

УДК 550.343.62

ГЛОБАЛЬНЫЙ ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА ИНТЕНСИВНЫЕ ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ НАВИГАЦИОННЫХ ПРИЕМНИКОВ GNSS

© 2023 г. М. С. Пулинец¹, *, П. А. Будников², **, С. А. Пулинец³, ***

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва, Россия

²Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Фёдорова Росгидромета (ИПГ), Москва, Россия

³Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

*e-mail: cotoraxy@gmail.com

**e-mail: pavel9860@gmail.com

***e-mail: pulse@rssi.ru

Поступила в редакцию 08.03.2022 г.

После доработки 10.11.2022 г.

Принята к публикации 28.11.2022 г.

Рассмотрен глобальный отклик ионосферы на интенсивные геомагнитные бури и вариации солнечной активности по данным индекса солнечной активности $F10.7$. В качестве источника информации используются данные о полном электронном содержании (ПЭС), рассчитанные по измерениям мировой сети приемников глобальных навигационных спутниковых систем. В отличие от многих публикаций, где подробно исследуются эффекты отдельных уникальных геофизических событий (например, супербури 28 октября 2003 г.), мы рассмотрели эффекты от сильных бурь ($Dst \leq -80$ нТл) начиная с 2005 г. Главное внимание уделялось зависимости от времени начала главной фазы бури относительно местного времени/долготы, а также зависимости интенсивности отклика ионосферы от широты. Для отображения ионосферных эффектов магнитных бурь использовался визуальный образ – двумерное представление в формате сутки–местное время, использовавшийся для визуализации ионосферных предвестников землетрясений. Этот подход позволяет также визуализировать эффекты вариаций солнечной активности по данным индекса $F10.7$, а также отличить их от ионосферных вариаций во время геомагнитных бурь. В результате удалось создать обобщенный глобальный “портрет” геомагнитной бури в ионосфере Земли.

DOI: 10.31857/S0016794022600703, EDN: DKQTMG

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных источников изменчивости ионосферы является солнечная активность, проявляющаяся как в виде электромагнитных излучений различных диапазонов, так и инъекции больших масс плазмы из корональных областей (Coronal Mass Ejections – CME), быстрых потоков энергичных протонов (протонные вспышки) и ускоренных потоков солнечного ветра, в частности, из корональных дыр. Кроме того, эффективность взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли зависит от конфигурации (направления составляющих) межпланетного магнитного поля. Воздействие на ионосферу осуществляется как непосредственно электромагнитными и корпускулярным воздействием от Солнца (рентгеновские и протонные вспышки, коротковолновая часть ультрафиолетового излучения) [Liu et al., 2011], так и опосредованно через воздействия на

магнитосферу Земли, когда модификация магнитосферы при взаимодействии с солнечным ветром приводит к проникновению электрических полей в ионосферу, а в авроральных широтах имеют место высыпания энергичных электронов из хвоста магнитосферы. С описанием физических процессов развития эффектов геомагнитной бури в ионосфере можно ознакомиться в фундаментальных работах [Buonsanto, 1999; Данилов, 2013; Lakhina and Tsurutani, 2016].

Проблема ионосферных эффектов магнитных бурь исследовалась в сотнях публикаций, но большинство из них сосредоточено на изучении особо сильных событий, таких как октябрьские бури 2003 г. (Halloween storm) с использованием максимально доступного количества наземных и спутниковых измерений [Panasyuk et al., 2004], либо на региональных эффектах (Калифорния, Южная Америка, Африканский сектор и пр.)

[Foster and Rideout, 2005; Sahai et al., 2009]. Есть работы и по статистическому анализу эффектов геомагнитных бурь [Ратовский и др., 2020], но авторы пошли по пути выделения региональных особенностей реакции ионосферы на геомагнитную бурю с помощью расчета глобального электронного содержания GEC и его сравнения с региональным электронным содержанием REC. Авторы также провели дифференциацию реакций на геомагнитную бурю по широтным зонам.

Модельные расчеты широтных эффектов (различия в реакции ионосферы на магнитную бурю в высоких и низких широтах и распространение возмущений, инициированных бурей, по широте) проводились в работе [Fuller-Rowell et al., 1996].

В то же время существуют явления малоисследованные, хотя об их существовании известно довольно давно. К таким эффектам можно отнести эффект так называемого “запрещенного времени”, который заключается в том, что отрицательная фаза в первые сутки бури не начинается в дневное время даже при начавшемся днем сильным магнитном возмущении [Медникова, 1980]. В настоящее время понятие “запрещенного времени” обрело в литературе название задержки ΔT отрицательной фазы ионосферной бури относительно начала магнитного возмущения [Черняков, 2003]. Фактически речь идет о долгом эффекте, где нужно учитывать два фактора: а) реакцию ионосферы на разных долготях (в разном местном времени) во время одной и той же геомагнитной бури; б) рассматривать зависимость реакции ионосферы от местного времени начала главной фазы геомагнитной бури.

Нам известна только одна публикация, в которой была сделана такая попытка, причем в глобальном масштабе [Szuszczewicz et al., 1998]. Это был уникальный эксперимент, в ходе которого были проанализированы данные мировой сети наземных ионозондов с целью анализа глобальной реакции ионосферы на три сильных геомагнитных бури в течение сентября 1989 г.: 15–16, 18–20 и 26–27 сентября. Для глобального распределения вариаций критической частоты f_oF_2 и высоты максимума F_2 -слоя h_mF_2 были построены уникальные диаграммы, показывающие поведение ионосферы в динамике развития бурь по долготе (UT) и по местному времени (LT). Из большого количества результатов, полученных в работе, хотелось бы выделить два: реакция ионосферы на разных долготях сильно зависит от времени UT, когда наблюдался минимум Dst -индекса и в меньшей степени от времени SSC: при практически одном и том же времени для минимума Dst для первой и второй бурь (04:00 UT и 04:40 UT), но значительном различии во времени SSC (00:40 UT и 10:28 UT) глобальные распределения практически идентичны, в то время как

глобальное распределение для третьей бури, когда минимум Dst наблюдался в 19:50 UT глобальные распределения разительно отличаются. Для примера на ионосферной ст. в Горьком (сейчас Нижний Новгород) отрицательная фаза бури длилась непрерывно в течение первой и второй бурь с 16 по 20 сентября, а на ст. в Токио реакция критической частоты на первые две бури была практически нулевой. Для третьей бури наблюдался обратный эффект: в Горьком реакция была минимальной, тогда как в Токио наблюдалась сильная отрицательная фаза ионосферного возмущения. Вторым результатом, который хотелось бы отметить, заключался в том, что на средних и низких широтах отрицательная фаза наблюдалась сначала в ночном полушарии, а затем коротковала вместе с Землей на дневную сторону. Эффект задержки можно заметить на долготных распределениях вариаций критической частоты и полного электронного содержания, полученных в работе [Chernigovskaya et al., 2021], однако авторы этот эффект не обсуждают.

В настоящей работе мы ставим своей задачей в какой-то мере повторить данный эксперимент, только с использованием данных мировой сети навигационных приемников, позволяющей определять глобальное распределение полного электронного содержания. Наши исследования мы будем проводить с использованием глобальных ионосферных карт (Global Ionospheric Maps (GIM)) как в виде глобальных распределений полного электронного содержания, так и в виде сечений по долготе и широте, или исследования вариаций в точках с выбранными координатами.

Вторая задача, которую мы ставим в данной работе, — это получение образа ионосферной бури в локальном времени на разных фазах развития геомагнитной бури, так называемую “маску” ионосферной бури — отклонение ПЭС от невозмущенного значения в координатах время (в сутках), ось X , местное время, ось Y . Величина отклонения отображается тоном. Такое представление ионосферных вариаций было применено в исследованиях ионосферных предвестников землетрясений [Пулинец и Давиденко, 2018], что позволило идентифицировать ночную положительную аномалию в ионосфере как надежный и стабильный предвестник землетрясений.

2. РАЗРАБОТКА МАСКИ ИОНОСФЕРНОЙ БУРИ И ОТЛИЧИЯ ОТ ТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДОВ

Еще в ранних работах по исследованию ионосферных аномалий, вызываемых различными источниками возмущений, было обнаружено, что генерация аномалий не однородна во времени, из-за чего определенные виды аномалий наблюдаются в определенные часы местного времени.

Но за недостатком количества данных для статистического исследования полученные результаты не были обобщены. Следующим шагом стало визуальное представление массивов суточных значений в виде тоновых изображений. Для этого массивы ΔTEC формировались в матрицу с распределением вычисленных значений по суткам и часам.

Для оценки воздействия магнитных бурь на ионосферу использовался метод картирования ионосферы, заключающийся в построении разностных глобальных ионосферных карт. Разностные глобальные ионосферные карты позволяют выделять области с локальными возмущениями в ионосфере, оценивать их размер и продолжительность существования. Глобальные ионосферные карты GIM (Global Ionospheric Maps) распространяются International GNSS Service (IGS) в формате IONEX (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>). Данные IGS в формате IONEX представляют собой матрицу, элементами которой являются значения полного электронного содержания (ПЭС – англ. Total Electron Content – TEC). Разрешение матрицы составляет 2.5 град. по широте и 5 град. по долготе. Значения ПЭС (TEC) рассчитываются IGS каждые 2 ч. Из-за не всегда устойчивой работы сервиса IGS, для получения данных также использовались индексы IONEX от UPC (Universitat Politècnica de Catalunya), предоставляемые с интервалом в 1 ч (http://newgl.upc.es/upc_ionex, http://cabrera.upc.es/upc_ionex_GPSonly-RINEXv3).

Визуализации, использующие абсолютные значения ΔTEC , не являются достаточно информативными ввиду того, что одни и те же значения абсолютных отклонений ПЭС днем могут составлять ~5% от медианы, а ночью достигать 50%. Поэтому в нашем исследовании мы предлагаем считать относительные отклонения ПЭС в процентах. Вычисление и построение разностных карт глобального ПЭС $\Delta\text{TEC}_{\text{GIM}}$, представляющих собой отклонение текущих значений ПЭС TEC_{GIM} от фоновых TEC_{GIMA} , выполнялось нами в среде MATLAB. Следующим аспектом предлагаемого исследования является его ориентированность на мониторинг состояния ионосферы в реальном времени. По этой причине для вычисления медианы невозможно использование 27-дневного интервала с установкой исследуемой точки по центру интервала, как это делается в большинстве случаев. Расчет разностных карт производился нами по формуле: $\Delta\text{TEC}_{\text{GIM}} = \text{TEC}_{\text{GIM}} - \text{TEC}_{\text{GIMA}}$, где в качестве фоновых значений использовались средние значения ПЭС (TEC), рассчитанные по 15 предшествующим числовым значениям для того же момента времени. Отклонение от фоновых значений выражалось нами в единицах ПЭС (TEC Units – TECU).

Также следует отметить, что так как в работе исследуются долготные и широтные зависимости, то диагностика наблюдаемых возмущений становится чувствительной к выбору приемников: кроме существенно неравномерного распределения GPS-приемников, работе мешает порой довольно низкое качество поставляемых данных, а иногда их отсутствие в реальном времени. Именно поэтому для настоящего исследования выбор пал на GPS GIM. Это позволяет проводить измерения с равномерным шагом по долготе и широте, а задержка получения данных в большинстве случаев не превышает одних суток.

В качестве примера рассмотрим магнитную бурю, начавшуюся 27 мая 2017 г. На рис. 1 показаны данные по геомагнитной обстановке во время этой бури. Данные о Dst -индексе взяты с сайта Kyoto Geomagnetic Data Service (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>), а индекса $F10.7$ с сайта NASA (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>).

Ниже представлены три графика, построенные в местном времени заданной долготы, на которых показана реакция полного электронного содержания на динамику развития бури 27 мая 2017 г. на широте 45° N. При этом график Dst приведен к местному времени.

На рисунке 2а главный минимум Dst пришелся на полночь по местному времени на долготу 120° W, и мы видим практически мгновенную реакцию ионосферы в виде отрицательного отклонения полного электронного содержания (ПЭС). Следует обратить внимание на интенсивный отклик ПЭС на положительный всплеск Dst . Если на отрицательное значения минимума $Dst = -125$ нТл отрицательное отклонение ПЭС составляет порядка 35%, то на положительный импульс $Dst = 50$ нТл, положительное отклонение ПЭС составило 100%.

Рисунок 2б построен на долготу 120° E. Задержка отрицательной фазы бури относительно времени минимума Dst составляет 9 ч, положительный максимум более продолжителен и сдвинулся по местному времени с 18 LT на рис. 2 до 13 LT. По амплитуде положительный пик ΔTEC уменьшился на 10%, а отрицательный – увеличился на 10% (по абсолютной величине).

Мы движемся дальше на запад на долготу 30° W. Здесь мы наблюдаем совсем иную картину. Положительная фаза бури исчезла, а запаздывание отрицательной составляет 18 ч. В то же время на втором и третьем графиках появляется вторая положительная фаза порядка 20% на втором графике и 35% – на третьем.

Исходя из полученных результатов, мы можем получить эмпирическую формулу запаздывания отрицательной фазы бури $\Delta T = 24 - \text{LT}(Dst_{\text{min}})$.

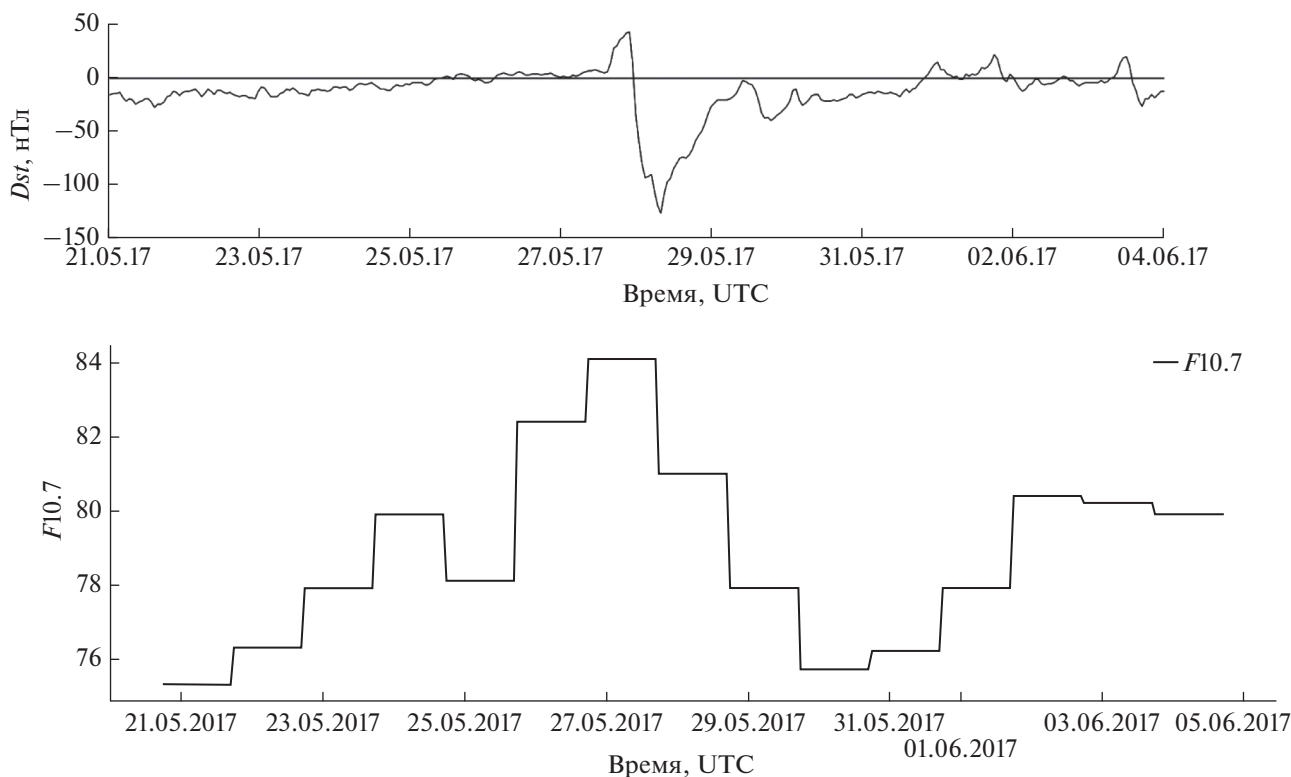


Рис. 1. Геомагнитная обстановка во время бури 27.05.2017 г. (а) *Dst*; (б) индекс *F10.7*.

Наши результаты подтверждают существование эффекта задержки [Медникова, 1980; Черняков, 2008], в которых вводится понятие “запрещенного времени”, когда одна и та же буря вызывает разную реакцию на разных долготах в зависимости от местного времени, соответствующего минимуму *Dst*.

Положительная или отрицательная фаза бури на заданной широте не гарантирует того, что то же самое будет наблюдаться на той же самой долготе, но на других широтах. Глобальное распределение отклонения ПЭС от невозмущенного значения имеет довольно сложный и труднообъяснимый характер. На рис. 4 представлены разностные карты полного электронного содержания для моментов максимального положительного и отрицательного значений отклонения ПЭС, соответствующих ионосферным маскам, представленным на рис. 3.

Как можно видеть, по мировому времени максимумы на долготах $120^{\circ} W$ и $120^{\circ} E$ практически совпали, хотя по местному времени разница составляет почти сутки. Задержка положительной фазы на долготе $120^{\circ} E$ относительно положительного пика *Dst* составляет порядка 7 ч. Положительный пик на долготе $30^{\circ} W$ не имеет отношения к положительному пику *Dst*, поскольку он наблюдается после отрицательной фазы бури

и относится уже к ее восстановительной фазе. Амплитуда положительных пиков на графиках спадает от 120% на долготе $120^{\circ} W$ до 20% на долготе $30^{\circ} W$, поэтому на тоновых картах, особенно рис. 4б, она имеет серый оттенок.

На рисунке 5 приведены разностные карты для максимумов отрицательной фазы для выбранных точек.

3. ВЛИЯНИЕ ПОТОКА *F10.7*

Значительное количество геомагнитных бурь сопровождается резкими изменениями потока *F10.7*, который является индикатором вариаций экстремального ультрафиолетового излучения (EUV), воздействующего на атмосферу, производя ее ионизацию. Нам не удалось обнаружить публикаций, в которых производились бы попытки отделить эффект изменения потока *F10.7* от собственно эффекта магнитной бури. В то же время, резкое увеличение потока *F10.7* может нивелировать отрицательную фазу бури в ионосфере, а его резкое понижение может создать искусственный отрицательный эффект, не имеющий отношения к геомагнитной буре. Это связано с тем, что медиана, рассчитываемая по длительному промежутку (месяц или 27 сут) не успевает отслеживать резкие изменения полного электронного содержания.

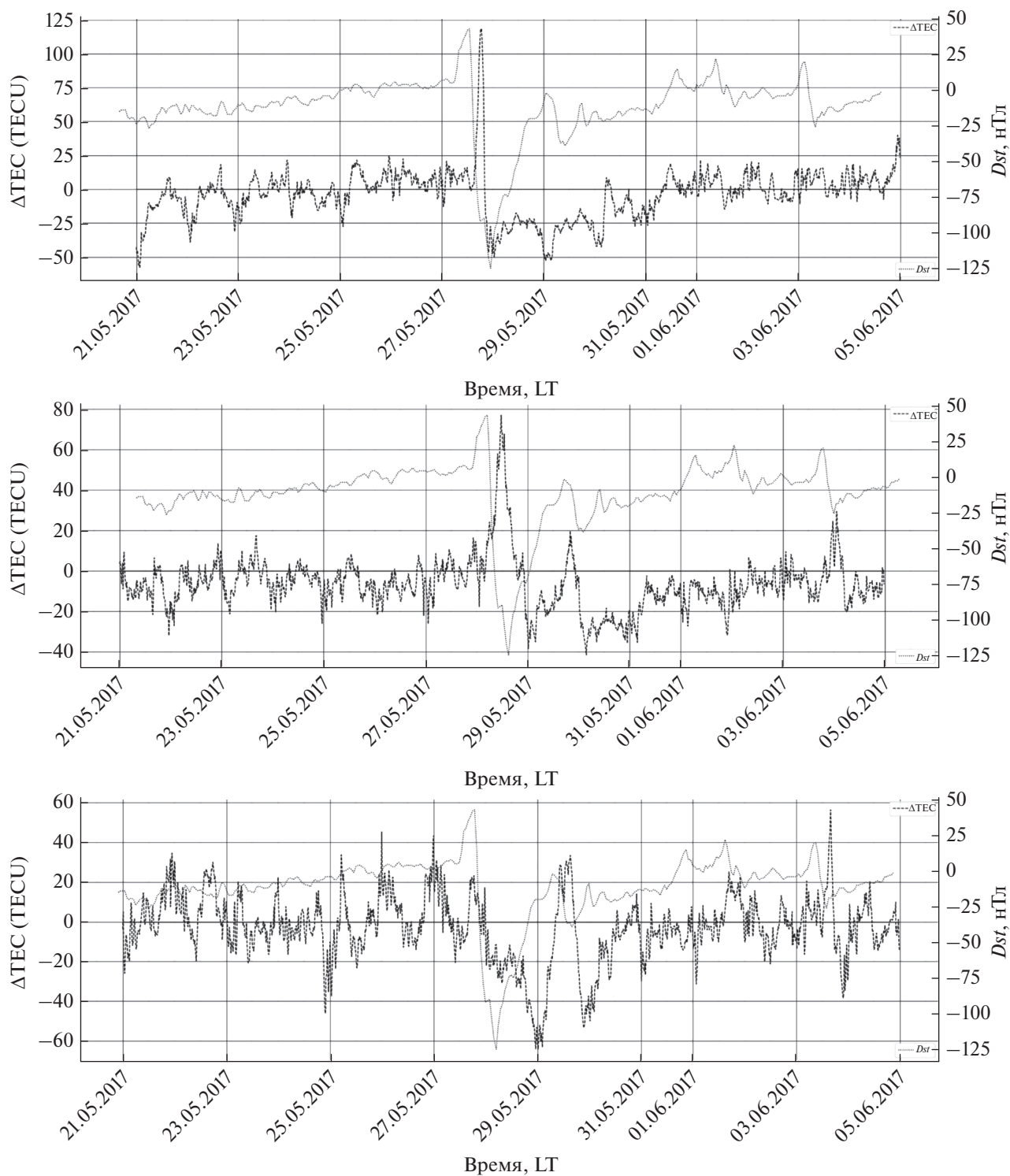


Рис. 2. Графики ΔTEC и Dst на 15-дневном интервале для магнитной бури 27.05.2017 г. (а) на долготе 120° W ; (б) на долготе 120° E ; (е) на долготе 30° W .

Еще одной характерной особенностью воздействия $F10.7$ на ионосферу является то, что оно носит глобальный характер. Несмотря на тот факт, что воздействие ультрафиолетового излучения на ионосферу осуществляется на освещенной полу-

сфере, повышение ТЕС наблюдается практически над всей поверхностью Земли, независимо от местного времени. На рис. 6 представлены две разностные карты, соответствующие двум существенным повышениям потока $F10.7$ в апреле и

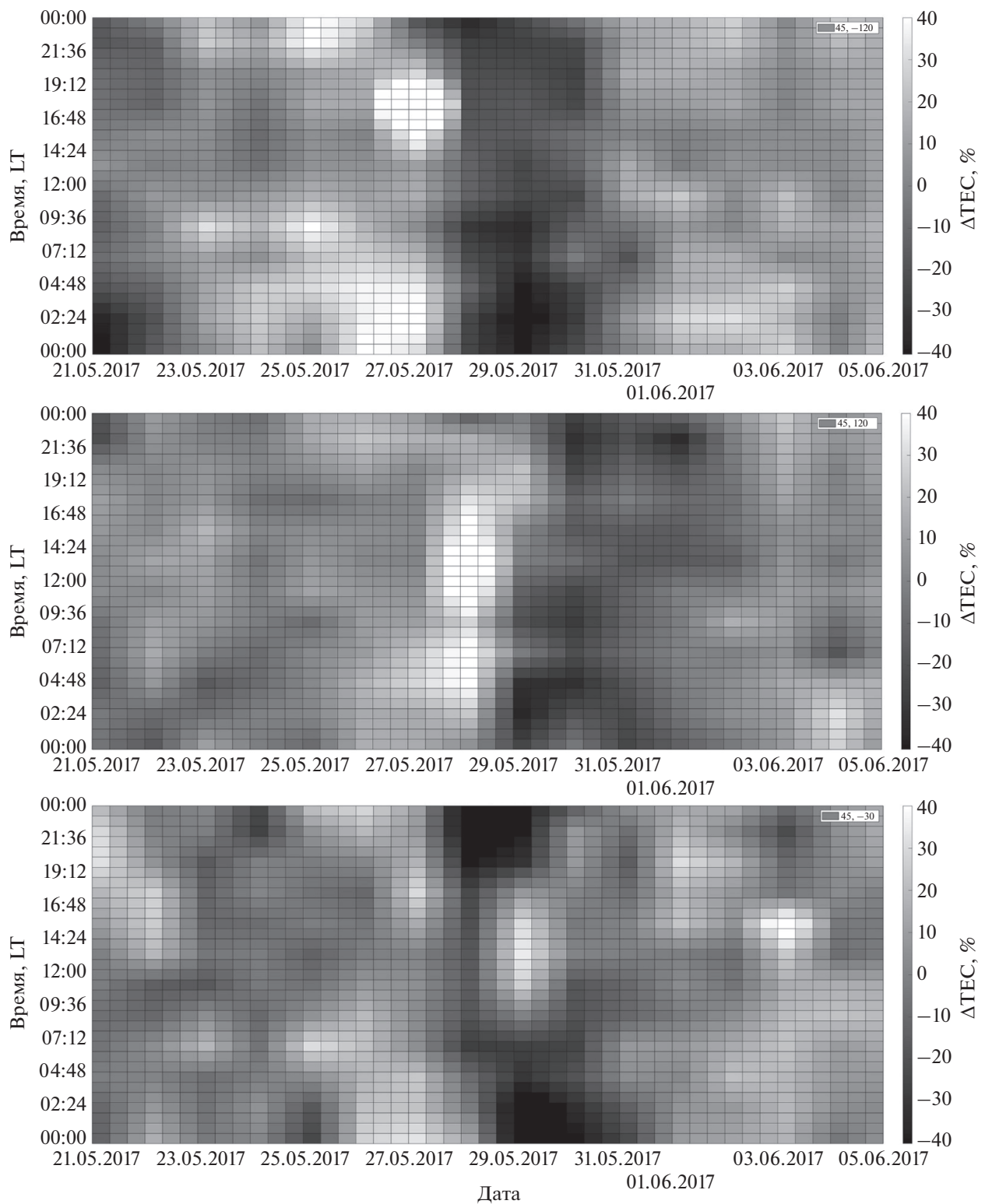


Рис. 3. Тоновые изображения (маски) ионосферного эффекта геомагнитной бури 27.05.2017 г. на долготах (а) 120° W; (б) 120° E; (в) 30° W.

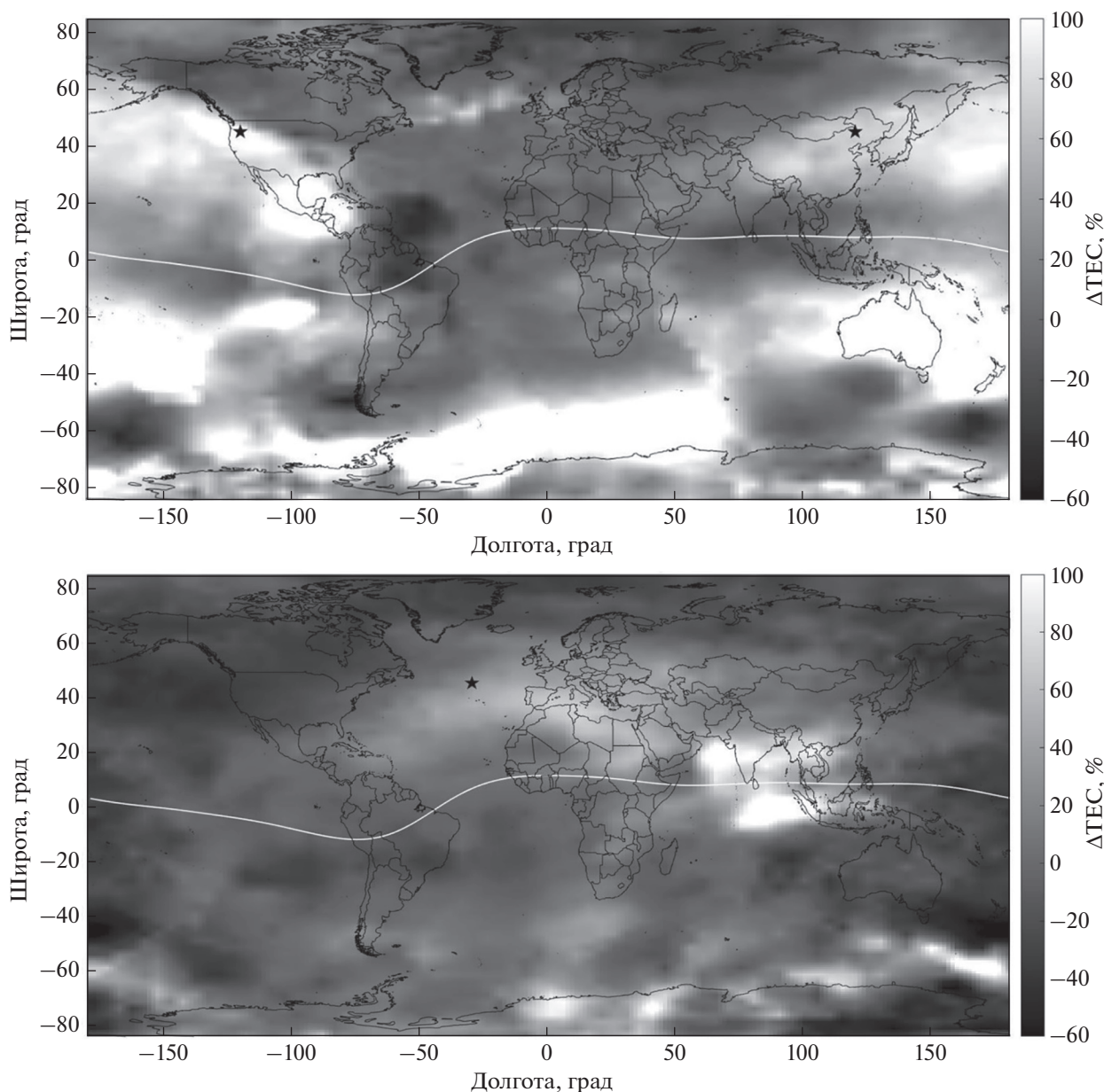


Рис. 4. (а) Разностная карта 28 мая 2017 г. 03:00 UTC; (б) Разностная карта 29 мая 2017 г. 16:00 UTC. Координаты точек для максимума положительной фазы показаны черными звездочками.

мае 2022 г. (более подробно они будут рассмотрены ниже), из которых можно видеть, что площадь, на которой наблюдаются положительные вариации GIM TEC, намного превышает площадь отрицательных вариаций.

Мы создали методику, позволяющую вычитать эффект изменения $F10.7$ в ионосфере при расчете величины ΔTEC . В качестве примера рассмотрим случай повышения потока $F10.7$ за период с 11 апреля по 2 июня 2022 г. (рис. 7а), в течение которого наблюдались два значительных повышения потока $F10.7$ (на 70 и на 80 единиц соответственно). В этот же период наблюдались две

геомагнитные бури 14 апреля (-81 нТл) и 28 мая (-63 нТл), рис. 7б.

На рисунке 7б представлено изменение GIM TEC (штриховая линия) и текущая медиана по 5 сут — сплошная линия. Абсолютно четко просматриваются две волны вариаций GIM TEC, соответствующие вариациям $F10.7$. Такая же картина видна на графике ΔTEC (рис. 7в), причем следование $F10.7$ настолько значительно, что ΔTEC в некоторые периоды (17.04–29.04 и 15.05–20.05) полностью выходит в положительную область значений над нулевой линией. А после 28 мая, на-

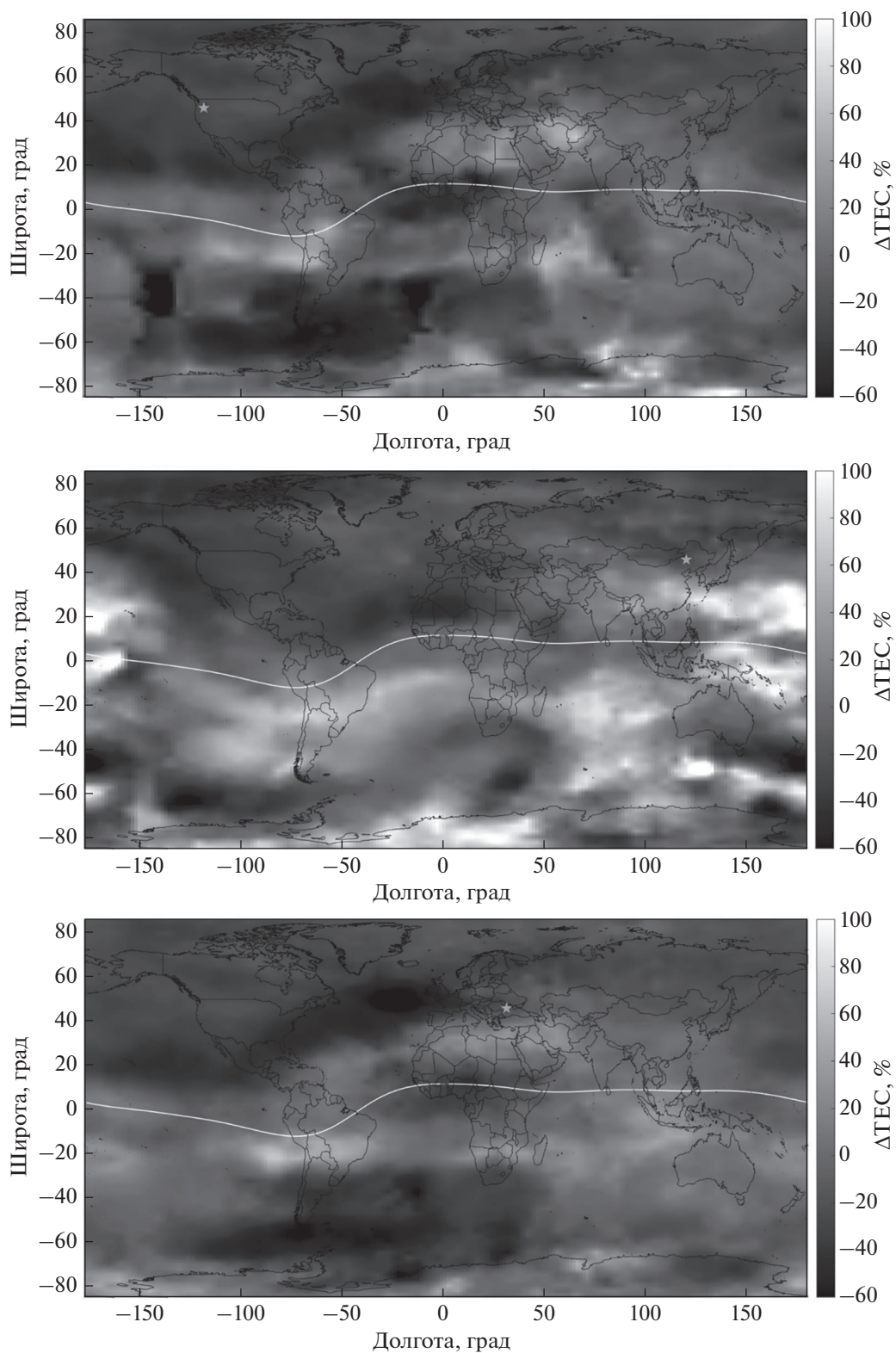


Рис. 5. Разностная карта для отрицательной фаз магнитной бури (а) для точки на долготе 120° W; (б) для точки на долготе 120° E; (в) для точки на долготе 30° W.

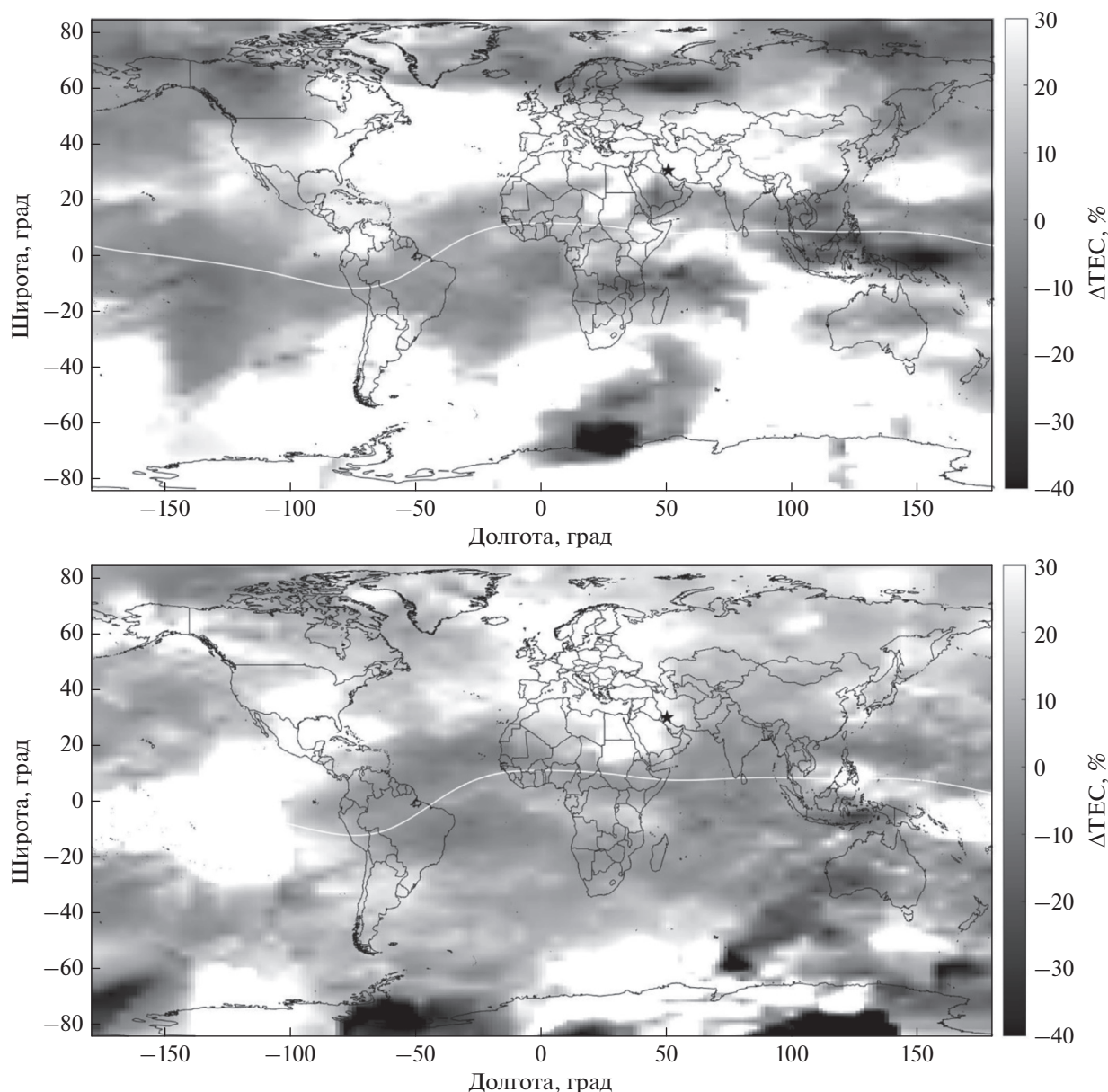


Рис. 6. (а) разностная карта GIM TEC 27.04.2022 г. 16:00 UTC; (б) разностная карта GIM TEC 16.05.2022 г. 13:00 UTC.

оборот, уходит полностью в отрицательную область значений.

С целью удаления трендов вариаций GIM TEC, связанных с вариациями солнечного потока $F_{10.7}$, нами были разработаны два варианта нормализации графиков полного электронного содержания: нормализация на сам поток $F_{10.7}$ с задержкой на одни сутки [Vaishnav et al., 2021], рис. 8, и с нормализацией на глобальное электронное содержание GEC [Afraimovich et al., 2008], рис. 9. Оба метода дают вполне удовлетворительные результаты, но на наш взгляд, использование нормализации по GEC является более предпочи-

тельным по двум причинам: во-первых, отсутствует промежуточный агент и мы используем вариации ионосферы, уже претерпевшие влияние потока $F_{10.7}$, и, во-вторых, анализ может проводиться даже в отсутствие доступа к данным о потоке $F_{10.7}$.

Как на рис. 8в, так и на рис. 9в уже отсутствует уход ΔTEC в сторону полностью положительных или полностью отрицательных значений, но для нормализации по потоку $F_{10.7}$ (рис. 8б) устранить волновую структуру вариаций GIM TEC не удастся, тогда как на рис. 9б мы наблюдаем только положительный (сезонный) тренд GIM TEC. Кроме

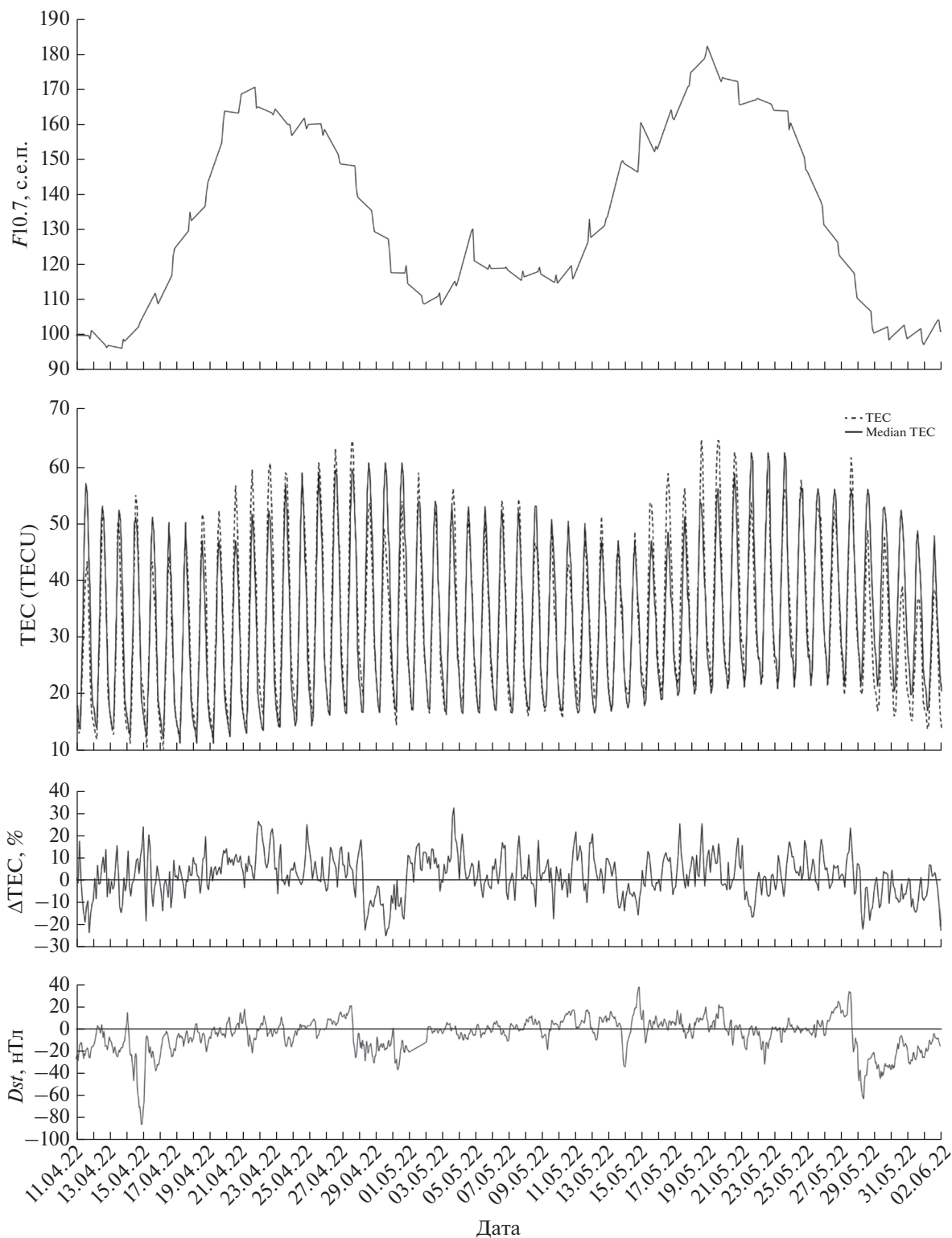


Рис. 7. (а) Поток $F_{10.7}$ за период с 11 апреля по 2 июня 2022 г.; (б) изменение GIM TEC (штриховая линия) и текущая медиана по 5 сут – сплошная линия; (в) график ΔTEC ; (г) график Dst .

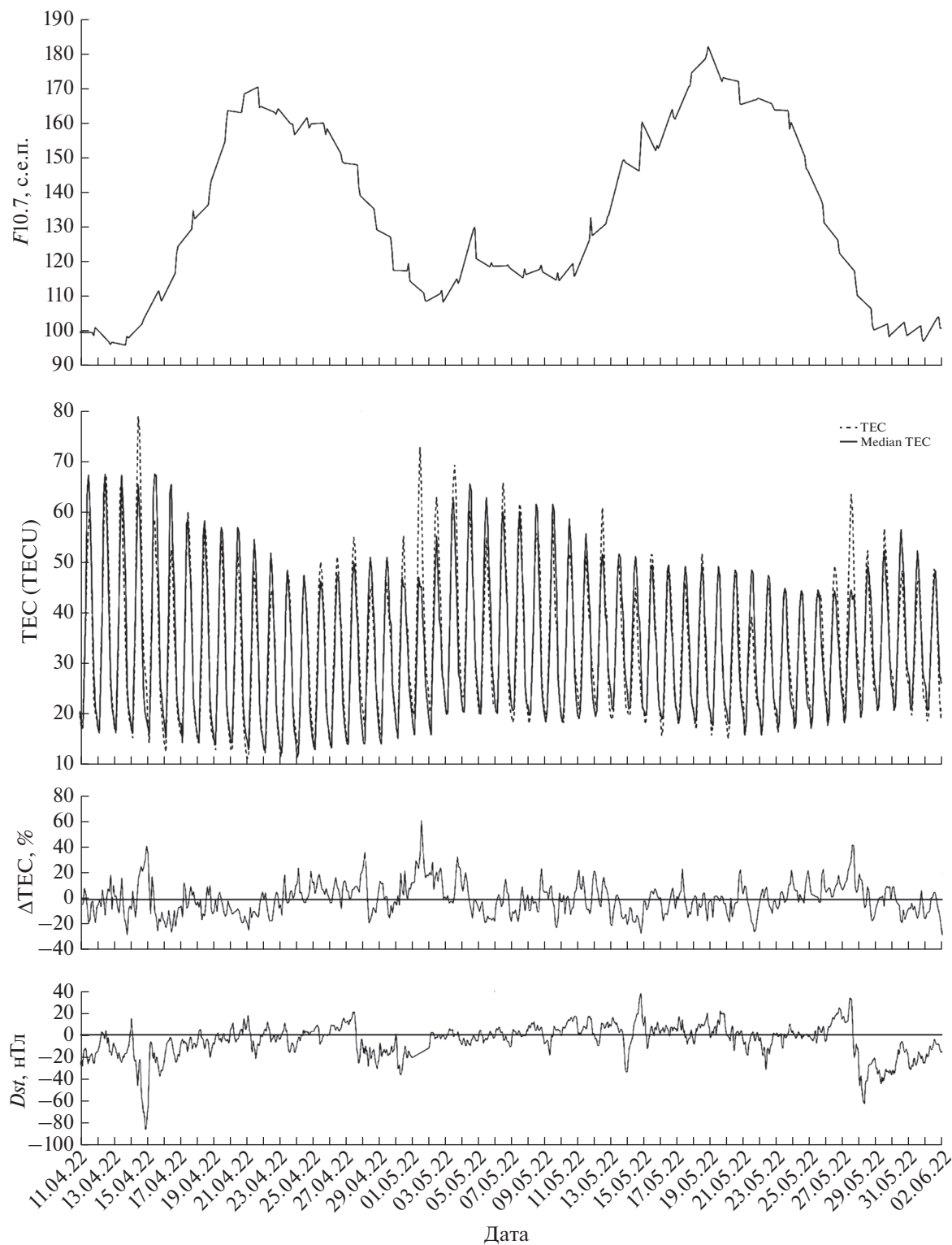


Рис. 8. Нормализация на поток $F10.7$ с задержкой на одни сутки: (а) поток $F10.7$ за период с 11 апреля по 2 июня 2022 г.; (б) изменение GIM TEC (штриховая линия) и текущая медиана по 5 сут — сплошная линия; (в) график ΔTEC ; (г) график Dst .

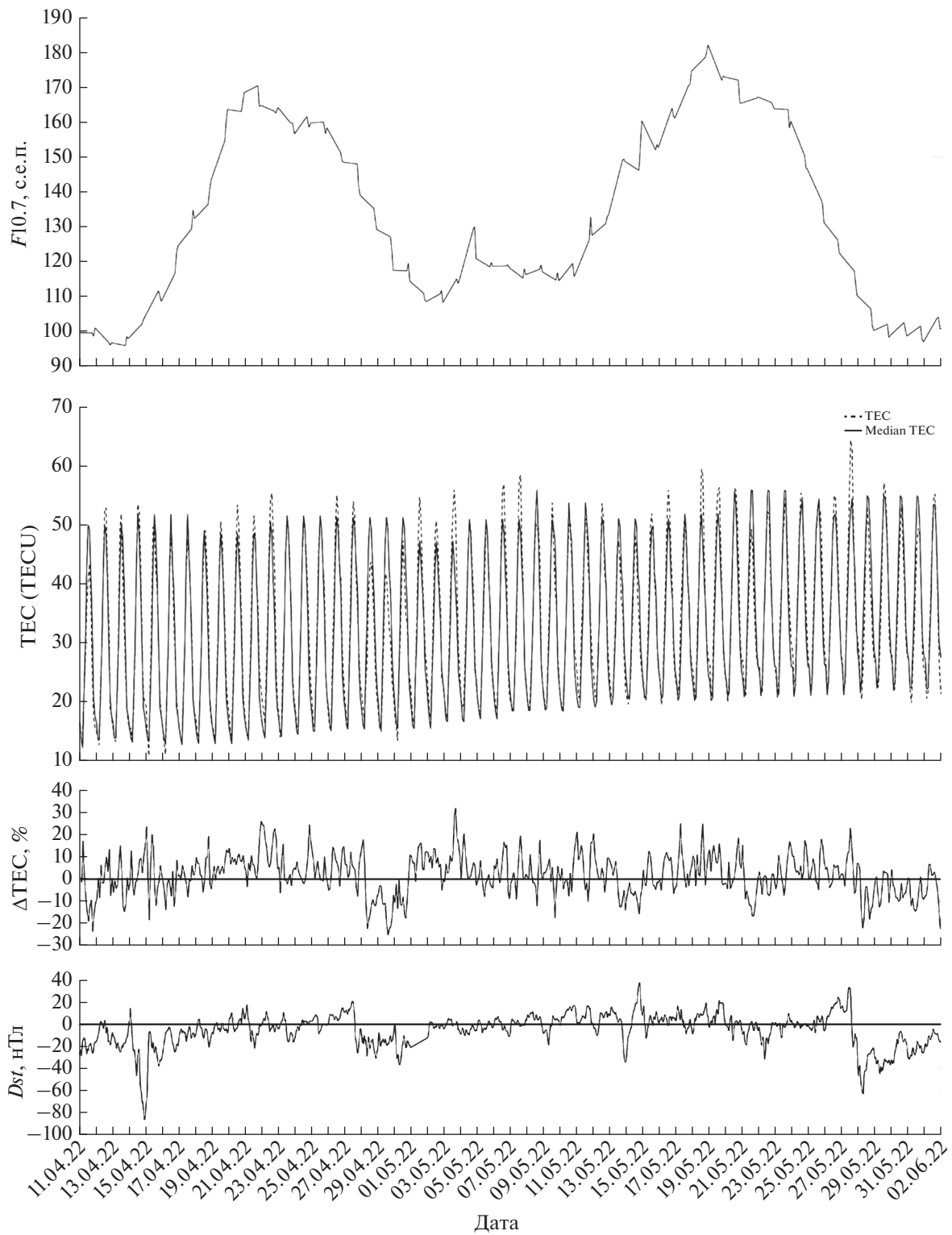


Рис. 9. Нормализация на глобальное электронное содержание ГЕС: (а) поток $F_{10.7}$ за период с 11 апреля по 2 июня 2022 г.; (б) изменение GIM TEC (штриховая линия) и текущая медиана по 5 сут – сплошная линия; (в) график ΔTEC ; (г) график Dst .

того, график $\Delta T_{ЕС}$ в случае нормализации по GEC более адекватно отражает реакцию ионосферы на геомагнитные бури.

Эффекты нормализации потребуют еще более тщательного изучения на предмет создания ложных эффектов, тем не менее, возможность устранения сильных вариаций полного электронного содержания, связанных с резкими изменениями потока $F10.7$, позволят более адекватно оценивать эффекты геомагнитных бурь в ионосфере.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КАК КЛЮЧ К ПОНИМАНИЮ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕАКЦИИ ИОНОСФЕРЫ НА ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ И ВАРИАЦИИ ПОТОКА $F10.7$

В данной работе представлена технология оперативного мониторинга глобальной реакции ионосферы на сильные геомагнитные бури на базе данных GIM TЕС. Преимуществом данного метода является наличие равномерной сетки данных, позволяющей более четко выделить долготно-широтные эффекты и эффекты зависимости реакции ионосферы от местного времени. В частности, разработана методология визуализации образа геомагнитной бури в ионосфере, позволяющая выделить наиболее чувствительные к эффектам бури интервалы местного времени. Фактически для всестороннего анализа эффекта геомагнитной бури в ионосфере необходимо создать ее многомерный “портрет”, состоящий из сравнения вариаций ПЭС во времени с изменениями геомагнитных индексов и индекса солнечной активности (рис. 1 и 2), формирование двумерной картины по осям сутки–местное время (рис. 3) и рассмотреть пространственные вариации путем построения разностных карт в ионосфере (рис. 4–6). Каждое из этих представлений позволяет выявить основные особенности реакции ионосферы. Временные графики позволили выявить эффект “запрещенного времени”, двумерные маски позволяют увидеть разницу между положительной фазой ионосферной бури, проявляющейся в виде яркого пятна, длящегося 2–4 ч, появляющегося, в основном, в дневные часы, и длительной отрицательной фазы, длящейся 12 ч и более. И, наконец, разностные карты позволяют понять неравномерность распределения отклонения ПЭС в зависимости от широты и долготы, из чего следует необходимость создания отдельных моделей, учитывающих широту и долготу. Под учетом долготы подразумевается отличие реакции ионосферы в зависимости от широтного положения геомагнитного экватора, а также угла его наклона относительно географической нулевой параллели. Это особенно касается регионов Северной и Южной Америки, где создаются специфические об-

ласти (например, в Мексике), где эффекты геомагнитных бурь практически не проявляются.

Подтверждение существования эффекта “запрещенного времени” [Медникова, 1980; Черняков, 2008] требует дальнейшего развития с целью получения зависимости времени задержек не только от долготы, но и от широты, что будет сделано в наших следующих работах. В зависимости от локального времени минимума Dst задержка по нашим данным может составлять до 20 ч.

Показано существенное влияние интенсивных вариаций $F10.7$, маскирующих эффект геомагнитной бури в ионосфере. Для того, чтобы нивелировать эффект потока $F10.7$, предложена методика калибровки данных путем их нормализации по $F10.7$ или GEC.

Следует признать, что использование карт GIM может вызывать некоторые сомнения относительно достоверности получаемых результатов из-за неоднородности глобального распределения наземных приемников навигационных сетей, но это сможет поправить только появление на орбите ионозондов внешнего зондирования, что ожидается в ближайшие годы.

5. ВЫВОДЫ

Во всех эмпирических моделях, в том числе IRI, при описании фаз бури, используется некоторый усредненный образ, не учитывающий того факта, что в зависимости от местного времени реакция ионосферы может быть совершенно разной: положительной, отрицательной или отсутствующей. Поэтому нужно вводить два параметра — степень и образ реакции ионосферы в зависимости от местного времени — фактически нужно создать маски для каждого типа реакции. Вторым фактором, который необходимо учитывать, — это время запаздывания реакции в зависимости от местного времени начала магнитной бури. По всей видимости, для разных широт эта зависимость будет разной. Для широт 45° полученная нами зависимость может быть записана как $\Delta T = 24 - LT(Dst_{\min})$.

При моделировании геомагнитной бури следует учитывать фактор солнечной активности. Если буря происходит на фоне резких изменения индекса $F10.7$, получаемые результаты должны быть скорректированы путем нормализации значений на фактор $F10.7$ или GEC.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность: International GNSS Service (IGS) и Universitat Politècnica de Catalunya — за предоставление доступа к ионосферным данным. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto — за предоставление доступа к данным по Dst . Space Weather

Forecast from Government of Canada и OMNIWeb Plus data and service of NASA/Goddard Space Flight Center – за предоставленные данные по потоку F10.7 и Dst.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор) // Гелиогеофизические исследования. Вып. 5. С. 1–33. 2013.
- Медникова Н.В. Вариации ионосферы во время магнитосферных возмущений // Сб. статей АН СССР, Ин-т земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн. Отв. ред. Л. Н. Ляхова, Н. П. Сергеев. М.: Наука, 131 с. 1980.
- Пулинец С.А., Давиденко Д.В. Положительная ночная аномалия электронной концентрации в ионосфере как краткосрочный предвестник землетрясений и возможный физический механизм ее формирования // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 4. С. 579–591. 2018.
- Ратовский К.Г., Клименко М.В., Ясюкевич Ю.В., Веснин А.М., Клименко В.В. Статистический анализ ионосферного отклика на геомагнитные бури с использованием данных глобальных ионосферных карт // Химическая физика. Т. 39. № 10. С. 57–68. 2020
- Черняков С.М. Изменение полного электронного содержания в ионосфере во время магнитной бури 24–28 марта 1991 года по данным разнесенного приема сигналов навигационных спутников // Сб. науч. тр. физ.-мат. факультета Мурманского гос. педагогического ун-та. Мурманск: изд-во МГПУ. С. 107–132. 2003.
- Aframovich E.L., Astafyeva E., Oinats A.V., Yasukevich Y., Zhivetiev I.V. Global electron content: a new conception to track solar activity // Ann. Geophysicae. V. 26. № 2. P. 335–344. 2008.
- Buonsanto M. Ionospheric Storms – A Review// Space Sci. Rev. V. 88. P. 563–601. 1999.
<https://doi.org/10.1023/A:1005107532631>
- Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Yasyukevich A.S. et al. Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters in the Northern Hemisphere during magnetic storms according to multi-instrument observations// Adv. Space Res. 67. 762–776. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.028>
- Foster J.C., Rideout W. Midlatitude TEC enhancements during the October 2003 superstorm // Geophys. Res. Lett. V. 32. L12S04. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2004GL021719>
- Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Rishbeth H., Moffett R.J., Quegan S. On the seasonal response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms // J. Geophys. Res. V. 101. № A2. P. 2343–2353. 1996.
- Lakhina G.S., Tsurutani B.T. Geomagnetic storms: historical perspective to modern view// Geosci. Lett. V. 3. № 5. 2016.
<https://doi.org/10.1186/s40562-016-0037-4>
- Liu L.B., Wan W.X., Chen Y.D. et al. Solar activity effects of the ionosphere: A brief review // Chinese Sci. Bull. V. 56. P. 1202–1211. 2011.
<https://doi.org/10.1007/s11434-010-4226-9>
- Panasyuk M.I., Kuznetsov S.N., Lazutin L.L. et al. Magnetic Storms in October 2003 // Cosmic Res. V. 42. № 5. P. 489–534. 2004.
- Sahai Y., Becker-Guedes F., Fagundes P.R. et al. Observations of the F-region ionospheric irregularities in the South American sector during the October 2003 “Halloween Storms” // Ann. Geophysicae. V. 27. № 12. P. 4463–4477. 2009.
- Szuszczewicz E.P., Lester M., Wilkinson P., Blanchard P., Abdu M., Hanbaba R., Igarashi K., Pulnits S., Reddy B.M. // A comparative study of global ionospheric responses to intense magnetic storm conditions // J. Geophys. Res. V. 103. № A6. P. 11 665–11 684. 1998.
- Vaishnav R., Jacobi C., Berdermann J., Codrescu M., Schmölter E. Role of eddy diffusion in the delayed ionospheric response to solar flux changes // Ann. Geophysicae. V. 39. 641–655. № 4. 2021.
<https://doi.org/10.5194/angeo-39-641-2021>