

ОЗОНОВАЯ «МИНИ-ДЫРА» НАД СЕВЕРОМ УРАЛА И СИБИРИ

*М.П. Никифорова¹, П.Н. Варгин², А.М. Звягинцев²,
Н.С. Иванова², И.Н. Кузнецова³, А.Н. Лукьянов²*

*¹Севастопольский экономико-гуманитарный институт (филиал)
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет
имени В.И. Вернадского»;*

²Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный;

*³Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации*

*nikiforovamp@yandex.ru, vargin@mail.ru, zvyagintsev45@yandex.ru,
oom@cao-rhms.ru, muza@mecom.ru, lukyanov@caomsk.mipt.ru*

Озон является важнейшей газовой составляющей атмосферы, поскольку является участником многих циклов атмосферной химии и защищает Землю от жесткого губительного солнечного ультрафиолетового (УФ) излучения [6]. Важнейшей характеристикой озона является его общее содержание в атмосфере (ОСО), влияющее на УФ облученность земной поверхности: чем меньше ОСО, тем больше ультрафиолета достигает поверхности. ОСО измеряют в единицах Добсона (е.Д.) – 1 е.Д. соответствует приведенной (при нормальных условиях) толщине слоя озона 0,01 мм. В среднем по Земле ОСО составляет около 300 е.Д.; ОСО очень изменчиво в пространстве и времени и связано с величиной потока солнечной радиации, атмосферным переносом и (фото-) химическими процессами.

Согласно существующей терминологии [2, 8, 14], озоновой «мини-дырой» (ОМД) называют область, общее содержание озона (ОСО) над которой меньше 220 е.Д. (критерий идентификации антарктической «озоновой дыры»), с продолжительностью существования до 1 недели (у «озоновой дыры» – более 1 мес) и

площадью до 3 млн км² (у «озоновой дыры» – более 10 млн км²). Кроме приведенных характеристик, существенно различаются также и причины возникновения «озоновой дыры», наблюдаемой в полярных областях Южного полушария, и эпизодов ОМД, наиболее характерных для внетропических широт Северного полушария.

Антарктическая "озоновая дыра" формируется с августа по ноябрь-декабрь в результате разрушения озона в гетерогенных реакциях на полярных стратосферных облаках (ПСО), в условиях устойчивого циркумполярного вихря (ЦПВ) [10, 18–20]. Во внетропических широтах Северного полушария осенью (в период, когда наблюдается сезонный минимум ОСО) в отдельные годы могут возникать области аномально низких значений ОСО синоптического масштаба, которые классифицируются как ОМД. Такие явления наиболее часто возникают над Северной Атлантикой и перемещаются с зональными потоками на восток, иногда доходя до северных районов Сибири [5, 7, 8]. Причинами их формирования являются аномалии крупномасштабных атмосферных процессов [15, 17, 22]. Самые глубокие озоновые «мини-дыры» образуются в стратосферном циклоне над высоким и теплым тропосферным антициклоном [11, 12].

В период инструментальных наблюдений в первые месяцы года над территорией России существенные отрицательные аномалии ОСО наблюдались в 1995–1997, 2000, 2005, 2011 гг., причем интенсивность аномалий нарастала к марту-апрелю [1, 3]. Однако ни в один из указанных годов ОСО на российских станциях не опускалось ниже 230 е.Д. В 2016 г. в конце января на станциях отечественной наземной озонометрической сети над севером Урала и Сибири впервые зафиксированы значения ОСО, меньшие 220 е.Д., т. е. ОМД. В настоящей работе приведены характеристики этой ОМД, рассмотрена динамика значений ОСО и различных метеоэлементов в эпизоде, а также обсуждены возможные причины и факторы возникновения аномально низкого уровня ОСО.

Особенности ОСО зимой 2015/2016 гг.

Средний многолетний сезонный ход ОСО во внетропических широтах Северного полушария имеет минимум в сентябре,

а максимум в марте-апреле [6]. В конце января 2016 г. над северными районами Урала и Сибири на четырех станциях российской озонотрической сети (Печора, 65° с. ш., 57° в. д.; Ханты-Мансийск, 61° с. ш., 69° в. д.; Туруханск, 66° с. ш., 88° в. д.; Тура, 64° с. ш., 100° в. д.) зафиксированы значения ОСО меньше 220 е.Д., что на 40–45 % меньше средних многолетних (рис. 1).

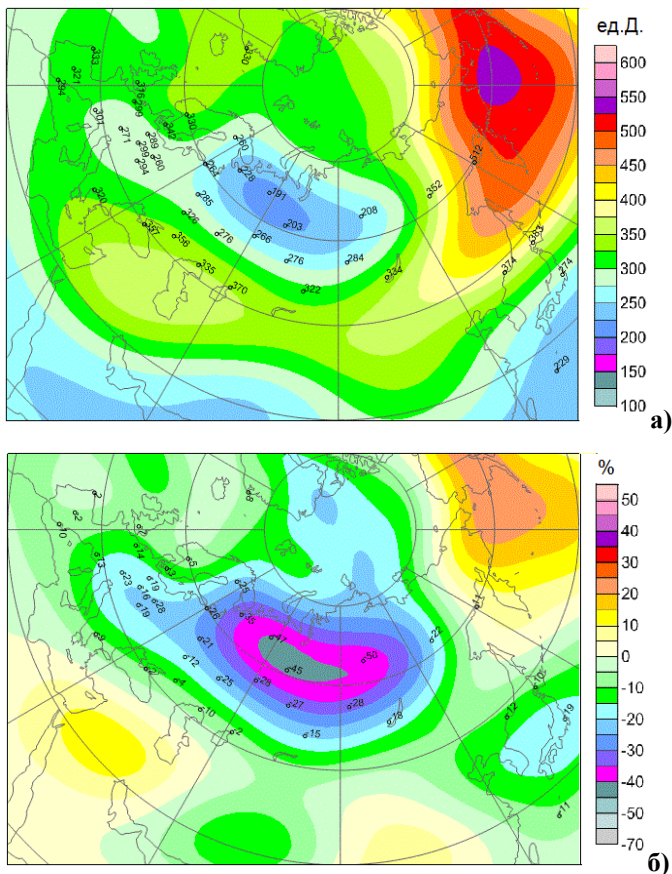


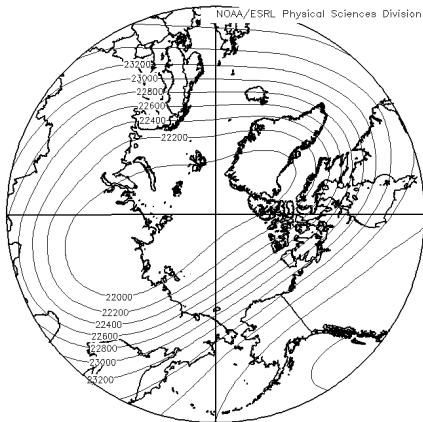
Рис. 1. ОСО (а) и его отклонения от нормы (б) 28 января 2016 г. по спутниковым данным WOUDC [<http://woudc.org/>], числа на карте – измерения ОСО на станциях озонотрической сети.

Столь значительное уменьшение ОСО подтверждалось и данными измерений ОСО с помощью инструмента OMI со спутника AURA (США). За всю историю инструментальных наблюдений (с 1973 г.) никогда прежде эпизодов ОМД в первую половину года над территорией России не наблюдалось, хотя значительные озоновые аномалии над территорией России регистрировались в отдельные годы в период февраль-апрель [1, 3, 9, 13]: дефицит ОСО достигал 50 % (от нормы), но ОСО оставалось больше 220 е.Д.

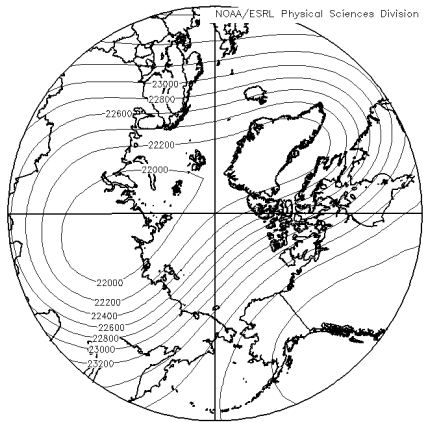
Заметные отклонения ОСО от «климатической» нормы, которая определяется как среднее за период 1973–1984 гг., начали наблюдаться уже в начале зимы 2015/2016 гг., в основном в высоких широтах Северного полушария. Над российским сектором Арктики в декабре 2015 г. временами отмечалось уменьшение ОСО почти до 250 е.Д., что соответствует дефициту 20–30 % от нормы.

Первые признаки возникновения «мини-дыры» над территорией России появились в последней неделе января. В эти дни большая ось имевшего вид эллипса стратосферного циклона, практически не меняя околополюсного положения, вместе с соответствующими ей ложбинами, распространившимися на Сибирь и Гренландию, разворачивалась на восток. Вращение циркумполярного вихря сопровождалось активными динамическими процессами в центре ЦПВ, а именно раздвоением центра и смещением вертикальной оси. Как видно на рис. 2, уже 27 января над Таймыром локализовался замкнутый минимум геопотенциала (показана поверхность 30 гПа). На следующий день он еще сохранялся, но над Гренландией начал формироваться второй барический минимум, который, продолжая углубляться и расширяться по площади, расположился между Гренландией и Скандинавским полуостровом.

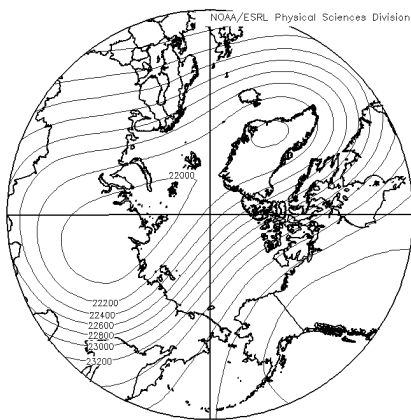
Именно в период изоляции центра ЦПВ над Таймыром (27–29 января) на северных станциях российской озонметрической сети зафиксировано резкое уменьшение ОСО, на станциях Печера и Ханты-Мансийск 28 января ОСО уменьшалось до 190–200 е.Д. (рис. 1, рис. 3). Измерения ОСО с помощью озонметров М-124 на станциях Туруханск и Тура также регистрировали значительное уменьшение ОСО (до 220 е.Д.).



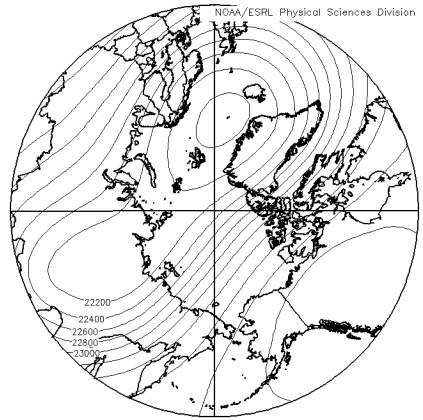
25 января



27 января



28 января



30 января

Рис. 2. Конфигурация циркумполярного стратосферного вихря, карты геопотенциальной высоты 30 гПа (гп. м). Реанализ NCEP/NCAR, 25–30 января 2016 г.

Площадь с аномально низким ОСО составила почти 3 млн км² (рис. 1). В период максимального развития ОМД содержание озона в столбе атмосферы составляло около половины нормы.

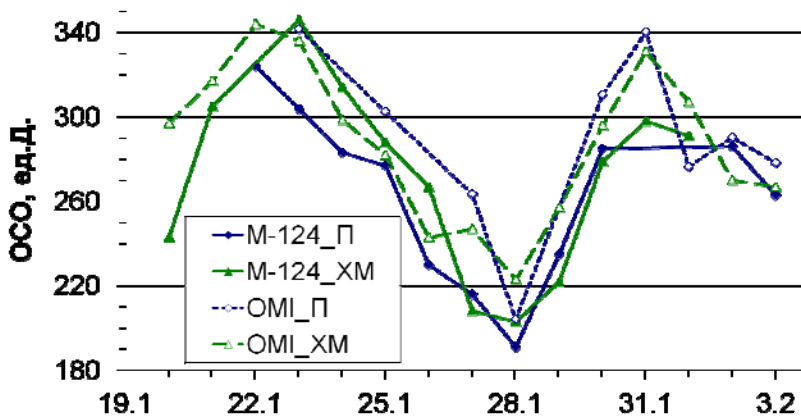


Рис. 3. ОСО по данным измерений с помощью наземного озонметра М-124 и инструмента ОМІ на спутнике АURA на станциях Печора (П) и Ханты-Мансийск (ХМ) в период 20 января – 3 февраля 2016 г.

Над российским севером и Сибирью ОМД существовала несколько дней. По-видимому, локализация минимума на Таймыром сопровождалась интенсивными восходящими движениями в нижней стратосфере, изоляцией холодного воздуха в центральной части ЦПВ. 1 февраля признаков ОМД уже не было, но ОСО над этой территорией по-прежнему оставалось меньше климатической нормы на 20–30 %. Исчезновение ОМД над российской территорией совпало с усилением стратосферного антициклона с центром Аляска – запад Канады и стратосферным потеплением, признаки начала которого обнаруживались уже 26 января в повышении температуры над севером Тихого океана, Чукоткой и Аляской.

Отличительными особенностями ЦПВ в начале 2016 г. стало то, что внутри него в диапазоне высот 15–30 км отмечалась экстремально низкая температура; область температуры $-80 \dots -90 \text{ }^\circ\text{C}$ (и ниже) была смещена в полярные широты Западного полушария и на север Евразийского материка, охватив большую часть Урала и Сибири. Отрицательные отклонения температуры от

нормы достигли на 10 гПа 30 К, на 50 гПа 20 К. На рис. 4 показаны поля геопотенциальной высоты и температуры на изобарической поверхности 30 гПа в день максимального углубления ОМД над российскими регионами.

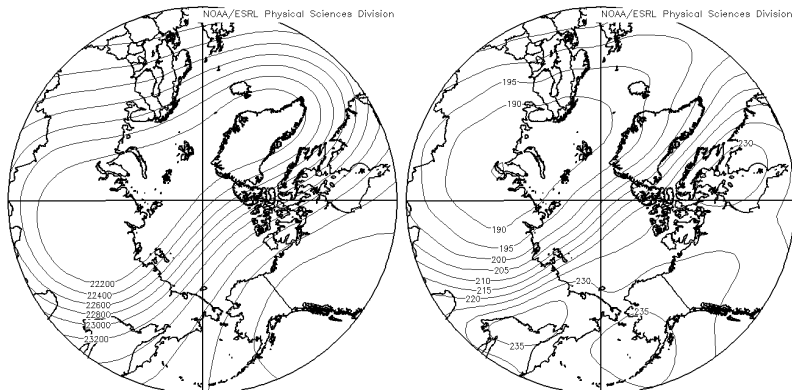


Рис. 4. Распределение геопотенциальной высоты (м; слева) и температуры (К; справа) на изобарической поверхности 30 гПа 28 января 2016 г. (по данным [25]).

О причинах образования озоновой «мини-дыры»

Дефицит ОСО в зимне-весенний период над северными областями России наблюдался в отдельные предыдущие годы в условиях малоподвижного глубокого ЦПВ. В эпизодах значительного дефицита ОСО температура внутри ЦПВ опускалась ниже $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ – порога образования полярных стратосферных облаков (ПСО), гетерогенные реакции на которых, в т. ч. с хлорсодержащими соединениями, ответственны за разрушение стратосферного озона [18].

Для справки: ПСО образуют частицы в разном агрегатном состоянии и разного композиционного состава; по этим характеристикам ПСО классифицируют на два типа. Частицы I типа ПСО образуются при температуре от 195 до 188 К (от -78 до $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$), частицы ПСО II типа – это кристаллики льда, образующиеся при температуре $\sim 188\text{ К}$ ($-85\text{ }^{\circ}\text{C}$) и ниже.

Зимой 2015/2016 гг., по данным NASA, США [22], в стратосфере над Арктикой зафиксированы рекордно низкие температуры (рис. 5 а), что способствовало возникновению большого количества ПСО I и даже II типа (на рис. 5 а зеленым цветом обозначены пороговые уровни их образования). Площадь ПСО к концу января 2016 г. достигла 17 млн км² (рис. 5 б) – это рекордное значение за всю историю инструментальных наблюдений.

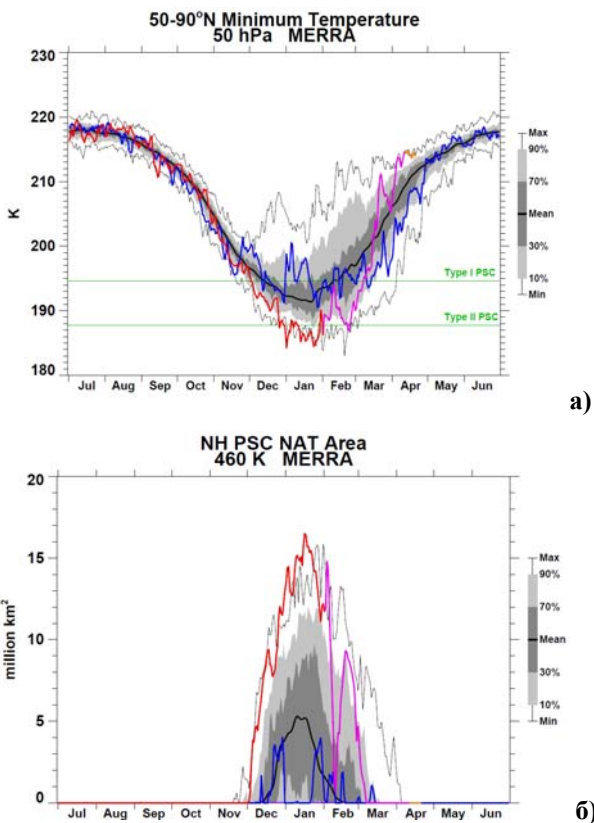


Рис. 5. Минимальная температура в широтном поясе 50–90° с. ш. на изобарической поверхности 50 гПа (а) и общая площадь полярных стратосферных облаков над Арктикой в 2015/2016 гг. (б) [22]. Черная линия – среднее за период 1978–2015 гг., синяя – зима 2014/2015 гг., красная-лиловая – зима 2015/2016 гг.

Аномально холодная нижняя стратосфера стала причиной значительных отклонений вертикальной стратификации температуры от «климатического» профиля. В первую очередь это касается слоя «термической» тропопаузы, которая на некоторое время практически исчезала. На рис. 6 показаны вертикальные профили температуры внутри зоны экстремального понижения температуры в ЦПВ на ст. Салехард (66° с. ш., 66° в. д.) до появления ОМД, в период ее существования и после исчезновения [23].

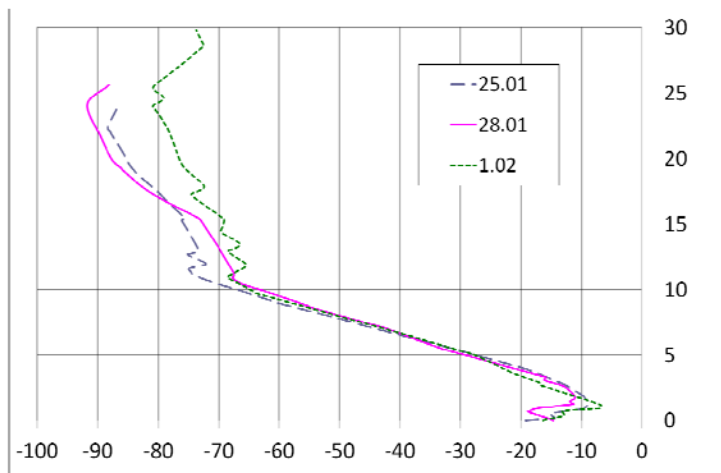


Рис. 6. Вертикальные профили температуры на ст. Салехард (66° с. ш., 66° в. д.) по результатам радиозондирования 0 ч ВСВ 25, 28 января и 1 февраля 2016 г. Вертикальная шкала – высота (км), ось x – температура ($^\circ\text{C}$).

Отметим, что тропопауза, обычно располагаясь на высотах 8–10 км, в период ОМД имела лишь формальные признаки. Явное повышение температуры с высотой, как указывают данные радиозондирования, отмечалось выше 25 км. Такая ситуация часто наблюдается при интенсификации явлений стратосферно-тропосферного обмена [4, 16], когда тропопауза, согласно ее классическому (термическому) определению, перестает четко выделяться на вертикальных температурных профилях (например, наблюдается «множественность» или «размытость» тропопаузы).

Отсутствие явной «термической» тропопаузы до высоты 20 км может свидетельствовать о том, что в формировании эпизода ОМД в начале 2016 г. определенную роль сыграли вертикальные движения [16]. Отметим также, что, согласно [21], в январе 2016 г. экваториальная поверхность 350 К располагалась выше по сравнению со средним многолетним положением (1979–2015 гг.), наибольший подъем совпал с эпизодом ОМД.

Исчезновение озоновой «мини-дыры» над территорией России, по-видимому, связано с минорным внезапным стратосферным потеплением, которое началось в последние дни января и достигло максимума к 9 февраля 2016 г. [21]. Оно же привело к быстрому сокращению общей площади полярных стратосферных облаков и восстановлению близкого к сезонной норме поля ОСО.

Образование зимой 2015/2016 гг. устойчивых областей значительного дефицита ОСО, изоляция и сильное углубление ЦПВ также сопровождалось заметными аномалиями ряда гидрометеорологических явлений:

- западной фазой квазидвухлетнего колебания, при которой ОСО меньше нормы на 6–8 % и более [1], что подтверждается событиями с образованием значительных отрицательных аномалий ОСО над северными районами России в 1995, 2005 и 2011 гг.;

- малой волновой активностью тропосферы зимой 2016 г., а также ослаблением среднезонального (45–75° с. ш.) потока тепла; с начала декабря 2015 г. этот поток тепла был меньше среднего многолетнего значения, только в конце января наметилась тенденция к его росту [21];

- максимальным за последние почти 70 лет (с 1948 г.) значением индекса Южного колебания в январе 2016 г. [24];

- активной фазой Эль-Ниньо. Положительная аномалия среднемесячной температуры поверхности Тихого океана в экваториальных широтах составила 2–3 °С [26]. Зимой 2016 г. положительные аномалии зафиксированы и в других акваториях Мирового океана, в т. ч. в Гольфстриме и Мексиканском заливе, где температура поверхности воды выше нормы на 1–2 °С, теплее обычного было в Норвежском и Баренцевом морях [26]. Другого знака отрицательная аномалия температуры морской поверхности уже длительное время наблюдается к югу от Гренландии;

– при аномально холодной нижней стратосфере на большей части России наблюдалась аномально теплая зима: средняя температура превысила климатическую норму на 4–5 °С, в Сибири, на Таймыре и Ямале на 7–8 °С, на арктических островах в Баренцевом и Карском морях на 10–12 °С. Отдельно отметим, в январе на Таймыре и в Якутии аномалии среднемесячной температуры достигли +12 ...14 °С, на островах в Карском море температура воздуха оказалась выше нормы почти на +17 °С (о. Визе). Никогда ранее аномалии не были столь большими. Исключение составил крайний восток страны, где зима оказалась холоднее нормы на 1–3 °С. Самой теплой в истории наблюдений стала зима 2015–2016 гг. также в США, Европе и Арктике [26].

И хотя сегодня не представляется возможным оценить взаимное влияние или взаимодействие процессов в стратосфере и обусловивших погодные аномалии процессов в нижней тропосфере, совпадение экстремальных событий, возможно, в какой-то мере отражает механизм взаимодействия, нуждающийся, как и проблема динамики ОСО, в глубоком изучении.

Заключение

За время наблюдений с 1973 года в конце января 2016 г. впервые над севером Урала и Сибири зарегистрирована озоновая «мини-дыра»; ее появление, по-видимому, обусловлено динамическими и химическими процессами в глубоком малоподвижном циркумполярном вихре. Образование обширной области озонового минимума и длительного сохранения дефицита ОСО (до 20–40 %) в околополярных районах и над территорией России сопровождалось интенсификацией стратосферно-тропосферного обмена, западной фазой квазидвухлетнего колебания, а также активной фазой Эль-Ниньо. В области циркумполярного стратосферного вихря в нижней стратосфере наблюдалась экстремально низкая температура (-80 ...-90 °С), рекордно большим было и количество полярных стратосферных облаков.

Образование первой в истории наблюдений озоновой «мини-дыры» во внетропических широтах Северного полушария в январе 2016 года, как и эпизодов крупных озоновых аномалий в

последние годы свидетельствует, что причины и механизмы эволюции озонового слоя сегодня изучены недостаточно и их еще предстоит установить.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-35-50114 мол_нр.

Список использованных источников

1. Божков Р.Д., Фиолетов В.Э., Кадыгрова Т.В., Ромашикина К.И., Шаламянский А.М. Оценка уменьшения озона над Европой в 1973–1995 гг. на основе откорректированных данных наблюдений фильтровых озонметров // Метеорология и гидрология. – 1995. – № 9. – С. 30–40.
2. Большая Российская энциклопедия. Том 23. – М.: БРЭ, 2013. – 768 с.
3. Звягинцев А.М., Кузнецов Г.И., Кузнецова И.Н. Весенние аномалии озонового слоя над Россией // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 5. – С. 5–13.
4. Иванова А.Р. Стратосферно-тропосферный обмен и его некоторые особенности во внетропических широтах // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 3. – С. 22–45.
5. Лукьянова Н.Ф., Людчик А.М. Статистика аномальных явлений в озоносфере над Европой // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 8. – С. 37–48.
6. Перов С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы атмосферного озона. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 288 с.
7. Balis D.S. An update on the dynamically induced episodes of extreme low ozone values over the northern middle latitudes // Int. J. Remote Sensing. – 2011. – Vol. 32, No. 24. – P. 9197–9205.
8. Bojkov R.D., Balis D.S. Characteristics of episodes with extremely low ozone values in the northern middle latitudes 1957–2000 // Ann. Geophys. – 2001. – Vol. 19. – P. 797–807.
9. Garcia R.R. Atmospheric science: An Arctic ozone hole? // Nature. – 2011. – Vol. 478. – P. 462–463.
10. Hartmann D.L., Watson R.T. Observations and theories related to antarctic ozone changes // Report of the International Ozone Trends Panel 1988. Chapter 11. WMO Report No. 18. – 1988. – P. 665–750.
11. Hommel R., Eichmann K.-U., Aschmann J., Bramstedt K., Weber M., von Savigny C., Rich-ter A., Rozanov A., Wittrock F., Khosrawi F., Bauer R.,

Burrows J.P. Chemical ozone loss and ozone mini-hole event during the Arctic winter 2010/2011 as observed by SCIAMO-CHY and GOME-2 // Atmos. Chem. Phys. – 2014. – Vol. 14. – P. 3247–3276.

12. James P.M., Peters D. The Lagrangian structure of ozone mini-holes and potential vorticity anomalies in the Northern Hemisphere // Ann. Geophys. – 2002. – Vol. 20. – P. 835–846.

13. Manney G.L., Santee M.L., Rex M., Livesey N.J. et al. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 // Nature. – 2011. – Vol. 478. – P. 469–475.

14. Newman P.A., Lait L.R., Schoeberl M.R. The morphology and meteorology of Southern Hemisphere spring total ozone mini-holes // Geophys. Res. Lett. – 1988. – Vol. 15. – P. 923–926.

15. Orsolini Y.J., Limpasuvan V. The North Atlantic Oscillation and the occurrences of ozone mini-holes // Geophys. Res. Lett. – 2001. – Vol. 20, No. 21. – P. 4099–4102.

16. Pan L.L., Randel W.J., Gille J.C., Hall W.D., Nardi B., Massie S., Yudin V., Khosravi R., Konopka P., Tarasick D. Tropospheric intrusions associated with the secondary tropopause // J. Geophys. Res. – 2009. – Vol. 114. – D10302. – doi: 10.1029/2008JD011374.

17. Peters D., Egger J., Entzian G. Dynamical aspects of ozone mini-hole formation // Meteorol. Atmos. Phys. – 1995. – Vol. 55. – P. 205–214.

18. Solomon S. Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history // Rev. Geophys. – 1999. – Vol. 37. – P. 275–316.

19. Solomon S., Portman R.W., Thompson D.W.J. Contrasts between Antarctic and Arctic ozone depletion // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2007. – Vol. 104. – No. 2. – P. 445–449.

20. Solomon S., Haskins J., Ivy D.J., Min F. Fundamental differences between Arctic and Antarctic ozone depletion // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2014. – Vol. 111, No. 17. – P. 6220–6225.

21. WMO Arctic ozone bulletin 2016
(<https://www.wmo.int/pages/prog/arep/>)

22. <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>

23. <http://weather.uwyo.edu/upperair/>

24. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>

25. <http://www.esrl.noaa.gov/>

26. <http://www.meteoinfo.ru/climate/>

Поступила в редакцию 14.06.2016 г.