

Изменение общего содержания озона в полярном регионе Южного полушария во время крупных ионосферных бурь

А.Н. Красовский^{1,2}, Т.В. Шлендер^{1,2}, С.К. Бородко¹, В.В. Жучкевич¹, А.М. Жмодиков²

¹ Учреждение БГУ «Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы», Минск, ул. Курчатова 7, 220045, Беларусь

² Факультет географии и геоинформатики БГУ, Минск, ул. Ленинградская 16, 220030 Беларусь

E-mail: timajaya@mail.ru

В работе рассматривается отклик общего содержания озона (ОСО) полярного региона Южного полушария с помощью метода наложенных эпох по спутниковым и данным реанализа. В качестве критерия ионосферных бурь был использован ионосферный планетарный индекс W_p , который отражает степень полного электронного содержания в ионосфере. В итоге сделан вывод о том, что ОСО в полярной шапке Южного полушария увеличивается до и после пика ионосферной бури для различных фаз экваториального квазидвухлетнего колебания (КДК).

Ключевые слова: ионосферный индекс, общее содержание озона, ионосферные бури, Антарктида

Changes in total ozone in the polar region of the Southern Hemisphere during major ionospheric storms

A.N. Krasouski^{1,2}, T.V. Schlender^{1,2}, S.C. Barodka¹, V.V. Zuchkevich¹, A.M. Zmodikov²

¹ National ozone monitoring research center of BSU

² Geography and geoinformatics faculty of BSU

The paper considers the response of the total ozone (TO) of the polar region of the Southern Hemisphere using the method of superimposed epochs. The ionospheric planetary index W_p , which reflects the degree of total electron content in the ionosphere, was used as a criterion for ionospheric storms. As a result, it was concluded that TO in the polar cap of the Southern Hemisphere increases before and after the peak of the ionospheric storm for different phases of the equatorial quasi-biennial oscillation (QBO).

Keywords: ionospheric index, total ozone, ionospheric storms, Antarctica

Введение

Наиболее чувствительным промежуточным звеном взаимодействия атмосферы с различными внешними факторами, такими, как, например, солнечная электромагнитная радиация, является изменение характеристик ионосферы Земли. При возникновении солнечных вспышек — явления взрывного выделения энергии в солнечной атмосфере — возникает значительное количество ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Рентгеновские лучи с большой энергией проникают глубоко в ионосферу, в результате на малых высотах образуются ионизированные области, что существенно изменяет характеристики распространения радиоволн. Внезапные ионосферные возмущения проявляются в увеличении ионизации в D и E областях за счет роста интенсивности ионизирующего излучения. В периоды высокой солнечной активности и в дневные часы профиля электронной плотности имеют большие значения, примерно в два раза выше [1].

Еще в конце 18 века Мартин Ван-Марум в лабораторных условиях обнаружил, что молекулы озона образуется электрическим путем [2].

На параметры ионосферы сильно влияют магнитосферные условия, особенно во время геомагнитных бурь (определяемых как уменьшение более чем на 100 нТл горизонтальной составляющей геомагнитного поля, измеренной на поверхности Земли [3]). В работе Кумар и Паркинсон [4] исследовали возмущения N_mF_2 (f_0F_2) в зависимости от местного времени начала геомагнитной бури, сезона и интенсивности бури. Они установили, что негативные штормовые эффекты начинаются сразу после начала геомагнитной бури в ночной полярной ионосфере, в то время как истощение дневной полярной ионосферы задерживаются на несколько часов. Обнаружено, что распространение негативных штормовых эффектов к экватору регулируется интенсивностью шторма, сезоном (самая большая летом) и временем суток (обычно глубже на ночной стороне). Напротив, положительные штормовые эффекты обычно возникают на дневной стороне ионосферных высот средних и низких широт, когда бури находятся в главной фазе, независимо от времени года. Поскольку в средних широтах полного электронного содержания (ПЭС) обычно увеличивается в начальной и основной фазах геомагнитной бури и уменьшается в фазе восстановления, ожидается, что ПЭС будет антикоррелировать с геомагнитным Dst-индексом и измеренной на земле горизонтальной составляющей геомагнитного поля [5]. Сильные геомагнитные бури, как правило, связаны с форбуш-понижениями галактических космических лучей и очень часто также с солнечными протонными событиями. Они вызывают большие возмущения в ионосфере, но они влияют и на нейтральную атмосферу, включая среднюю атмосферу и тропосферу [6]. Исследования влияния геомагнитных бурь на ОСО в высоких широтах Северного полушария были рассмотрены в работе [7]. Было установлено, что достаточно сильные, статистически значимые, эффекты геомагнитных бурь проявляются в ОСО в высоких широтах Северного полушария только для сильных событий ($A_p > 60$), зимой, в условиях высокой солнечной активности и восточной фазы КДК. Количество событий в условиях восточной фазы КДК невелико, но наблюдаемый эффект повторяется во всех без исключения событиях. ОСО повышается примерно на 4-5 дней после начала бури. Общая реакция озона на сильные геомагнитные бури является косвенным эффектом, а не прямым эффектом, как в случае с эффектами солнечных протонных событий в мезосферном озоне. Связанные с бурями форбуш-понижения космических лучей, по-видимому, играют важную роль в воздействии геомагнитных бурь на ОСО [8]. Форбс и др. [9] утверждали, что ~15-20% наблюдаемой ионосферной изменчивости на всех широтах с периодами в диапазоне ~2-30 дней в спокойных геомагнитных условиях, по-видимому, имеют метеорологическое происхождение. Стратосферно-ионосферная связь не только наблюдалась на разных широтах и в разные промежутки времени, но и моделировалась с использованием современных атмосферных и атмосферно-ионосферных моделей [10, 11]. Еще одним явлением нижней атмосферы, которое может влиять на ионосферно-стратосферную связь, являются квазидвухлетние колебания (КДК) направления стратосферных зональных ветров вблизи экватора. Фаза КДК (западная или восточная) влияет на условия распространения гравитационных волн в нижних и средних слоях атмосферы и, следовательно, на условия полярных вихрей. Внезапные стратосферные потепления (ВСП) более часты в эпоху восточных КДК, тогда как периоды западных КДК связаны с более сильным и долгоживущим полярным вихрем и сильными западными зональными ветрами в среднеширотной стратосфере [12]. Таким образом, можно ожидать зависимости силы ионосферно-стратосферной связи от фазы КДК. В работе [13] установлено, что температура воздуха и давление на уровне 70–10 гПа антикоррелируют с ПЭС в ионосфере.

Стратосферно-ионосферная связь наблюдается сильнее зимой, особенно во время восточной фазы КДК с ВСП.

Таким образом, изменения параметров ионосферы, так и полярного озона зависят как от внешнего космического воздействия (галактические лучи, солнечные протонные вспышки, геомагнитные бури и пр.), так и от воздействия других слоев атмосферы (планетарные волны, ВСП, гравитационные волны и др.). В обоих случаях ионосфера выступает промежуточным звеном как уменьшения, так и увеличения молекул озона. Поэтому в данной работе будет сделан акцент на связи между ионосферными показателями атмосферы и ОСО в полярных регионах Южного полушария, так как данная местность свободна от высоких орографических систем, прямого антропогенного воздействия и обладает чистой атмосферой.

Данные и методы

Для установления причинно-следственных связей между электрическими процессами в атмосфере и ОСО использовался метод наложенных эпох. В качестве критерия электрических процессов был выбран параметр ионосферный планетарный индекс W_p [14]. Система W индексов ионосферной погоды позволяет градуировать состояние ионосферы и плазмосферы от спокойных условий до интенсивных бурь. Степень ионосферной возмущенности градуирована по данным сети обсерваторий, а также в узлах глобальных карт GPS TEC, ПЭС за период с 1994 по 2022 гг. Под ПЭС понимается полное число электронов в столбе единичного сечения, проходящего через ионосферу. Общепринятой единицей измерения ПЭС является TECU (Total Electron Content Unit – единица измерения полного электронного содержания, равная 10^{16} м^{-2}).

Степень возмущенности обозначена как W индекс:

- $W=\pm 1$ для спокойного состояния,
- $W=\pm 2$ при умеренном возмущении,
- $W=\pm 3$ при малой буре,
- $W=\pm 4$ при интенсивной буре.

Знак \pm характеризует положительное или отрицательное отклонение $\log(N_m F2/N_q F2)$ или $\log(\text{TEC}/\text{TEC}_q)$ в каждом пункте наблюдений от спокойного медианного уровня за предыдущие 27 дней (один оборот Солнца).

В качестве параметра ОСО были выбраны средние показатели для полярной шапки Южного полушария (от 63° ю.ш. до 90° ю.ш.) [15]. Рассчитаны значения отклонений ОСО от многолетней нормы (период 1978-2022 гг.) для полярной шапки Южного полушария. В архиве ИЗМИРАН [16] были использованы даты с ионосферными бурями по критерию индекса W_p , где значения бурь превышали 6 единиц, т.е. это очень интенсивные ионосферные бури планетарного масштаба. Всего таких ионосферных бурь получилось 37 случаев за период с 1994 по 2022 гг. Далее методом наложенных эпох были получены изменения отклонений ОСО от нормы в периоды этих ионосферных бурь для всех 37 случаев и для восточной и западной фазы КДК. Данные по фазам КДК использовались с сайта Берлинского института метеорологии [17].

Результаты

В итоге получились, что за 9-10 дней до начала ионосферной бури наблюдается значительный рост ОСО (на 7 ед.Д.) в полярной области Южного полушария, и в день начала бури (в среднем это -2 – -3 день на рисунке 1) отклонения ОСО достигают своего максимального пика. Далее идет уменьшение ОСО на протяжении всего периода развития

ионосферной бури (до периода окончания бури на рисунке 1 это +3 – +4 день). После окончания бури снова наблюдается небольшой рост значений ОСО в полярной шапке Южного полушария (см. рис.1).

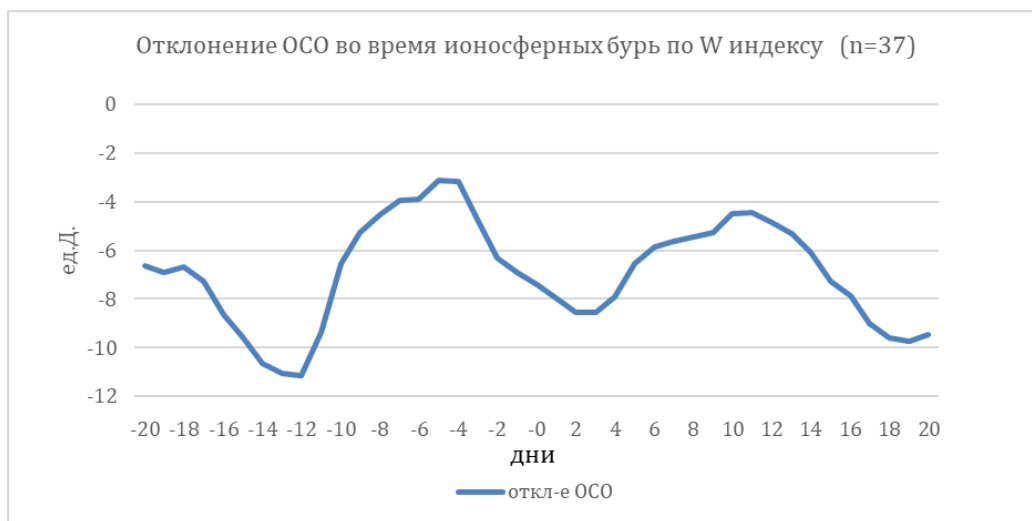


Рис. 1. Отклонение ОСО в полярной шапке Южного полушария от многолетней нормы в период развития 37 случаев ионосферных бурь по планетарному индексу W_p за период 1994-2022 гг. «0» - пик бури.

Объяснение двух пиков ОСО во время ионосферной бури можно увидеть на рисунке 2, где представлены отклонения ОСО во время ионосферных бурь при разных фазах КДК. Ранний пик ОСО (до начала бури) характерен для случаев бурь во время западной фазы КДК (22 случая), а поздний пик – для случаев бурь во в период восточной фазы КДК. Также имеются различия между двумя группами бурь по фазам КДК и по количественной характеристике. При западной фазе амплитуда отклонений ОСО (15 ед.Д.) несколько больше, чем при восточной (10 ед.Д.).

Далее для детального представления изменений вертикальных профилей озона и других малых газовых составляющих средней атмосферы рассматривался случай мощной ионосферной бури 2004 год, которая началась 7 ноября, достигла своего пика 8 ноября в 10-12 ч по UTC, и закончилась 14 ноября (см. рисунок 3). Эта буря отличается тем, что она была индуцирована солнечной протонной вспышкой накануне вечером 6 ноября и была самая продолжительная и самая сильная из всех интенсивных бурь по критерию W -индекса. Значения индекса в пик бури достигали 9,9 баллов. На рисунке 3 построены усредненные (среднесуточные и мгновенные) карты планетарного индекса W для трех стадий развития ионосферной бури. В итоге, в пиковый день бури, 8 ноября, значения индекса достигали 4 баллов, что соответствует интенсивной ионосферной буре. Область положительного роста ПЭС была расположена, в основном, в области между Австралией и Южной Америкой. Над Антарктидой наблюдались отрицательные значения W -индекса (от 0 до -4). В дни до пика бури состояние ионосферы было близко к нейтральному состоянию, а после - имело небольшое отрицательное отклонение.

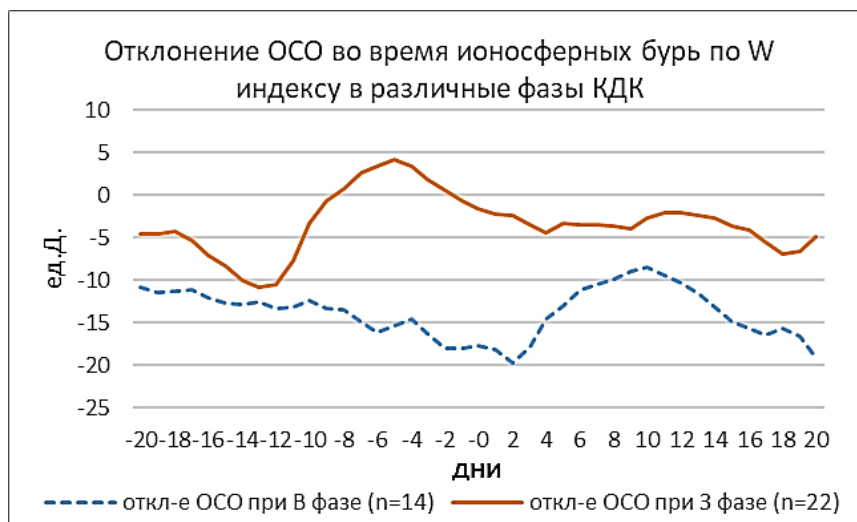


Рис. 2. Отклонение ОСО в полярной шапке Южного полушария от многолетней нормы в период западной (22 случая) и восточной (14 случаев) фазы КДК, когда наблюдались ионосферные бури по индексу W_p . «0» - пик бури.

В отличие от Северного полушария, в высоких широтах Южного полушария не наблюдается заметного влияния геомагнитных бурь на ОСО [18]. Это не означает отсутствия таких эффектов в высоких широтах Южного полушария. В высоких широтах выпадение частиц, связанных с бурями и солнечными протонными событиями (СПС) производят чрезмерное количество HO_x и NO_x , которые разрушают озон в мезосфере и, во время зимней полярной ночи, в верхней и средней стратосфере [19].

Солнечные протонные вспышки выбрасывают потоки высокоэнергетических частиц, называемых солнечными космическими лучами. За сильными СПС обычно следуют геомагнитные бури. СПС модулируют поглощение энергии в полярной шапке в нижней ионосфере. СПС значительно увеличивают электропроводность в стратосфере высоких широт. СПС играют важную роль в нейтральной средней атмосфере, но не в нижней. Они производят нечетный азот и нечетный водород с последующим разрушением озона [20]. Увеличение HO кратковременны, тогда как увеличение NO носят долгосрочный характер [21].

Профиль атмосферного озона очень чувствителен не только к солнечному излучению, но и к галактическим космическим лучам (Форбуш-понижениям), а точнее к производимой ими вторичной ионизации в нижней стратосфере и активации дополнительной выработки озона вблизи максимума Регенера-Пфотцера. Зависимость отклика озона от широты обусловлена различной энергией заряженных частиц. Стратосферный озон в низких широтах, чувствителен к излучению, захваченному геомагнитным полем в радиационных поясах Ван-Аллена. В то же время полярный озон больше уязвим для солнечной плазмы, попадающей на Землю вслед за солнечными протонными событиями [22].

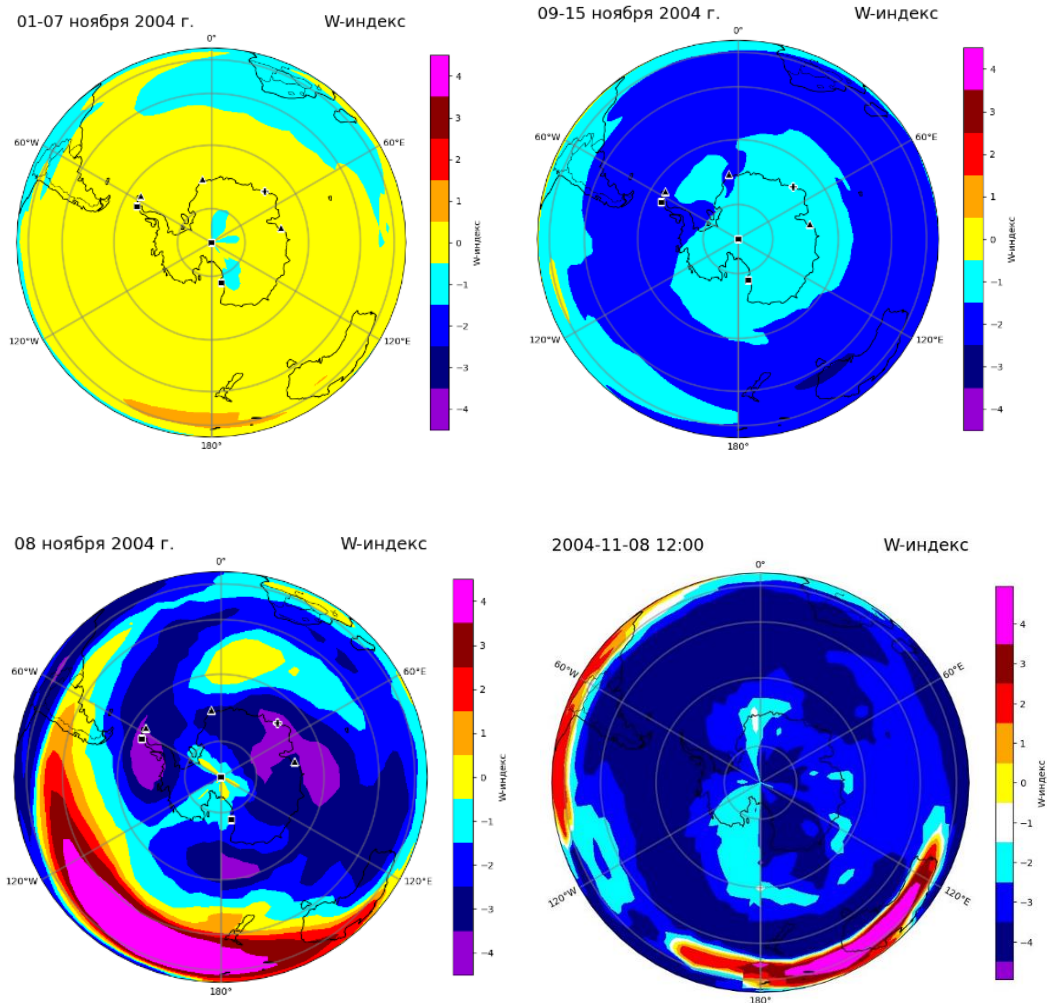


Рис. 3. Усредненные карты W-индекса для Южного полушария на даты до начала бури, пик бури и окончания бури 07-14.11.2004 г.

При рассмотрении вертикальных профилей малых газовых составляющих средней атмосферы в ходе развития солнечной протонной вспышки и ионосферной бури 7-14 ноября 2004 года были выявлены следующие моменты (см. рисунок 4). Наблюдался рост концентрации озона (по абсолютному значению парциальной плотности, увеличение от 1 ноября до 15 ноября составило около $100 \cdot 10^{-9}$ кг/м³) в верхней (на уровнях от 5 до 10 гПа) и средней (на уровнях от 10 до 70 гПа) стратосфере. Одновременно, на схожих уровнях росла и концентрация NO_x (NO₂ и NO). Азотистые соединения, в основном, изменялись и росли вниз по вертикальному столбу атмосферы (на уровнях от 10 до 50 гПа).

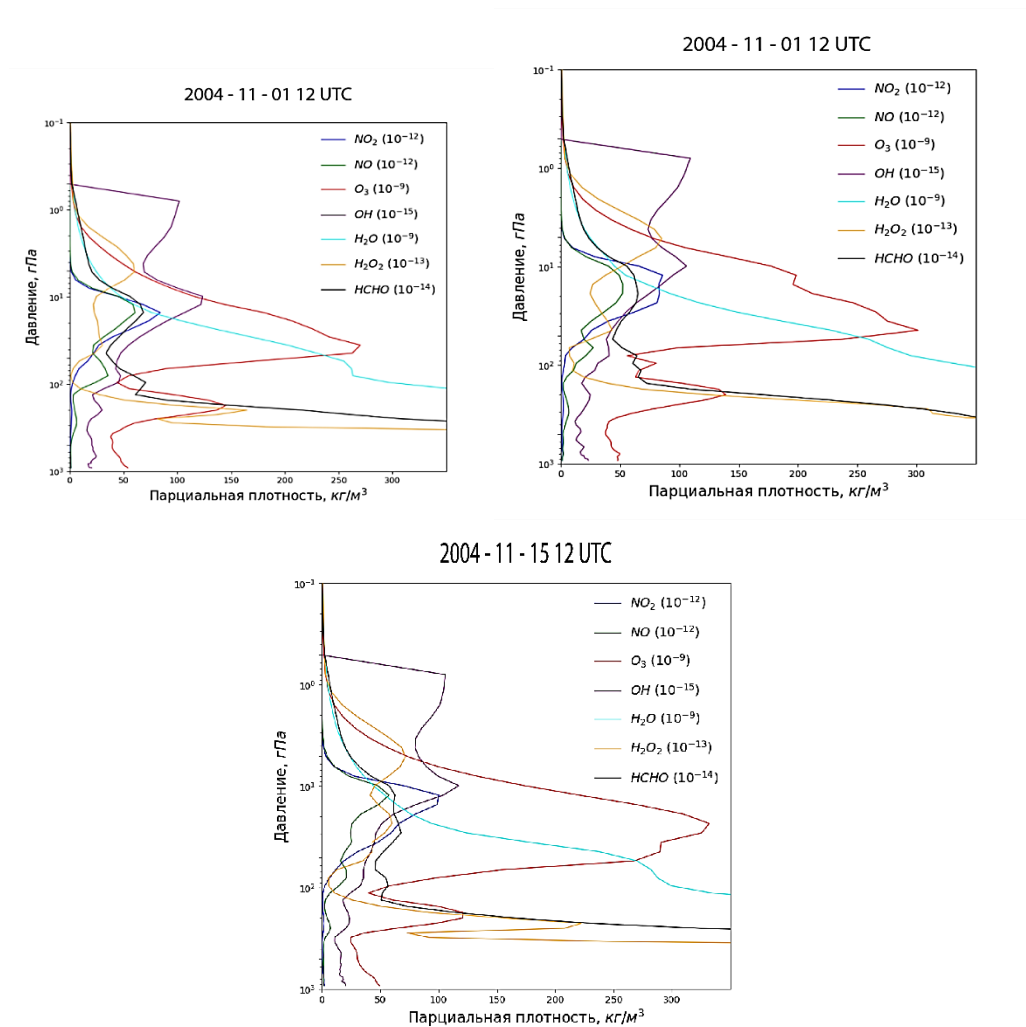


Рис. 4. Вертикальные профили различных малых газовых составляющих для территории Восточной Антарктиды на 01 ноября, 08 ноября и 15 ноября 2004 г. по данным реанализа MERRA-2.

В пик бури, 8 ноября, концентрация озона на уровне 10 гПа несколько уменьшилась за счет роста концентраций NO₂ на фоне дальнейшего общего роста. К окончанию ионосферной бури рост озона продолжился, а концентрации NO_x уменьшились до исходного значения. В итоге, профиль озона частично трансформировался под воздействием роста концентраций NO_x (NO₂ и NO). Остальные газы претерпели незначительные изменения.

Выводы

Таким образом, полученные результаты подтверждают прошлые исследования изменения ОСО во время ионосферных бурь, в том числе и для Южного полушария [18]. В период развития ионосферной бури или роста ПЭС происходит уменьшение ОСО, а увеличение ОСО происходит до начала бури и после ее завершения при разных фазах КДК. Химические реакции озона с азотистыми соединениями замедляют реакцию образования озона в верхней и нижней стратосфере. В данном анализе не учитывались изменения ОСО

под действием динамических и фотохимических факторов в средней атмосфере, что приводит к перераспределению или разрушению ОСО в данном регионе.

Литература

1. Митра, А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. – Москва: Мир, 1977, 372 с.
2. Leeds A. R. Lines of Discovery in the History of Ozone/A. R Leeds //Annals of the New York Academy of Sciences. 1880. V. 1. iss. 3. P. 363-391.
3. Cander L. R. and Mihajlovic S. J. Forecasting ionospheric structure during the great geomagnetic storms, J. Geophys. Res.: Space Phys. 1998. 103 (A1). P. 391–398, doi:10.1029/97JA02418.
4. Kumar V. V. and Parkinson M. L. A global scale picture of ionospheric peak electron density changes during geomagnetic storms, Space Weather. 2017. 15 (4). P. 637 – 652, doi:10.1002/2016SW001573.
5. Roux S.G., Knížová P.K., Mořna Z., Abry P. Ionosphere fluctuations and global indices: A scale dependent wavelet-based cross-correlation analysis. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2012. 90. P. 186-197, doi:10.1016/j.jastp.2012.03.014.
6. Laštovička J. Effects of geomagnetic storms in the lower ionosphere, middle atmosphere and troposphere. J. Atmos. Terr. Phys. 1996. 58. P. 831–843.
7. Laštovička J. and Křižan P. Geomagnetic storms, Forbush decreases of cosmic rays and total ozone at northern higher middle latitudes. J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2005. 67. P. 119–124.
8. Kilifarska N. Hemispherical asymmetry of the lower stratospheric O3 response to galactic cosmic rays forcing ACS Earth & Space Chem. 2017. 1. P. 80–88.
9. Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2000. 62(8). P.685-693
10. Gavrilov N.M., Koval A.V., Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N. Simulating planetary wave propagation to the upper atmosphere during stratospheric warming events at different mountain wave scenarios. Adv. Space Res. 2018. 61. 7. P. 1819-1836, doi:10.1016/j.asr.2017.08.022
11. Pedatella N. M., Liu H.-L. The influence of internal atmospheric variability on the ionosphere response to a geomagnetic storm, Geophys. Res. Lett. 2018. 45. P. 4578–4585, doi:10.1029/2018GL077867.
12. Lu H., Baldwin M.P., Gray L.J., Jarvis M.J. Decadal-scale changes in the effect of the QBO on the northern stratospheric polar vortex, J. Geophys. Res. Atmos. 2008. 113(D10).
13. Morozova A. L., Ribeiro P., Blanco J. J., Barlyaeva T. V. Temperature and pressure variability in mid-latitude low atmosphere and stratosphere-ionosphere coupling. Advances in Space Research. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.10.039>
14. Гуляева Т.Л. Показатели изменчивости ионосферы во время геомагнитных бурь по наблюдениям GPS/ Т.Л.Гуляева //Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12. Т. 2. С.152-156.
15. NASA Режим доступа: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/> - Дата доступа: 08.01.2023 г.
16. ИЗМИРАН. Режим доступа: <https://www.izmiran.ru/> - Дата доступа: 08.01.2023 г.
17. Берлинского института метеорологии. Данные КДК. Режим доступа: <https://www.geo.fu-berlin.de/en/met/ag/strat/produkte/qbo/index.html> - Дата доступа: 19.01.2023 г.
18. Laštovička Y., Křižan P. Impact of strong geomagnetic storms on total ozone at Southern higher middle latitudes. Stud. Geophys. Geod. 2008. 53. P. 151–156
19. Jackman C.H., Fleming E.L. Vitt F.M. Influence of extremely large solar proton events in a changing stratosphere. J. Geophys. Res. 2000. 105(D9). P. 11659–11670
20. Heath D.F., Krueger A.J., Crutzen P.J. Solar Proton Event: Influence on Stratospheric Ozone. Science. 1977. 197 (4306). P. 886-889, doi:10.1126/science.197.4306.886

21. Jackman C.H., Douglass A.R., Rood R.B., McPeters R.D., Meade P.E. Effect of solar proton events on the middle atmosphere during the past two solar cycles as computed using a two-dimensional model, *J. Geophys. Res.* 1990. 95(D6). P. 7417–7428, doi:10.1029/JD095iD06p07417.
22. Kilifarska N.A., Bakmutov V.G., Melnyk G.V. The hidden link between Earth's magnetic field and climate. 2020. Amsterdam, Elsevier. ISBN 978-0-12-819346-4.