурями 4 ноября 2021 г. и 17 марта 2013 г. Буря 4 ноября 2021 г. началась в 00 UT, а главная фаза у нее завершилась в 12 UT. Буря 17 марта 2013 г. началась в 06 UT, а главная фаза у нее завершилась в 22 UT. И наконец, геомагнитная буря 7 ноября 2022 г. началась в 11 UT, а главная фаза бури завершилась в 18 UT. По интенсивности буря 7 ноября была самой слабой, а буря в марте 2013 г. самой сильной из рассматриваемых

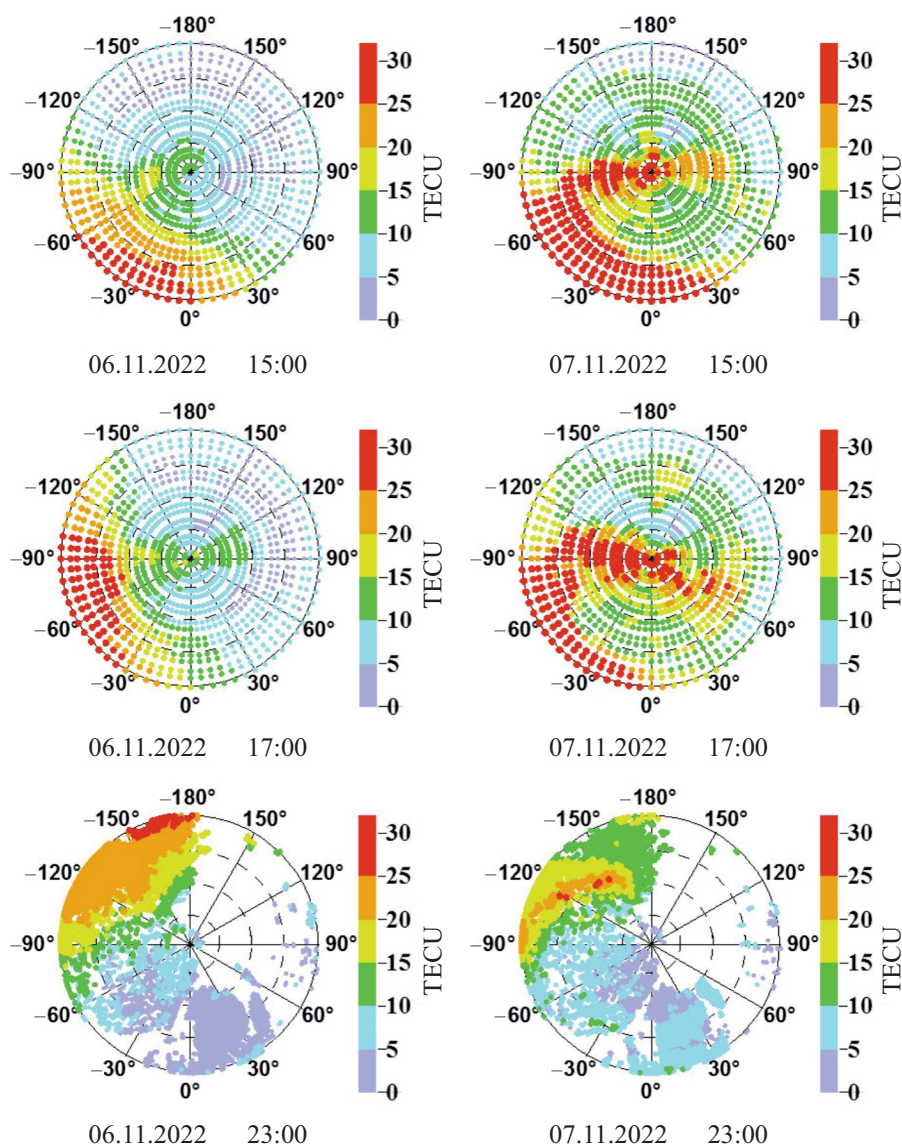


Рис. 4. Полярные карты TEC за 6 и 7 ноября: 15, 17 UT, сформированные по IONEX-данным, 20 UT — по данным базы Мадригал.

бурь. Во время бури 4 ноября 2021 г. мы обнаружили SED-plume в Европе в виде узкого шлейфа, простирающегося в северо-западном направлении до географических широт около 65° с.ш. Шлейф наблюдался вблизи местного полудня в течение 6—8 ч. Основание шлейфа располагалось на широте около 60° с.ш. CGL (corrected geomagnetic latitude). Максимальная величина TEC в шельфе составляла около 22—24 TECU, что в 1.5—2 раза превышало фоновый уровень. Ширина шельфа в основании составляла 5° — 7° . SED-эффект приходился на стадию активной фазы бури, при этом индекс Кр достигал значения около 7—8 [24].

Во время бури 17 марта 2013 г. структура SED-plume наблюдалась в американском секторе в 19—23 UT и приходилась также на максимум

развития геомагнитной бури, когда индекс SYM-H достигал максимальной величины (-130 нТл). Основание шлейфа приходилось на широты около 40° с.ш. Более низкое положение основания можно объяснить конфигурацией магнитного поля в американском секторе. Отметим, что для бури 17 марта 2013 г. структура SED-plume в TEC-измерениях проявлялась весьма слабо [9], в отличие от того, что демонстрируется для рассматриваемой бури (см. рис. 3). Хотя интенсивность бури была сильнее в марте 2013 г.

Для рассматриваемой бури 7 ноября 2022 г., в отличие от бури 4 ноября 2021 г., проявление SED-plume наблюдалось не в европейском, а в американском секторе в интервале 20—23 UT, но аналогично с предыдущим событием — в районе местного

полудня в активную фазу бури (см. рис. 2б). Различие долгот, на которых наблюдалась структура SED-plume, связано с разницей во временном ходе развития геомагнитных бурь. Шлейф повышенной электронной концентрации для бури 7 ноября простирается в северо-западном направлении с широт 50° до 70° с.ш. в американском секторе. Детальная картина проявления SED-plume на карте TEC представлена в нижней части на рис. 3 для 21 UT. Белая область на долготах больше -90° в.д. и широтах ниже 45° с.ш. связана с отсутствием измерений. Здесь можно определенно видеть основание шлейфа — область, которую можно ассоциировать с источником формирования SED-plume [16]. Основание шлейфа расположено в среднеширотной ионосфере на широтах 48° — 50° с.ш.

В большинстве работ структура SED-plume демонстрируется на картах TEC, что не позволяет корректно оценить амплитуду эффекта. Для оценки амплитуды на рис. 3 показан широтный разрез SED-plume. На фоне плавного падения TEC в спокойный день 6 ноября во время бури наблюдается его резкое повышение в виде всплеска (горба). Центр горба располагается на широте 61° с.ш. В максимуме ширина всплеска составляет 2.0° — 2.5° , в основании — около 10° , его амплитуда составила около 32 TECU. На экваториальной стенке горба величина TEC была в 2 раза выше относительно фона.

Полярные карты TEC

В отличие от представленных выше карт пространственно-временного распределения TEC (см. рис. 2), полярные карты позволяют проследить перемещение плазмы через полярную шапку, выделить возникновение и эволюцию SED/TOI во время бури. Полярные карты TEC формировались в географических координатах широта-долгота в широтном диапазоне 50° — 90° с.ш. На рис. 4 для отдельных моментов времени представлены карты для 6—7 ноября 2022 г. Для 15 и 17 UT карты формировались по IONEX-данным, а для 23 UT использовались данные базы “Мадригал”. Данные “Мадригал” наиболее полно представлены для американского сектора. Рисунок демонстрирует пространственно-временную динамику SED/TOI во время бури.

Эффект эволюции SED/TOI-структур был получен для умеренной по интенсивности бури 13 октября 2012 г. Карты TEC формировались с одночасовым интервалом, что дало возможность наблюдать временную динамику структуры SED/TOI и проследить ее распространение со средних широт в высокоширотную область. Структура SED-plume наблюдалась на восстановительной фазе бури 14 октября после 19 UT. Затем структура TOI перемещалась через полярную шапку и проявлялась в ночной ионосфере в 23 UT. При этом превышение TEC по сравнению со спокойным днем составляло ~ 12 TECU [25].

Для рассматриваемой бури 7 ноября 2022 г. мы видели, что TOI-структура проявилась после 15 UT в евроазиатском секторе (см. рис. 3). На рис. 4 для 15 UT явно прослеживается перемещение плазмы через полярную шапку из дневного в ночной сектор на долготах около 90° в.д.. Аномальное повышение электронной концентрации распространилось до широт $\sim 65^\circ$ с.ш. Величина TEC в 2—3 раза превышала уровень спокойного дня 6 ноября. В 17 UT повышение продвинулось в вечерний сектор на долготы $\sim 60^\circ$ в.д. и проявилось на более низких широтах $\sim 60^\circ$ с.ш. При этом интенсивность языка ионизации TOI выросла и расширился его долготный размер в полярной шапке. Величина TEC на широте 60° с.ш. превышала 15 TECU.

После 20 UT на долготах Америки четко сформировалась структура SED-plume в форме узкого шлейфа, вытянутого в северо-западном направлении, как это демонстрируется на рис. 2б. На рис. 4 для 20 UT показано проявление SED-plume на полярной карте, сформированной по данным базы “Мадригал”, которые обеспечивают более высокое разрешение по сравнению с IONEX-картами. К сожалению, данные “Мадригал” имеются не для всех долгот. Здесь ярко проявляется структура SED-plume в виде полосы, простирающейся в солнечном направлении до широт около 70° с.ш. Основание шлейфа приходилось на дневную ионосферу на широты около 50° с.ш. Величина электронной концентрации в центре шлейфа на широте 70° с.ш. составила более 15 TECU, что согласуется с результатами работы [25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным TEC получена детальная картина пространственно-временного развития ионосферных возмущений во время умеренной по интенсивности бури 7 ноября 2022 г. Показаны особенности развития ионосферной бури в европейском и американском секторах. В обоих долготных секторах на стадии активной фазы бури на обоих секторах в послеполуденные часы наблюдалось положительное возмущение TEC, которое свидетельствует о проявлении эффекта SED (Storm Enhanced Density). В европейском секторе обнаружена высокая электронная концентрация на широтах выше 75° с.ш., которая наблюдалась в евроазиатском секторе в послеполуденное/вечернее время. Структура была ассоциирована с языком ионизации (TOI). На основе полярных карт показано, как плазма перемещалась через полярную шапку с дневной стороны ионосферы в ночную, где величина TEC превышала 15 TECU. Повышение TEC составляло более чем в 2 раза относительно спокойного дня.

На долготах Америки в околополуденное время обнаружена SED-plume-структура в виде узкого по широте шлейфа, простирающегося со средних

широт в северо-западном направлении до широт около 75° с.ш. Превышение ТЕС в данной структуре составляло более чем в 2 раза относительно фона. Для равноценной по интенсивности бури 4 ноября 2021 г. SED-plume-структура наблюдалась в европейском секторе. Мы полагаем, что долготное различие для ноябрьских бурь 2021 и 2022 гг. связано с разницей во временном ходе развития геомагнитных бурь.

Результаты свидетельствуют, что SED/TOI-структуры могут иметь место не только для сильных, но для умеренных геомагнитных возмущений. Причем их проявление может наблюдаться на разных долготах, в зависимости от особенностей развития бурь. Как известно, с этими структурами ассоциируются флуктуации/сцинтилляции навигационных сигналов. Представленные исследования интересны для уточнения механизмов формирования SED/TOI, в задачах прогноза эффектов космической погоды, а также в вопросах обеспечения навигации на высоких широтах. Вопрос долготных особенностей проявления SED-plume требует дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Demyanov V., Yasyukevich Ya., Sergeeva M.A., Vesnin A. Space weather impact on GNSS performance. 1st ed. Springer, 2022. P. 380.
2. Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Berngardt O.I. et al. // Radiophys. Quant. Electron. 2004. V. 47. No. 7. P. 453.
3. Xiong C., Yin F., Luo X. et al. // J. Space Weather Space Clim. 2019. V. 9. Art. No. A25.
4. Шагимуратов И.И., Филатов М.В., Ефишов И.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 3. С. 427; Shagimuratov I.I., Filatov M.V., Efshov I.I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 3. P. 318.
5. Foster J.C. // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. No. A2. P. 1675.
6. Heelis R.A., Sojka J.J., David M., Schunk R.W. // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. No. A3. Art. No. A03315.
7. Foster J.C., Rideout W. // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. No. 12. Art. No. L12S04.
8. Shan L.L., Yao Y.B., Kong J. et al. // Space Weather. 2022. V. 20. No. 4. Art. No. e2021SW002862.
9. Zhai C., Lu G., Yao Y. et al. // J. Geophys. Res. 2020. V. 125. No. 11. Art. No. e2020JA028257.
10. Dang T., Lei J., Wang W. et al. // J. Geophys. Res. 2019. V. 124. No. 12. P. 10619.
11. Hosokawa K., Tsugawa T., Shiokawa K. et al. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. No. A12. Art. No. A12333.
12. Horvath I., Lovell B.C. // J. Geophys. Res. 2015. V. 120. No. 2. P. 1428.
13. David M., Sojka J.J., Schunk R.W., Coster A.J. // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. No. 6. P. 2422.
14. Zhang Q.-H., Zhang B.-C., Moen J. et al. // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. No. 12. P. 2918.
15. Yizengaw E., Moldwin M.B., Galvan D.A. // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. No. 17. Art. No. L17103.
16. Coster A.J., Colerico M.J., Foster J. C. et al. // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. No. 18. Art. No. L18105.
17. Maruyama T. // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. No. 20. Art. No. L20111.
18. Zou S., Moldwin M.B., Ridley A.J. et al. // J. Geophys. Res. 2014. V. 119. No. 10. P. 8543.
19. Liu J., Wang W., Burns A. et al. // J. Geophys. Res. 2016. V. 121. No. 8. P. 8121.
20. Klimenko M.V., Zakharenkova I.E., Klimenko V.V. et al. // Space Weather. 2017. V. 17. No. 7. P. 1073.
21. Aa E., Zhang S.-R., Erickson P.J. et al. // Space Weather. 2022. V. 20. No. 4. Art. No. e2022SW003055.
22. Hernández-Pajares M., Juan J., Sanz J. et al. // J. Geodesy. 2009. V. 83. P. 263.
23. Xiong B., Wang Y., Li X. et al. // Astrophys. Space Sci. 2022. V. 367. Art. No. 85.
24. Efshov I.I., Shagimuratov I.I., Klimenko M.V. et al. // Proc. Phys. Auroral Phenomena. 2022. No. 45. P. 32.
25. Liu J., Nakamura T., Liu L. et al. // J. Geophys. Res. 2015. V. 120. No. 8. P. 6860.

Features of development of the magnetic storm on November 7, 2022 according to the total electron content measurements

I. I. Shagimuratov^{1, *}, M. V. Klimenko¹, I. I. Efishov¹, M. V. Filatov², G. A. Yakimova¹

¹*West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, 236016 Russia*

²*Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia*

**e-mail: shagimuratov@mail.ru*

Using the global total electron content data, the development of a moderate magnetic storm on November 7, 2022, is presented. The effects of the storm in the American and European sectors are compared. During the storm, manifestations in the ionosphere large-scale structures such as SED (storm enhanced density) and TOI (tongue of ionization) were detected.

Keywords: ionosphere, magnetic storm, TEC, SED, TOI