

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.534

Об эволюции весенней антарктической озоновой аномалии

А.М. Звягинцев¹, И.Н. Кузнецова², Г.И. Кузнецов^{3*}

¹ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория»
141700, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3

²ФГБУ «Гидрометцентр России»
123242, г. Москва, Б. Предтеченский пер., 11–13

³ГУНУ Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова
119992, г. Москва, ул. Лебедева, 2

Поступила в редакцию 10.11.2011 г.

Рассмотрены долгопериодные изменения основных характеристик весенней антарктической озоновой аномалии. Показано, что начиная с конца 1980-х гг. изменение основных характеристик озоновой аномалии за первые 10 лет в заметной степени были связаны с изменениями температуры в нижней стратосфере, а в последующие 10 лет изменений температуры и озона не наблюдалось. Сделан вывод, что основные характеристики озоновой аномалии в последние 15 лет стабилизировались и их последующие изменения будут в заметной степени определяться динамикой атмосферы.

Ключевые слова: весенняя антарктическая озоновая аномалия, долговременные изменения озона и температуры; Antarctic ozone hole, long-term changes of ozone and temperature.

О наличии весенней антарктической озоновой аномалии (ВАОА) впервые сообщил Г.М.В. Dobson [1] по результатам наблюдений за общим содержанием озона (ОСО) на станции Хали-Бей (74° ю.ш.) в 1950-х гг. Аномальным представлялся сезонный ход ОСО в высоких широтах Южного полушария (ст. Хали-Бей) — отсутствие характерного для умеренных широт обоих полушарий и высоких широт Северного полушария четко выраженных максимума весной и минимума осенью. Этот факт иллюстрируется годовыми ходами ОСО на станциях Хали-Бей, Резолют (75° с.ш.) и Лаудер (45° ю.ш.) (рис. 1).

Во внетропических широтах Северного полушария годовой максимум ОСО везде наблюдается весной, а минимум — осенью. В соответствующих умеренных широтах обоих полушарий время наступления экстремумов ОСО и их величины примерно совпадают, поэтому замеченное автором [1] разительное несовпадение годовых ходов ОСО на полярных станциях Южного и Северного полушарий оказалось весьма неожиданным. Также было отмечено, что на фоне глобального уменьшения ОСО с конца 1970-х гг. [2, 3] наиболее быстрыми темпами формировался четкий минимум ОСО в высоких широтах Южного полушария [4, 5] (рис. 1). Здесь в начале весны Южного полушария величины ОСО стали опускаться ниже 200 е.Д. Это явление в зарубежной научной литературе и СМИ получило название «озоновой дыры» («ozone hole»).

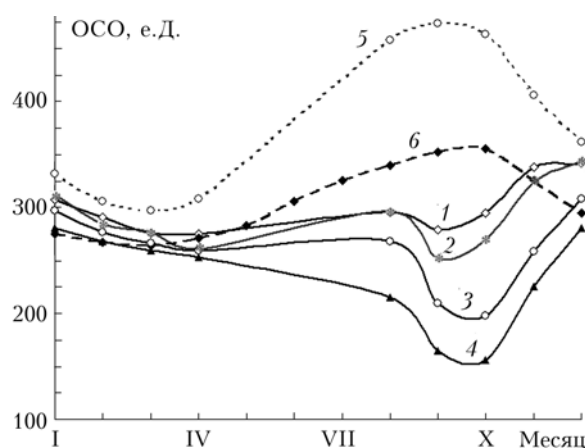


Рис. 1. Средний годовой ход ОСО на различных станциях в различные периоды времени: 1 — Хали-Бей, 1957–1967; 2 — Хали-Бей, 1973–1980; 3 — Хали-Бей, 1980–1990; 4 — Хали-Бей, 1997–2007; 5 — Резолют, 1957–1967; 6 — Лаудер, 2000–2010. Для совмещения сезонов для ст. Резолют горизонтальная шкала сдвинута на 6 мес

Начиная с середины 1990 гг. Всемирная метеорологическая организация стала публиковать краткие сообщения, а с 2000 г. — издавать специальные бюллетени (ежегодно несколько номеров в период с конца августа по декабрь), посвященные динамике весенней антарктической озоновой аномалии [<http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone>]. Установлено, что образование ВАОА связано с возникновением полярных стратосферных облаков в условиях низких температур (ниже -78°C) и происходящими на них химическими реакциями, приводящими к разрушению озона на молекулярном уровне [2, 10]. В русскоязычной научной литерату-

* Анатолий Михайлович Звягинцев (azvyagintsev@cao-rhms.ru); Ирина Николаевна Кузнецова (muza@mesom.ru); Геннадий Иванович Кузнецов (gikozone@yandex.ru).

ре явление «озоновой дыры» достаточно подробно описано в работах [6–9]. В настоящей статье обсуждается эволюция ВАОА по данным мониторинга ОСО за десятилетия.

Основными признаками ВАОА являются: 1) низкие значения ОСО (менее 220 е.Д.) в течение длительного времени (более 1 мес) на значительной территории (более 10 млн км²) и 2) наличие в профиле вертикального распределения отношения смеси озона (отношение числа молекул озона к общему числу молекул воздуха в единице объема) в атмосфере на высотах 15–20 км нехарактерного глубокого локального минимума [11, 12]. Появление в вертикальном профиле такого слоя свидетельствует о наличии мощного источника разрушения озона (см. ниже рис. 4). В соответствии с общепринятыми соглашениями [2], началом ВАОА считаются сутки, когда при наблюдениях с ИСЗ на заметной площади (не менее 0,1 млн км²) в высоких широтах Южного полушария ОСО становится менее 220 е.Д, а датой ее исчезновения — когда таких территорий не остается.

Начиная с 1980-х гг. ВАОА регулярно появляется в августе на площади более 10 млн км² (рис. 2) и исчезает в ноябре–декабре.

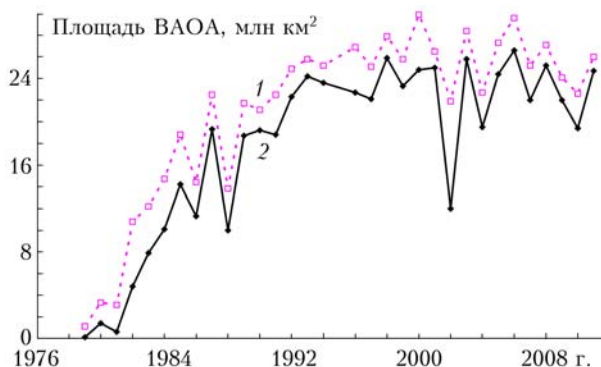


Рис. 2. Площадь ВАОА в различные годы по данным NASA (<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>): 1 – максимальная суточная; 2 – в период 7 сентября – 13 октября

Особенности временного хода основных характеристик ВАОА описаны, например, в [9, 11] и в период ВАОА оперативно отображаются в Интернете (в частности, на сайтах <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/> и <http://www.temis.nl/protocols/o3hole/>).

Многолетний ход основных характеристик ВАОА, полученный с использованием данных NASA, изображен на рис. 2 и 3.

Видно, что в конце 1990-х – начале 2000-х гг. наступила стабилизация основных характеристик ВАОА, что соответствует сделанному в [9] прогнозу, основанному на статистических закономерностях временного хода ОСО в различных широтах. По-прежнему весьма актуальным является вопрос о сроках восстановления озонового слоя в глобальном и в региональном масштабах [2, 3, 13]. Как указано в [2, 14, 15], полное восстановление озонового слоя ожидается примерно в 2070 гг.; в Северном полушарии этот процесс с высокой достоверно-

стью уже начался [3, 13, 16]. Исходя из характеристик динамики удаления озоноразрушающих соединений из атмосферы, первые надежные признаки восстановления озонового слоя в Антарктическом регионе, по мнению авторов [14, 15], можно будет заметить только в начале 2020-х гг.

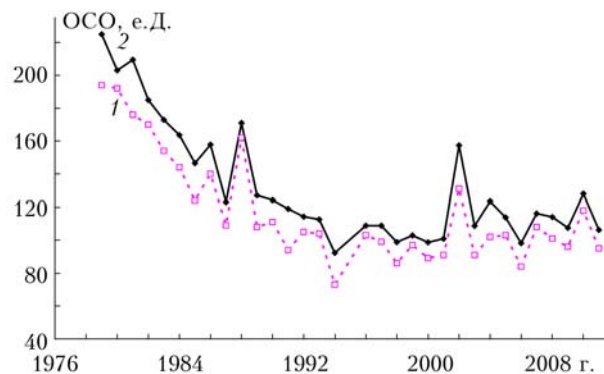


Рис. 3. Значение ОСО в период ВАОА в различные годы по данным NASA (<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>): 1 – минимальное суточное; 2 – среднее в период 21 сентября – 16 октября

Прогноз сроков восстановления озонового слоя над Антарктидой сложен, во-первых, из-за недостаточной изученности фотохимических гетерофазных реакций, приводящих к разрушению озона и происходящих на полярных стратосферных облаках [14, 17], во-вторых, из-за сильной нелинейной зависимости скорости разрушения озона от температуры, и в-третьих, из-за значительной изменчивости наблюдаемой динамики глобального потепления, сопровождаемого похолоданием в стратосфере. Хотя в [18] сообщается об обнаружении признаков восстановления озонового слоя в районе наблюдений ВАОА, авторы работ [13–15, 17] таких признаков не выявили. Статистический анализ основных характеристик ВАОА, представленных на рис. 2 и 3, также не позволяет сделать статистически достоверного вывода о начале ее разрушения.

Временные ходы параметров, характеризующих ВАОА и показанных на рис. 1–3, хорошо соответствуют изменениям средних годовых ходов отношения смеси озона и температуры на различных высотах H на станции NOAA в Южном полюсе по данным зондирования озона (рис. 4) за 25-летний период времени. Видно, что наиболее низкие отношения смеси озона наблюдаются примерно с двухмесячной задержкой после достижения минимальных значений температуры. Это соответствует гипотезе, что разрушение озона происходит с участием полярных стратосферных облаков, образующихся при понижении температуры ниже -78 °С. По-видимому, изменения отношения смеси озона являются вторичными по отношению к изменениям температуры, по крайней мере в краткосрочной перспективе.

За 10 лет (начиная с конца 1980-х гг.) зимой и весной произошло заметное понижение температуры в слое атмосферы, где наблюдается разрушение

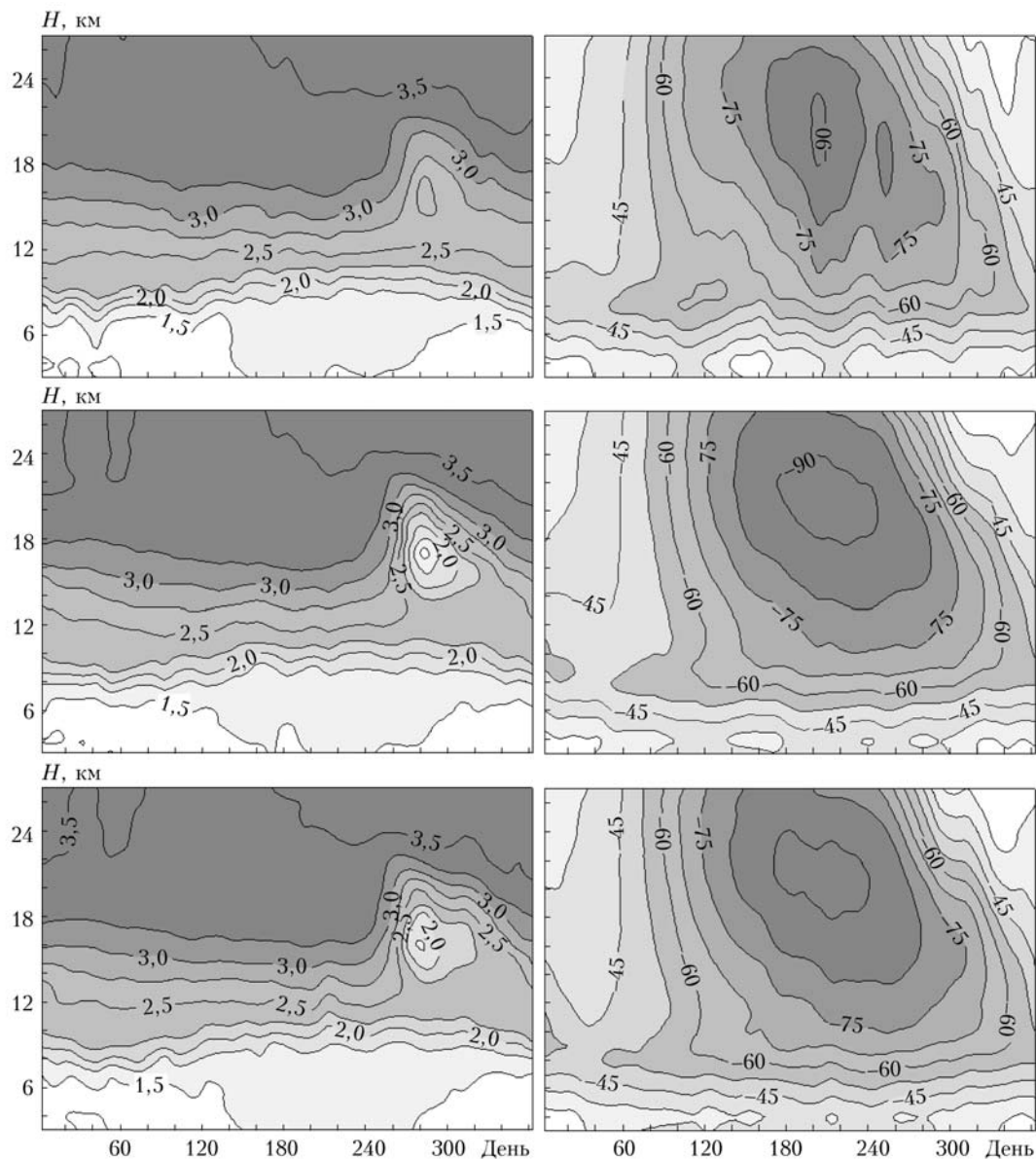


Рис. 4. Средний годовой ход десятичного логарифма отношения смеси озона (в млрд⁻¹; слева) и температуры (справа) на различных высотах H на станции NOAA (Южный полюс) по данным озонного зондирования (по горизонтальной оси — юлианский день Day). Верхний ряд — для периода 1986–1990 гг., средний — 1986–1990 гг., нижний 2006–2010 гг.

озона (12–23 км); уменьшились также отношения смеси озона. За следующие 10 лет температура и отношение смеси озона практически не изменились. Учитывая, что характерное время изменения содержания озоноразрушающих соединений в стратосфере составляет около 50 лет, можно полагать, что влияние наблюдаемых климатических изменений температуры в стратосфере на эволюцию ВАОА сравнимо с влиянием изменений концентраций озоноразрушающих соединений в стратосфере.

Таким образом, углубление ВАОА в 1990-е гг. по сравнению с 1980-ми гг. представляется в сильной степени обусловленным похолоданием стратосферы. В последующие 15 лет температура и отношение смеси озона стабилизировались. Следует

ожидать, что дальнейшие изменения ВАОА будут в заметной степени определяться динамикой атмосферы.

Работа выполнена при частичной поддержке проектов РФФИ № 11-05-01144-а и 11-05-91061-НЦНИ_а.

1. Dobson G.M.B. Annual variation of ozone in Antarctica // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 1966. V. 92, N 394. P. 549–552.
2. WMO Ozone Report No. 52. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. Geneva, 2011. 438 p.
3. Harris N.R.P., Kyro E., Staehelin J., Brunner D., Andersen S.-B., Godin-Beekmann S., Dhomse S., Hadjinicolaou P., Hansen G., Isaksen I., Jrrar A., Kar-

- petchko A., Kivi R., Knudsen B., Krizan P., Lastovicka J., Maeder J., Orsolini Y., Pyle J.A., Rex M., Vanicek K., Weber M., Wohltmann I., Zanis P., Zerefos C.* Ozone trends at northern mid- and high latitudes – a European perspective // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26, N 5. P. 1207–1220.
4. *Chubachi S.* A special ozone observation at Syowa Station, Antarctica from February 1982 to January 1993 // Atmospheric ozone (Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium. Halkidiki, Greece, 1984). 1985. P. 285–289.
 5. *Farman J.C., Gardiner B.G., Shanklin J.D.* Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction // *Nature (Gr. Brit.)*. 1985. V. 315, N 6016. P. 207–210.
 6. *Данилов А.Д., Авдюшин С.И.* Стратосферный озон в Арктике и Антарктике – проблема современности // *Геомангнет. и аэроном.* 1989. Т. 29, № 5. С. 705–717.
 7. *Авдюшин С.И., Данилов А.Д.* Стратосферный озон в Арктике и Антарктике // *Геомангнет. и аэроном.* 1992. Т. 32, № 1. С. 1–14.
 8. *Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хриган А.Х.* Озонный щит Земли и его изменения. СПб.: Гидрометеониздат, 1992. 168 с.
 9. *Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М.* Эволюция весенней антарктической озоновой аномалии: результаты наблюдений // *Исслед. Земли из космоса.* 2002. № 6. С. 10–18.
 10. *Звягинцев А.М., Зуев В.В., Крученицкий Г.М., Skorobogatyy T.B.* О вкладе гетерофазных процессов в формирование весенней озоновой аномалии в Антарктиде // *Исслед. Земли из космоса.* 2002. № 3. С. 29–34.
 11. *Черников А.А., Борисов Ю.А., Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М., Перов С.П.* Изменчивость озонового слоя в период 1979–1999 гг. // *Оптика атмосф. и океана.* 2000. Т. 13, № 1. С. 100–105.
 12. *Gardiner B.G.* Comparative Morphology of the Vertical Ozone Profile in the Antarctic Spring // *Geophys. Res. Lett.* 1988. V. 15, N 8. P. 901–904.
 13. *Weatherhead E.C., Andersen S.B.* The search for signs of recovery of the ozone layer – Review // *Nature (Gr. Brit.)*. 2006. V. 441, N 7089. P. 39–45.
 14. *Newman P.A., Oman L.D., Douglass A.R., Fleming E.L., Frith S.M., Hurwitz M.M., Kavva S.R., Jackman C.H., Krotkov N.A., Nash E.R., Nielsen J.E., Pawson S., Stolarski R.S., Velders G.J.M.* What would have happened to the ozone layer if chlorofluorocarbons (CFCs) had not been regulated? // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9, N 6. P. 2113–2128.
 15. *Newman P.A., Nash E.R., Douglass A.R., Nielsen J.E., Stolarski R.S.* Estimating When the Antarctic Ozone Hole will Recover / C. Zerefos et al. (eds.) // *Twenty Years of Ozone Decline.* Athens: Springer, 2009. P. 191–200.
 16. *Звягинцев А.М., Ананьев Л.Б., Артамонова А.А.* Изменчивость общего содержания озона над территорией России в 1973–2008 гг. // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 3. С. 190–195.
 17. *Solomon S., Portmann R.W., Sasaki T., Hofman D.J., Thompson D.W.J.* Four decades of ozonesonde measurements over Antarctica // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110, D21311. doi:10.1029/2005JD005917.
 18. *Salby M., Titova E., Deschamps L.* Rebound of Antarctic ozone // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L09702. doi:10.1029/2011GL047266.

A.M. Zvyagintsev, I.N. Kuznetsova, G.I. Kuznetsov. **About evolution of the Antarctic ozone hole.**

Long-term changes of basic characteristics of the Antarctic ozone hole are considered. We show that from the end of 1980s a change of basic characteristics of the ozone hole during first 10 years were impacted in great extent by changes of temperature in the low stratosphere; during the next 10 years changes of ozone characteristics and temperature were not statistically trustworthy. A conclusion was done that the basic characteristics of the ozone hole during last 15 years were stabilized and their future changes would be strongly impacted by dynamics of the atmosphere.