

Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 269—293.
Hydrometeorology and Ecology. 2026;(83):269—293.

Научная статья
УДК 551.510.41:546.214
doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-269-293

Отклонения общего содержания озона во время глобальных ионосферных бурь

*Антон Михайлович Жмодиков^{1,2}, Тимофей Викторович Шлендер^{1,2},
Александр Николаевич Красовский¹, Вероника Вадимовна Жучкевич¹,
Сергей Константинович Бородко¹, Александр Георгиевич Светашев^{1,2},
Алексей Евгеньевич Яротов^{1,2}*

¹ Учреждение БГУ «Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы» (НИИЦ МО БГУ), Минск, Беларусь, nomrec@bsu.by

² Факультет географии и геоинформатики БГУ

Аннотация. В работе исследовались отклонения общего содержания озона (ОСО) в периоды интенсивных ионосферных бурь как для полушарий в отдельности, так и в полярной зоне Северного и Южного полушария. Для этого использовался метод наложенных эпох. Показано, что ионосферные бури планетарного масштаба создают значительные условия уменьшения ОСО в последующие 4,5 дня после начала бури, особенно в холодный сезон года и при западной фазе квазидвухлетнего колебания в полярных зонах. Выявлена существенная зональную анизотропию отклика во внетропических широтах. Значительная часть выявленных аномалий не достигает строгих критериев статистической значимости, что отражает высокий уровень естественной variability атмосферы и ограниченность выборки событий.

Ключевые слова: ионосферная буря, общее содержание озона, метод наложенных эпох, квазидвухлетнее колебание, положительные и отрицательные отклонения.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке научной государственной подпрограммы «Развитие деятельности Белорусской антарктической станции» государственной программы №20213749 «Научная и инновационная деятельность Национальной академии наук Беларуси» на 2021—2025 гг.

Для цитирования: Жмодиков А. М., Шлендер Т. В., Красовский А. Н. и др. Отклонения общего содержания озона во время глобальных ионосферных бурь // Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 269—293. doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-269-293.

Total ozone variations during global ionospheric storms

*Anton M. Zhmodikov^{1,2}, Timofey V. Shlender^{1,2}, Aliaksandr N. Krasouski¹,
Veronika V. Zhuchkevich¹, Sergey K. Borodko¹, Aleksandr G. Svetashev^{1,2},
Aliaksei E. Yarotau^{1,2}*

¹ National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University, Minsk, Belarus, nomrec@bsu.by

² The Faculty of Geography and Geoinformatics

Summary. The article investigates the influence of intense planetary ionospheric storms on the spatial distribution of total atmospheric ozone in both hemispheres. Stratospheric ozone plays a key role in the Earth's climate system by regulating the radiative balance, determining the thermal structure of the stratosphere, and influencing large-scale atmospheric circulation. Variations in ozone concentration can therefore affect dynamical processes in the middle atmosphere and potentially propagate their influence to the troposphere. In this context, disturbances of the upper atmosphere caused by solar activity, including geomagnetic and ionospheric storms, are considered as possible drivers of short-term changes in atmospheric composition. Enhanced ionization during such events leads to the production of reactive nitrogen and hydrogen species, which participate in catalytic ozone destruction processes. Understanding the atmospheric response to ionospheric storms is therefore important for clarifying the mechanisms linking solar-terrestrial interactions with variability in the middle atmosphere.

The main objective of the study is to identify statistically significant variations in the spatial distribution of total ozone associated with strong ionospheric storms and to determine the factors that modulate this response. Particular attention is paid to hemispheric differences, polar regions, seasonal conditions, and the phase of the quasi-biennial oscillation. To reveal systematic patterns in ozone variability, the superposed epoch method was applied, allowing the typical atmospheric response to storm events to be extracted from multiple time series. This approach makes it possible to distinguish storm-related signals from background variability and improves the signal-to-noise ratio in the analysis of atmospheric data.

The selection of ionospheric storm events was carried out using the planetary W index of ionospheric disturbance provided by IZMIRAN. A total of 37 intense ionospheric storms observed between 1994 and 2025 were selected according to the criterion $W_p\text{-mean} \geq +6$. These events represent the strongest disturbances of the ionosphere and are therefore expected to produce the most pronounced atmospheric effects. For each event, time series of total column ozone were analyzed in relation to the storm onset. Ozone data were obtained from the MERRA-2 atmospheric reanalysis. The analysis was performed separately for the Northern and Southern Hemispheres and for their polar regions in order to identify regional differences in ozone response.

A significant zonal anisotropy of the response was revealed at extratropical latitudes: positive anomalies with maxima in the Arctic sector (up to +40 Dobson units) predominate in the Northern Hemisphere, while persistent negative anomalies, localized primarily over East Antarctica (up to -40 Dobson units), predominate in the Southern Hemisphere. A significant portion of the identified anomalies do not achieve strict statistical significance criteria, reflecting the high level of natural variability in the atmosphere and the limited sample of events. However, they exhibit spatial consistency with the centers of ozone anomalies, indicating the physical nature of the observed TOC response to ionospheric storms. The obtained results may be useful for accounting for the dependencies between TOC and the ionosphere in the modeling and forecasting of atmospheric processes.

Keywords: ionospheric storm, total ozone content, superimposed epoch method, quasi-biennial oscillation, positive and negative deviations.

Acknowledgments. This work was supported by the state scientific subprogram «Development of the Belarusian Antarctic Station» of state program No. 20213749 «Scientific and Innovative Activities of the National Academy of Sciences of Belarus» for 2021—2025.

For citation: Zhmodikov A. M., Shlender T. V., Krasouski A. N. et al. Total ozone variations during global ionospheric storms *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(83):(269—293). doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-269-293. (In Russ.).

Введение

Исследования последних десятилетий выявили ключевую роль озона в атмосферных процессах. Поглощая ультрафиолетовую солнечную радиацию, озон в стратосфере определяет ее термический и динамический режимы, причем изменения распределения стратосферного озона напрямую влияют на радиационный баланс стратосферы, вызывая изменения температуры и циркуляции, которые, в свою очередь, влияют на региональный климат тропосферы. Большинство исследований стратосферного озона было сосредоточено на последствиях химического разрушения озона из-за озоноразрушающих веществ, но в последнее десятилетие основное внимание уделяется оценке двусторонней связи между стратосферным озоном и климатической системой через радиационные, динамические и химические процессы [1].

Озон в средней атмосфере рассматривается рядом исследователей как чувствительное промежуточное звено, через которое воздействие проявлений солнечной активности (вариаций уровней электромагнитного солнечного излучения в разных диапазонах, выброса корональных масс) на верхнюю атмосферу передаются в тропосферу [2, 3]. Связь стратосферного озона с приземным климатом в глобальном и региональном масштабах, механизмы, посредством которых вариации солнечной активности через вариации озона могут передаваться в нижние слои атмосферы, давно обсуждаются в научном сообществе [4, 5].

Одним из проявлений солнечной активности в земной атмосфере являются геомагнитные бури, которые представляют собой резкое возмущение магнитного поля Земли, вызванное взаимодействием ее магнитосферы и потока заряженных частиц, возникших в результате солнечных вспышек и корональных выбросов. Геомагнитные бури, приводят к резким возмущениям плотности, состава и структуры ионосферы — ионосферным бурям. Во время таких событий значительно увеличивается или уменьшается полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы за счет изменений содержания электронов в верхней ее части, слое F [напр., 6, 7]. Развитие и динамика ионосферных бурь обычно основана на эволюции ПЭС, поскольку это наиболее легкодоступный ионосферный параметр. Из-за индивидуального характера каждой такой бури и сложности, протекающих во время нее процессов, ионосферная буря обычно описывается положительной фазой (увеличение ПЭС) и отрицательной фазой (уменьшение ПЭС) по сравнению с поведением этого параметра в спокойные дни [8, 9].

Важной частью реакции ионосферы на такие события является изменение состава и содержания малых составляющих атмосферы на высотах нижней мезосферы и верхней стратосферы, особенно в полярных регионах вследствие высыпания высокоэнергичных частиц из радиационных поясов, которые могут проникать на высоты нижней ионосферы и вызывать дополнительную ионизацию в нижней ионосфере (слой D). Геомагнитные бури вызывают интенсивное

и быстрое выпадение релятивистских электронов, длящееся иногда достаточно долго, в верхние слои атмосферы [10].

Прямым химическим эффектом от вторжения высокоэнергичных частиц является образование радикалов семейства нечетного водорода ($\text{HO}_x = \text{H}, \text{OH}, \text{HO}_2$) и радикалов нечетного азота ($\text{NO}_x = \text{N}, \text{NO}, \text{NO}_2$), которые приводят к каталитическому разрушению молекул озона. Время жизни HO_x мало, действие HO_x сильно локализовано во времени и пространстве и может наблюдаться только во время выпадения частиц в области, где происходит ионизация. NO_x являются более стабильными соединениями, особенно в условиях полярной ночи, и могут переноситься далеко от того места, где образовались, и могут приводить к ощутимому воздействию на озон в стратосфере [11, 12, 13].

Помимо выпадения высокоэнергичных частиц из радиационных поясов, к образованию радикалов семейства нечетного водорода и азота приводят и другие проявления солнечной активности — мощные солнечные протонные вспышки, когда в верхнюю атмосферу попадают высокоэнергичные протоны и ионы [14, 15, 16]. Такие события происходят обычно во время максимумов солнечной активности и, по сравнению с выпадением частиц из радиационных поясов, происходят реже.

Непосредственно исследований влияния ионосферных возмущений на общее содержание озона (ОСО) очень мало. По большей части представлены работы, где оценивается влияние геомагнитных бурь (и как следствие ионосферных бурь) на содержание стратосферного озона. Например, анализ данных наземных наблюдений ОСО за период с 1963 г. по 1988 г. с использованием метода наложенных эпох позволил найти значительное влияние сильных геомагнитных бурь ($A_p > 40$) вблизи широтного круга 50° с.ш. в зимний период и при восточной фазе квазидвухлетнее колебание (КДК) в периоды высокой солнечной активности. Отмечается, что наблюдаемые эффекты развиты лучше всего в европейском секторе, где сразу после сильной бури наблюдается значительное увеличение общего содержания озона, которое авторы связывают с перераспределением озона [17, 18]. В отличие от Северного полушария (СП), где при определенных условиях наблюдается эффект, в высоких широтах Южного полушария (ЮП) заметное влияние геомагнитных бурь на ОСО не отмечается [19].

Исследование долготного распределения ОСО, предшествующее солнечным протонным событиям, в нескольких широтных зонах обеих полушарий, показало статистически значимое уменьшение озона вдоль широтных кругов 70° с.ш. и 70° ю.ш., отсутствие статистически значимых эффектов в средних широтах (40° ю.ш.) и статистически значимое увеличение в низких широтах (20° ю.ш.) в отдельных регионах [2020]. Данное исследование воздействия геомагнитных бурь на концентрацию озона за период с ноября 2001 г. по январь 2002 г. выявило увеличение озона после начала геомагнитных бурь в полярных областях и увеличение содержания концентраций озона как до, так и после начала сильной магнитной бури в экваториальном регионе, локализованном над Тихим океаном. В работе [21] проведен анализ двух сильных геомагнитных бурь и спокойных условий, сопровождавшихся эффектом Форбуша, в результате которого было установлено, что наблюдаемые изменения стратосферного озона подтверждают

идею о существовании дополнительного источника озона в нижней стратосфере. Ионно-молекулярные реакции каталитического образования озона инициируются вторичной ионизацией, вызванной космическим излучением на этих высотах.

В работе [22] анализ реакции ОСО на интенсивные геомагнитные бури в зоне Южно-Атлантической магнитной аномалии, отличающейся слабым магнитным полем и повышенным потоком энергичных частиц, показал статистически значимое снижение ОСО в течение 7—10 дней после начала каждого события (–4,4% ... –6,0%). Анализ вертикальных профилей показал увеличение в столбе атмосферы нечетного азота на высотах средней и верхней стратосферы и отсутствие существенных изменений в профиле озона.

Исследование вкладов возмущений магнитного поля Земли в изменения полярного озона по сравнению с потоком солнечного УФ-излучения в верхних слоях атмосферы показало, что геомагнитная активность оказывает отрицательное воздействие (уменьшение содержания озона) на полярный озон в обоих полушариях, эффекты геомагнитной активности имеют тот же порядок величины, что и эффекты потока солнечного УФ-излучения, а воздействие геомагнитной активности на полярный озон оказались более значительными в полярных широтах ЮП, чем в СП [23]. Реакция атмосферы на солнечное излучение и геомагнитную активность исследуется также в численных экспериментах с использованием модели Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM) для идеализированных сценариев, сочетающих высокое и низкое солнечное радиационное воздействие с высокой и низкой геомагнитной активностью. Сравнение результатов разных численных экспериментов позволило установить более значительное влияние геомагнитной активности на концентрации нечетного азота и озона в ЮП, чем в СП для всех сценариев и большинства сезонов [24].

Вопрос о том, как именно бури в ионосфере влияют на озоновый слой, все еще до конца не исследован. Это понимание важно для построения целостной модели взаимодействия между собой средних и низких слоев атмосферы Земли, поэтому целью настоящей работы является анализ отклонений ОСО в периоды развития интенсивных ионосферных бурь (по параметру ПЭС) как для полушарий в отдельности, так и в полярной зоне Северного и Южного полушарий.

Данные и методы

Для анализа вариаций пространственного распределения ОСО, связанных с ионосферными бурями, использовался метод наложенных эпох. Метод наложенных эпох — статистический метод, используемый для изучения типичной реакции системы на какое-либо событие путем усреднения множества временных рядов («эпох»), привязанных к ключевым событиям (реперным датам), что позволяет повысить соотношение сигнал/шум. Метод часто используется в исследованиях в области геофизики, астрономии. Реализация метода проводится путем выбора моментов времени t_0 (реперной даты), когда происходит изучаемое событие, выделения временных рядов для каждого события вокруг реперной даты; наложения всех полученных эпох друг на друга и вычисления среднего значения для каждого момента времени внутри эпохи [25, 26].

Выбор событий сильных возмущений в ионосфере проводился на основе данных ИЗМИРАН (каталог планетарных ионосферных бурь, W индекса за период с 1994 г. по 2025 г., среднесуточные значения) [27]. Планетарный ионосферный W индекс (W_p) определяется по отклонениям ПЭС от невозмущенных условий и рассчитывается на основе глобальных карт ПЭС ионосферы, генерируемых Лабораторией реактивного движения NASA [28]. Индекс W_p является медианой от локальных индексов W , базовая формула которого определяется как логарифмическое отклонение текущего значения ПЭС от медианы за предыдущие 27 дней [8, 9]:

$$W = \log \left(\frac{TEC}{TEC_{med}} \right),$$

где TEC — total electric content (ПЭС).

Планетарные ионосферно-плазмосферные бури характеризуются значением $W_p\text{-mean} > 4$ и пиковым значением $W_p\text{-max} \geq 6$ [9, 29]. За доступный период было выбрано 37 событий сильных ионосферных бурь по среднему значению индекса $W_p\text{-mean} \geq +6$, поскольку такие бури будут наиболее ярко отражать исследуемую связь. Начало и конец возмущения выбирались по изменению величины индекса W_p согласно каталогу (начальный день, пиковый день, конечный день) (табл. 1). Средняя продолжительность ионосферной бури с индексом $W_p\text{-mean} \geq +6$ —108 часов или 4,5 дня.

Таблица 1

Пример каталога планетарных ионосферных бурь с фильтром $W_p\text{-mean} \geq 6$
An example of a catalog of planetary ionospheric storms with a $W_p\text{-mean} \geq 6$ filter

Start	UT	Peak	UT	$W_p\text{-max}$	End day	UT	Hrs	$W_p\text{-mean}$
19980331	12	19980401	10	7,8	19980405	6	115	6,5
19980701	0	19980702	0	7,9	19980705	6	103	7,2
19980801	0	19980801	14	7,6	19980805	10	107	6,5
19980901	0	19980901	16	8,9	19980905	0	97	7,8
19981101	0	19981104	8	7,2	19981105	0	97	6,7
19981107	12	19981108	10	8,5	19981113	0	133	6,0
19990531	20	19990602	23	9,1	19990605	1	102	7,4
19990630	23	19990701	23	8,4	19990705	8	106	6,7
19990731	21	19990802	23	7,6	19990805	7	107	6,0
20000406	19	20000406	23	8,9	20000408	13	43	6,2
20000715	9	20000716	1	9,7	20000717	11	51	6,4

Данные ОСО реанализа MERRA-2 (временное разрешение 1 ч) использовались для определения отклонений ОСО от многолетних средних значений (1980—2025 гг.), для устранения детерминированной сезонной составляющей ОСО. Отклонения ОСО рассматривались в период развития ионосферных бурь [30, 31]. Все случаи ионосферных бурь группировались относительно СП и ЮП, восточной и западной фазы квазидвухлетнего колебания (КДК) [32] (см. табл. 2) для сезонов года.

Для построения картосхем отклонений ОСО в период развития ионосферных бурь каждое событие было разделено на периоды: период развития бури (дата начала и конца бури, согласно каталогу ИЗМИРАН, начало бури — 0 день), период до начала бури (–5 дней — 0 день), и период после бури (0 день — +5 дней). Далее была проведена фильтрация всех случаев бурь в зависимости от смены циркуляции в стратосфере на теплый (декабрь—май) и холодный (июнь—ноябрь) сезоны для ЮП, а для СП — на теплый (июнь—ноябрь) и холодный (декабрь—май).

После производилось усреднение значений ОСО за все 37 случаев бурь для всего полушария по периодам (–5 дней — 0 день, период развития бури, 0 день — +5 дней) и по сезонам года. Далее были рассчитаны отклонения ОСО по периодам от многолетней нормы 1980—2025 гг. отдельно для теплого и холодного сезона.

Для поправки на множественные сравнения при анализе пространственного распределения применялся метод Бенджамини-Хохберга (FDR), а для карт разницы отклонений между периодами применялся t -критерий с построением его пространственного распределения. В качестве уровней значимости при применении FDR использовались доверительные интервалы 95 % и 90 %. Применение доверительного интервала 90 % вызвано пространственной связностью ОСО и большим количеством факторов, влияющих на него и ослабевающих его сигнал на ионосферные возмущения, а также относительно небольшой выборкой данных по мощным ионосферным возмущениям, ограниченной временем наблюдений за ними [33].

По аналогичным причинам для карт разницы отклонений от нормы анализировались области со значением модуля t -критерия Стьюдента $|t| \geq 1$, где обычно используется полученное значение $|t| > 1,96$ (при большой выборке), то результат считается значимым на уровне $p < 0,05$. Применение значений $|t| \geq 1$ не дает возможности доказать зависимость, но оно может быть использовано для описания устойчивых тенденций при распределении областей с $|t| \geq 1$ как пространственно связанных структур, так и физически обоснованных [34].

Обработка, построение и визуализация картосхем производилась в разработанном программном комплексе библиотек Python.

Таблица 2

Список ионосферных бурь с $W_p\text{-mean} \geq 6$ и их классификация по фазам КДК за период с 1994 г. по 2025 г.

List of ionospheric storms with $W_p\text{-mean} \geq 6$ and their classification by QBO phases for the period 1994—2025

Номер	Дата начала бури	Фаза КДК
1	31.03.1998	восточная
2	01.07.1998	западная
3	01.08.1998	западная
4	01.09.1998	западная
5	01.11.1998	западная
6	07.11.1998	западная
7	31.05.1999	западная
8	30.06.1999	западная

Номер	Дата начала бури	Фаза КДК
9	31.07.1999	западная
10	06.04.2000	восточная
11	15.07.2000	западная
12	19.03.2001	восточная
13	11.04.2001	восточная
14	19.05.2001	восточная
15	30.09.2002	западная
16	29.01.2003	восточная
17	26.02.2003	восточная
18	31.03.2003	восточная
19	29.05.2003	западная
20	17.08.2003	западная
21	24.07.2004	западная
22	07.11.2004	западная
23	31.10.2005	западная
24	14.12.2005	восточная
25	01.05.2011	восточная
26	01.10.2011	западная
27	31.10.2011	западная
28	30.11.2011	восточная
29	31.01.2012	восточная
30	24.02.2014	восточная
31	01.04.2014	восточная
32	17.03.2015	восточная
33	29.11.2015	восточная
34	31.03.2016	восточная
35	30.04.2016	восточная
36	13.10.2016	западная
37	31.10.2016	западная

Результаты и обсуждение

Отклонения ОСО в полярном регионе

Для полярной области СП вариации ОСО во время ионосферных бурь оценивались по отклонениям от многолетних средних значений. Известно, что на межсуточные вариации озона существенно влияют динамические процессы в стратосфере. Интенсивность этих процессов, изменчивость ОСО в обоих полушариях особенно сильно проявляется поздней зимой и весной и ослабевает в летнее время и осенью. КДК в экваториальной стратосфере модулируют циркуляцию и распределение малых газовых примесей в стратосфере и содержание стратосферного озона в полярных областях [35], поэтому анализ отклонений ОСО (в полярном регионе от 63° до 90° широты) выполнялся для разных выборок — для всех ситуаций ионосферных возмущений независимо от сезона года и фаз КДК

и для конкретных сезонов года и фаз КДК. Результаты анализа вариаций ОСО во время сильных ионосферных бурь в полярной области обоих полушарий представлены на рисунках 1—3.

Общий эффект снижения ОСО в полярных областях СП и ЮП начинается до начала развития ионосферных бурь (–3 день) и длится в среднем 5 дней (до +2 дня, после начала бури 0 день). Отрицательное отклонение полярного значения ОСО от нормы при ионосферных бурях со значением $W_p > 6$ в СП достигает до –2 ... –3 ед. Д., в ЮП, которое отличается большими отклонениями ОСО — до –3 ... –4 ед. Д. (рис. 1 а). Снижение ОСО в полярных областях при бурях

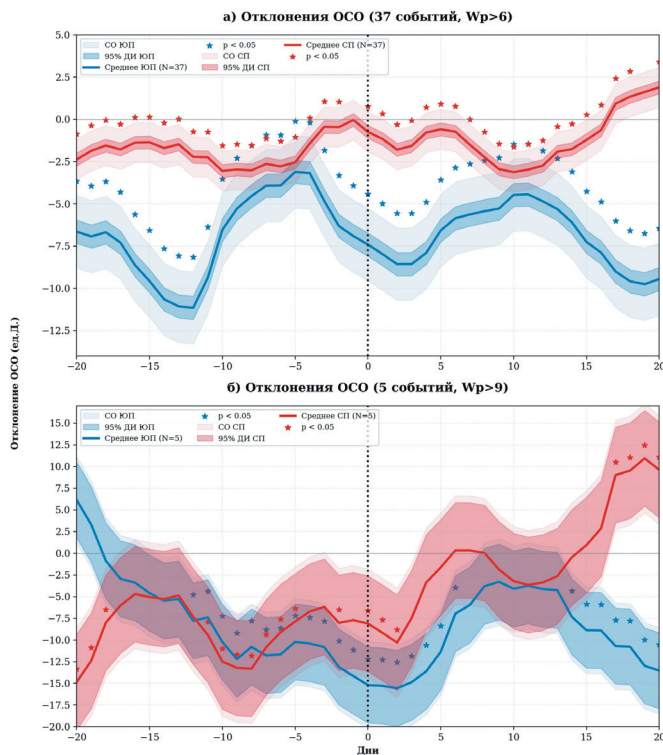


Рис. 1. Отклонения значений ОСО от многолетних средних величин для полярной области (63–90° ш.) СП и ЮП: а) для всех случаев ионосферных бурь (37 шт.) с W_p -mean индексом $\geq +6$; б) для случаев ионосферных бурь (5 шт.) с индексом выше 9.

Крупным пунктиром отмечено начало бури («0» день). СО — оценка стандартного отклонения, 95 % ДИ — доверительный интервал, среднее — отклонение значений ОСО.

Fig. 1. Deviations of TO values from long-term averages for the polar region (63–90° latitude) of the NH and SH: а) for all cases of ionospheric storms (37 cases) with a W_p -mean index $\geq +6$; б) for cases of ionospheric storms (5 cases) with an index above 9.

The large dotted line indicates the start of storm («0» day). SD — the standard deviation estimate, 95 % CI — the confidence interval, mean — the deviation of the TOC values.

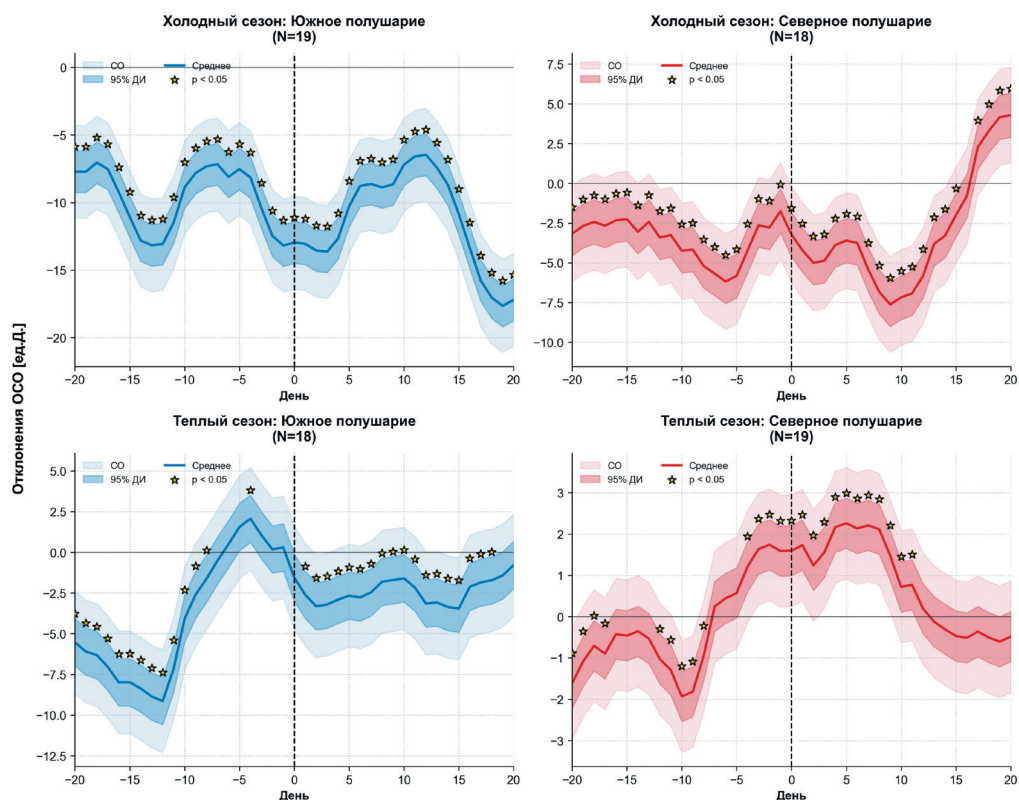


Рис. 2. Отклонения значений ОСО от многолетних средних величин для полярной области (63—90° ш.) СП и ЮП для всех случаев ионосферных бурь (37 шт.) по сезонам года: теплый сезон, холодный сезон.

Крупным пунктиром отмечено начало бури («0» день). СО — оценка стандартного отклонения, 95 % ДИ — доверительный интервал, среднее — отклонение значений ОСО.

Fig. 2. Deviations of TO values from long-term averages for the polar region (63—90° latitude) of the NH and SH for all cases of ionospheric storms (37 cases) by seasons: warm season, cold season.

The large dotted line indicates the start of storm (“0” day). SD — the standard deviation estimate, 95 % CI — the confidence interval, mean — the deviation of the TOC values.

с $W_p > 9$ достигает до $-4 \dots -5$ ед. Д. в СП и $-5 \dots -6$ ед. Д. в ЮП (рис. 1 б). После общего эффекта снижения ОСО наблюдается его резкий рост и восстановление к $+7 \dots +10$ дню в СП особенно для бурь с индексом выше 9, в то время как для ЮП к $+7 \dots +10$ дню наблюдается снижение ОСО, также более заметное для бурь с $W_p > 9$ (рис. 1). Для графиков отклонений ОСО во время бурь с $W_p > 6$ (рис. 1 а), статистически значимые точки ($p < 0,05$) идут сплошным рядом после начала бури, что подтверждает значимость снижения озона для большинства случаев. Меньшая плотность значимых точек после начала бури для графиков отклонений

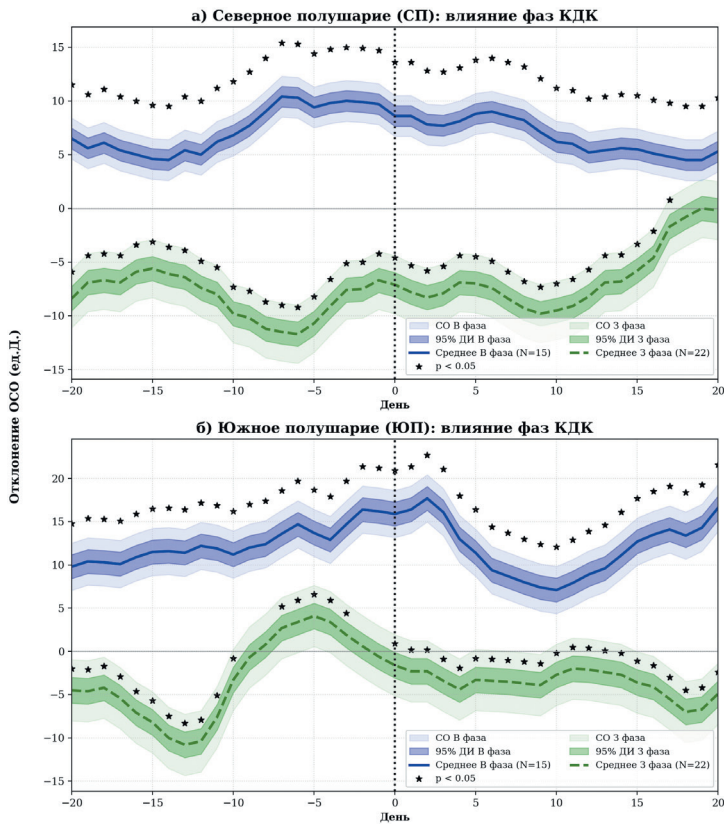


Рис. 3. Отклонения значений ОСО от многолетних средних величин для полярной области (63—90° ш.) СП и ЮП для всех случаев ионосферных бурь (37 шт.) для восточной (В-фаза) и западной (З-фаза) фаз КДК.

Крупным пунктиром отмечено начало бури («0» день). СО — оценка стандартного отклонения, 95 % ДИ — доверительный интервал, среднее — отклонение значений ОСО.

Fig. 3. Deviations of TO values from long-term averages for the polar region (63—90° latitude) of the NH and SH for all cases of ionospheric storms (37 cases) for the eastern and western phases of the QBO.

The large dotted line indicates the start of storm (“0” day). SD — the standard deviation estimate, 95 % CI — the confidence interval, mean — the deviation of the TOC values.

ОСО во время бурь с $W_p > 9$ (рис. 1 б) может объясняться малым количеством случаев в выборке.

Для теплого и холодного сезонов ЮП характерно отрицательное отклонение ОСО за пять дней до пика бури, а также ослабление снижения ОСО на пятый — десятый дни после пика бури (рис. 2). Для СП в теплый сезон незначительно проявляется эффект снижения ОСО, в некоторые дни наблюдаются даже положительные отклонения, что указывает на доминирование динамических процессов

над радиационно-химическим воздействием и подтверждается коротким рядом статистически значимых точек после нулевого дня. Холодный сезон СП имеет аналогичную тенденцию отклонений ОСО, как и в ЮП, подтверждаемую рядами значимых точек. Разделение всех рассматриваемых событий бурь по фазам КДК (рис. 3) демонстрирует тот же эффект снижения ОСО как в день начала ионосферной бури, так и в последующие четыре дня. Восточная фаза КДК имеет в некоторые дни незначительное положительное отклонение ОСО обоих полушарий. Западная фаза КДК отличается только снижением ОСО во все дни развития ионосферной бури. Закономерности, демонстрируемые ходом всех графиков по фазам КДК, подтверждаются рядами статистически значимых точек.

Наличие ионосферной бури отражается на снижении полярного озона обоих полушарий. Только в период развития восточной фазы КДК и теплого сезона года наблюдается некоторое незначительное положительное отклонение ОСО в полярной области СП (до +2 ед. Д.). При западной фазе КДК и холодного сезона года наблюдается отрицательное отклонение ОСО, и после пика бури («0» день) еще большее снижение ОСО в последующие 3—4 дня.

Отклонение ОСО для СП и ЮП

Для выявления вариаций ОСО в связи с ионосферными бурями в глобальных масштабах была проведена процедура осреднения в каждой точке сетки СП и ЮП для трех периодов развития ионосферных бурь. Период до начала бури: –5 день — 0 день; период бури: 0 день — начало и конец бури; период после бури: 0 день — +5 день с дальнейшим нахождением их отклонений от многолетней нормы 1980—2025 гг. На рис. 4 приведены распределения отклонений ОСО в обоих полушариях для всех исследуемых случаев ионосферных бурь, $Wp\text{-mean} \geq +6$.

Полученные для обоих полушарий распределения отклонений ОСО подтверждают приведенные ранее результаты для полярных областей. Наибольшие положительные отклонения ОСО от нормы 1980—2025 гг. в период до ионосферной бури в СП (рис. 4 а) наблюдаются в Арктическом секторе от Канадского Арктического архипелага до северо-восточной части Евразии (+25 ед. Д.). В данных районах также наблюдается область FDR-значимости ($p < 0,1$). В период ионосферной бури в СП (рис. 4 б) наибольшие положительные отклонения от нормы наблюдаются над Восточно-Сибирским морем и морем Лаптевых (до +25 ед. Д.), а также на севере Канады и над Аляской (до +20 ед. Д.). Перечисленные районы располагаются в области FDR-значимости ($p < 0,05$). В период после ионосферной бури в СП (рис. 4 в) наблюдаются схожие тенденции отклонений ОСО, как во время ионосферной бури.

В ЮП (рис. 4 г—е) наибольшие отклонения ОСО от нормы 1980—2025 гг. наблюдаются в периоды до (рис. 4 г) и после (рис. 4 е) ионосферной бури (до –23,5 ед. Д.) с центром аномалий, локализованных над Восточной Антарктидой. Для обоих периодов данный район располагается в области FDR-значимости ($p < 0,05$). В период ионосферной бури (рис. 4 д) центр отрицательной аномалии ОСО над Антарктидой менее выражен (до –16 ед. Д.) по сравнению с периодами до и после ионосферной бури и уменьшился по площади.

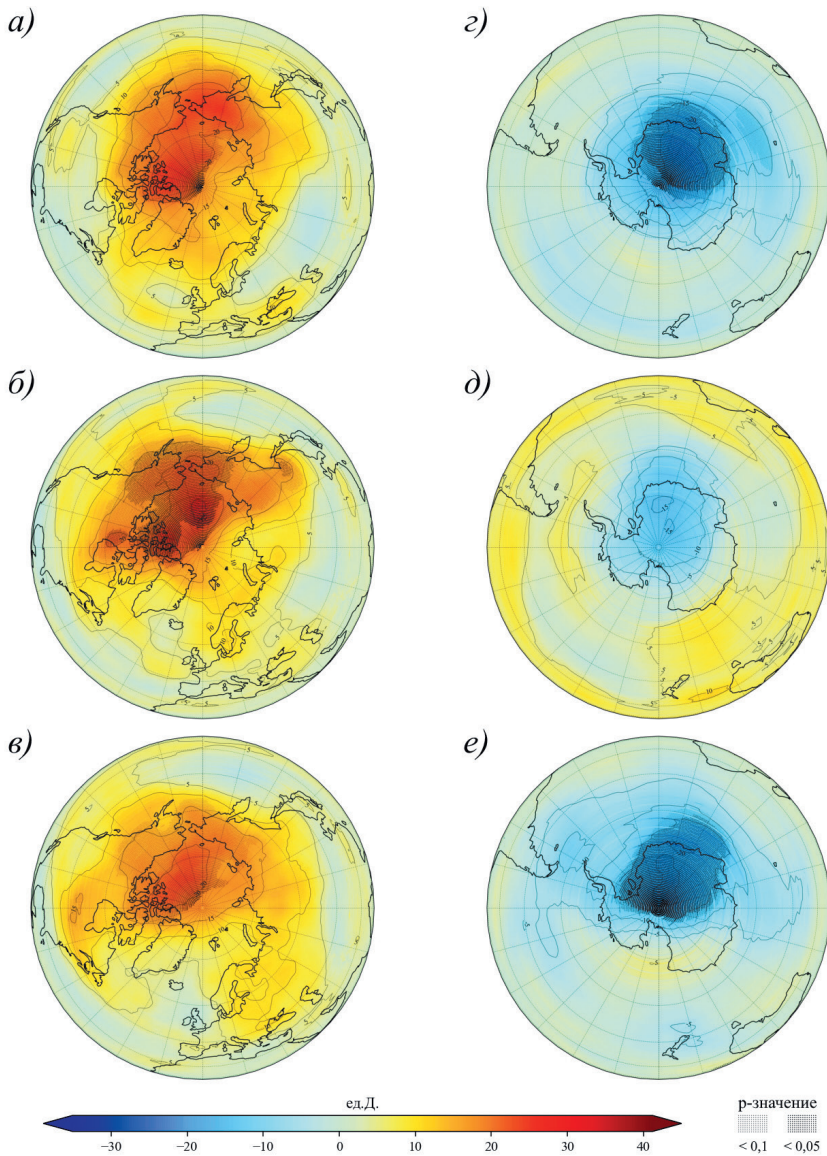


Рис. 4. Осредненные карты отклонений значений ОСО от многолетней нормы 1980—2025 гг. в единицах Добсона (ед. Д.) для всех случаев ионосферных бурь, $W_p\text{-mean} \geq +6$ (37 случаев) для СП (а, б, в) и ЮП (z, d, e): а, z) период: -5 дней — 0 день; б, d) период: 0 день — начало и конец бури; в, e) период: 0 день — +5 дней.

Fig. 4. Average deviations of TOC assessment maps for the 1980—2025 norms in Dobson units (DU) for all cases of ionospheric storms, $W_p\text{-mean} \geq +6$ (37 cases) for the NH (a, б, в) and SH (z, d, e): a, z) period: -5 days — 0 day; б, d) period: 0 day — start and final of storm; в, e) period: 0 day — +5 days.

Сезонность эффектов распределения отклонений ОСО

Далее рассмотрим сезонность эффектов глобального распределения отклонений ОСО в период развития ионосферных бурь. Для СП в теплый сезон (рис. 5 *a—e*) наибольшие отклонения ОСО от нормы 1980—2025 гг. наблюдаются в периоды до и во время бури над территорией Аляски и Чукотки (+26,2 ед. Д.). В период после бури максимальные отклонения ОСО постепенно снижаются. Несмотря на наличие относительно значительных отклонений, области FDR-значимости отсутствуют для всех карт, что может быть связано с уменьшением выборки случаев. Также по представленным картам видно, что в теплый сезон для тихоокеанского сектора преобладают положительные отклонения ОСО, в то время как атлантический сектор характеризуется нейтральным состоянием или незначительными отрицательными отклонениями ОСО.

Холодный сезон в СП (рис. 5 *z—e*) отличается большими отклонениями ОСО от нормы до, во время и после ионосферной бури, чем теплый. Наибольшие отклонения положительного знака наблюдаются во время ионосферной бури в районе Канадского Арктического архипелага (до +41 ед. Д.). В период до ионосферной бури, наблюдается значительный максимум отклонений до +34 ед. Д. севернее Канадского Арктического архипелага. Зона максимумов отклонений ОСО (до +40 ед. Д.) в период ионосферной бури сохраняется и в период после ионосферной бури с областью FDR-значимости ($p < 0,1$). Для холодного сезона в период после ионосферной бури в районе южнее Камчатки наблюдается формирование зоны отрицательных отклонений ОСО (–10 ед. Д.). Стоит отметить, что все перечисленные области не подкреплены FDR-штриховкой, причиной этого может являться недостаточность объема выборки, тем не менее, описанные отклонения могут быть следствием развития полярного стратосферного вихря в холодный период, который динамически и химически перераспределяет и разрушает молекулы озона [36—39].

В теплый сезон с наступлением бури падение ОСО в СП (рис. 6 *a*) достигает до 11 ед. Д. в районе Гренландии. Слабее проявляются области роста ОСО над территорией Сибири и северной частью Тихого океана, где рост достигает до 7,92 ед. Д. После ионосферной бури в СП за теплый сезон наиболее заметен рост ОСО на 9,7 ед. Д. южнее Аляски (рис. 6 *b*). С наступлением ионосферной бури в холодный сезон в СП (рис. 6 *в*) наблюдается рост ОСО до +29 ед. Д. для северо-востока Северной Америки. В низких и средних широтах тихоокеанского сектора наблюдается рост ОСО до +15 ед. Д. Снижение ОСО наиболее выражено севернее Таймыра и в средних широтах на востоке Тихого океана (до –22 ед. Д.). После бури (рис. 6 *z*) наблюдается рост ОСО на ~15 ед. Д. над западной Сибирью. Над территорией Аляски после бури наблюдается снижение ОСО на 17 ед. Д. Возможно, такое чередование положительных и отрицательных отклонений ОСО по всему СП может быть сопоставимо с числом волн Россби и планетарной динамикой верхней тропосферы и нижней стратосферы [40, 41]. Отсутствие зон значимости (менее $p = 2$) после поправки FDR для обоих сезонов может быть связано с недостаточным объемом выборок.

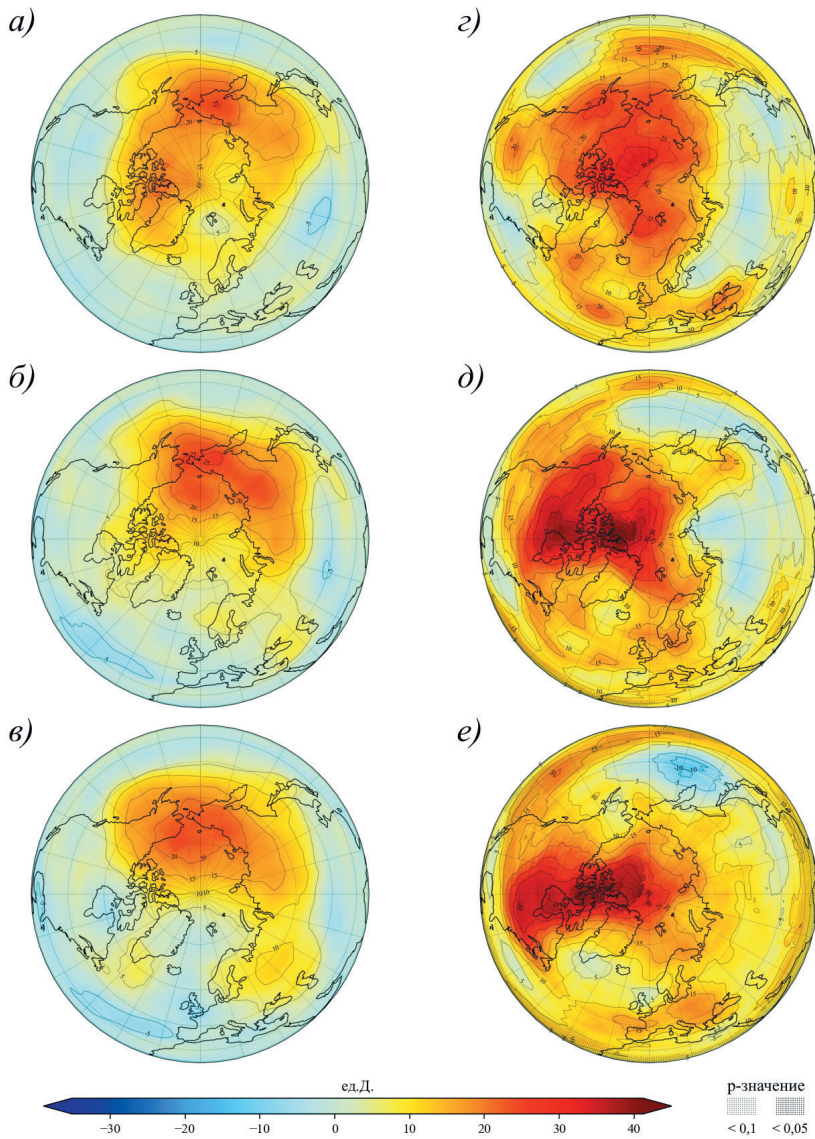


Рис. 5. Осредненные карты изменения отклонений ОСО (ед. Д.) от нормы 1980—2025 гг. во время ионосферных бурь для СП: *а, б, в*) для теплого сезона (июнь—ноябрь); *з, д, е*) для холодного сезона (декабрь—май): *а, з*) период: -5 дней — 0 день; *б, д*) период: 0 день — начало и конец бури; *в, е*) период: 0 день — +5 дней.

Fig. 5. Averaged maps of changes in TOC deviations (DU) from the norm for 1980—2025 during ionospheric storms for the NH: *а, б, в*) for the warm season (June—November); *з, д, е*) for the cold season (December—May): *а, з*) period: -5 days — 0 day; *б, д*) period: 0 day — start and final of storm; *в, е*) period: 0 day — +5 days.

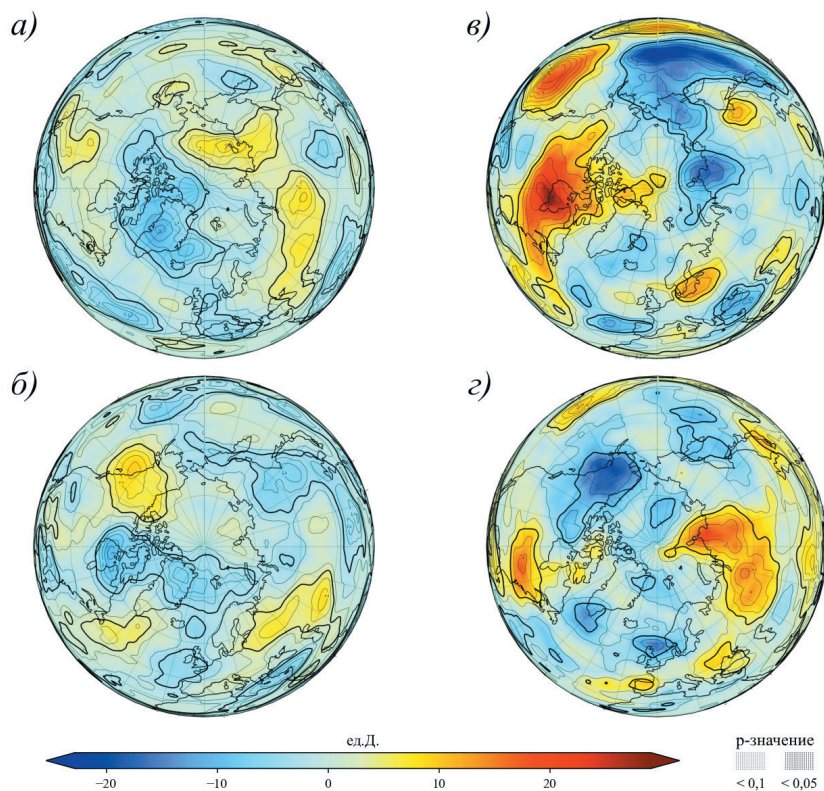


Рис. 6. Картограммы разности значений ОСО (ед. Д.) для СП в периоды до и во время бури (а, в), во время и после бури (б, з): а, б) для теплого сезона (июнь—ноябрь); в, з) для холодного сезона (декабрь—май).

Изолинии — значения t -критерия Стьюдента.

Сплошные толстые линии — значения t -критерия Стьюдента $|t| \geq 1$.

Fig. 6. Schematic maps of the difference in TOC values (DU) for the NH in the periods: before and during the storm (а, в), during and after the storm (б, з). а, б) for the warm season (June—November); в, з) for the cold season (December—May).

Isolines are Student's t -test values. Solid thick lines are Student's t -test values ($|t| \geq 1$).

В ЮП в теплый сезон (рис. 7 а—в) отклонения ОСО от нормы характеризуются примерно равной амплитудой для всех периодов. В период до ионосферной бури центр отрицательной аномалии (–15 ед. Д.) локализован над Антарктидой, а положительная аномалия (до +10 ед. Д.) наблюдается у тихоокеанского побережья Антарктиды. В период ионосферной бури до +17,41 ед. Д. усилилось отклонение ОСО в районе тихоокеанского побережья Антарктиды, обширные области с отклонениями 10—15 ед. Д. охватывают средние широты всех трех океанов. В период после ионосферной бури выделяется область отрицательного отклонения до –15 ед. Д., которая располагается над Антарктидой. В холодный сезон

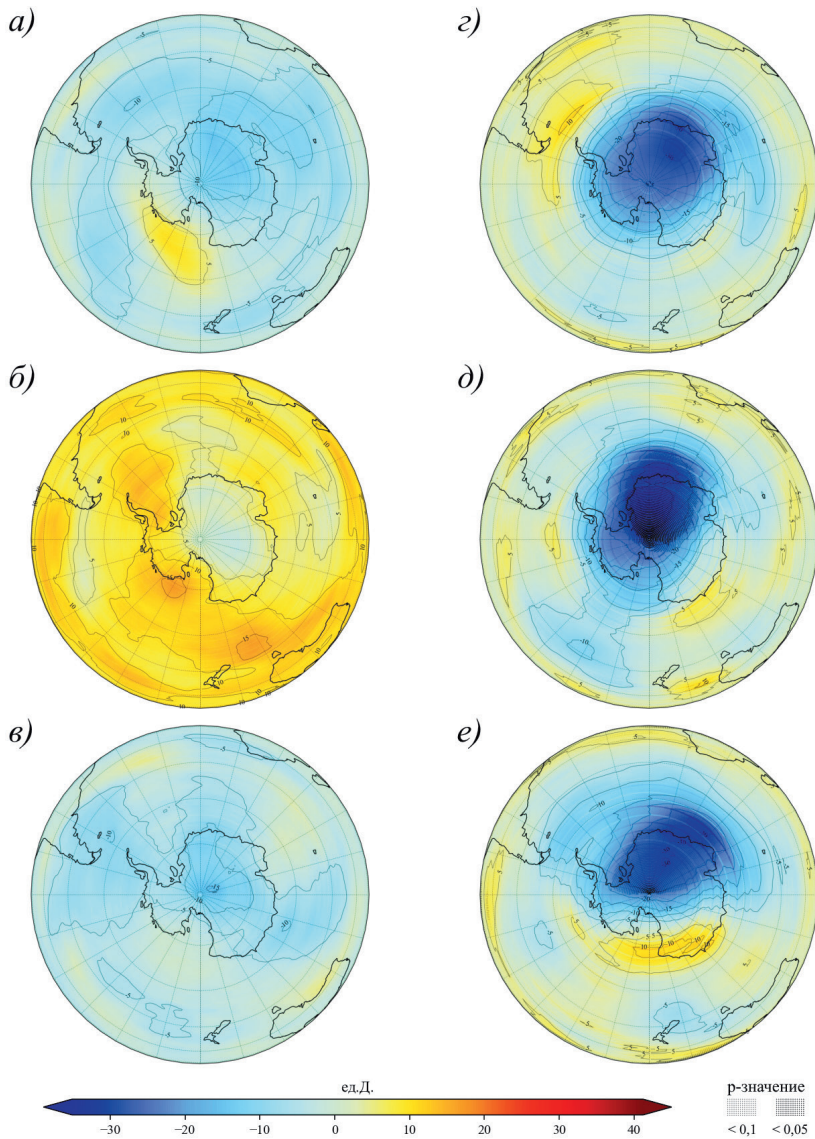


Рис. 7. Осредненные карты изменения отклонений ОСО (ед. Д.) от нормы 1980—2025 гг. во время ионосферных бурь для ЮП: *а, б, в*) для теплого сезона (декабрь—май); *з, д, е*) для холодного сезона (июнь—ноябрь): *а, з*) период: -5 дней — 0 день; *б, д*) период: 0 день — начало и конец бури; *в, е*) период: 0 день — +5 дней.

Fig. 7. Averaged maps of changes in TOC deviations (DU) from the 1980—2025 norm during ionospheric storms for the SH: *a, б, в*) for the warm season (December—May); *з, д, е*) for the cold season (June—November): *a, з*) period: -5 days — 0 day; *б, д*) period: 0 day — start and final of storm; *в, е*) period: 0 day — +5 days.

в ЮП (рис. 7 *з—е*), как и в СП, амплитуда отклонений ОСО от нормы выше, чем в теплый период. Наибольшие отклонения наблюдаются в период ионосферной бури в районе Восточной Антарктиды (до $-35,0$ ед. Д.). Данный район выделяется отрицательными отклонениями ОСО от нормы во все периоды, но в период ионосферной бури и после нее, здесь присутствует штриховка FDR: с $p < 0,05$ для периодов бури и с $p < 0,1$ для периода после нее.

Карты разности отклонений ОСО от нормы в теплый сезон представлены на рисунке 8 *а, б*. С наступлением ионосферной бури (рис. 8 *а*), наиболее интенсивные центры роста ОСО (до $+22,7$ ед. Д.) локализованы над югом Индийского и

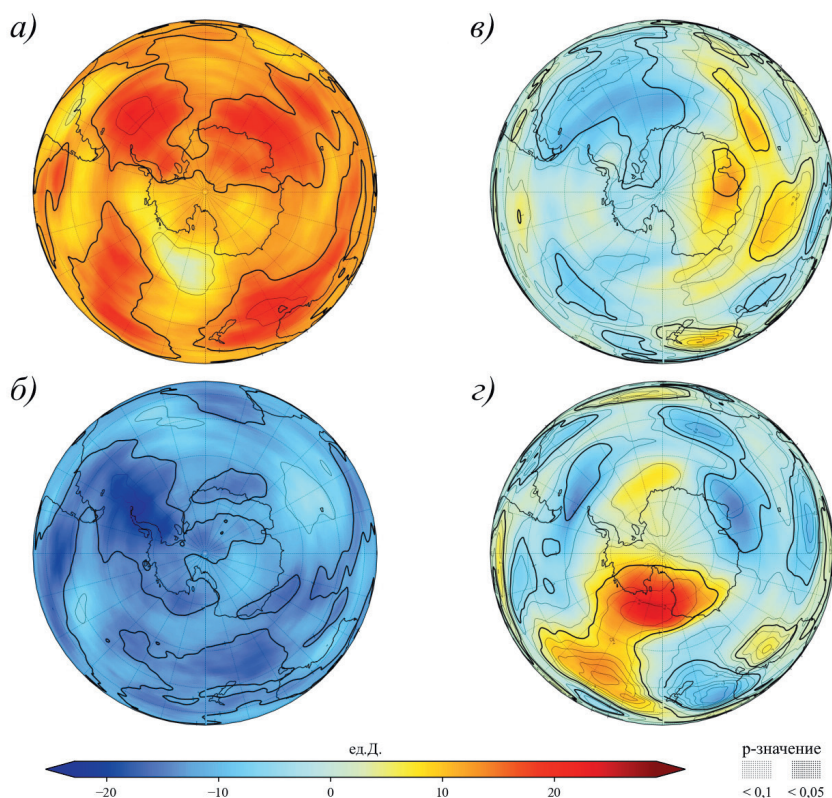


Рис. 8. Картограммы разности значений ОСО (ед. Д.) для ЮП в периоды до и во время бури (*а, в*), во время и после бури (*б, з*): *а, б*) для теплого сезона (июнь—ноябрь); *в, з*) для холодного сезона (декабрь—май).

Изолинии — значения *t*-критерия Стьюдента.

Сплошные толстые линии — значения *t*-критерия Стьюдента ($|t| \geq 1$).

Fig. 8. Schematic maps of the difference in TOC values (DU) for the SH in the periods: before and during the storm (*a, v*), during and after the storm (*b, z*): *a, b*) for the warm season (June—November); *v, z*) for the cold season (December—May).

Isolines are Student's *t*-test values. Solid thick lines are Student's *t*-test values ($|t| \geq 1$).

Атлантического океанов. С окончанием ионосферной бури (рис. 8 б), наибольшее снижение ОСО (–22,8 ед. Д.) наблюдается в районе Антарктического полуострова. На обеих картах, области $t = 1$ охватывают внетропическое пространство ЮП, при этом t достигает 1,5 лишь в областях максимального роста или снижения ОСО.

В холодный сезон в период бури (рис. 8 в) наблюдаются области с разным знаком, что может быть вызвано сильным влиянием полярного вихря. Рост ОСО (до +13,4 ед. Д.) наблюдается на юге Индийского океана, в то время как снижение ОСО (до –12,4 ед. Д.) наиболее выражено на юге Атлантического океана. После бури (рис. 8 г) наибольший рост ОСО (до +24,3 ед. Д.) наблюдается над тихоокеанским побережьем Антарктиды, наибольшее снижение ОСО (до –14,9 ед. Д.) отмечается в южных частях Индийского и Атлантического океанов. На обеих картах области с $|t| \geq 1,0$ занимают крупные районы, связанные с местами наибольшего изменения ОСО, где $|t|$ достигало 2—3,5. FDR-круп не проявился для всех карт разности для обоих сезонов, что может быть связано с малым объемом выборок данных. Несмотря на то, что локальные значения t -критерия не везде достигают порога 0,05, высокая пространственная корреляция между отклонениями ОСО и возмущениями ионосферы указывает на наличие системного геофизического отклика.

Заключение

Рассмотрены эффекты отклика ОСО на интенсивные ионосферные бури (по планетарному индексу $W_p\text{-mean} \geq +6$) в полярной зоне (63—90° ш.) обоих полушарий. Наиболее сильный эффект отрицательного отклонения ОСО наблюдается в СП особенно в холодный сезон года и при западной фазе КДК (до –15 ... –20 ед. Д.), где снижение значений ОСО начинается в день начала бури и сохраняется в течение последующих около 4,5 дней. После завершения интенсивной ионосферной бури наблюдается восстановление и резкий рост ОСО в обоих полушариях полярных зон.

Анализ пространственных распределений ОСО по всей территории полушарий показал существенную зональную анизотропию озонного отклика внетропических широт, которая может быть связана с воздействием планетарных волн и особенностями атмосферной циркуляции. Установлено, что значительная часть выявленных аномалий не всегда достигает строгих критериев статистической значимости, что свидетельствует о недостаточной выборке случаев, высоком уровне естественной вариабельности атмосферы, но при этом аномалии обладают пространственной когерентностью с областями экстремумов отклонений озона.

В СП в целом преобладают положительные отклонения ОСО, наиболее выраженные в арктическом секторе (до +41 ед. Д.), которые сохраняются на всех этапах развития ионосферной бури и постепенно ослабевают после ее завершения, отражая восстановление озоносферы. В ЮП, напротив, доминируют отрицательные аномалии, локализованные преимущественно над Восточной Антарктидой (до –35,0 ед. Д.), что указывает на тесную связь с устойчивыми циркуляционными и химическими процессами, характерными для области озоновой дыры.

В теплый период отклонения ОСО в обоих полушариях менее выражены, в ЮП они статистически незначимы, что может быть обусловлено недостаточным объемом выборки данных. В холодный сезон для обоих полушарий, напротив, наблюдаются более интенсивные и пространственно организованные аномалии ОСО, особенно в полярных регионах, где влияние полярного вихря усиливает как динамическую, так и химическую перестройку озоносферы. Таким образом, обширные области с уровнем значимости ($p < 0,15$, $|t| = 1-2$) пространственно согласованы с центрами аномалий озона, что свидетельствует о физической природе наблюдаемого эффекта отклика ОСО на ионосферные бури.

Список литературы

1. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022. Geneva: World Meteorological Organization, 2022. 66 p. [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://ozone.unep.org/system/files/documents/Scientific-Assessment-of-Ozone-Depletion-2022-Executive-Summary.pdf> (дата обращения: 08.10.2025).
2. Gray L. J., Beer J., Geller M. et al. Solar influences on climate // *Reviews of Geophysics*. 2010. Vol. 48, № 4. RG4001. doi: 10.1029/2009RG000282.
3. Ward W., Seppälä A., Yiğit E. et al. Role of the Sun and the middle atmosphere/thermosphere/ionosphere in climate (ROSMIC): A retrospective and prospective view // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2021. Vol. 8. Art. 47. doi: 10.1186/s40645-021-00433-8.
4. Kilifarska N. Mechanism of lower stratospheric ozone influence on climate // *International Review of Physics*. 2012. Vol. 6. No. 3. P. 279—289. doi: 10.1134/S1069351315050067.
5. Красовский А. Н., Шлендер Т. В., Бородко С. К. и др. Наследие Чижевского А. Л. о солнечно-земных связях. Роль озонового механизма. Развитие географических исследований в Беларуси в XX—XXI веках.: материалы международной научной и практической конференции. Минск; 2021. С. 71—91. [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/268237> (дата обращения: 08.10.2025).
6. Белаховский В. Б., Будников П. А., Калишин А. С. и др. Влияние геомагнитных возмущений на сцинтилляции ГНСС-сигналов и возникновение ГИТ в авроральных и субавроральных широтах // *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 3. С. 58—72. doi: 10.12737/szf-93202307.
7. Pansong C., Kenpankho P. Low-Latitude Ionospheric Responses to Two Matched Intense Equinoctial Geomagnetic Storms: A Case-Based Comparison Between Solar Cycles 24 and 25 // *Annales Geophysicae*. 2026. Vol. 69. doi: 10.4401/ag-9415.
8. Гуляева Т. Л. Показатели изменчивости ионосферы во время геомагнитных бурь по наблюдениям GPS // *Солнечно-земная физика*. 2008. Т. 2. Вып. 12. С. 152—156.
9. Gulyaeva T. L., Stanislawski I. Derivation of a planetary ionospheric storm index // *Annales Geophysicae*. 2008. Vol. 26, No. 8. P. 2645—2648. doi: 10.5194/angeo-26-2645-2008.
10. Rodger C. J., Clilverd M. A., Seppälä A. et al. Radiation belt electron precipitation due to geomagnetic storms: Significance to middle atmosphere ozone chemistry // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2010. Vol. 115. A11320. doi: 10.1029/2010JA015599.
11. Кривошук А. А., Репнев А. И. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М.: ГЕОС, 2009. 384 с.
12. Sinnhuber M., Nieder H., Wieters N. Energetic particle precipitation and the chemistry of the mesosphere/lower thermosphere // *Surveys in Geophysics*. 2012. Vol. 33. P. 1281—1334. doi: 10.1007/s10712-012-9201-3.
13. Rozanov E. V. Effect of Precipitating Energetic Particles on the Ozone Layer and Climate // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2018. Vol. 12. P. 786—790. doi: 10.1134/S1990793118040152.
14. Friederich F., Sinnhuber M., Funke B. et al. Local impact of solar variation on nitrogen dioxide in the lower mesosphere and upper stratosphere from 2007 to 2012 // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014. Vol. 14. P. 4055—4064. doi: 10.5194/acp-14-4055-2014.

15. Seppälä A., Clilverd M. A., Beharrell M. J. et al. Substorm-induced energetic electron precipitation: Impact on atmospheric chemistry // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. No. 19. P. 8172—8176. doi: 10.1002/2015GL065523.
16. Seppälä A., Clilverd M. A., Rodger C. J. et al. The effects of hard-spectra solar proton events on the middle atmosphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008. Vol. 113. A11311. doi: 10.1029/2008JA013517.
17. Danilov A. D., Laštovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*. 2001. Vol. 2, No. 3. P. 209—224.
18. Laštovička J., Mlch P. Is ozone affected by geomagnetic storms? // *Advances in Space Research*. 1999. Vol. 24, № 5. P. 631—640. doi: 10.1016/S0273-1177(99)00103-9.
19. Laštovička J., Křižan P. Impact of strong geomagnetic storms on total ozone at southern higher middle latitudes // *Studia Geophysica et Geodaetica*. 2008. Vol. 53. No. 2. P. 151—156. doi: 10.1007/s11200-008-0009-z.
20. Mansilla G. A. Variation of total ozone during 24 August 2005 magnetic storm: A case study // *Atmospheric and Climate Sciences*. 2013. Vol. 3. No. 4. P. 475—480. doi: 10.4236/acs.2013.34049.
21. Kilifarska N., Peqini K. Impact of Forbush decreases and geomagnetic storms on the atmospheric ozone profiles // *Earth and Space Science*. 2023. Vol. 10. No. 7. Art. e2023EA002954. doi: 10.1029/2023EA002954.
22. Zossi M. M., Zotto E. M., Mansilla G. A. Can geomagnetic storms affect stratospheric ozone and reactive nitrogen in the South Atlantic Anomaly zone? // *Pure and Applied Geophysics*. 2021. Vol. 178. No. 1. P. 141—154. doi: 10.1007/s00024-020-02633-7.
23. Huang C., Huang F., Zhang X. et al. The contribution of geomagnetic activity to polar ozone changes in the upper atmosphere // *Advances in Meteorology*. 2017. Vol. 2017. No. 1. Article 1729454. doi: 10.1155/2017/1729454.
24. Tartaglione N., Toniazzo T., Orsolini Y., Otterå O. H. Impact of solar irradiance and geomagnetic activity on polar reactive nitrogen, ozone and temperature in WACCM simulations // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2020. Vol. 209. 105398. doi: 10.1016/j.jastp.2020.105398.
25. Singh, Y. P. Statistical considerations in superposed epoch analysis and its applications in space research // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2006. Vol. 68, No. 7. P. 803—813. doi: 10.1016/j.jastp.2006.01.007.
26. Walton S. D., Murphy K. R. Superposed epoch analysis using time-normalization: A Python tool for statistical event analysis // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2022. Vol. 9. 1000145. doi: 10.3389/fspas.2022.1000145.
27. ИЗМИРАН. Ионосферная погода. [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/storm/> (дата обращения: 19.11.2025).
28. Global Differential GPS (GDGPS) System [Электронный ресурс]. URL: <https://gdgps.jpl.nasa.gov>. (дата обращения: 19.11.2025).
29. Stanislawski I., Gulyaeva T. L. Ionospheric W index based on global navigation satellite system total electron content in the operational use for navigation systems // *Satellite Positioning: Methods, Models and Applications* / ed. S. Jin. Rijeka: In Tech, 2015. P. 155—169. doi: 10.5772/59902.
30. NASA Ozone Watch. [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 19.11.2025).
31. Gelaro R. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *Journal of Climate*. 2017. Vol. 30. No. 14. P. 5419—5454. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
32. The Quasi-Biennial-Oscillation (QBO) Data Serie. [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://www.geo.fu-berlin.de/en/met/ag/strat/produkte/qbo/index.html> (дата обращения: 19.11.2025).
33. Tinsley B. A., Zhou L. Effects of global circuit downward current flow on atmospheric dynamics: modeling of relevant cloud microphysics // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2014. Vol. 119. No. 10. P. 5905—5920. doi: 10.1002/2013JD020601.
34. Laštovička J., Křižan P. Geomagnetic storms, Forbush decreases of cosmic rays and total ozone at northern higher middle latitudes // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2005. Vol. 67, No. 1—2. P. 119—124. doi: 10.1016/j.jastp.2004.07.021.

35. Wang W., Tian W., Zhang J. et al. Zonally asymmetric influences of the quasi-biennial oscillation on stratospheric ozone // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 22. No. 20. P. 13695—13711. doi: 10.5194/acp-22-13695-2022.
36. Wohltmann I., von der Gathen P., Lehmann R. et al. Near-complete local reduction of Arctic stratospheric ozone by severe chemical loss in spring 2020 // *Geophysical Research Letters*. 2020. Vol. 47. Art. 20. e2020GL089547. doi: 10.1029/2020GL089547.
37. Tsvetkova N. D., Vargin P. N., Lukyanov A. N. et al. Studying chemical ozone depletion and dynamic processes in the Arctic stratosphere in the winter 2019/2020 // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2021. Vol. 46. P. 606—615. doi: 10.3103/S1068373921090065.
38. Зуев В. В., Савельева Е. С. Аномальное разрушение озона в Арктике с января по апрель 2020 г.: динамика полярного вихря под влиянием планетарных волн // *Исследование Земли из космоса*. 2021. No. 1. С. 41—52. doi: 10.31857/S0205961421010115.
39. Зоркальцева О. С., Антохина О. Ю., Гочаков А. В., Артамонов М. Ф. Эволюция стратосферного полярного вихря на примере зимних периодов 2022–2024 гг. // *Солнечно-земная физика*. 2025. Т. 11, No. 2. doi: 10.12737/szf-112202508.
40. Zhang C., Zhang C., Grytsai A., Evtushevsky O. et al. Rossby waves in total ozone over the Arctic in 2000–2021 // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. 2192. doi: 10.3390/rs14092192.
41. Riishøjgaard L. P., Källén E. On the correlation between ozone and potential vorticity for large-scale Rossby waves // *Journal of Geophysical Research*. 1997. Vol. 102, № D7. P. 8793—8804. doi: 10.1029/96JD03059.

References

1. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022*. Geneva: World Meteorological Organization, 2022; 66 p. Available at: <https://ozone.unep.org/system/files/documents/Scientific-Assessment-of-Ozone-Depletion-2022-Executive-Summary.pdf> (accessed 08.10.2025).
2. Gray L. J., Beer J., Geller M. et al. Solar influences on climate. *Reviews of Geophysics*. 2010; (48): (4): RG4001. doi: 10.1029/2009RG000282.
3. Ward W., Seppälä A., Yiğit E. et al. Role of the Sun and the middle atmosphere/thermosphere/ionosphere in climate (ROSMIC): A retrospective and prospective view. *Progress in Earth and Planetary Science*. 2021; (8):47. doi:10.1186/s40645-021-00433-8.
4. Kilifarska N. Mechanism of lower stratospheric ozone influence on climate. *International Review of Physics*. 2012; 6(3): 279—289. doi: 10.1134/S1069351315050067.
5. Krasovskiy A. N., Shlender T. V., Borodko S. K. et al. Nasledie Chizhevskogo A.L. o solnechno-zemnykh svyazyakh. Rol' ozonovogo mekhanizma = Chizhevsky's legacy on solar-terrestrial relations. The role of the ozone mechanism. *Razvitie geograficheskikh issledovaniy v Belarusi v XX—XXI vekakh: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy i prakticheskoy konferentsii* = Development of geographical research in Belarus in the XX—XXI centuries: materials of the international scientific and practical conference. Minsk, 2021; (71—91). Available at: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/268237> (accessed 08.10.2025). (In Russ.).
6. Belakhovsky V. B., Budnikov P. A., Kalishin A. S. et al. Vliyanie geomagnitnykh vozmushcheniy na stsintillyatsii GNSS-signalov i vozniknovenie GIT v avroral'nykh i subavroral'nykh shirotakh = Influence of geomagnetic disturbances on GNSS signal scintillations and GIC occurrence at auroral and subauroral latitudes. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-Terrestrial Physics*. 2023; 9(3): (58—72). doi: 10.12737/szf-93202307. (In Russ.).
7. Pansong C., Kenpankho P. Low-Latitude Ionospheric Responses to Two Matched Intense Equinoctial Geomagnetic Storms: A Case-Based Comparison Between Solar Cycles 24 and 25. *Annales Geophysicae*. 2026; (69). doi: 10.4401/ag-9415.
8. Gulyaeva T. L. Pokazateli izmenchivosti ionosfery vo vremiya geomagnitnykh bur' po nablyudeniya GPS = Indices of ionospheric variability during geomagnetic storms from GPS observations. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-Terrestrial Physics*. 2008; 2(12):(152—156). (In Russ.).
9. Gulyaeva T. L., Stanislawski I. Derivation of a planetary ionospheric storm index. *Annales Geophysicae*. 2008; 26(8): 2645—2648. doi: 10.5194/angeo-26-2645-2008.

10. Rodger C. J., Clilverd M. A., Seppälä A. et al. Radiation belt electron precipitation due to geomagnetic storms: Significance to middle atmosphere ozone chemistry. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2010; (115): A11320. doi: 10.1029/2010JA015599.
11. Krivolutskiy A. A., Repnev A. I. *Vozdeystvie kosmicheskikh faktorov na ozonosferu Zemli = Impact of cosmic factors on the Earth's ozonosphere*. Moscow: GEOS, 2009; 384 p. (In Russ.).
12. Sinnhuber M., Nieder H., Wieters N. Energetic particle precipitation and the chemistry of the mesosphere/lower thermosphere. *Surveys in Geophysics*. 2012; (33): 1281—1334. doi: 10.1007/s10712-012-9201-3.
13. Rozanov E. V. Effect of Precipitating Energetic Particles on the Ozone Layer and Climate. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2018; (12): 786—790. doi: 10.1134/S1990793118040152.
14. Friederich F., Sinnhuber M., Funke B. et al. Local impact of solar variation on nitrogen dioxide in the lower mesosphere and upper stratosphere from 2007 to 2012. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014; (14): 4055—4064. doi: 10.5194/acp-14-4055-2014.
15. Seppälä A., Clilverd M. A., Beharrell M. J. et al. Substorm-induced energetic electron precipitation: Impact on atmospheric chemistry. *Geophysical Research Letters*. 2015; 42(19): 8172—8176. doi: 10.1002/2015GL065523.
16. Seppälä A., Clilverd M. A., Rodger C. J. et al. The effects of hard-spectra solar proton events on the middle atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008; (113): A11311. doi: 10.1029/2008JA013517.
17. Danilov A. D., Laštovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*. 2001; 2(3): 209—224.
18. Laštovička J., Mlch P. Is ozone affected by geomagnetic storms? *Advances in Space Research*. 1999; 24(5): 631—640. doi: 10.1016/S0273-1177(99)00103-9.
19. Laštovička J., Křížan P. Impact of strong geomagnetic storms on total ozone at southern higher middle latitudes. *Studia Geophysica et Geodaetica*. 2008; 53(2):151—156. doi: 10.1007/s11200-008-0009-z.
20. Mansilla G. A. Variation of total ozone during 24 August 2005 magnetic storm: A case study. *Atmospheric and Climate Sciences*. 2013; 3(4): 475—480. doi: 10.4236/acs.2013.34049.
21. Kilifarska N., Peqini K. Impact of Forbush decreases and geomagnetic storms on the atmospheric ozone profiles. *Earth and Space Science*. 2023; 10(7): e2023EA002954. doi: 10.1029/2023EA002954.
22. Zossi M. M., Zotto E. M., Mansilla G. A. Can geomagnetic storms affect stratospheric ozone and reactive nitrogen in the South Atlantic Anomaly zone? *Pure and Applied Geophysics*. 2021; 178(1): 141—154. doi: 10.1007/s00024-020-02633-7.
23. Huang C., Huang F., Zhang X. et al. The contribution of geomagnetic activity to polar ozone changes in the upper atmosphere. *Advances in Meteorology*. 2017; 2017(1): 1729454. doi: 10.1155/2017/1729454.
24. Tartaglione N., Toniazzo T., Orsolini Y., Otterå O. H. Impact of solar irradiance and geomagnetic activity on polar reactive nitrogen, ozone and temperature in WACCM simulations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2020; (209): 105398. doi: 10.1016/j.jastp.2020.105398.
25. Singh Y. P. Statistical considerations in superposed epoch analysis and its applications in space research. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2006; 68(7): 803—813. doi: 10.1016/j.jastp.2006.01.007.
26. Walton S. D., Murphy K. R. Superposed epoch analysis using time-normalization: A Python tool for statistical event analysis. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2022; (9): 1000145. doi: 10.3389/fspas.2022.1000145.
27. IZMIRAN. Ionosfernaya pogoda = Ionospheric weather. Available at: <https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/storm/> (accessed 19.11.2025). (In Russ.).
28. Global Differential GPS (GDGPS) System. Available at: <https://gdgps.jpl.nasa.gov> (accessed 19.11.2025).
29. Stanisławska I., Gulyaeva T. L. Ionospheric W index based on global navigation satellite system total electron content in the operational use for navigation systems. In: Jin S. (ed.) *Satellite Positioning: Methods, Models and Applications*. Rijeka: InTech, 2015; 155—169. doi: 10.5772/59902.
30. NASA Ozone Watch. Available at: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov> (accessed 19.11.2025).
31. Gelaro R. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*. 2017; 30(14):5419—5454. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.

32. The Quasi-Biennial-Oscillation (QBO) Data Serie. Available at: <https://www.geo.fu-berlin.de/en/met/ag/strat/produkte/qbo/index.html> (accessed 19.11.2025).
33. Tinsley B. A., Zhou L. Effects of global circuit downward current flow on atmospheric dynamics: modeling of relevant cloud microphysics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2014; 119(10): 5905—5920. doi: 10.1002/2013JD020601.
34. Laštovička J., Krizán P. Geomagnetic storms, Forbush decreases of cosmic rays and total ozone at northern higher middle latitudes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2005; 67 (1—2): 119—124. doi: 10.1016/j.jastp.2004.07.021.
35. Wang W., Tian W., Zhang J. et al. Zonally asymmetric influences of the quasi-biennial oscillation on stratospheric ozone. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022; 22(20): 13695—13711. doi: 10.5194/acp-22-13695-2022.
36. Wohltmann I., von der Gathen P., Lehmann R. et al. Near-complete local reduction of Arctic stratospheric ozone by severe chemical loss in spring 2020. *Geophysical Research Letters*. 2020; (47):20: e2020GL089547. doi: 10.1029/2020GL089547.
37. Tsvetkova N. D., Vargin P. N., Lukyanov A. N. et al. Studying chemical ozone depletion and dynamic processes in the Arctic stratosphere in the winter 2019/2020. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2021; (46): (606—615). doi: 10.3103/S1068373921090065. (In Russ.).
38. Zuev V. V., Savelieva E. S. Abnormal ozone depletion in the Arctic from January to April 2020: dynamics of the polar vortex under the influence of planetary waves. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Earth Research from Space*. 2021; (1): (41—52). doi: 10.31857/S0205961421010115. (In Russ.).
39. Zorkaltseva O. S., Antokhina O. Yu., Gochakov A. V., Artamonov M. F. Evolution of the stratospheric polar vortex on the example of winter periods of 2022—2024. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-Terrestrial Physics*. 2025; (11): (2). doi: 10.12737/szf-112202508. (In Russ.).
40. Zhang C., Zhang C., Grytsai A., Evtushevsky O. et al. Rossby waves in total ozone over the Arctic in 2000—2021. *Remote Sensing*. 2022; (14): 2192. doi: 10.3390/rs14092192.
41. Riishøjgaard L. P., Källén E. On the correlation between ozone and potential vorticity for large-scale Rossby waves. *Journal of Geophysical Research*. 1997; 102(D7): 8793—8804. doi: 10.1029/96JD03059.

Информация об авторах

Жмодиков Антон Михайлович, младший научный сотрудник, ННИЦ МО БГУ, nomrec@bsu.by.
Шлендер Тимофей Викторович, научный сотрудник, ННИЦ МО БГУ, shlenderTV@bsu.by.
Красовский Александр Николаевич, ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, доцент, ННИЦ МО БГУ, krasovsky@bsu.by.
Жучкевич Вероника Вадимовна, старший научный сотрудник, ННИЦ МО БГУ, nomrec@bsu.by.
Бородко Сергей Константинович, научный сотрудник, ННИЦ МО БГУ, skbarodka@gmail.com.
Светашев Александр Георгиевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией биофотоники, ННИЦ МО БГУ, asvetashev@tut.by.
Яротов Алексей Евгеньевич, кандидат географических наук, профессор, доцент, директор ННИЦ МО БГУ, yarotau@bsu.by.

Information about authors

Zhmodikov Anton M., junior research fellow, National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University.
Shlender Timofey V., research fellow, National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University.
Krasouski Aliaksandr N., Leading Researcher, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University.
Zhuchkevich Veronika V., senior research fellow, National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University.
Borodko Sergey K., research fellow, National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University.

А. М. ЖМОДИКОВ, Т. В. ШЛЕНДЕР, А. Н. КРАСОВСКИЙ и др.

Svetashev Aleksandr G., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Biophotonics Laboratory, National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University.

Yarotau Aliaksei E., Candidate of Geographical Sciences, Professor, Associate Professor, Director of NOMREC BSU, National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University.

Конфликт интересов: Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 04.12.2025

Принята в печать после доработки 20.05.2026

The article was received on 04.12.2025

The article was accepted after revision on 20.05.2026