

Посвящается двум выдающимся ученым-оптимистам – Э.Л. Афраймовичу и Ю.Н. Коренькову

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИОНОСФЕРНОГО ОТКЛИКА НА ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ГЛОБАЛЬНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ КАРТ

© 2020 г. К. Г. Ратовский^{1*}, М. В. Клименко², Ю. В. Ясюкевич¹, А. М. Веснин¹, В. В. Клименко²

¹Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

²Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия

*E-mail: ratovsky@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 07.05.2020;

после доработки 07.05.2020;

принята в печать 20.05.2020

Цель работы – статистический анализ ионосферного отклика на геомагнитные бури с использованием данных глобальных ионосферных карт (global ionospheric maps (GIM)). В качестве ионосферных характеристик, рассчитываемых из глобальных с использованием GIM, выбраны глобальное электронное содержание и среднезональные значения полного электронного содержания для пяти широтных зон (экваториальная зона, среднеширотные зоны Северного и Южного полушарий и высокоширотные зоны Северного и Южного полушарий). Результаты статистического анализа обсуждаются с точки зрения концепции ионосферно-термосферной бури, в рамках которой ионосферные возмущения есть следствие изменения термосферных параметров (нейтрального состава термосферы и ветра). Противоречия концепции термосферно-ионосферной бури обсуждаются с точки зрения методических аспектов статистического анализа и эффектов, находящихся вне указанной концепции.

Ключевые слова: статистический анализ, ионосфера, геомагнитная буря, глобальные ионосферные карты.

DOI: 10.31857/S0207401X20100106

ВВЕДЕНИЕ

Дневные значения электронной концентрации в ионосфере Земли связаны с изменениями скорости ионообразования и возрастают с ростом солнечной активности [1, 2], причем зимой – гораздо сильнее, чем летом [3]. На ионосферу Земли также влияют процессы в магнитосфере (через высыпания частиц, джоулев нагрев магнитосферно-ионосферные токи и проникновение электрического поля магнитосферного происхождения) [2, 4–6] и нижележащей атмосфере (через приливы, планетарные и внутренние гравитационные волны) [7–12]. В настоящей работе продолжены начатые в работе [13] исследования ионосферного отклика на геомагнитные бури на основе статистического анализа. Последний является реализацией метода наложенных эпох, представляющего собой усреднение ионосферных откликов относительно ключевых дат, характеризующих определенную фазу геомагнитной бури (детально метод анализа

описан в разд. 1). Среднее значение ионосферного отклика интерпретируется как детерминированная компонента, обусловленная воздействием собственно геомагнитной бури. Разброс значений отклика относительно среднего значения, характеризуемый среднеквадратичным отклонением, интерпретируется как случайная компонента, обусловленная влиянием других (не буревых) факторов, связанных с солнечной активностью и процессами в атмосфере.

В работе [13] на основе статистического анализа было проведено исследование ионосферного отклика на геомагнитные бури с использованием данных о максимуме электронной концентрации (N_mF_2), полученных с Иркутского и Калининградского ионозондов. Статистический анализ N_mF_2 позволил получить два основных результата:

1) поведение ионосферного отклика в начале фазы восстановления геомагнитной бури хорошо согласуется с известной концепцией сезонной за-

висимости ионосферного отклика на геомагнитные бури [1, 7, 14–16]: отклик наиболее отрицателен летом и наименее отрицателен (или даже положительен) зимой с промежуточными значениями весной и осенью;

2) для изолированных и сильных геомагнитных бурь были выявлены так называемые эффекты последствий (положительные возмущения N_mF2 , наблюдаемые в дневное время на 3–5-тый день после начала фазы восстановления). На основе численного моделирования с помощью глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП) [17–19] было показано, что эффекты последствий объясняются увеличением плотности атомарного кислорода за счет его переноса из экваториальных в средние широты на фазе последствия геомагнитной бури [6, 13, 20]. В свою очередь, этот перенос обусловлен дополнительным градиентом давления нейтрального газа от низких широт к высоким. Градиент возникает из-за появления избыточной плотности нейтрального газа на низких широтах за счет переноса кислорода от авроральных широт в сторону экватора в главную фазу геомагнитной бури.

При проведении статистического анализа N_mF2 [13] некоторые вопросы остаются открытыми. Важной частью процесса формирования эффектов последствий является появление избыточной плотности нейтрального газа на низких широтах за счет переноса кислорода от авроральных широт в сторону экватора в главную фазу геомагнитной бури. Согласно результатам модельных расчетов на основе ГСМ ТИП, этот процесс должен сопровождаться положительным возмущением электронной концентрации на экваториальных широтах. Однако проверить эту гипотезу с помощью данных среднеширотных ионозондов не представлялось возможным. Анализ характеристик, рассчитываемых из данных глобальных ионосферных карт (global ionospheric maps (GIM)) для различных широтных зон, может позволить косвенно проверить гипотезу о переносе кислорода от авроральных широт в сторону экватора и формировании положительных возмущений электронной концентрации в главную фазу геомагнитной бури.

Статистический анализ показал, что соотношение детерминированной и случайной компонент ионосферного отклика в начале фазы восстановления составляет ~ 1 , а на фазе эффектов последствия – не превышает 0.35. Было выдвинуто предположение, что случайная составляющая ионосферного отклика обусловлена взаимодействием процессов, вызванных собственно магнитной бурей, и процессами, связанными со всеми видами атмосферной активности. Одной из ионосферных характеристик, которые могут быть рассчитаны из данных GIM, является глобальное

электронное содержание (global electron content (GEC)). Исследования показали, что GEC хорошо коррелирует с динамикой УФ-излучения Солнца [21, 22]. При этом изменчивость GEC характеризуется выраженными 11-летними, годовыми, полугодовыми, 27-дневными, а также суточными вариациями. Предположительно, эта характеристика по сравнению с N_mF2 в гораздо меньшей степени подвержена влиянию процессов, связанных со всеми видами атмосферной активности, и ее использование должно привести к повышению соотношения детерминированной и случайной компонент ионосферного отклика на геомагнитные бури.

В работе [23] отмечается незначительная связь 27-дневных вариаций глобального электронного содержания и A_p -индекса при наличии широтной зависимости отклика ионосферы на геомагнитные бури. Было показано, что вклад геомагнитной активности в электронное содержание отрицателен на высоких геомагнитных широтах, возрастает с уменьшением геомагнитной широты и становится положительным на низких широтах. В работах [24, 25] был выделен двухфазный профиль отклика глобального электронного содержания на геомагнитные бури. Было показано, что GEC превышает фоновые значения в течение ~ 24 ч на 10–20%, после чего возникает отрицательная фаза с понижением значений на 10–20% в течение ~ 40 ч во время фазы восстановления. Чен с соавт. в работе [26] показали значимую корреляцию (> 0.8) отклика GEC на слабую геомагнитную возмущенность в условиях глубокого минимума солнечной активности 2007–2009 гг., при том, что в 2003–2005 гг. в условиях сильных геомагнитных бурь корреляция отклика и индекса A_p на малых масштабах практически отсутствовала.

Таким образом, данные глобальных ионосферных карт были использованы по следующим причинам: 1) сопоставление результатов статистического анализа с концепцией термосферной бури [7, 13–16, 27, 28], в рамках которой ионосферные возмущения являются следствием изменения термосферных параметров (нейтрального состава термосферы и ветра); 2) проверка возможности повышения соотношения детерминированной и случайной компонент ионосферного отклика; 3) проверка наличия/отсутствия эффектов последствий в отношении параметров, которые могут быть рассчитаны из данных глобальных ионосферных карт.

1. МЕТОД СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИОНОСФЕРНОГО ОТКЛИКА НА ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ГЛОБАЛЬНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ КАРТ

1.1. Ионосферные данные

В данной работе мы используем глобальные ионосферные карты, рассчитываемые лабораторией CODE (<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>), входящей в консорциум IGS [29]. Изначально *GIM* представляют собой матрицу значений полного электронного содержания (total electron content (TEC)) для данного дня года (DoY) и момента всемирного времени (UT). Каждая ячейка представляет собой значение TEC для данной широты (Lat) и долготы (Long). Таким образом, исходные данные представляют собой TEC как функцию

$$GEC(DoY, UT) = \sum_{Lat=-90}^{90} \sum_{Long=0}^{360} TEC(DoY, UT, Lat, Long)S(Lat, Long), \tag{1}$$

где $S(Lat, Long)$ – площадь соответствующей широтно-долготной ячейки. В данной работе использовалось среднесуточное значение GEC , т.е.

$$GEC(DoY) = \frac{1}{24} \sum_{UT=0}^{24} \sum_{Lat=-90}^{90} \sum_{Long=0}^{360} TEC(DoY, UT, Lat, Long) \times S(Lat, Long). \tag{2}$$

По аналогии с GEC так называемое региональное электронное содержание (regional electron content (REC)), определяющее число электронов в выбранном широтно-долготном регионе [32], может быть рассчитано по формуле, аналогичной (1), (2), с тем отличием, что суммирование ведется по определенному широтно-долготному региону с нормированием на региональную площадь [33]. В этом случае нормировка позволяет получать величины одного порядка для разных регионов. Такой подход позволяет сравнивать значения REC в разных областях, а также получать величины GEC на основе инструментов другого типа, например, спутниковых высотомеров [34]. В данной работе использовались среднесуточные значения TEC для пяти широтных зон:

$$TEC(DoY, Lat0) = \frac{1}{24} \frac{1}{S} \times \sum_{UT=0}^{24} \sum_{Lat=Lat1}^{Lat2} \sum_{Long=0}^{360} TEC(DoY, UT, Lat, Long) \times S(Lat, Long), \tag{3}$$

где S – площадь широтной зоны, $Lat1$ и $Lat2$ – границы широтной зоны, $Lat0 = (Lat1 + Lat2)/2$ – центральная широта широтной зоны. Для пяти

четырёх переменных: $TEC(DoY, UT, Lat, Long)$. Изначально матрица значений TEC задается в географической системе координат, однако может быть легко пересчитана для любой другой системы координат. В данной работе используется система скорректированных геомагнитных координат.

Глобальное электронное содержание эквивалентно общему количеству электронов в ионосфере Земли до высот орбиты навигационных спутников GPS/ГЛОНАСС (~20000 км) [30]. Впервые данный параметр был введен в работе проф. Э.Л. Афраймовича [21]. Идея использования этого параметра в геофизических исследованиях и метод расчета GEC были рассмотрены в работе [31]. По определению из [31], GEC рассчитывается по следующей формуле:

выбранных широтных зон использовались следующие обозначения и границы по скорректированной геомагнитной широте: экваториальная зона ($\pm 30^\circ$), среднеширотные зоны Северного ($30-60^\circ$) и Южного ($-30...-60^\circ$) полушарий, высокоширотные зоны Северного ($60-90^\circ$) и Южного ($-60...-90^\circ$) полушарий.

1.2. Метод идентификации геомагнитных бурь и выбора ключевых дат

Метод идентификации геомагнитных бурь с использованием базы данных геомагнитных индексов D_{st} аналогичен методу, использованному в работе [13]. Событие рассматривалось как магнитная буря при выполнении следующих условий: 1) значение $D_{st}(t_0)$ является наименьшим на временном интервале $t_0 \pm 12$ ч, и 2) $D_{st}(t_0) \leq -50$ нТл; здесь t_0 – время, соответствующее концу главной фазы и началу фазы восстановления геомагнитной бури. Все бури были разделены на четыре типа: изолированные (временной интервал между соседними бурями $t_0 \geq 5$ дней); неизолированные (указанный интервал не превышает 5 дней); слабые ($D_{st}(t_0) > -100$ нТл) и сильные ($D_{st}(t_0) \leq -100$ нТл). В каждой группе бури делились по сезонам: зима (декабрь–февраль); весна (март–май); лето (июнь–август) и осень (сентябрь–ноябрь). В работе были использованы данные глобальных ионосферных карт за 1999–2017 гг. За этот период по вышеописанному методу было выявлено 535 геомагнитных бурь (см. табл. 1). Необходимо отметить, что изолированные бури преимущественно слабые (только 20 событий из 141 относятся к типу сильных), и, соответственно, сильные бури

Таблица 1. Число бурь различных типов в разные сезоны

Тип бури	Всего	Зима	Весна	Лето	Осень
Изолированные	141	32	40	32	37
Неизолированные	394	57	116	63	158
Сильные	94	9	22	20	43
Слабые	441	80	134	75	152

преимущественно неизолированные (только 20 событий из 94 относятся к типу изолированных).

1.3. Метод расчета возмущений и реализация метода наложенных эпох

Метод расчета возмущений ионосферных характеристик в целом аналогичен методу, использованному в работе [13] для исследования отклика $N_m F_2$ на среднеширотных станциях. Для произвольной характеристики F возмущение (ΔF) представляет собой отклонение (в %) наблюдаемого значения (F_{obs}) от 27-дневного скользящего среднего значения (F_{27}):

$$\Delta F = (F_{obs} - F_{27}) / F_{27} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Усреднение ионосферных откликов осуществлялось для дня, соответствующего моменту t_0 (день 0), пяти предыдущих дней (день (-5), ..., день (-1)) и пяти следующих дней (день 1, ..., день 5). Для каждой ячейки, соответствующей данному типу бури, сезону и дню до и после t_0 , рассчитывались средние значения возмущений ($\langle \Delta F \rangle$) и среднеквадратичные отклонения возмущений (σF). В качестве ионосферных характеристик F в данном исследовании фигурируют значения ГЕС и сезонно-незональные значения ТЕС для пяти широтных зон (экваториальная зона, среднеширотные и высокоширотные зоны Северного и Южного полушарий). Аналогичный статистический анализ был осуществлен для значений индекса солнечной активности $F_{10.7}$ с целью установления корреляционной связи между геомагнитными бурями и вариациями солнечного потока. Если магнитные бури происходят в произвольной фазе 27-дневных вариаций $F_{10.7}$, то ожидается существенное превышение $\sigma F_{10.7}$ над $\langle \Delta F_{10.7} \rangle$. В противном случае, когда магнитные бури преимущественно происходят, например, вблизи максимума 27-дневных вариаций $F_{10.7}$, ожидаются положительные значения $\langle \Delta F_{10.7} \rangle$, превышающие $\sigma F_{10.7}$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ГЕС

На рис. 1 показаны вариации $\langle \Delta GEC \rangle$ и σGEC в течение 5 дней до и после начала фазы восстановления для изолированных, неизолированных,

сильных и слабых бурь. Для изолированных бурь основным признаком ионосферного отклика являются положительные значения $\langle \Delta GEC \rangle$ в день 0. Значения $\langle \Delta GEC \rangle$ в день 0 больше весной и осенью (~7%), чем зимой и летом (~3%). Положительный отклик, наблюдаемый в день 0, означает увеличение ГЕС, что косвенно подтверждает гипотезу о формировании положительных возмущений электронной концентрации в главную фазу бури за счет переноса кислорода от авроральных широт в сторону экватора [13]. Еще одной причиной положительных возмущений ГЕС является дополнительный ветер к экватору, приводящий к подъему плазмы в область меньших скоростей химических потерь. Более высокая амплитуда положительного отклика весной и осенью, чем зимой и летом, возможна, связана с различной фоновой атмосферной циркуляцией: более сильной в периоды солнцестояния и более слабой в периоды равноденствия. Если весной и осенью ионосферный отклик практически всегда неотрицателен, то зимой и летом наблюдаются отрицательные эффекты в день 1 и дни (-4) и (-5). Отрицательный эффект в день 1, по всей видимости, объясняется интегральным превашированием отрицательных возмущений в высокоширотной и среднеширотной ионосфере (которые максимальны в день 1) над положительными возмущениями в низких и экваториальных широтах. Отрицательные эффекты, наблюдаемые в дни (-4) и (-5), будут рассмотрены отдельно в следующем разделе при анализе ионосферного отклика в ТЕС для экваториальной зоны.

Ионосферный отклик на сильные бури заметно отличается от ионосферного отклика на изолированные бури. Наибольшие положительные значения $\langle \Delta GEC \rangle$ наблюдаются в период день (-3)–день (-1), что может объясняться наложением положительных эффектов различных бурь (согласно табл. 1, сильные бури являются в основном неизолированными). Для сильных бурь отрицательные значения $\langle \Delta GEC \rangle$, наблюдаемые в день 1, сопоставимы по величине либо превышают положительные значения, наблюдавшиеся в предшествующие дни. С одной стороны этот результат согласуется с выводами работы [34]. С другой стороны, учитывая, что в случае изолированных бурь весной и осенью значения $\langle \Delta GEC \rangle$ практически всегда неотрицательны, отрицательные значения $\langle \Delta GEC \rangle$ в день 1 не могут объясняться простым наложением эффектов различных бурь. Объяснение этого эффекта будет представлено в следующем разделе при анализе ионосферного отклика в ТЕС для различных широтных зон. Как видно из рис. 1, поведение $\langle \Delta GEC \rangle$ для зимы существенно отличается от поведения $\langle \Delta GEC \rangle$ для других сезонов и характеризуется необычайно высоким положительным значением $\langle \Delta GEC \rangle$, наблюдаемым в день 1 (~10% зимой по сравнению с ~4% в другие сезоны). Это различие связано с небольшим количеством сильных

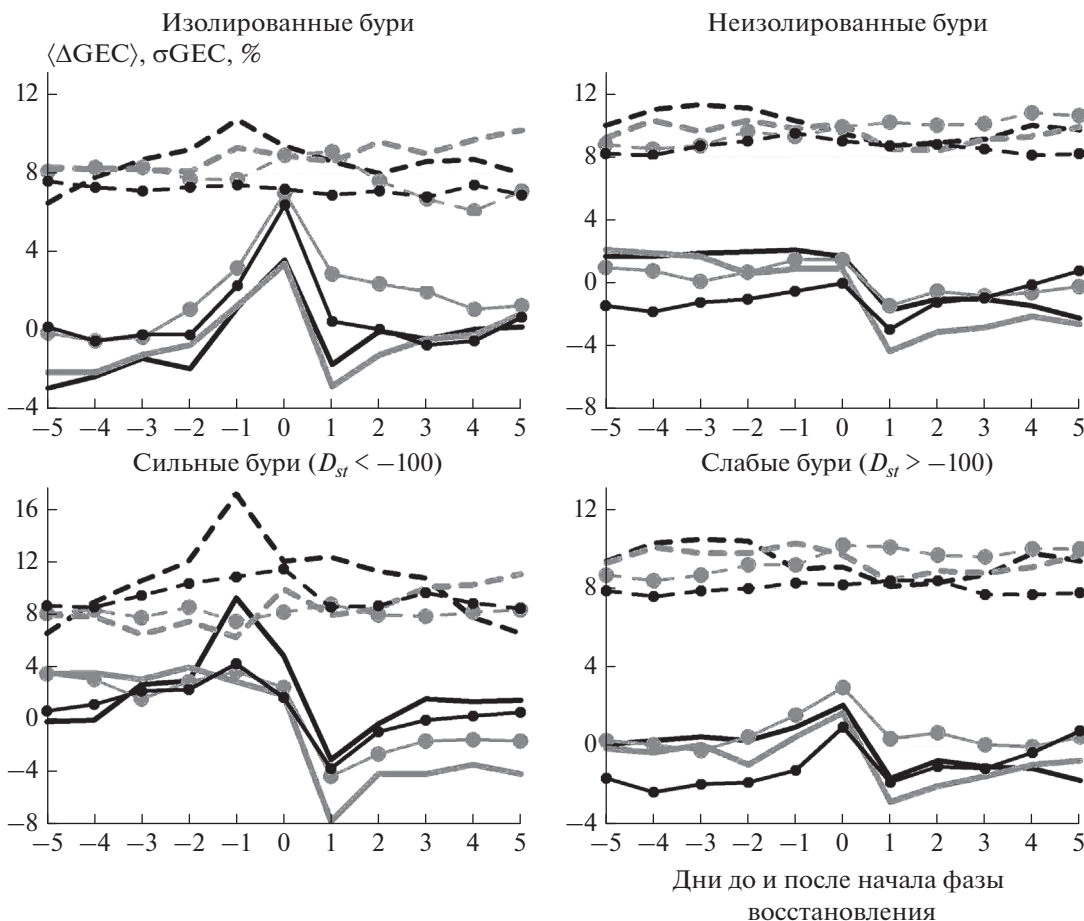


Рис. 1. Вариации $\langle \Delta GEC \rangle$ (сплошная линия) и σGEC (штриховая) в течение 5 дней до и после начала фазы восстановления для различных типов бурь. Черные и серые линии без кружков показывают результаты для зимы и лета соответственно. Черные и серые линии с кружками показывают результаты для осени и весны соответственно.

зимних бурь и чрезвычайно высоким положительным ΔGEC (~40%) во время одной из них (сильная геомагнитная буря 18 февраля 1999 г. [35]). Исключение этого события из статистики снижает $\langle \Delta GEC \rangle$ до ~5%. Объяснение причины такого высокого положительного ΔGEC представляет особый интерес, однако выходит за рамки данного исследования.

Статистические результаты для неизолированных и слабых магнитных бурь менее информативны по сравнению со случаями изолированных и сильных бурь. Поведение $\langle \Delta GEC \rangle$ для неизолированных бурь напоминает поведение $\langle \Delta GEC \rangle$ для сильных бурь, при этом амплитуды откликов более слабые в силу смешения эффектов сильных и слабых бурь. Поведение $\langle \Delta GEC \rangle$ для слабых бурь напоминает поведение $\langle \Delta GEC \rangle$ для изолированных бурь, при этом амплитуды откликов более слабые в силу наложения эффектов неизолированных бурь. Этот результат согласуется с выводами работы [13] о большей информативности результатов статисти-

ческого анализа изолированных и сильных бурь.

Сопоставление детерминированной ($\langle \Delta GEC \rangle$) и случайной (σGEC) компонент отклика в глобальном электронном содержании показало, что наибольшие значения $\langle \Delta GEC \rangle$ близки к σGEC (близкий результат был получен при статистическом анализе $N_m F2$ [13]). Таким образом, использование GEC вместо $N_m F2$ не привело к повышению соотношения детерминированной и случайной компонент ионосферного отклика. По всей видимости, основной причиной разброса значений ΔGEC является, в свою очередь, разброс значений солнечного потока во время различных магнитных бурь. Статистический анализ индекса солнечной активности $F_{10.7}$ показал, что в основном $\sigma F_{10.7}$ намного превышает $\langle \Delta F_{10.7} \rangle$, при этом значения $\sigma F_{10.7}$ и σGEC близки друг к другу.

Статистический анализ GEC в отличие от аналогичного анализа $N_m F2$ не выявил явных эффектов последствий (положительных возмущений,

наблюдаемых на 3–5-тый день после начала фазы восстановления геомагнитной бури).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СРЕДНЕЗОНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕС ДЛЯ ПЯТИ ШИРОТНЫХ ЗОН

Описание результатов статистического анализа в этом разделе отличается от описания, приведенного в предыдущем разделе. Здесь мы не приводим значений $\sigma_{\text{ТЕС}}$, поскольку сопоставление детерминированной ($\langle \Delta \text{ТЕС} \rangle$) и случайной ($\sigma_{\text{ТЕС}}$) компонент отклика дает приблизительно тот же результат, что и для ГЕС и $N_m F_2$. Здесь мы ограничиваемся анализом отклика только на изолированные и сильные бури, поскольку отклики именно на эти типы бурь являются наиболее информативными. Мы добавляем также анализ вариаций $\langle \Delta F_{10.7} \rangle$ для исследования влияния солнечного потока на ионосферный отклик.

3.1. Изолированные бури

На рис. 2 показаны вариации $\langle \Delta \text{ТЕС} \rangle$ для пяти широтных зон и вариации $\langle \Delta F_{10.7} \rangle$ в течение 5 дней до и после начала фазы восстановления для случая изолированных бурь. Основным эффектом в экваториальной зоне является положительный отклик в день 0 (начало фазы восстановления) со значениями $\langle \Delta \text{ТЕС} \rangle$ от ~4–5% зимой и летом до ~7–8% осенью и весной с восстановлением до невозмущенного уровня на 3–4-тый день после дня 0 (кроме весны). Этот эффект полностью согласуется с результатами, полученными для ГЕС, и, таким образом, подтверждает формирование положительных возмущений электронной концентрации в экваториальной зоне во время главной фазы бури за счет переноса кислорода от авральных широт к экватору [13].

Интересным (хотя и второстепенным) эффектом является асимметрия поведения $\langle \Delta \text{ТЕС} \rangle$ в предбуревой и послепуревой периоды. В период день (–5)–день (–2) значения $\langle \Delta \text{ТЕС} \rangle$ преимущественно отрицательны, тогда как в дни 2–5 значения $\langle \Delta \text{ТЕС} \rangle$ преимущественно положительны, т.е. происходит возрастание $\langle \Delta \text{ТЕС} \rangle$ от дня (–5) к дню 5. Указанное поведение $\langle \Delta \text{ТЕС} \rangle$ может объясняться поведением $\langle \Delta F_{10.7} \rangle$ (при этом только качественно) только для весны и лета. Таким образом, для объяснения асимметрии поведения $\langle \Delta \text{ТЕС} \rangle$ в предбуревой и послепуревой периоды должна существовать причина (неясная на сегодняшний момент), не связанная с изменением солнечного потока, но, возможно, связанная с эффектами последствия.

Основным эффектом в среднеширотной зоне Северного полушария являются отклики в дни 0 и

1. В день 0 положительный отклик хорошо выражен зимой и осенью (~11–13%), слабее выражен весной и показывает близкие к нулю значения летом. В день 1 отрицательный отклик хорошо выражен летом (~–10%), слабее выражен весной и осенью и показывает близкие к нулю значения зимой. Второстепенными эффектами в среднеширотной зоне Северного полушария являются следующие: положительный отклик в день (–1) – день до начала фазы восстановления весной, летом и осенью (~7–8%), отрицательный предвестник зимой (~–3%), отрицательный эффект последствия бури зимой (~–3%) и положительный эффект последствия бури летом (~3%). Все отмеченные эффекты среднеширотной зоны Северного полушария (включая второстепенные эффекты) повторяются в Южном полушарии, с той лишь разницей, что зиму следует заменить на лето, весну – на осень и т.д. (т.е. эффекты повторяются в терминах локальной зимы, локальной весны и т.д.). Следует отметить, что имеется некоторое различие в положительных эффектах последствия бури: в Южном полушарии этот эффект имеет место не только для локального лета, но и для локальной весны.

Идентичность откликов для Северного и Южного полушарий в терминах локальных сезонов, по-видимому, указывает на то, что все отмеченные эффекты (включая второстепенные) являются следствием именно геомагнитных бурь, а не результатом влияния других факторов (процессов в нижней атмосфере и короткопериодных вариаций солнечной активности). Действительно, получая идентичные отклики в Северном и Южном полушариях в терминах локальных сезонов, в действительности мы имеем дело с различными бурями, происходящими в различное время, с различным влиянием других факторов. Количественное различие заключается в том, что в Южном полушарии основные эффекты выглядят более контрастными: как положительные (~16%), так и отрицательные (~–13%) эффекты имеют большую амплитуду. Следует обратить внимание на асимметрию весеннего и осеннего поведения $\langle \Delta \text{ТЕС} \rangle$: весеннее поведение ближе к летнему, а осеннее – к зимнему. Интерпретация всех отмеченных эффектов будет рассмотрена в следующем разделе.

Основным эффектом в высокоширотной зоне Северного полушария являются отклики в день 0. Именно в этот день наблюдается как наибольший положительный отклик (зима, ~15%), так и наибольший отрицательный отклик (лето, ~–12%), при этом последовательность перехода от положительного к отрицательному отклику такая же, как в средних широтах (зима–осень–весна–лето). В отличие от средних широт наибольший отрицательный отклик наблюдается в день 0, а не в день 1. Интересно отметить повторяемость второстепенных эффектов в высоко- и среднеширот-

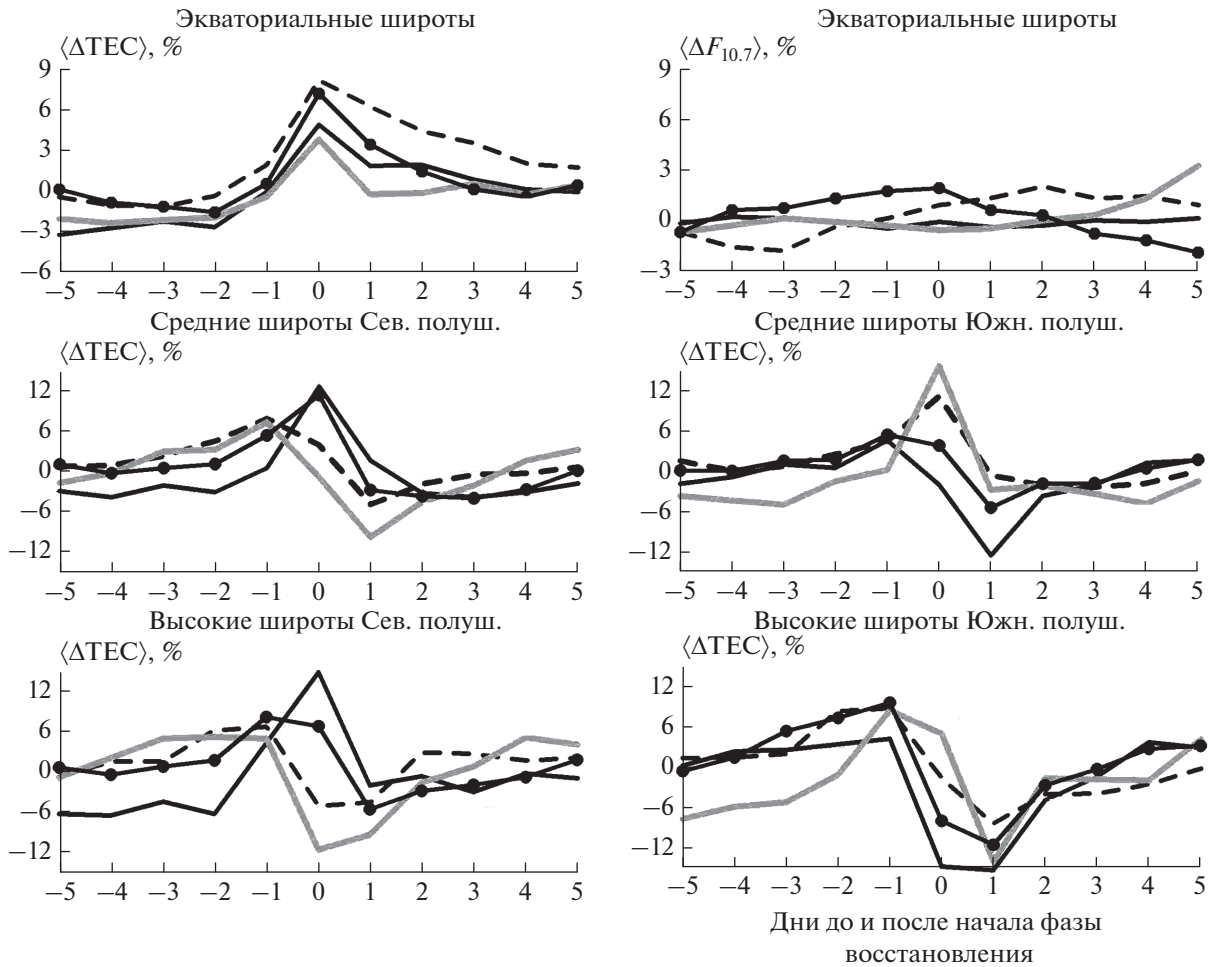


Рис. 2. Вариации $\langle \Delta \text{TEC} \rangle$ для пяти широтных зон и вариации $\langle \Delta F_{10.7} \rangle$ в течение 5 дней до и после начала фазы восстановления для случая изолированных бурь. Черная сплошная, черная штриховая, серая сплошная и черная линия с кружками показывают результаты, полученные для зимы, весны, лета и осени соответственно. В левой колонке (сверху вниз) показаны $\langle \Delta \text{TEC} \rangle$ соответственно для экваториальной зоны, среднеширотной и высокоширотной зон Северного полушария. В правой колонке (сверху вниз) показаны $\langle \Delta F_{10.7} \rangle$, $\langle \Delta \text{TEC} \rangle$ для среднеширотной зоны Южного полушария и $\langle \Delta \text{TEC} \rangle$ для высокоширотной зоны Южного полушария.

ной зонах Северного полушария. В отличие от средних широт отклик в высокоширотной зоне Северного полушария не повторяется в Южном полушарии. Наибольшие отрицательные отклики (вплоть до -15% локальным летом) наблюдаются в день 1 (а не в день 0), а наибольшие положительные отклики (до 10% для всех сезонов, за исключением локального лета) – в день (-1) , а не в день 0. Основной проблемой для интерпретации являются положительные отклики, наблюдаемые в дни 0 и (-1) . Этот вопрос будет рассмотрен в следующем разделе.

3.2. Сильные бури

На рис. 3 показаны вариации $\langle \Delta \text{TEC} \rangle$ для пяти широтных зон и вариации $\langle \Delta F_{10.7} \rangle$ в течение 5 дней до и после начала фазы восстановления для слу-

чая сильных бурь. В экваториальной зоне, в отличие от случая изолированных бурь, положительный отклик для сильных бурь нечетко выражен в день 0. При этом амплитуда положительного отклика меньше, чем в случае изолированных бурь, за исключением зимы (последний случай является следствием небольшого количества сильных зимних бурь и доминирующего влияния одной бури с большим положительным откликом). В отличие от случая изолированных бурь, отклик TEC в экваториальной зоне не повторяет отклик GEC. Основное различие заключается в значительном уменьшении отрицательного отклика, наблюдаемого в день 1. Как будет показано ниже, отрицательный отклик GEC в основном обусловлен отрицательным откликом на средних и высоких широтах. Отклик TEC в экваториальной зоне на сильные бури в целом положителен, за исключе-

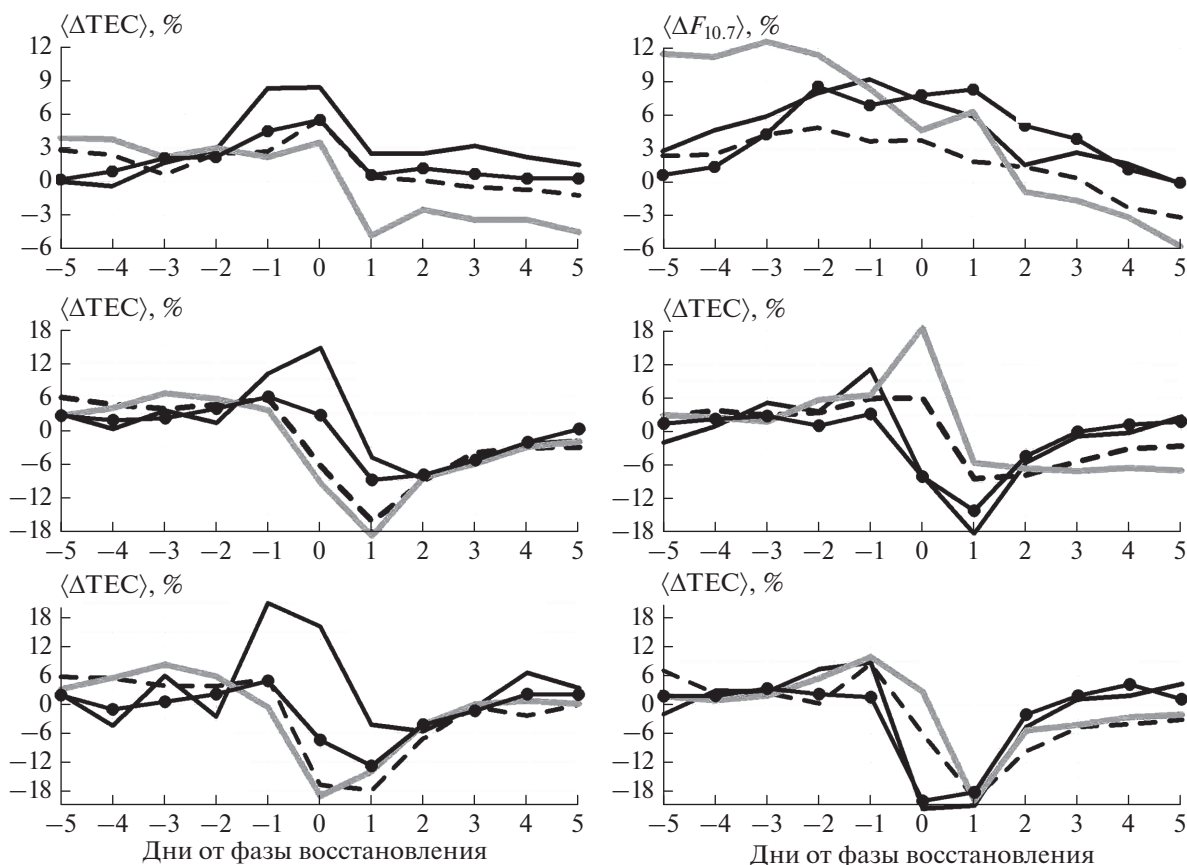


Рис. 3. Вариации $\langle \Delta TEC \rangle$ для пяти широтных зон и вариации $\langle \Delta F_{10.7} \rangle$ в течение 5 дней до и после начала фазы восстановления для случая сильных бурь ($D_{st} < -100$). Черная сплошная, черная штриховая, серая сплошная и черная линия с кружками показывают результаты, полученные для зимы, весны, лета и осени соответственно. В левой колонке (сверху вниз) показаны $\langle \Delta TEC \rangle$ для экваториальной зоны, $\langle \Delta TEC \rangle$ для среднеширотной зоны Северного полушария и $\langle \Delta TEC \rangle$ для высокоширотной зоны Северного полушария. В правой колонке (сверху вниз) показаны $\langle \Delta F_{10.7} \rangle$, $\langle \Delta TEC \rangle$ для среднеширотной зоны Южного полушария и $\langle \Delta TEC \rangle$ для высокоширотной зоны Южного полушария.

нием случая летних бурь. Сопоставление поведения $\langle \Delta TEC \rangle$ и $\langle \Delta F_{10.7} \rangle$ показывает, что для обоих параметров характерен переход от положительных значений в день (–5) к отрицательным значениям в день 5, при этом для летних бурь имеет место наибольшая разница между значениями в день (–5) и день 5. Таким образом, наиболее вероятным объяснением отрицательного отклика на сильные летние бури является отрицательная тенденция изменения солнечной активности.

В среднеширотной зоне, как и в случае изолированных бурь, основными проявлениями сильных бурь для обоих полушарий были отклики в дни 0 и 1, причем с повторением тех же самых сезонных закономерностей: наиболее положительные отклики наблюдаются локальной зимой (~15–19%), а наиболее отрицательные — локальным летом (~–18...–19%). Количественное различие заключается в возрастании амплитуды как наибольшего положительного, так и наибольшего отрицательного отклика. Положительный отклик в день (–1) — день до на-

чала фазы восстановления — в случае сильных бурь также присутствует. Главное различие сильных и изолированных бурь — отсутствие повторяемости малозначительных эффектов в Северном и Южном полушариях.

В высокоширотной зоне основные закономерности отклика, отмеченные для изолированных бурь, близки к закономерностям, наблюдаемым для сильных бурь. Для Северного полушария основное отличие сильных бурь заключается в смещении наибольшего положительного отклика со дня 0 на день (–1). Для Южного полушария основные закономерности ионосферного отклика на изолированные и сильные бури повторяются. Количественным отличием случая сильных бурь от случая изолированных бурь является возрастание амплитуды отрицательного отклика (вплоть до –21%). Как и в случае изолированных бурь, основной проблемой для интерпретации являются положительные отклики, наблюдаемые в дни 0 и (–1). Этот вопрос будет рассмотрен в следующем разделе.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В этом разделе результаты статистического анализа обсуждаются с точки зрения концепции термосферной бури [7, 13–16, 27, 28], в рамках которой ионосферные возмущения есть следствие изменения термосферных параметров (состав и ветер). Термосферная буря начинается в главную фазу геомагнитной бури с разогрева нижней термосферы в авроральных широтах за счет увеличения джоулева нагрева и усиления авроральных высыпаний. Разогрев приводит к увеличению концентрации как молекулярного азота $n(N_2)$, так и атомарного кислорода $n(O)$ в верхней термосфере. Избыточное давление в авроральных широтах приводит к переносу воздуха с авроральных широт в сторону экватора. Перенос молекулярного азота, как более тяжелого газа, охватывает высокоширотную зону и часть среднеширотной зоны. Перенос атомарного кислорода, как более легкого газа, охватывает все широтные зоны, вплоть до экваториальной зоны. На фазе последствия геомагнитной бури происходит обратный процесс переноса атомарного кислорода от экваториальных широт в средне- и высокоширотную зону. Разогрев нижней термосферы в авроральных широтах приводит не только к изменению состава, но и к изменению нейтрального ветра: усиливается ветер, направленный к экватору (ночные условия), и ослабляется ветер, направленный к полюсу (дневные условия). И то и другое изменение ветра ведет к подъему ионосферной плазмы вверх (т.е. к перемещению плазмы в область меньшей скорости рекомбинации) относительно спокойных условий. Сезонная картина термосферной бури определяется сезонной картиной фоновой циркуляции. Фоновый дневной ветер, направленный от экватора к полюсу, препятствует переносу молекулярного азота от авроральных широт к средним. Зимой дневной ветер сильнее, чем летом, поэтому эффект ослабления переноса N_2 выражен сильнее. К увеличению электронной концентрации, а значит, положительному отклику в статистическом анализе приводит возрастание $n(O)$ и изменение ветра. К уменьшению электронной концентрации, а значит отрицательному отклику в статистическом анализе, приводит возрастание $n(N_2)$.

В итоге в различных широтных зонах ожидаются следующие отклики вблизи начала фазы восстановления. В экваториальной зоне ожидается только положительный отклик, обусловленный ростом $n(O)$ и изменением ветра. Возрастания $n(N_2)$ не ожидается из-за ограниченности проникновения молекулярного азота в среднеширотную и высокоширотную зоны. В среднеширотной зоне возможен как положительный, так и отрицательный отклик в зависимости от соотношения

эффектов возрастания $n(O)$, $n(N_2)$ и изменения ветра. Итоговый эффект зависит от силы бури, широты и сезона. Ожидается следующая сезонная картина: наиболее отрицательный отклик ожидается локальным летом, а наиболее положительный — локальной зимой с промежуточными значениями весной и осенью. В высокоширотной зоне ожидается только отрицательный отклик, обусловленный ростом $n(N_2)$. Возрастания $n(O)$ не ожидается из-за переноса избыточного атомарного кислорода в среднеширотную и экваториальную зоны. Дополнительно к отклику вблизи начала фазы восстановления в среднеширотной зоне ожидаются эффекты последствия, т.е. положительные отклики на 3–5-тый день после начала фазы восстановления.

4.1. Экваториальная зона

Для изолированных бурь положительный отклик в день 0 полностью соответствует ожидаемому результату. Для сильных бурь положительный отклик не противоречит ожидаемому результату, за исключением случая летних бурь, когда имел место отрицательный отклик, который может объясняться отрицательной тенденцией изменения солнечной активности. Для изолированных бурь асимметрия поведения отклика в предбуриевой и послебуриевой периоды не связана с изменением солнечной активности. Причина такого поведения в настоящий момент неясна и требует дальнейших исследований.

4.2. Среднеширотная зона

Как для изолированных, так и для сильных бурь поведение отклика в дни 0 и 1 с учетом сезонных закономерностей полностью соответствует ожидаемому результату. Тот факт, что отклик в день 1 является более отрицательным, чем в день 0, может быть объяснен запаздыванием возрастания $n(N_2)$ относительно роста $n(O)$ и изменения ветра в силу большей инерционности увеличения концентрации молекулярного азота. Асимметрия весеннего и осеннего поведения отклика (весеннее поведение ближе к летнему, а осеннее — к зимнему) возможно связана с разбиением сезонов по календарным месяцам. Интересно, что при статистическом анализе $N_m F2$ [13] такая асимметрия была выражена гораздо слабее.

Положительный отклик в день (–1) — день до начала фазы восстановления, по всей видимости, объясняется следующим. Особенность принятой схемы статистического анализа заключается в усреднении откликов с точностью до одного дня. Возможна ситуация, когда фаза восстановления приходится на день 0, в то время как главная фаза бури приходится на предыдущий день (день (–1)).

С учетом запаздывания возрастания $n(N_2)$ относительно роста $n(O)$ и изменения ветра, в главной фазе ожидается увеличение электронной концентрации, что и объясняет положительный отклик в день (-1).

Эффекты последствия, т.е. положительные отклики на 3–5-тый день после начала фазы восстановления, наблюдаются для локального лета в обоих полушариях и для локальной весны в Южном полушарии. Этот результат несколько расходится с результатами работы [13], где весна называлась в качестве наиболее благоприятного сезона для проявления эффектов последствий. Теоретические объяснения сезонных закономерностей эффектов последствий в настоящее время отсутствуют, и поэтому данный вопрос требует дальнейших исследований.

Отрицательный предвестник и отрицательный эффект последствия, наблюдаемые локальной зимой, по всей видимости, связаны с методическими особенностями выбранной схемы статистического анализа. Положительный отклик в дни 0 и 1 на бури, произошедшие локальной зимой, приводит к завышению 27-дневной скользящей средней относительно невозмущенного уровня. Завышение предполагаемого невозмущенного уровня приводит к появлению “ложного” предвестника и “ложного” эффекта последствия.

4.3. Высокоширотная зона

Наиболее отрицательный отклик в день 1 (по сравнению с другими широтными зонами) соответствует ожидаемому результату. В то же время положительные отклики, наблюдаемые в дни 0 и (-1), противоречат концепции термосферной бури из-за отсутствия причин для положительного отклика в высокоширотной зоне. Для объяснения данного противоречия на сегодняшний момент может быть выдвинуто три версии.

Первая версия связана с методом построения глобальных ионосферных карт, рассчитываемых лабораторией CODE на основе гармонической аппроксимации, вследствие чего эффекты средних широт проецируются на высокоширотную зону. В пользу этой версии говорит повторяемость морфологии ионосферного отклика в средних и высоких широтах Северного полушария.

Вторая версия связана с особенностью выбранной ионосферной характеристики. Разогрев электронов в главной фазе бури ведет к увеличению масштабной высоты внешней ионосферы и, как следствие, к увеличению электронного содержания на высотах выше 800–1000 км (см., например, [6, 36]). Важным условием реализации положительного возмущения является опережение возрастания масштабной высоты относительно роста $n(N_2)$.

Третья версия связана с наличием причин положительного возмущения электронной концентрации, что противоречит концепции термосферной бури. Таким явлением может быть перенос плазмы из средних и низких широт в высокоширотную зону, индуцированный усилением электрического поля ионосферной конвекции (storm-enhanced plasma density (SED) [37]). На данный момент все три версии являются предположениями, требующими дальнейшей проверки.

4.4. Глобальное электронное содержание

Положительный отклик глобального электронного содержания для случая изолированных бурь подтверждает формирование положительных возмущений электронной концентрации в главную фазу геомагнитной бури за счет переноса кислорода от авроральных широт в сторону экватора. Отрицательный отклик глобального электронного содержания для случая сильных бурь объясняется изменением баланса отрицательных возмущений в высоких и средних широтах и положительных возмущений в экваториальных широтах относительно случая изолированных бурь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом статистического анализа ионосферного отклика на геомагнитные бури с использованием данных глобальных ионосферных карт получены следующие основные результаты.

Идентичность откликов для среднеширотных зон Северного и Южного полушарий в терминах локальных сезонов указывает на то, что полученные статистические данные являются следствием эффектов геомагнитных бурь, а не результатом влияния других факторов (процессов в нижней атмосфере и короткопериодных вариаций солнечной активности).

Ионосферные отклики в экваториальной зоне и среднеширотных зонах Северного и Южного полушарий подтверждают основные выводы концепции термосферной бури, в рамках которой ионосферные возмущения есть следствие изменения термосферных параметров (нейтрального состава термосферы и ветра). Сезонная зависимость ионосферного отклика согласуется с концепцией влияния фоновой атмосферной циркуляции на эффекты термосферной бури. Наиболее отрицательный ионосферный отклик, наблюдаемый через один день после начала фазы восстановления, объясняется запаздыванием возрастания концентрации молекулярного азота относительно роста концентрации атомарного кислорода и изменения нейтрального ветра.

Статистический анализ среднезонального полного электронного содержания в среднеширотных зонах выявил наличие эффектов последствия

для локального лета в обоих полушариях и для локальной весны в Южном полушарии. Этот результат несколько расходится с результатами статистического анализа максимума электронной концентрации, где весна называлась в качестве наиболее благоприятного сезона для проявления эффектов последствий. Теоретические объяснения сезонных закономерностей эффектов последствий в настоящее время отсутствуют, и поэтому данный вопрос требует дальнейших исследований.

Ионосферный отклик в высокоширотных зонах Северного и Южного полушарий показал двоякий результат. С одной стороны, наиболее отрицательный отклик (по сравнению с другими широтными зонами) согласуется с концепцией термосферной бури. С другой стороны, положительные отклики, наблюдаемые в начале фазы восстановления и до этого периода, противоречат концепции термосферной бури, согласно которой причин для положительного отклика в высокоширотной зоне нет. Для объяснения данного противоречия на сегодняшний момент может быть выдвинуто три версии. Первая версия связана с методом построения глобальных ионосферных карт на основе гармонической аппроксимации, вследствие чего эффекты средних широт проецируются на высокоширотную зону. Вторая версия связана с увеличением масштабной высоты внешней ионосферы из-за разогрева электронов в главной фазе бури. Третья версия связана с наличием причин положительного возмущения электронной концентрации, что противоречит концепции термосферной бури. На данный момент все три версии являются предположениями, требующими дальнейшей проверки.

Авторы благодарны лаборатории CODE за доступ к данным глобальных ионосферных карт через веб-сайт <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>, а также Центру данных о физике космоса НАСА (NASA's Space Physics Data Facility, SPDF) за использование геомагнитных и солнечных индексов через веб-сайт <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>. Исходные ряды ГЭС получены в рамках проекта РФФ № 17-77-20005 с использованием системы SIMuRG (<https://simurg.iszf.irk.ru/>).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-05-00594. В работе использованы методы, полученные в рамках базового финансирования программы ФНИ И.12.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. // Физика ионосферы. М.: Наука, 1988.

2. Абдуллаев А.Р., Марков А.В., Клименко М.В. и др. // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 12. С. 39; <https://doi.org/10.7868/S0207401X17120020>
3. Клименко М.В., Клименко В.В., Захаренкова И.Е. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 10. С. 83; <https://doi.org/10.1134/S0207401X19070082>
4. Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V. et al. // Radio Sci. 2005. V. 40. RS5009; <https://doi.org/10.1029/2004RS003179>
5. Кореньков Ю.Н., Бессараб Ф.С., Клименко В.В. и др. // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 10. С. 67; <https://doi.org/10.7868/S0207401X1710003X>
6. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V. et al. // J. Atmosph. Sol.-Terr. Phys. 2018. V. 180. P. 78; <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.017>
7. Rishbeth H., Mendillo M. // Ibid. 2001. V. 63. P. 1661; [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(01\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00036-0)
8. Deminov M.G., Deminova G.F., Zhrebtsov G.A. et al. // Advances in Space Research. 2013. V. 51. № 5. P. 702–711; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.09.037>
9. Ratovsky K.G., Medvedev A.V., Tolstikov M.V. // Adv. Space Res. 2015. V. 55. № 8. P. 2041; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.08.001>
10. Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н. и др. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 1. С. 49; <https://doi.org/10.7868/S0207401X16010052>
11. Карпов И.В., Киевецкий С.П., Борчевкина О.П. и др. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 1. С. 59; <https://doi.org/10.7868/S0207401X16010064>
12. Клименко В.В., Клименко М.В., Бессараб Ф.С. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 7. С. 86; <https://doi.org/10.1134/S0207401X19070070>
13. Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В. и др. // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4. № 4. С. 32; <https://doi.org/10.12737/szf-44201804>
14. Buonsanto M.J. // Space Sci. Rev. 1999. V. 88. № 3–4. P. 563; <https://doi.org/10.1023/A:1005107532631>
15. Mikhailov A.V. // Fis. Tierra. 2000. V. 12. P. 223.
16. Pröls G.W. // Ann. Geophys. 1993. V. 11. № 1. P. 1.
17. Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Forster M. et al. // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № A7. P. 14697; <https://doi.org/10.1029/98JA00210>
18. Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н., Голубков М.Г. // Хим. физика. 2011. Т. 30. № 5. С. 16.
19. Кореньков Ю.Н., Бессараб Ф.С., Клименко В.В. и др. // Хим. физика. 2013. Т. 32. № 9. С. 54; <https://doi.org/10.7868/S0207401X13090094>
20. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E. et al. // Ann. Geophys. 2017. V. 35. P. 923; <https://doi.org/10.5194/angeo-35-923-2017>
21. Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В. // ДАН. 2006. Т. 409. № 3. С. 399.
22. Yasyukevich Yu.V., Yasyukevich A.S., Zhivetiev I.V. // IEEE Proc. (Prog. in Electromagn. Res. Sympos.). 2018. P. 2422; <https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8597938>
23. Yao Y., Zhai C., Kong J. et al. // J. Geod. 2017. V. 91. P. 1299; <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1026-x>

24. *Gulyaeva T.L., Veselovsky I.S.* // Adv. Space Res. 2014. V. 53. № 3. P. 403;
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.11.036>
25. *Yenen S.D., Gulyaeva T.L., Arikan F. et al.* // Ibid. 2015. V. 56. № 7. P. 1343;
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.025>
26. *Chen Y., Liu L., Le H. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119. P. 3747;
<https://doi.org/10.1002/2013JA019692>
27. *Mayr H.G., Harris I., Spencer N.W.* // Rev. Geophys. Space Phys. 1978. V. 16. P. 539;
<https://doi.org/10.1029/RG016i004p00539>
28. *Field P.R., Rishbeth H.* // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 1997. V. 59. № 2. P. 163;
[https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(96\)00085-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(96)00085-5)
29. *Hernández-Pajares M., Juan J.M., Sanz J. et al.* // J. Geod. 2009. V. 83. P. 263;
<https://doi.org/10.1007/s00190-008-0266-1>
30. *Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V. et al.* // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P. 335;
<https://doi.org/10.5194/angeo-26-335-2008>
31. *Astafyeva E.I., Afraimovich E.L., Oinats A.V. et al.* // Adv. Space Res. 2008. V. 42. P. 763;
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.11.007>
32. *Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В. и др.* // Геомагнетизм и аэрномия. 2008. V. 48. № 2. P. 195.
33. *Hocke K.* // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. A04302;
<https://doi.org/10.1029/2007JA012798>
34. *Ясюкевич Ю.В., Едемский И.К., Первалова Н.П. и др.* Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013.
35. *Aponte N., Gonzalez S.A., Kelley M.C. et al.* // Geoph. Res. Lett. 2000. V. 27. № 18. P. 2833;
<https://doi.org/10.1029/2000GL000025>
36. *Liu J., Wang W., Burns A. et al.* // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2016. V. 121. P. 727;
<https://doi.org/10.1002/2015JA021832>
37. *Foster J.C.* // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. № A2. P. 1675;
<https://doi.org/10.1029/92JA02032>