

## ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ОЗОН СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ В ПОЛЯРНЫХ ШИРОТАХ

Ю.Ю. Куликов<sup>1</sup>, В.И. Демин<sup>2</sup>, В.М. Демкин<sup>3</sup>, А.С. Кириллов<sup>2</sup>, В.Г. Рыскин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

E-mail: yuyukul@ipfran.ru

<sup>2</sup>Полярный геофизический институт, 184209, г. Апатиты, Академгородок, 25а

<sup>3</sup>Высшая школа экономики, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25

**Аннотация.** Представлены результаты наземных микроволновых наблюдений озона средней атмосферы за Полярным кругом на Кольском полуострове в Апатитах (67N, 33E), которые были выполнены для нескольких зимне-весенних сезонов (2017–2024 гг.). В измерениях был использован мобильный озонметр (рабочая частота 110.8 ГГц). Прибор позволяет отслеживать вариации озона в средней атмосфере с 15-ти минутным разрешением по времени. Выполнены оценки вертикальных распределений озона в интервале высот 22–60 км. Эти высотные профили были сопоставлены со спутниковыми данными MLS/Aura об озоне и температуре в средней атмосфере. Обнаружено значительное и продолжительное влияние внезапных стратосферных потеплений на вертикальное распределение озона на высотах 22–60 км. При этом границы изменчивости мезосферного озона (60 км) над Апатитами сопоставимы или превышают модельные расчёты последних лет по оценке влияния солнечных протонных событий и высыпания авроральных электронов на полярный озон. Рассмотрено воздействие планетарной геомагнитной бури в марте 2023 г. и протонных событий в феврале-марте 2024 г. на полярный мезосферный озон.

**Ключевые слова:** полярный мезосферный озон, средняя атмосфера, наземная микроволновая радиометрия, внезапное стратосферное потепление, солнечная активность

## INFLUENCE OF SOLAR ACTIVITY ON THE MIDDLE ATMOSPHERE OZONE IN POLAR LATITUDES

Y.Y. Kulikov, V.I. Demin, V.M. Demkin, A.S. Kirillov, V.G. Ryskin

**Abstract.** Results of ground-based microwave observations of the middle atmosphere ozone in the Arctic Circle at the Kola Peninsula, Apatity (67N, 33E), which were executed for several winter-spring seasons (2017 – 2024), are presented. In measurements was used the mobile ozonemeter (observation frequency 110.8 GHz). Instrument allows to trace variations of the middle atmosphere ozone with temporal resolution 15 min. The vertical distributions of ozone in the altitude range of 22 – 60 km were estimated. These high-altitude profiles were compared to satellite data MLS/Aura about ozone and temperature in a middle atmosphere. Significant and long influence of sudden stratospheric warming on vertical distribution of ozone at altitudes 22 - 60 km is revealed. Thus, the scale of variability mesospheric ozone (60 km) above Apatity is comparable or exceeds known model calculations according to influence of solar proton events and auroral electrons precipitation on variability of polar ozone. Thus, the scale of variability mesospheric ozone (60 km) above Apatity is comparable or exceeds known model calculations according to influence of solar proton events and auroral electrons precipitation on variability of polar ozone. Influence of a planetary geomagnetic storm in March, 2023 and proton events in February - March 2024 on polar mesospheric ozone is considered.

**Keywords:** polar mesospheric ozone, middle atmosphere, ground-based microwave radiometry, sudden stratospheric warming, solar activity

### Введение

На полярный озон средней атмосферы воздействуют как динамические процессы, связанные с развитием внезапных стратосферных потеплений (ВСП) или активизацией полярного вихря [1, 2], так и солнечная активность – протонные события, высыпания авроральных электронов [3–5]. Напомним, что средней атмосферой является область с условными границами 20 – 100 км. Значительная часть озонового слоя находится в средней атмосфере. Пригодное для жизни на Земле количество озона составляет величину около 300 единиц Добсона (е.Д). Кроме того, небольшое количество озона, порядка нескольких е.Д, находится в мезосфере. Эта часть атмосферы располагается от 50 до 90 км. Она остается до сих пор наименее изученной частью средней атмосферы. Отличительным свойством этой области

является большая плотность нейтральных частиц, которая всегда на порядки выше, чем ионов и электронов (менее  $10^3 \text{ см}^{-3}$ ). Наличие отрицательных ионов является одной из важных особенностей нижней ионосферы (D-области) по сравнению с другими ионосферными слоями. На сегодняшний день до конца не ясно как солнечная активность влияет на поведение мезосферного озона в полярных широтах. Ещё раз подчеркнем, что метод наземной микроволновой радиометрии один из немногих, который позволяет непрерывно следить за поведением озона во всей средней атмосфере в одном месте с высоким временным разрешением. Подробное описание прибора и методики измерений изложены в работе [6]. Цель настоящей работы – оценка изменений озона средней атмосферы при наличии ВСП в авроральной зоне в период повышенной солнечной активности

### Обсуждение результатов наблюдений

23–24 марта 2023 г. геомагнитные обсерватории по всему миру зафиксировали наиболее крупную за последние несколько лет магнитную бурю, произошедшую на Земле и имеющую планетарный характер. Главная фаза бури началась в  $\sim 17:30 \text{ UT}$  23 марта. Наиболее интенсивная суббуря (балл события в пике 7.66) с максимумом в  $21:30 \text{ UT}$  и магнитной возмущенностью до 1500 нТл наблюдалась преимущественно в авроральных широтах [7]. Непрерывные наземные микроволновые наблюдения озона проводились с 21 по 26 марта, т.е. до и после магнитной бури. Суточные вариации мезосферного озона на высоте 60 км происходили без изменений [2].

На рис. 1 приведены суточные вариации плотности озона (60 км) над Апатитами во время солнечных протонных событий в феврале 2024 г.

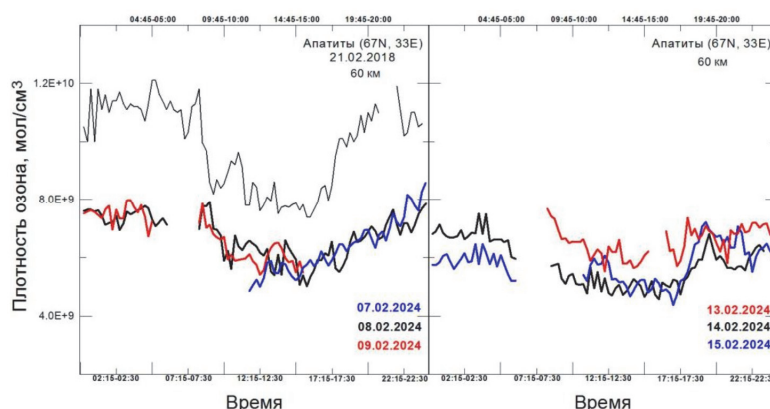


Рис. 1. Изменения мезосферного озона (60 км) из ММ-измерений во время протонных событий в феврале 2024 г. Левая панель (перед протонными событиями) – суточные циклы плотности  $\text{O}_3$  7.02. (синяя кривая), 8.02. (черная кривая) и 9.02. (красная кривая). Правая панель (во время протонных событий) – суточные циклы плотности  $\text{O}_3$  13.02. (красная кривая), 14.02. (черная кривая) и 15.02. (синяя кривая). На левой панели также показан суточный ход  $\text{O}_3$  (тонкая черная кривая) после ВСП зимой 2017–2018 гг.

В зимне-весенний сезон 2023–2024 гг. во время 25 солнечного цикла произошли протонные события (данные GOES-18) первое (февральское) с 09.02. 16:00 UT по 25.02.2024 – три всплеска потока частиц, следующее повышение потока случилось 12.02. 08:00 UT и третье слабое 16.02. 08:00 UT. Общая продолжительность данных событий составила около двух недель. Обратимся к рис. 1, хорошо заметно отличие суточных циклов озона на высоте 60 км на левой и правой панели. Усредненная за трое суток величина уменьшения плотности  $\text{O}_3$  (правая панель) составила  $(11 \pm 2) \%$  относительно правой панели. Результат воздействия ВСП на мезосферный озон существенно больше, чем влияние протонных событий (см. рис. 1). Следующие протонные события состоялись в марте 2024 г. Они начались 23.03. и продолжались до 01.04.2024 г. Мартовские протонные события имели один продолжительный всплеск потока частиц, интенсивность которого превышала предыдущие февральские события. Кроме того, эти события сопровождались форбуш эффектом (ФЭ) 24–25 марта.

На рис. 2 приведены суточные вариации плотности озона (60 км) над Апатитами во время солнечных протонных событий и ФЭ в марте 2024 г.

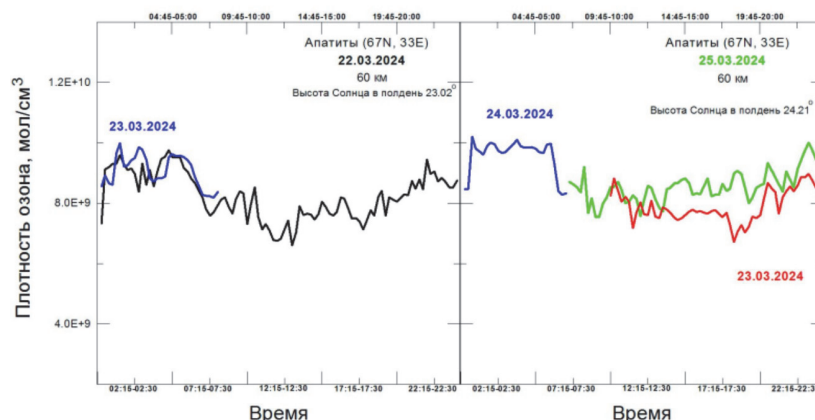


Рис. 2. Суточные вариации плотности мезосферного озона (60 км) из ММ-измерений во время протонных событий в марте 2024 г. Левая панель (перед протонными событиями) – суточные циклы плотности  $O_3$  22.03. (черная кривая) и 23.03. (синяя кривая). Правая панель (во время протонных событий и ФЭ) – суточные циклы  $O_3$  продолжение 23.03. (красная кривая); 24.03. (синяя кривая) и 25.03. (зеленая кривая)

Рассмотренные выше протонные события не вызвали существенных изменений суточного хода  $O_3$ . Вариации мезосферного озона (60 км), связанные с восходом и заходом Солнца, доминировали над вариациями, которые возможно были вызваны влиянием протонных событий вблизи максимума 25 солнечного цикла.

Более тридцати лет тому назад с борта судна Академик Ширшов были выполнены ракетные измерения озона, окиси азота и температуры в средней атмосфере над Индийским океаном (вблизи Антарктиды) во время экстремально сильных солнечных протонных событий в октябре 1989 г. [8, 9]. Начало вспышки 19 октября в 13:00 UT. Было обнаружено максимальное снижение озона на высоте 50 км на 20–25%. В это же время нам удалось выполнить годовичные наблюдения озона средней атмосферы в 1989–1990 гг. на станции Мирный (67S, 93E) в миллиметровом диапазоне длин волн [9].

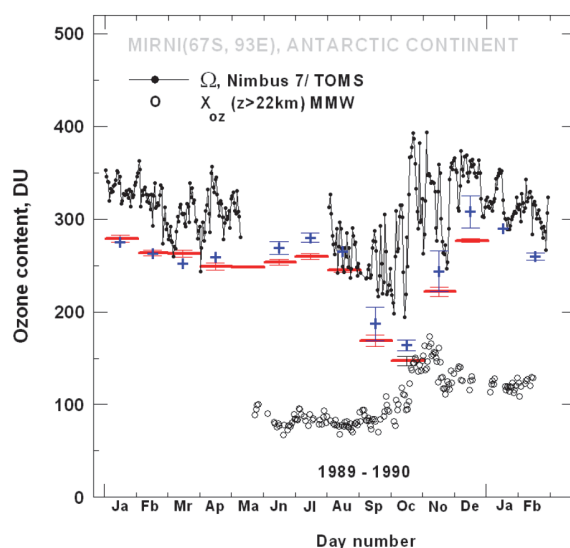


Рис. 3. Вариации содержания озона в средней атмосфере, которые были измерены в миллиметровом диапазоне длин волн в 34 Советской Антарктической экспедиции на станции Мирный (полые кружки – среднесуточные величины) в 1989–1990 гг.; изменения общего содержания в этот же период времени над станцией обозначены заполненными кружками – спутниковые данные Nimbus-7/TOMS; изменения среднемесячных величин суммарного озона на станции Амундсен-Скотт, Южный полюс по данным озонозондов более чем за 30 лет с 1992 г. (красные горизонтальные линии и синие кресты с ошибкой для сезона 2004 г.)

Протонные события 19 октября совпали по времени с ВСП на антарктическом берегу и разделить их действие на озон средней атмосферы представлялось затруднительным.

### Заключение

Исключительно важным является использование для диагностики поведения озона средней атмосферы в полярных широтах радиофизического метода – наземной радиометрии в миллиметровом диапазоне длин волн.

В зимне-весенних микроволновых наблюдениях над Апатитами вблизи максимума солнечной активности (25 цикл) были получены следующие результаты:

1. Планетарная геомагнитная буря 23–24 марта 2023 года не оказала заметного влияния на мезосферный озон на высоте 60 км.
2. В сезон 2023 – 2024 гг. во время протонных событий 09.02. – 25.02.2024 и 23.03. – 01.04.2024 понижение мезосферного озона на высоте 60 км не превышало 10%.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИПФ РАН (проект FFUF-2024- 0034).

### Список литературы

1. Куликов Ю.Ю., Андриянов А.Ф., Демин В.И., Демкин В.М., Кириллов А.С., В.Г. Рыскин, Шишаев В.А. Длительные микроволновые наблюдения озона средней атмосферы в Апатитах в течение трех зим // Геомагнетизм и Аэронавтика. – Т. 63. – № 5. – С. 644–656, 2023.
2. Куликов Ю.Ю., Демин В.И., Демкин В.М., Кириллов А.С., Лосев А.В., Рыскин В.Г. Динамические явления в стратосферном и мезосферном озоне полярной атмосферы в феврале-марте 2023 года // Оптика атмосферы и океана. – Т. 38. – № 2. – С. 109–114. –2025.
3. Jackman C.H., Fleming E.L., Vitt F.M., Considine D.V. The influence of solar proton events on the ozone layer // Adv. Space Res. – 1999. – V. 24. – № 5. – P. 625–630.
4. Jackman C.H., Marsh D.R., Vitt F.M., Garcia R.R., Randall C.E., Fleming E.L., Frith S.M. Long term middle atmosphere influence of very large solar proton events // J. Geophys. Res. – V. 114. – No. D11. DOI: 10.1029/2008jd011415. 2009.
5. Andersson V.E., Verronen P.T., Rodger C.J., Clilverd M.A., Seppälä A. Missing driver in the SunEarth connection from energetic precipitation impacts mesospheric ozone // Nat. Commun. – 2014. DOI: 10.1038/ncomms6197.
6. Kulikov Y.Y., Krasilnikov A.A., Shchitov A.M. New mobile ground-based microwave instrument for research of stratospheric ozone (some results of observation). // The Sixth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'07) Proceedings. – 2007. – Vol. 1. – P. 62–66.
7. Громова Л.И., Клейменова Н.Г., Громов С.В., Канониди К.Х., Петров В.Г., Малышева Л.М. Интенсивные суббури в главную фазу магнитной бури 23–24 марта 2023 г. // Геомагнетизм и аэронавтика. – 2024. – Т. 64. – № 6. – С. 760–770.
8. Задорожный А.М., Кихтенко В.Н., Кокин Г.А., Распопов О.М., Шумилов О.И., Тучков Г.А., Тясто М.И., Чижов А.Ф., Штырков О.В., Касаткина Е.А., Вашенюк Э.В. Реакция средней Атмосферы на солнечные протонные события в октябре 1989 г. // Геомагнетизм и аэронавтика. – 1992. – Т. 32. – № 2. – С. 32–40.
9. Zadorozhny A.M., Kikhtenko V.N., Kokin G.A., et al. Middle atmosphere response to the solar proton events of October 1989 using the results of rocket measurements // J. Geophys. Res. –1994. – V. 99. – No D10. – P. 21059–21069.
10. Kulikov Y.Y., Kuznetsov I.V., Andriyanov A.F., et al. Stratospheric ozone variability in high latitudes from microwave observations // J. Geophys. Res. – 1994. – V. 99. – No D10. – P. 21109–21116.