

**ОТКЛИКИ РЕГИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ
НА ГЕОМАГНИТНЫЕ СОБЫТИЯ В ВЫСОКИХ, СРЕДНИХ
И ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ ШИРОТАХ,
ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ НАЛОЖЕННЫХ ЭПОХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЕ-ИНДЕКСА**

**REGIONAL ELECTRON CONTENT RESPONSES TO GEOMAGNETIC EVENTS
AT HIGH, MIDDLE, AND EQUATORIAL LATITUDES OBTAINED BY SUPERPOSED
EPOCH METHOD USING AE-INDEX**

К.Г. Ратовский 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ratovsky@iszf.irk.ru*

М.В. Клименко

*Калининградский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН,
Калининград, Россия, maksim.klimenko@mail.ru*

А.М. Веснин 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, artem_vesnin@iszf.irk.ru*

К.В. Белюченко

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kdei@list.ru*

K.G. Ratovsky

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ratovsky@iszf.irk.ru*

M.V. Klimenko

*West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism,
Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia, maksim.klimenko@mail.ru*

A.M. Vesnin

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, artem_vesnin@iszf.irk.ru*

K.V. Belyuchenko

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kdei@list.ru*

Аннотация. Статья посвящена исследованию статистических закономерностей откликов регионального электронного содержания на геомагнитные события в высоких, средних и экваториальных широтах. Региональное электронное содержание представляет собой полное электронное содержание, усредненное по всем долготам в данной широтной зоне. Статистический анализ включает следующие составляющие: 1) идентификация геомагнитных событий на основе АЕ-индекса и расчет «эталонных» геомагнитных бурь; 2) расчет регионального электронного содержания (*REC*) для пяти широтных зон (экваториальная зона, среднеширотные зоны Северного и Южного полушарий и высокоширотные зоны Северного и Южного полушарий); 3) расчет возмущений *REC* (ΔREC), представляющих собой относительные (процентные) отклонения наблюдаемых значений от 27-дневного скользящего среднего значения *REC*; 4) получение «эталонного» ионосферного отклика в виде динамики среднего ΔREC , полученной методом наложенных эпох. Метод наложенных эпох реализован с часовым разрешением и ключевыми моментами, соответствующими максимуму АЕ-индекса. По сравнению с нашим предыдущим статистическим анализом, реализованным с суточным разрешением на основе идентификации геомагнитных бурь с использованием *Dst*-индекса, новый метод привел к существенному возрастанию амплитуды отклика и сокращению его продолжительности. Сезонное поведение ионосферных откликов было проанализировано на предмет соответствия концепции термосферной бури. Отклики экваториальной

Abstract. The paper studies statistical patterns of regional electron content responses to geomagnetic events at high, middle, and equatorial latitudes. The regional electron content is the total electron content averaged over all longitudes in a given latitudinal zone. The statistical analysis includes the following: 1) identification of geomagnetic events based on the AE index and calculation of “reference” geomagnetic storms; 2) calculation of the regional electron content (*REC*) for five latitudinal zones (equatorial zone, mid-latitude zones of the Northern and Southern hemispheres, and high-latitude zones of the Northern and Southern hemispheres); 3) calculation of *REC* disturbances (ΔREC), which are relative (percentage) deviations of the observed values, from the 27-day running mean of *REC* and 4) obtaining the “reference” ionospheric response in the form of the dynamics of average ΔREC , obtained by the superposed epoch method. The superposed epoch method is implemented with the hourly resolution and key moments corresponding to the AE index maximum. Compared with our previous statistical analysis, implemented with daily resolution based on geomagnetic storm identification by the *Dst* index, the new method leads to a significant increase in the amplitude and the time-focusing of the response. The seasonal behavior of ionospheric responses was analyzed for correspondence to the thermospheric storm concept. The responses of the equatorial and mid-latitude zones of the Southern Hemisphere fit the thermospheric storm concept. In the mid-latitude zone of the Northern Hemisphere, there are a number of exceptions. The responses of the high-latitude zone show the need to take into account the mechanisms

зоны и среднеширотной зоны Южного полушария соответствуют концепции термосферной бури. В среднеширотной зоне Северного полушария имеет место ряд исключений. Отклики высокоширотной зоны показывают необходимость учета механизмов формирования положительных возмущений, которые отсутствуют в концепции термосферной бури.

Ключевые слова: ионосферный отклик, геомагнитная буря, статистика, метод наложенных эпох, AE-индекс.

ВВЕДЕНИЕ

В общую изменчивость ионосферы вносят вклад солнечная, геомагнитная и метеорологическая активность. Статистический анализ ионосферной вариабельности показал примерно одинаковые оценки вклада метеорологической и геомагнитной активности: 13–15 % от всех возмущений максимума электронной концентрации N_mF2 для дневной среднеширотной ионосферы [Araujo-Pradere et al., 2005; Rishbeth, Mendillo, 2001; Deminov et al., 2011]. Статистический анализ ионосферных откликов на геомагнитные бури [Ратовский и др., 2018] показал, что даже в случае изолированных бурь, происходящих в одни и те же сезоны примерно в одно и то же время суток, ионосферные отклики могут значительно отличаться друг от друга. Причиной таких различий могут быть ионосферные возмущения метеорологического происхождения, которые имеют источники в нижней атмосфере, а также уникальность развития каждой геомагнитной бури. Результаты моделирования [Pedatella, 2016; Pedatella, Liu, 2018; Klimenko et al., 2023] показали важность учета состояния атмосферы при анализе ионосферного отклика на геомагнитные бури. Эти факты в значительной степени усложняют проблему прогноза космической (в том числе ионосферной) погоды в периоды геомагнитных бурь.

Исследование ионосферных откликов на геомагнитные события может быть разделено на два подхода. Первый подход заключается в исследовании отклика на конкретную геомагнитную бурю или набор небольшого количества бурь. Задачей второго (статистического) подхода является получение ионосферного отклика, усредненного по ансамблю однотипных бурь (в пределах некоторых выбранных критериев). Ожидается, что второй подход имеет преимущество в том, что усредненный ионосферный отклик будет в основном обусловлен эффектами собственно магнитной бури, тогда как влияние процессов в нижних слоях атмосферы будет уменьшено за счет усреднения. Как показали предыдущие исследования [Ratovsky et al., 2020], изолированные бури происходят в различные фазы 27-дневных вариаций солнечной активности, что обеспечивает уменьшение влияния этих вариаций на ионосферный отклик за счет усреднения по ансамблю изолированных бурь.

Впервые статистический подход был предложен в работе [Wrenn et al., 1987], где ионосферные отклики сортировались по ячейкам в соответствии с мест-

behind the formation of positive disturbances, which are absent in the thermospheric storm concept.

Keywords: ionospheric response, geomagnetic storm, statistics, superposed epoch method, AE index.

ным временем, месяцем года и уровнем геомагнитной возмущенности, определяемой интегральным индексом A_p для получения среднего устойчивого возмущения (average steady state disturbance). Этот подход получил свое развитие в построении усредненной суточно-сезонной картины среднеширотного отклика N_mF2 [Rodger et al., 1989] и в анализе межполушарной асимметрии возмущений полного электронного содержания TEC [Titheridge, Buonsanto, 1988].

В предыдущих исследованиях авторами данной статьи был предложен статистический подход к получению усредненной картины отклика на геомагнитные бури для следующих ионосферных характеристик: среднедневное значение N_mF2 в Иркутске и Калининграде [Ратовский и др., 2018] и среднесуточное значение REC для пяти широтных зон [Ratovsky et al., 2020]. Во всех случаях: временное разрешение составляло 1 сут; геомагнитные бури идентифицировались с использованием Dst ; усредненный ионосферный отклик рассчитывался методом наложенных эпох с ключевой датой, соответствующей дню минимума Dst по UT.

Недостатком использования суточного разрешения является то, что ионосферный отклик в ключевую дату является смесью предбуревых возмущений, эффектов отклика на главной фазе магнитной бури и ранней стадии фазы восстановления. При минимуме Dst вблизи 0 UT — это отклик на фазу восстановления, при минимуме Dst вблизи 23 UT — это отклик на главную фазу в совокупности с предбуревыми возмущениями, в остальных случаях отклик является промежуточным вариантом. Данный недостаток побудил авторов в дальнейшем использовать часовое разрешение. Другой особенностью предложенного подхода является использование Dst как индикатора геомагнитного события. Преимуществом Dst является то, что для этого индекса разработана концепция главной фазы и фазы восстановления магнитной бури, а также идентификация и классификация магнитных бурь в зависимости от минимального значения Dst [Gonzalez et al., 1994, 1999]. В то же время для ионосферных исследований полезен индикатор геомагнитного события, наиболее тесно связанный с ионосферным откликом. В соответствии с анализом, проведенным в работах [Prölss, 2006; Lu et al., 2001] таким индикатором является AE-индекс. Именно этот индекс показывает высокую корреляцию с джоулевым нагревом высокоширотной и авроральной ионосферы во время геомагнитных бурь [Prölss, 2006; Lu et al., 2001], который, в свою очередь, в рамках концепции термосферной

бури является одной из основных причин ионосферных возмущений. Дополнительным стимулом является то, что *AE* является одним из управляющих параметров для физических моделей ионосферы, например для ГСМ ТИП [Klimenko et al., 2011]. Статистические исследования показали, что высокоинтенсивная длительная и непрерывная *AE*-активность (High-Intensity Long-Duration and Continuous *AE* Activities, HILDCAA) приводит к значительным возмущениям *TEC* на низких широтах [da Silva et al., 2020]. Данные соображения побудили авторов использовать *AE* в качестве идентификатора геомагнитных событий. Нюансы, связанные с заменой *Dst* на *AE*, обсуждаются в следующем разделе.

Таким образом, в статье представлена модификация ранее предложенного статистического подхода к исследованию ионосферных откликов на геомагнитные бури [Ратовский и др., 2018; Ratovsky et al., 2020], основанная на использовании часового разрешения вместо суточного и *AE* вместо *Dst*. Последствия этой модификации обсуждаются в соответствующем разделе. Важно отметить, что, несмотря на то, что эти индексы являются индикаторами геомагнитной активности, они описывают абсолютно разные токовые системы. Так, *AE* показывает вариации авроральных токов, а *Dst* — кольцевого тока.

МЕТОД АНАЛИЗА ДАННЫХ

В данной работе использовались индексы геомагнитной активности и глобальные ионосферные карты *TEC* за 1999–2018 гг. Выбор 1999 г. связан с тем, что этот год является первым годом полных глобальных карт *TEC*, выбор 2018 г. — тем, что значения *AE* в используемой нами базе данных [https://omniweb.gsfc.nasa.gov] доступны только до 2018 г. В дальнейшем анализе использовался средне-часовой *AE*.

Метод идентификации геомагнитных событий на основе *AE* детально описан в работе [Ratovsky et al., 2024]. Он аналогичен ранее разработанному методу идентификации геомагнитных бурь на основе *Dst* с тем отличием, что вместо минимума *Dst* используется максимум *AE*, а пороговое значение *AE* для идентификации события, должно обеспечивать наиболее близкое число геомагнитных событий к числу бурь, полученных по *Dst*-критерию при пороговом значении *Dst* = –50 нТл. В работе [Ratovsky et al., 2024] приведены следующие обоснования выбранного способа определения пороговых значений. Пороговый уровень K_p -индекса, полученный тем же способом, что для *AE*, дает значение $K_p = 5$, что полностью согласуется с пороговым значением геомагнитной бури по K_p -критерию согласно NOAA Space Weather Scales. Пороговое значение *AE* = 930 нТл близко к пороговому значению *AE* = 1000 нТл, используемому в работе [Marques de Souza Franco et al., 2021] для идентификации событий HILDCAA. В подавляющем числе случаев геомагнитные события, идентифицированные по *AE*, соответствуют геомагнитным бурям по *Dst*-критерию. В итоге критерием геомагнитного события, идентифицированного по *AE*, было выполнение двух условий: 1) $AE(t_0)$ являются наиболь-

шими значениями *AE* на временном интервале $t_0 \pm 12$ ч; 2) $AE(t_0) \geq 930$ нТл, где t_0 — время, соответствующее максимуму *AE*. С использованием этих критериев было выявлено 554 геомагнитные бури по *Dst*-критерию и 556 геомагнитных событий по *AE*-критерию. Сопоставление списков выявленных событий показало, что геомагнитное событие по *AE*-критерию в 469 случаях из 556 (т. е. в 84 % случаев) происходит во время геомагнитных бурь по *Dst*-критерию. Таким образом, событие по *AE*-критерию в большинстве случаев является магнитной бурей, в оставшихся случаях — интенсивной суббурей в небуревых условиях. В дальнейшем геомагнитные события, идентифицированные по *AE*, обозначаются как *AE*-бури.

Как показали предыдущие исследования [Ратовский и др., 2018; Ratovsky et al., 2020], статистические результаты для неизолированных магнитных бурь гораздо менее информативны по сравнению со случаями изолированных бурь. По этой причине в дальнейшем анализе использовались только изолированные бури, т. е. бури, для которых временной интервал между соседними событиями $t_0 \geq 5$ дней. Из 556 *AE*-бурь количество изолированных событий составляет 178, т. е. ~32 %. С помощью метода наложенных эпох с ключевыми моментами, соответствующими максимуму *AE*, для изолированных *AE*-бурь было рассчитано усредненное поведение *AE* как функция времени относительно максимума *AE*, далее обозначаемое как эталонная *AE*-буря. Аналогичным образом было рассчитано усредненное поведение *Dst*. Результаты расчетов показаны на рис. 1.

Для исследования сезонной зависимости ионосферных откликов изолированные *AE*-бури были разделены по сезонам. В данном случае сезоны представляют собой интервалы продолжительностью ~91 день, центрированные относительно солнцестояний и равноденствий в Северном полушарии: зима (07.11–22.12–05.02, 38 *AE*-бурь); весна (06.02–22.03–07.05, 57 *AE*-бурь); лето (08.05–22.06–07.08, 48 *AE*-бурь) и осень (08.08–22.09–06.11, 35 *AE*-бурь). Даты означают начало, середину и конец сезона. Как будет показано в следующем разделе, усредненные поведения *AE* для различных сезонов отличаются незначительно, что облегчает интерпретацию ионосферных откликов, позволяя не учитывать потенциально различную интенсивность *AE*-бурь в разные сезоны.

В качестве ионосферных характеристик использовались региональные электронные содержания *REC*, представляющие собой средневзвешенные значения

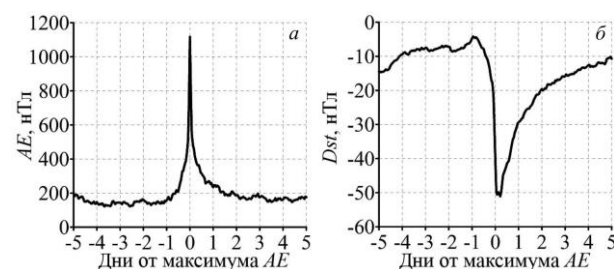


Рис. 1. Усредненное поведение *AE* (а) и *Dst* (б) как функция времени (в днях) относительно максимума *AE*

TEC для выбранного широтного и долготного региона. Значения *TEC* были получены из глобальных ионосферных карт GIM лаборатории CODE [Schaer et al., 1998; <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>]. Для расчета *REC* было выбрано пять широтных зон в скорректированной геомагнитной системе координат: среднеширотные зоны в обоих полушариях 30°–60°, высокоширотные зоны в обоих полушариях 60°–90° и экваториальная зона $\pm 30^\circ$. Для расчета возмущений *REC* (ΔREC) использовалось относительное (процентное) отклонение наблюдаемых значений от 27-дневного скользящего среднего значения *REC*. С помощью метода наложенных эпох с ключевыми моментами, соответствующими максимуму *AE*, для изолированных зимних, весенних, летних и осенних *AE*-бурь было рассчитано усредненное поведение ΔREC как функция времени относительно максимума *AE* (эталонный ионосферный отклик).

АНАЛИЗ ЭТАЛОННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ОТКЛИКОВ НА ИЗОЛИРОВАННЫЕ МАГНИТНЫЕ БУРИ

На рис. 2 показано усредненное поведение *AE* для четырех сезонов и эталонные ионосферные отклики для четырех сезонов и пяти широтных зон. Во всех случаях под сезоном понимается зима, весна, осень и лето в Северном полушарии.

Видно, что усредненное поведение *AE* для различных сезонов отличается незначительно. Это означает, что средняя интенсивность *AE*-бурь в разные сезоны приблизительно одинакова, что, в свою очередь, облегчает анализ сезонных различий в ионосферных откликах. Анализ показывает, что по поведению на главной фазе бури и ранней фазе восстановления все отклики можно разделить на три типа: А-тип, N-тип и V-тип. Отклики А-типа представляют собой преимущественно положительные возмущения и наблюдаются для всех сезонов в экваториальных широтах и для локальных зим в средних широтах обоих полушарий. Положительный пик отклика наблюдается через 3–4 ч после максимума *AE*, т. е. вблизи начала фазы восстановления. Отклики N-типа представляют собой возмущения, имеющие хорошо выраженную положительную и отрицательную фазы, и наблюдаются в средних широтах весной, осенью и локальным летом, в высоких широтах — весной, осенью и локальной зимой. Положительный пик отклика наблюдается через 2–3 ч после максимума *AE* в среднеширотной зоне и через 1–2 ч после максимума *AE* в высокоширотной зоне, т. е., как и в случае экваториальной зоны, вблизи начала фазы восстановления. Время появления отрицательного пика отклика показывает существенные сезонные вариации. Весной и локальным летом в средних широтах, а также весной и осенью в высоких широтах пики наблюдаются через 15–19 ч после максимума *AE*. Осенью в средних широтах и локальной зимой в высоких широтах Северного полушария пики наблюдаются через 33–35 ч после максимума *AE*. Промежуточное положение соответствует пику через 22 ч после максимума *AE*, который наблюда-

ется локальной зимой в высоких широтах Южного полушария. Отклики V-типа представляют собой преимущественно отрицательные возмущения и наблюдаются для локального лета в высоких широтах. Отрицательный пик отклика наблюдается через 7–15 ч после максимума *AE*.

В табл. 1 представлены максимальные и минимальные значения *AE* и эталонных ионосферных откликов ΔREC . Видно, что максимальные положительные возмущения *REC* (если они присутствуют) раньше всего появляются в высоких широтах (через 1 ч после максимума *AE*), со временем смещаясь через средние широты к экватору.

Сезонное поведение ионосферных откликов может быть рассмотрено с точки зрения концепции локальная зима — равноденствия — локальное лето, подразумевающей, что экстремальные значения откликов (положительные и отрицательные) достигаются локальной зимой либо летом с промежуточными значениями в равноденствия. В данную концепцию полностью укладываются отклики в Южном полушарии для среднеширотной и высокоширотной зон: амплитуда положительного отклика последовательно возрастает от локального лета к локальной зиме, амплитуда отрицательного отклика последовательно убывает от локального лета к локальной зиме. В концепцию укладываются также положительные отклики в экваториальной зоне: амплитуда положительного отклика в Южном полушарии последовательно возрастает от локального лета к локальной зиме. В Северном полушарии имеет место ряд исключений. В средних широтах амплитуда положительного отклика возрастает по схеме весна—лето—осень—зима, а амплитуды отрицательных откликов близки друг к другу при наибольшей амплитуде осенью и наименьшей весной. В высоких широтах амплитуда положительного отклика укладывается в концепцию, а амплитуда отрицательного отклика убывает по схеме осень—лето—зима—весна.

На рис. 2 видно, что значительные ионосферные отклики наблюдаются на предбуревой фазе (от начала дня –5 до начала дня –1). Наибольшие положительные отклики видны летом (+8÷+9 %) и осенью (+6÷+11 %) в средне- и высокоширотных зонах Северного полушария. В Южном полушарии положительный отклик выражен слабее и не имеет хорошо выраженной сезонной структуры. Наибольшие отрицательные отклики наблюдаются локальной зимой в средне- и высокоширотных зонах обоих полушарий (–3÷–4 % в среднеширотной зоне и –7÷–8 % в высокоширотной зоне). Из четырех дней предбуревой фазы выделяется день –2, когда в Северном полушарии наблюдаются наиболее положительный и наиболее отрицательный отклики. В Южном полушарии день –2 не выделяется.

По рис. 2 можно оценить эффекты последствий, анализируя поведение отклика на поздней фазе восстановления бури (от начала дня 2 до конца дня 4). В Южном полушарии на поздней фазе восстановления бури все отклики выходят на приблизительно нулевой уровень, демонстрируя отсутствие

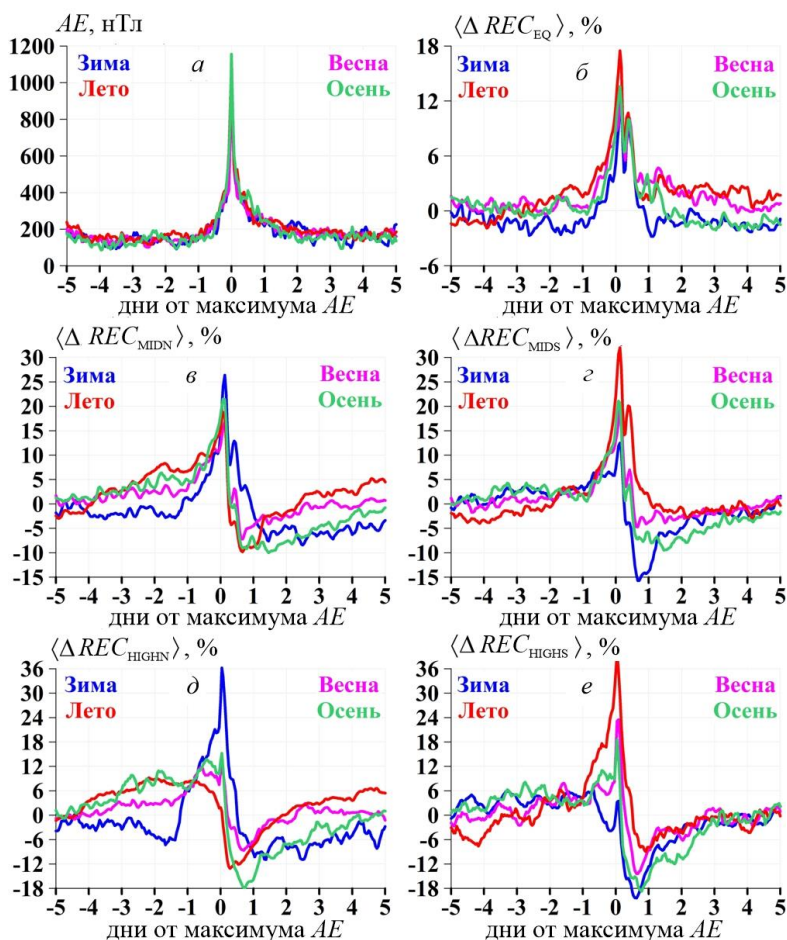


Рис. 2. Усредненные AE (а) и эталонные ионосферные отклики для экваториальной зоны (б), среднеширотной зоны Северного (в) и Южного (г) полушарий и высокоширотной зоны Северного (д) и Южного (е) полушарий. Под сезоном понимается зима, весна, осень и лето в Северном полушарии

Таблица 1

Максимальные (макс.) и минимальные (мин.) значения AE
и эталонных ионосферных откликов ΔREC

AE, нТл					ΔREC, экваториальная зона, %				
сезон	макс.	часы	мин.	часы	сезон	макс.	часы	мин.	часы
зима (A)	1144	0	92	-40	зима (A)	11.1	3	-2.8	26
весна (A)	1066	0	100	-61	весна (A)	12.9	4	-0.4	-51
осень (A)	1156	0	86	-95	осень (A)	13.6	3	-2.1	73
лето (A)	1129	0	116	-61	лето (A)	17.5	3	-1.9	-94
ΔREC, среднеширотная зона Северного полушария					ΔREC, среднеширотная зона Южного полушария				
сезон	макс.	часы	мин.	часы	сезон	макс.	часы	мин.	часы
зима (A)	26.4	3	-8.4	60	зима (N)	12.5	3	-15.7	16
весна (N)	16.7	3	-7.2	15	весна (N)	19.4	3	-4.7	16
осень (N)	21.5	2	-10	35	осень (N)	21.1	2	-9.5	35
лето (N)	18.8	2	-9.8	16	лето (A)	32	3	-4	-99
ΔREC, высокоширотная зона Северного полушария					ΔREC, высокоширотная зона Южного полушария				
сезон	макс.	часы	мин.	часы	сезон	макс.	часы	мин.	часы
зима (N)	36.2	1	-10.9	33	зима (V)	6.2	-17	-20.4	15
весна (N)	13	1	-8.7	17	весна (N)	23.5	2	-14.4	15
осень (N)	15.2	1	-17.8	17	осень (N)	18.6	1	-18.7	19
лето (V)	9.2	-52	-13.1	7	лето (N)	39.9	1	-9	22

Под сезоном понимается зима, весна, осень и лето в Северном полушарии. Знак после сезона показывает тип отклика, часы — времена наблюдения макс. и мин. относительно максимума AE. Курсивом отмечены слабо выраженные экстремумы.

эффекта последействия. Схожее поведение показывают осенний и весенний отклики в Северном полушарии. Летний отклик в Северном полушарии на поздней фазе восстановления бури переходит от отрицательной фазы к положительной, что означает классический эффект последействия, описанный в [Ратовский и др., 2018]. Зимний отклик в Северном полушарии на поздней фазе восстановления бури варьирует около отрицательного уровня (–5 % в среднеширотной зоне и –6 % в высокоширотной зоне), показывая тем самым отрицательное последействие.

ОБСУЖДЕНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ «ЭТАЛОННЫХ» ИОНОСФЕРНЫХ ОТКЛИКОВ НА ИЗОЛИРОВАННЫЕ МАГНИТНЫЕ БУРИ

Модификация статистического подхода к исследованию ионосферных откликов на геомагнитные бури, основанная на использовании часового разрешения вместо суточного и *AE* вместо *Dst*, позволила получить следующие преимущества по сравнению с ранее разработанным методом [Ratovsky et al., 2020]. Ранее время появления наибольшего положительного отклика варьировало в пределах двух суток относительно дня, соответствующего минимуму *Dst*. При новом подходе это время сконцентрировано в интервале 1–4 ч после максимума *AE*. Временная концентрация положительного отклика привела к существенному увеличению его амплитуды: 18 % в экваториальной зоне, 26–32 % в среднеширотной зоне и 36–40 % в высокоширотной зоне; ранее эти цифры составляли 8 %, 14–18 % и 12–18 %. Прояснилась сезонная картина в экваториальной зоне: ранее по необъяснимым причинам весенний отклик в ~1.5 раза превышал отклики в другие сезоны, теперь отклик укладывается в концепцию зима—равноденствия—лето. Упростилась картина эффекта последействия: теперь эффект сводится к положительному последействию летом и отрицательному последействию зимой для откликов Северного полушария.

Концепция термосферной бури [Mayr et al., 1978; Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Field, Rishbeth, 1997; Buonsanto, 1999; Mikhailov, 2000; Mendillo, 2006; Prölss, 2008; Ратовский и др., 2018] подразумевает, что изменения в нейтральном составе термосферы и нейтральном ветре, вызванные нагревом в высокоширотной зоне, являются основными факторами, определяющими ионосферный отклик на геомагнитную бурю. В рамках этой концепции ожидаются отрицательные возмущения электронной концентрации N_e в высокоширотной зоне из-за отрицательного возмущения отношения концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота $n(O)/n(N_2)$. В экваториальной зоне ожидаются положительные возмущения N_e из-за положительного возмущения $n(O)/n(N_2)$. В среднеширотной зоне возмущения N_e могут быть и положительными, и отрицательными,

причем, если наблюдаются возмущения обоих типов, положительное возмущение должно предшествовать отрицательному. В среднеширотной зоне ожидается следующая сезонная зависимость возмущений N_e : наибольшие отрицательные возмущения локальным летом и наибольшие положительные возмущения локальной зимой с промежуточными возмущениями в периоды равноденствий.

Анализ эталонных ионосферных откликов на изолированные магнитные бури, проведенный в предыдущем разделе, показывает, что положительные отклики в экваториальной зоне и сезонная структура откликов в среднеширотной зоне Южного полушария полностью соответствуют концепции термосферной бури. В сезонном поведении откликов среднеширотной зоны Северного полушария присутствует ряд исключений, отмеченных в предыдущем разделе как исключения из концепции локальная зима—равноденствия—локальное лето. В концепцию термосферной бури не укладываются положительные отклики *REC* в высокоширотной зоне (наибольшие среди всех широтных зон). Необъяснимым выглядит совпадение сезонных структур откликов в среднеширотной и высокоширотной зонах Южного полушария.

Отклики высокоширотной зоны показывают необходимость учета механизмов формирования положительных возмущений, которые отсутствуют в концепции термосферной бури. Изменения N_e в рамках данной схемы, в первую очередь, относятся к высотам вблизи максимума F2-слоя ионосферы. По мере роста высоты влияние изменений в нейтральном составе термосферы ослабевает, а влияние температуры электронов усиливается. Увеличение температуры электронов приводит к увеличению шкалы высот (толщины) внешней ионосферы, что в итоге может привести к положительному возмущению *TEC* (которое пропорционально шкале высот внешней ионосферы) при отрицательном возмущении N_e вблизи максимума F2-слоя. Данная версия подтверждается результатами работ [Astafyeva et al., 2015; Lei et al., 2015; Liu et al., 2016; Klimenko et al., 2017], где было показано, что отклики внутренней и внешней ионосферы на геомагнитную бурю могут иметь противоположный знак. Совпадение сезонных структур откликов в среднеширотной и высокоширотной зонах Южного полушария может быть объяснено следующим образом. В зимних условиях фоновая шкала высот внешней ионосферы минимальна относительно других сезонов и соответственно эффект увеличения шкалы высот приводит к наибольшему положительному возмущению *TEC*. В летних условиях фоновая шкала высот внешней ионосферы максимальна и эффект увеличения шкалы высот приводит к наименьшему положительному возмущению *TEC*. В итоге реализуется концепция локальная зима—равноденствия—локальное лето.

Сопоставляя отклики в Северном и Южном полушариях, можно выделить следующие проявления межполушарной асимметрии. На ранней фазе вос-

становления бури отклик более контрастен в Южном полушарии для среднеширотной и высокоширотной зон: амплитуда как положительного, так и отрицательного откликов больше в Южном полушарии, чем в Северном. Отклики в Южном полушарии полностью укладываются в концепцию локальная зима—равноденствия—локальное лето, тогда как в Северном полушарии имеет место ряд исключений. На предбуревой фазе в Южном полушарии положительный отклик выражен слабее и не имеет хорошо выраженной сезонной структуры. На поздней фазе восстановления бури в Южном полушарии отсутствует эффект последействий. Межполушарная асимметрия среднеширотных ионосферных откликов на геомагнитные бури была также выявлена на основе ранее разработанного метода [Ratovsky et al., 2020]. В работе [Ratovsky et al., 2020] обсуждалось две версии, объясняющие межполушарную асимметрию: (1) межполушарная асимметрия фоновое нейтрального состава термосферы [Titheridge, Buonsanto, 1988] и (2) отклики N_e и термосферной плотности более чувствительны к геомагнитным бурям в Южном полушарии по сравнению с Северным [Ercha et al., 2012]. Важным дополнением к работе [Ratovsky et al., 2020] является то, что в данном исследовании межполушарная асимметрия выявлена не только в среднеширотной зоне, но и в высокоширотной. На наш взгляд, это дополнение является аргументом в пользу версии (2), поскольку версия (1) давала интерпретацию для среднеширотной зоны, тогда как версия (2) касалась отклика во всех широтных зонах. Отметим, что данная версия не объясняет межполушарную асимметрию на предбуревой и поздней фазах восстановления бури.

В предыдущем исследовании ионосферные отклики на предбуревую фазу характеризовались как монотонное увеличение усредненного ΔREC . В данном исследовании из четырех дней предбуревой фазы выделяется день -2 , когда в Северном полушарии наблюдаются и наибольший положительный (летом и осенью), и наибольший отрицательный (зимой) отклики, тогда как в Южном полушарии день -2 не выделяется. День -2 никак не выделяется также в усредненном AE (см. рис. 2). Это позволяет вслед за авторами работы [Burešová, Laštovička, 2007] исключить авроральную активность, выраженную через AE , как причину положительного отклика. Выявленная сезонная зависимость (наиболее положительный отклик летом и осенью) частично согласуется с результатами работы [Burešová, Laštovička, 2007], где отмечалась повышенная активность предбуревых положительных возмущений $N_m F_2$ в летнее время. И сезонная зависимость, и межполушарная асимметрия позволяют исключить какое-либо проявление солнечной активности как причину положительного отклика. Выявленная межполушарная асимметрия поведения отклика на предбуревую фазу добавляет неясности при объяснении ионосферных возмущений на предбуревую фазу.

АНАЛИЗ РАЗЛИЧИЙ В ИОНОСФЕРНОМ ОТКЛИКЕ НА СОБЫТИЯ, ИДЕНТИФИЦИРОВАННЫЕ ПО ИНДЕКСАМ Dst И AE

Представляет интерес анализ различий в ионосферном отклике на геомагнитные события, идентифицированные по Dst и AE . Критерием геомагнитного события, идентифицированного по Dst , было выполнение двух условий: 1) $Dst(t_0)$ являются наименьшими значениями Dst на временном интервале $t_0 \pm 12$ ч; 2) $Dst(t_0) \leq -50$ нТл, где t_0 — время, соответствующее минимуму Dst . В соответствии с работами [Gonzalez et al., 1994; 1999] события, идентифицированные по Dst , являются геомагнитными бурями в классическом понимании. Далее события, идентифицированные по разным индексам, обозначаются как AE - и Dst -бури.

Dst -бури можно разделить на три группы (табл. 2). Первая состоит из изолированных Dst -бурь, которые одновременно являются изолированными AE -бурями, вторая — из изолированных Dst -бурь, которые являются неизолированными AE -бурями. Третья группа состоит из изолированных Dst -бурь, которые не являются AE -бурями (значение AE ниже порога AE -бури).

В предположении, что ионосферный отклик связан сильнее с AE , чем с Dst , можно ожидать следующих различий. Бури первой группы не вносят различий в отклики. Отклики на Dst -бури второй группы ожидаются более отрицательными, поскольку ионосферные возмущения возникают на фоне отрицательной фазы откликов на предыдущую AE -бурю (или бури). Отклики на Dst -бури третьей группы ожидаются менее контрастными (уменьшение амплитуд как положительного, так и отрицательного откликов) из-за меньших значений AE во время этих Dst -бурь. Отметим, что при усреднении влияние бурь второй группы (увеличение отрицательного отклика) конкурирует с влиянием бурь третьей группы (уменьшение отрицательного отклика).

Наибольшая разница между откликами на AE - и Dst -бури была получена для высокоширотной зоны Южного полушария (рис. 3). Видно, что отклики на летние Dst -бури являются более отрицательными (уменьшение амплитуды положительного отклика и увеличение амплитуды отрицательного отклика), а отклики на зимние, весенние и осенние Dst -бури являются менее контрастными (уменьшение амплитуд и положительного, и отрицательного откликов). Это сезонное различие объясняется тем, что (см. табл. 2) вклад Dst -бурь, являющихся неизолированными AE -бурями, максимален именно для летнего сезона (32 %), тогда для других сезонов этот вклад существенно меньше (9 % для зимы и 15 % для весны и осени). Для зимы, весны и осени доминирует вклад Dst -бурь, которые не являются AE -бурями (значение AE ниже порога AE -бури). Таким образом, разница между откликами на AE - и Dst -бури для высокоширотной зоны Южного полушария соответствует предположению, что ионосферный отклик связан сильнее с AE , чем с Dst .

Общим свойством разницы между откликами на AE - и Dst -бури для всех широтных зон является то,

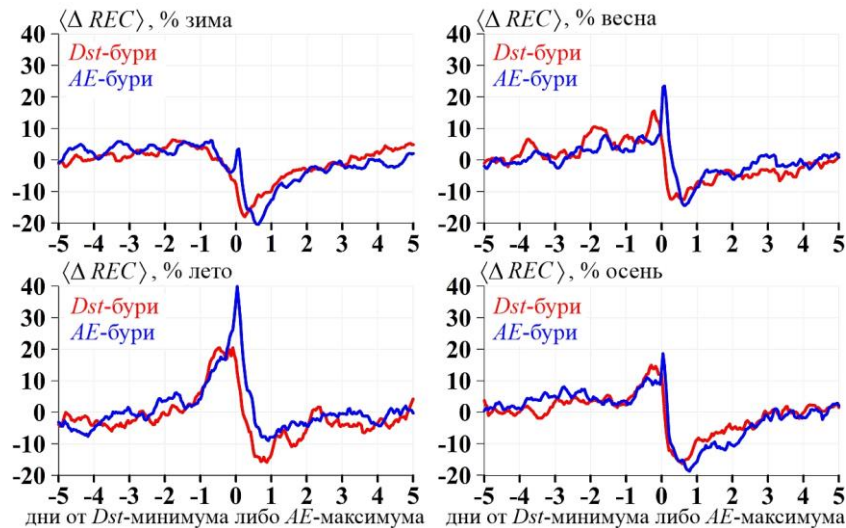


Рис. 3. Высокоширотная зона Южного полушария. Ионосферные отклики на *Dst*-бури как функции времени относительно минимума *Dst* (красные кривые) и на *AE*-бури как функции времени относительно максимума *AE* (синие кривые)

Таблица 2

AE-бури различных типов в списке изолированных *Dst*-бурь для разных сезонов

Тип <i>AE</i> -бури/Сезон	Зима	Весна	Лето	Осень
Изолированные <i>AE</i> -бури	50 %	46 %	55 %	48 %
Неизолированные <i>AE</i> -бури	9 %	15 %	32 %	15 %
События, не являющиеся <i>AE</i> -бурями	41 %	39 %	13 %	37 %

что отклики на летние *Dst*-бури более отрицательны. Однако, факт, что отклики на весенние и осенние *Dst*-бури являются менее контрастными, наблюдается только для высокоширотной зоны Южного полушария (для других зон отклики близки друг к другу). Отклики на зимние *Dst*-бури являются менее контрастными также для высокоширотной зоны Северного полушария и среднеширотной зоны Южного полушария (для среднеширотной зоны Северного полушария и экваториальной зоны отклики близки друг к другу). Данное широтное различие в сопоставлении откликов на *AE*- и *Dst*-бури в настоящий момент не имеет объяснения и требует дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистическое исследование откликов регионального электронного содержания на геомагнитные события в высоких, средних и экваториальных широтах, полученных методом наложенных эпох с использованием *AE*-индекса, позволило получить следующие основные результаты.

Отклики регионального электронного содержания можно разделить на три типа: А-тип (преимущественно положительное возмущение), N-тип (возмущение, имеющее хорошо выраженную положительную и отрицательную фазы) и V-тип (преимущественно отрицательное возмущение). Положительные пики сконцентрированы в интервале 1–4 ч после максимума *AE*. Отрицательные пики имеют широкий разброс от 7 до 35 ч после максимума *AE*.

Положительные отклики в экваториальной зоне и сезонная структура откликов в среднеширотной зоне

Южного полушария полностью соответствуют концепции термосферной бури. В сезонном поведении откликов среднеширотной зоны Северного полушария присутствует ряд исключений. Положительные отклики в высокоширотной зоне не укладываются в концепцию термосферной бури.

В качестве причины положительных откликов в высокоширотной зоне предложено увеличение температуры электронов, приводящее к увеличению шкалы высот внешней ионосферы и соответствующему росту полного электронного содержания. Наибольший эффект наблюдается в зимних условиях, когда фоновая шкала высот внешней ионосферы минимальна относительно других сезонов.

Межполушарная асимметрия откликов проявляется на всех фазах геомагнитной бури. На ранней фазе восстановления бури амплитуда как положительного, так и отрицательного откликов больше в Южном полушарии, чем в Северном. На предбуревой фазе в Южном полушарии положительный отклик выражен слабее и не имеет хорошо выраженной сезонной структуры. На поздней фазе восстановления бури в Южном полушарии отсутствует эффект последствий. Для объяснения межполушарной асимметрии откликов предложена версия, заключающаяся в том, что отклики электронной концентрации и термосферной плотности более чувствительны к геомагнитным бурям в Южном полушарии по сравнению с Северным. Межполушарная асимметрия на предбуревой фазе и поздней фазе восстановления бури в настоящий момент не имеет объяснения даже в виде версий.

Основным фактором, влияющим на различие между ионосферными откликами на *AE*- и *Dst*-бури,

является то, что некоторые изолированные *Dst*-бури являются неизолированными *AE*-бурями. Влияние данного фактора зависит от процентного вклада неизолированных *AE*-бурь в изолированные *Dst*-бури. Максимальный вклад (32 %) имеет место для летнего сезона, что приводит к тому, что для всех широтных зон отклики на летние *Dst*-бури более отрицательны, чем отклики на летние *AE*-бури.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00213. Данные OMNI были получены через интерфейс GSFC/SPDFOMNI-Web на веб-сайте [\[https://omniweb.gsfc.nasa.gov/\]](https://omniweb.gsfc.nasa.gov/).

Авторы выражают благодарность лаборатории CODE за глобальные ионосферные карты, доступные по адресу [\[ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/\]](ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/). Первичные ряды регионального электронного содержания были получены с использованием системы SIMuRG, веб-сайт [\[https://simurg.iszf.irk.ru/\]](https://simurg.iszf.irk.ru/).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. *Физика ионосферы*. М.: Наука, 1988, 528 с.
- Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В. и др. Эффекты последствий геомагнитных бурь: статистический анализ и теоретическое объяснение. *Солнечно-земная физика*. 2018, т. 4, № 4, с. 32–42. DOI: [10.12737/stp-44201804](https://doi.org/10.12737/stp-44201804) / Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Chirik N.V., Korenkova N.A., Kotova D.S. After-effects of geomagnetic storms: Statistical analysis and theoretical explanation. *Solar-Terrestrial Phys.* 2018, vol. 4, no. 4, pp. 26–32. DOI: [10.12737/stp-44201804](https://doi.org/10.12737/stp-44201804).
- Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Bilitza D. Characteristics of the ionospheric variability as a function of season latitude local time and geomagnetic activity. *Radio Sci.* 2005, vol. 40, RS5009. DOI: [10.1029/2004RS003179](https://doi.org/10.1029/2004RS003179).
- Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrument overview. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 120, no. 10, pp. 9023–9037. DOI: [10.1002/2015JA021629](https://doi.org/10.1002/2015JA021629).
- Buonsanto M.J. Ionospheric Storms: A Review. *Space Sci. Rev.* 1999, vol. 88, no. 3–4, pp. 563–601. DOI: [10.1023/A:1005107532631](https://doi.org/10.1023/A:1005107532631).
- Burešová D., Laštovička J. Pre-storm enhancements of f_oF_2 above Europe. *Adv. Space Res.* 2007, vol. 39, no. 8, pp. 1298–1303. DOI: [10.1016/j.asr.2007.03.003](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.03.003).
- da Silva R.P., Denardini C.M., Marques M.S., et al. Ionospheric total electron content responses to HILDCAA intervals. *Ann. Geophys.* 2020, vol. 38, no. 1, pp. 27–34. DOI: [10.5194/angeo-38-27-2020](https://doi.org/10.5194/angeo-38-27-2020).
- Deminov M.G., Deminova G.F., Zhrebtsov G.A., Polekh N.M. Statistical properties of variability of the quiet ionosphere F2-layer maximum parameters over Irkutsk under low solar activity. *Adv. Space Res.* 2011, vol. 51, no. 5, pp. 702–711. DOI: [10.1016/j.asr.2012.09.037](https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.09.037).
- Ercha A., Ridley A.J., Zhang D., Xiao Z. Analyzing the hemispheric asymmetry in the thermospheric density response to geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, no. A08317. DOI: [10.1029/2011JA017259](https://doi.org/10.1029/2011JA017259).
- Field P.R., Rishbeth H. The response of the ionospheric F2-layer to geomagnetic activity: an analysis of worldwide data. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1997, vol. 59, no. 2, pp. 163–180. DOI: [10.1016/S1364-6826\(96\)00085-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(96)00085-5).
- Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.* 1994, vol. 99, no. A4, pp. 5771–5792. DOI: [10.1029/93JA02867](https://doi.org/10.1029/93JA02867).
- Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clúa de Gonzalez A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.* 1999, vol. 88, pp. 529–562. DOI: [10.1023/A:1005160129098](https://doi.org/10.1023/A:1005160129098).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., et al. Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005. *Radio Sci.* 2011, vol. 46, no. 3, RS0D03. DOI: [10.1029/2010RS004590](https://doi.org/10.1029/2010RS004590).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., et al. Similarity and differences in morphology and mechanisms of the f_oF_2 and *TEC* disturbances during the geomagnetic storms on 26–30 September 2011. *Ann. Geophys.* 2017, vol. 35, no. 4, pp. 923–938. DOI: [10.5194/angeo-35-923-2017](https://doi.org/10.5194/angeo-35-923-2017).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Sukhodolov T.V., et al. Role of internal atmospheric variability in the estimation of ionospheric response to solar and magnetospheric proton precipitation in January 2005. *Adv. Space Res.* 2023, vol. 71, iss. 11, pp. 4576–4586. DOI: [10.1016/j.asr.2023.01.012](https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.01.012).
- Lei J., Zhu Q., Wang W., et al. Response of the topside and bottomside ionosphere at low and middle latitudes to the October 2003 superstorms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 120, no. 8, pp. 6974–6986. DOI: [10.1002/2015JA021310](https://doi.org/10.1002/2015JA021310).
- Liu J., Wang W., Burns A., et al. Profiles of ionospheric storm-enhanced density during the 17 March 2015 great storm. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016, vol. 121, no. 1, pp. 727–744. DOI: [10.1002/2015JA021832](https://doi.org/10.1002/2015JA021832).
- Lu G., Richmond A.D., Roble R.G., Emery B.A. Coexistence of ionospheric positive and negative storm phases under northern winter conditions: A case study. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, no. A11, pp. 24493–24504. DOI: [10.1029/2001JA000003](https://doi.org/10.1029/2001JA000003).
- Marques de Souza Franco A., Hajra R., Echer E., Bolzan M.J.A. Seasonal features of geomagnetic activity: a study on the solar activity dependence. *Ann. Geophys.* 2021, vol. 39, no. 5, pp. 929–943. DOI: [10.5194/angeo-39-929-2021](https://doi.org/10.5194/angeo-39-929-2021).
- Mayr H.G., Harris I., Spencer N.W. Some properties of upper atmosphere dynamics. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1978, vol. 16, pp. 539–565. DOI: [10.1029/RG016i004p00539](https://doi.org/10.1029/RG016i004p00539).
- Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Rev. Geophys.* 2006, vol. 44, RG4001. DOI: [10.1029/2005RG000193](https://doi.org/10.1029/2005RG000193).
- Mikhailov A.V. Ionospheric F2-Layer Storms. *Fis. Tierra*. 2000, vol. 12, pp. 223–262.
- Pedatella N.M. Impact of the lower atmosphere on the ionosphere response to a geomagnetic superstorm. *Geophys. Res. Lett.* 2016, vol. 43, pp. 9383–9389. DOI: [10.1002/2016GL070592](https://doi.org/10.1002/2016GL070592).
- Pedatella N.M., Liu H.-L. The influence of internal atmospheric variability on the ionosphere response to a geomagnetic storm. *Geophys. Res. Lett.* 2018, vol. 45, no. 10, pp. 4578–4585. DOI: [10.1029/2018GL077867](https://doi.org/10.1029/2018GL077867).
- Prölss G.W. Ionospheric F-region storms: unsolved problems. *Characterizing the Ionosphere. Meeting Proc. RTO-MP739 IST-056*. Paper 10. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. 2006, pp. 10–1–10–20.
- Prölss G.W. Ionospheric storms at mid-latitudes: a short review. *Midlatitude Ionospheric Dynamics and Disturbances, AGU Monograph*. 2008, vol. 181, pp. 9–24.
- Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Yasyukevich Y.V., et al. Statistical analysis and interpretation of high-, mid- and low-latitude responses in regional electron content to geomagnetic storms. *Atmosphere*. 2020, vol. 11, no. 12, p. 1308. DOI: [10.3390/atmos11121308](https://doi.org/10.3390/atmos11121308).
- Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Vesnin A.M., et al. Comparative analysis of geomagnetic events identified according to different indices. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2024, vol. 88, no. 3, pp. 296–302. DOI: [10.1134/S1062873823705433](https://doi.org/10.1134/S1062873823705433).
- Rishbeth H., Mendillo M. Patterns of F2-layer variability. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2001, vol. 63, pp. 1661–1680. DOI: [10.1016/S1364-6826\(01\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00036-0).

- Rodger A.S., Wrenn G.L., Rishbeth H. Geomagnetic storms in the Antarctic F-region. II. Physical interpretation. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1989, vol. 51, no. 11-12, pp. 851–866. DOI: [10.1016/0021-9169\(89\)90002-0](https://doi.org/10.1016/0021-9169(89)90002-0).
- Schaer S., Beutler G., Rothacher M. Mapping and predicting the ionosphere. *Proc. IGS AC Workshop*. Darmstadt, Germany, 1998, pp. 307–320.
- Titheridge J.E., Buonsanto M.J. A Comparison of Northern and Southern hemisphere TEC storm behavior. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1988, vol. 50, no. 9, pp. 763–780. DOI: [10.1016/0021-9169\(88\)90100-6](https://doi.org/10.1016/0021-9169(88)90100-6).
- Wrenn G.L., Rodger A.S., Rishbeth H. Geomagnetic storms in the Antarctic F-region. I. Diurnal and seasonal patterns for main phase effects. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1987, vol. 49, no. 9, pp. 901–913. DOI: [10.1016/0021-9169\(87\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(87)90004-3).
URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 6 мая 2023 г.).
URL: <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/> (дата обращения 1 декабря 2023 г.).
URL: <https://simurg.iszf.irk.ru/> (дата обращения 1 декабря 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Ратовский К.Г., Клименко М.В., Веснин А.М., Бelyuchenko К.В. Отклики регионального электронного содержания на геомагнитные события в высоких, средних и экваториальных широтах, полученные методом наложенных эпох с использованием AE-индекса. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 2, с. 79–88. DOI: [10.12737/szf-112202507](https://doi.org/10.12737/szf-112202507).