

А.А. Черников, Ю.А. Борисов, А.М. Звягинцев, Г.М. Крученицкий, С.П. Перов

Изменчивость озонового слоя в период 1979–1999 гг.

Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный Московской области

Поступила в редакцию 6.12.99 г.

За период 1979–1999 гг. отмечено уменьшение глобального среднегодового значения общего содержания озона (ОСО) со скоростью примерно 2,5% в десятилетие. В средних и высоких широтах Северного полушария это понижение в значительной мере связано с возрастанием частоты появления и степени выраженности отрицательных аномалий ОСО в период 1987–1997 гг. На протяжении двух последних лет в средних и высоких широтах Северного полушария отмечено возрастание ОСО до значений, характерных для середины 1970-х гг.

По данным спутниковых наблюдений, антарктическая озоновая аномалия в весенний период, отчетливо прослеживаемая в годовом ходе ОСО на широтах выше 60° ю.ш. еще в период 1960–1970 гг., либо продолжает расширяться, либо в 1998 г. достигла максимума. Отмеченное в последние два года глобальное возрастание ОСО не может быть объяснено мерами, принятыми для устранения антропогенного воздействия на озоновый слой, так как оно наблюдается в условиях повышенных концентраций ХФУ в атмосфере.

Существующие в мире научные представления о состоянии и причинах наблюдаемой эволюции озонового слоя далеки от полноты и, в частности, не позволяют предсказывать наблюдаемые резкие изменения в нем и появление отдельных аномалий в Северном полушарии.

Регулярные наблюдения за практически важнейшим параметром озонового слоя – общим содержанием озона (ОСО) – проводятся с помощью спектрофотометрической аппаратуры в отдельных пунктах с 1920-х гг. [1]. С начала Международного геофизического года в 1957 г. число наблюдательных станций увеличилось скачком за несколько лет с единиц до нескольких десятков; при этом станции расположились на всех континентах, кроме Африки и Южной Америки. Озонометрическая сеть СССР, включавшая спектрофотометр Добсона № 108 (С.-Петербург) и фильтровые озонометры М-83 (впоследствии – М-124) конструкции проф. Г.П. Гущина, стала действовать с 1958 г. С октября 1978 г. наблюдения наземной озонометрической сети дополнились близкими по точности наблюдениями, производимыми с помощью спутниковой аппаратуры TOMS, установленной на спутниках Nimbus-7 (1978–1993 гг.), а впоследствии на спутниках Метеор-3М (1991–1994 гг.) и Earth Probe (с 1996 г.). Анализ временных изменений озонового слоя уже сегодня способен привести к пониманию основных причин изменений озонового слоя, до сих пор остающихся предметом научных дискуссий [2–7]. В настоящее время в мире доминирует точка зрения [2, 3], согласно которой примерно до 1979 г. ОСО испытывало лишь межгодовые вариации, а с 1979 г. проявилось систематическое изменение – тренд, который связывается с антропогенным загрязнением атмосферы озоноразрушающими соединениями – хлорфторуглеродами (ХФУ). В противоположность этой точке зрения значительную поддержку среди российских исследователей получила «нефреоновая» гипотеза изменения планетарного озонового слоя, которая детально была обоснована на научной сессии ООФАГ РАН осенью 1995 г., организованной по инициативе академика-секретаря В.Е. Зуева.

В настоящей статье проведен анализ последних изменений озонового слоя Земли на основе данных спутниковой аппаратуры TOMS и мировой наземной озонометрической сети с целью выявления последних тенденций этих изменений. Используются данные об ОСО, полученные мировой наземной озонометрической сетью и входящие в мировую базу озоновых данных [8], а также с помощью аппаратуры TOMS, установленной на ИСЗ Nimbus-7 с ноября 1978 по апрель 1993 г., на ИСЗ Метеор-3М – с мая 1991 по ноябрь 1994 г. [9, 10] и на ИСЗ Earth Probe (США, NASA) – с августа 1996 по июль 1999 г.

Считается [3], что абсолютная погрешность измерений ОСО с помощью аппаратуры Nimbus-7/TOMS (и, по-видимому, Earth Probe/TOMS) составляет ± 3 , случайная – ± 2 и неопределенность, обусловленная дрейфом параметров аппаратуры, – $\pm 1,5\%$ за 14 лет; для измерений ОСО с помощью аппаратуры Метеор-3/TOMS – ± 3 , ± 3 и $\pm 1\%$ за 3 года соответственно. Для сравнения укажем, что погрешность современных лучших наземных спектрофотометрических измерений составляет $\pm 1\%$ по прямому солнцу и $\pm 3\%$ по зениту, а в 1970-х гг. она была примерно в 2 раза больше. Погрешность наблюдений с помощью озонометра М-124 оценивается $\pm 5\%$ [3]; при этом стоит отметить, что озонометрическая сеть бывшего СССР достаточно успешно обнаруживает практически те же тенденции изменений ОСО, что и мировая сеть высокоточных спектрофотометров [11], хотя и не столь оперативно.

Для иллюстрации пространственно-временных изменений озонового слоя в последние годы на рис. 1 приведены поля среднемесячных отклонений ОСО от «норм» (многолетних средних в 1974–1984 гг.) для месяцев, когда в Северном (март) и Южном (октябрь) полу-

шариях соответственно наблюдаются самые значительные отрицательные аномалии ОСО. Из рис. 1 видно, что если в Южном полушарии аномалии озонового слоя еще продолжают наблюдаться (в частности, антарктическая озоновая аномалия 1998 г. была одной из самых значительных), хотя и здесь темпы уменьшения ОСО сильно замедлились, то в Северном полушарии в последние

2 года озоновый слой практически возвратился к уровню значений ОСО, характерных для середины 1970-х гг. На это же указывает и временной ход среднегодовых и мартовских значений ОСО по данным [8] спектрофотометра Добсона на станции «Ароза» (46°с.ш., 10°в.д.), где имеется самый длительный ряд регулярных наблюдений (рис. 2) – с сентября 1926 г.

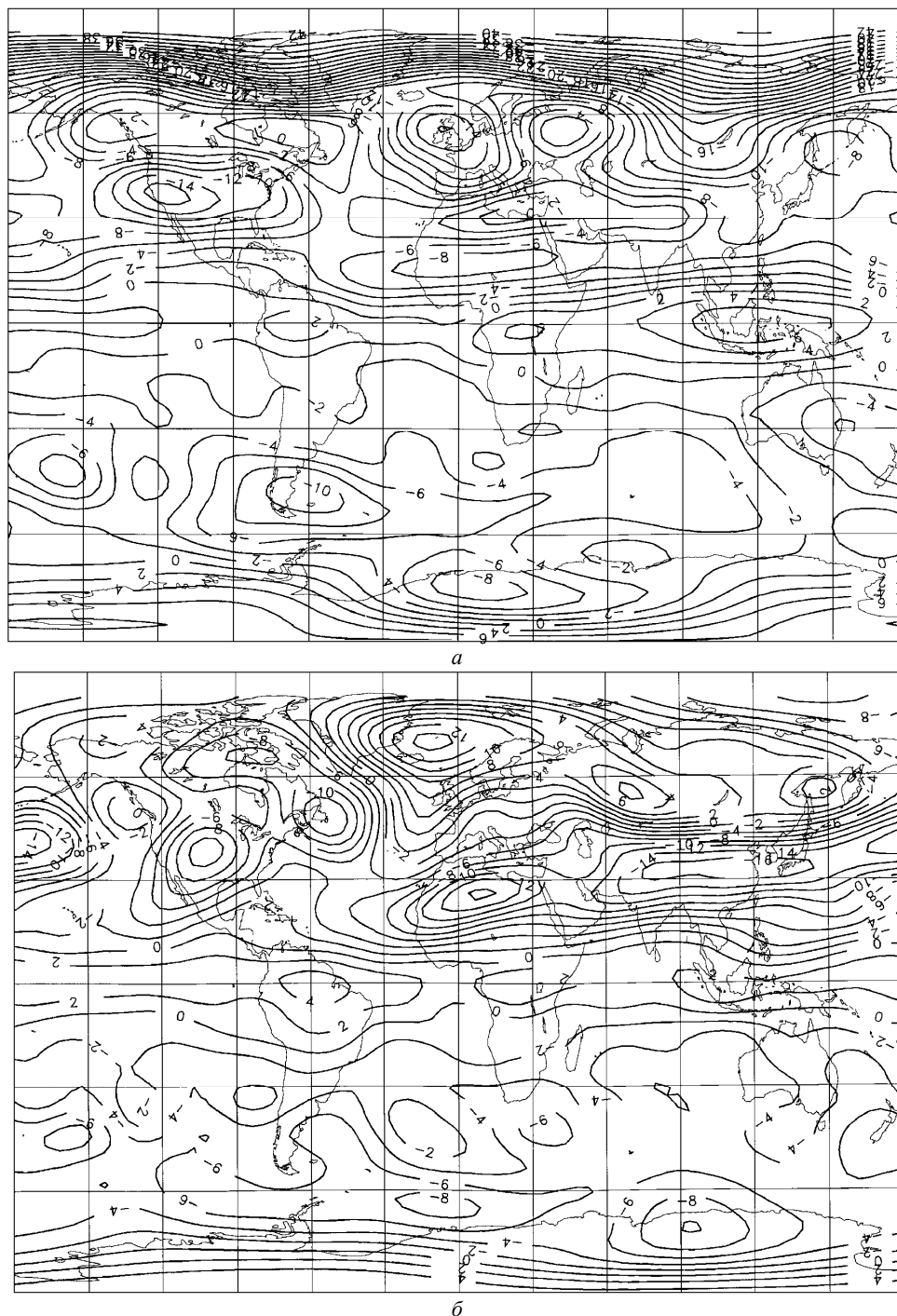
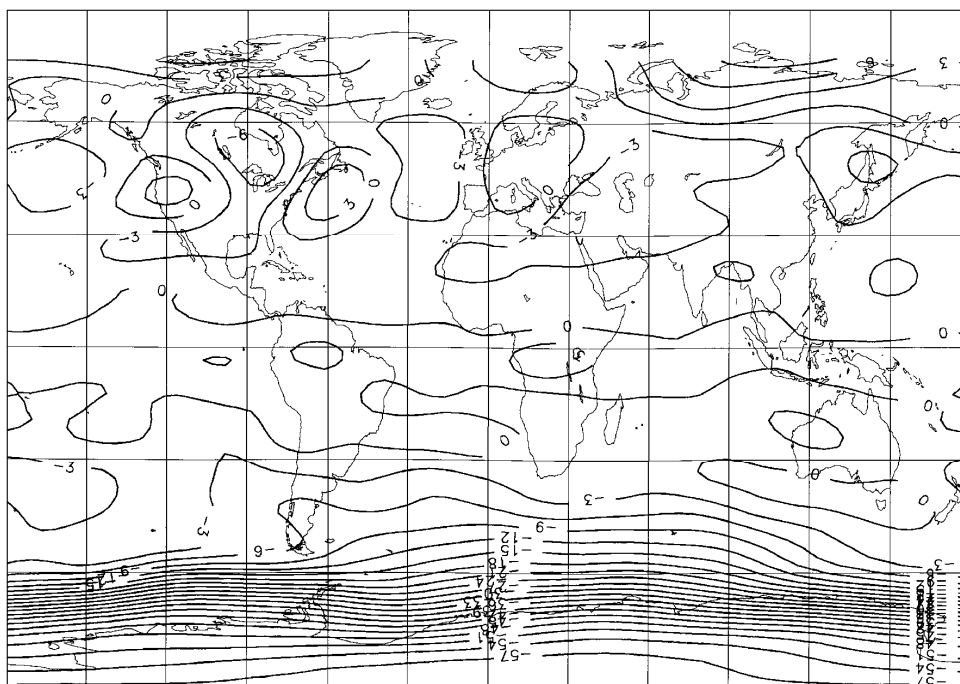
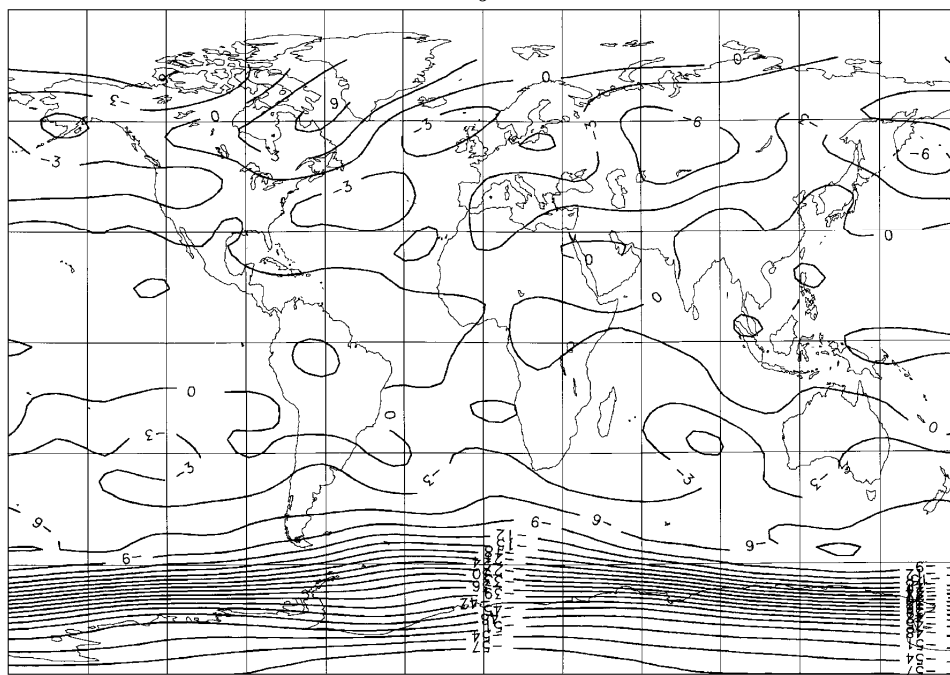


Рис. 1. Поля отклонений среднемесячного общего содержания озона (%) от многолетних средних 1974–1984 гг.: а – в марте 1997 г.; б – марте 1999 г. по данным аппаратуры TOMS



6



2

Рис. 1 (продолжение): 6 – в октябре 1998 г. и 2 – в октябре 1999 г. по данным аппаратуры TOMS

На рис. 3 представлен временной ход отклонений ОСО от норм после пропускания через фильтр низких частот с граничным периодом $T = 12$ мес по наблюдениям с помощью аппаратуры TOMS для широтных поясов: 80–60° ю.ш. (кривая 1), 60–40° ю.ш. (2), 40° ю.ш.–40° с.ш. (3), 40–60° с.ш. (4), 60–80° с.ш. (5), и среднее по всем станциям наземной озонметрической сети бывшего СССР (6). Отметим, что площади земной поверхности, занятые указанными широтными поясами, составляют 5,9; 11,2; 64,3; 11,2 и 5,9% от общей площади земной поверхности соответственно. Коэффициенты корреляции

рядов (на общем для них отрезке времени), изображенных кривыми 6 и 4, составляют 0,74, а кривыми 6 и 5 – 0,62 соответственно, т. е. в рядах наблюдений, полученных с помощью сети фильтровых озонметров и спутниковой аппаратуры, изменчивость описывается приблизительно одинаково. В области широт 40° ю.ш.–40° с.ш. в ОСО отчетливо проявляется 11-летний солнечный цикл. Изменчивость ОСО на уровне 1–2% с периодом 11 лет синфазна с индексом солнечной активности $F_{10,7}$, что хорошо согласуется с литературными данными [12]. В средних и высоких широтах 11-летия изменчивость ОСО

статистически незначима на фоне значительно большей изменчивости, обусловленной иными причинами.

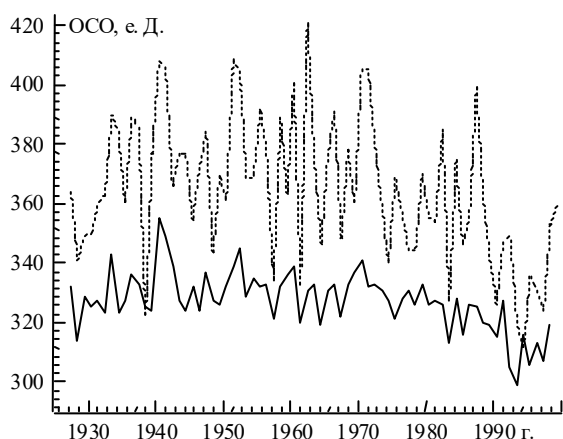


Рис. 2. Временной ход среднегодового (сплошная линия) и мартовского (пунктирная линия) общего содержания озона в Арозе с 1927 г. (46°с.ш., 10°в.д.)

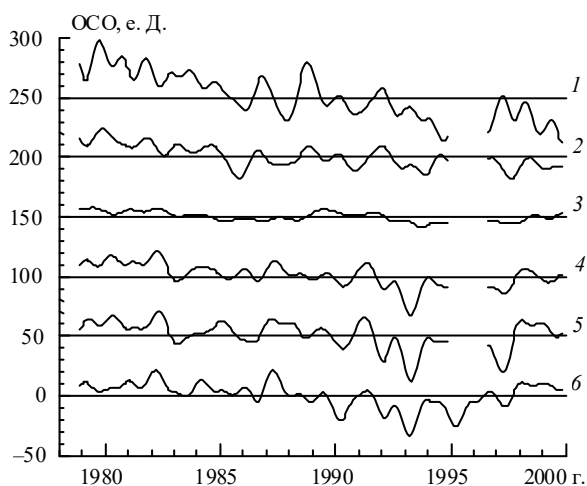


Рис. 3. Временной ход отклонений общего содержания озона от многолетних средних значений (со смещением на 50 е. Д.)

На рис. 4 приведен среднегодовой ход среднезонального ОСО для различных широтных поясов в различные периоды наблюдений. Хорошо видно, что в средних широтах обоих полушарий, а также высоких широтах Северного полушария годовой максимум ОСО наблюдается в начале весны. В высоких широтах Южного полушария уже с начала измерений ОСО с помощью аппаратуры TOMS в 1979 г. отчетливо проявилась его весенняя аномалия, выражающаяся в том, что в начале весны (в Антарктиде – с сентября), т. е. в период, когда в широтных поясах 30–90° с.ш. и 30–60° ю.ш. наблюдается максимум ОСО, над Антарктидой имеет место его «провал». Такое аномальное поведение ОСО над Антарктидой впервые было отмечено еще в первых наблюдениях в середине 1950-х гг. Добсоном [13] и другими исследователями [14]. После публикации в 1985 г. широко известной статьи Фармана с соавторами [15] явление получило в СМИ название антарктической озонной «дыры» (отсюда название перешло и в научные публикации), а работы его первооткрывателей оказались неза-

служенно забытыми. Рис. 4 иллюстрирует постепенность (фактически – монотонность) увеличения глубины «провала» ОСО, максимального вблизи Южного полюса и практически незаметного в средних широтах, в течение последних 20 лет. Видно, что в последние годы глубина весеннего «провала» ОСО над Антарктидой существенно превышает амплитуду годовой гармоники ОСО в соответствующих широтах Северного полушария. Признаки «провалов» в годовом ходе ОСО в Северном полушарии, сравнимые по интенсивности даже с относительно слабыми антарктическими «провалами» 1950–1960-х гг., до сих пор не наблюдались.

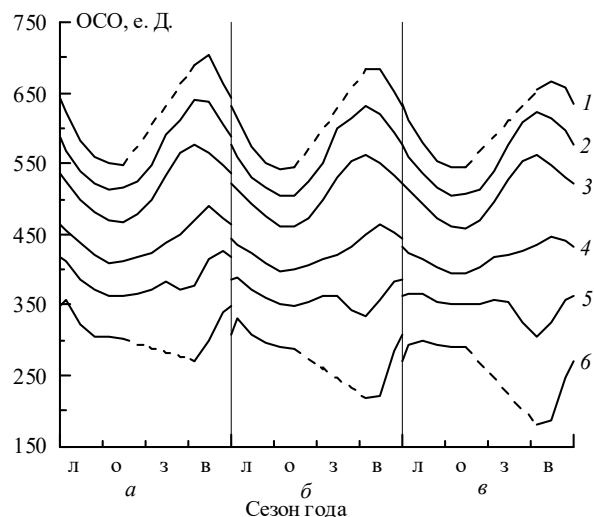


Рис. 4. Среднегодовой ход среднезональных ОСО для различных широтных поясов: 80–70°с.ш. (1), 70–60°с.ш. (2), 60–50°с.ш. (3), 50–60°ю.ш. (4), 60–70°ю.ш. (5), 70–80°ю.ш. (6) (для нижней кривой численные значения по оси ординат соответствуют действительности, каждая последующая кривая поднята на 50 е.Д.), в различные периоды наблюдений: а – декабрь 1978 – ноябрь 1982 г.; б – декабрь 1990 – ноябрь 1994 г.; в – август 1996 – июль 1999 г.

Для иллюстрации различия между вертикальными структурами зимне-весенних аномалий в Антарктиде (регулярно наблюдаемая аномалия) и в Северном полушарии (эпизодические аномалии) на рис. 5 приведены характерные профили вертикального распределения озона (ВРО) во время таких событий. Антарктическая аномалия характеризуется наличием заметного провала отношения смеси (r_3) озона в нижней стратосфере (т.е. в области, дающей наибольший вклад в ОСО), что вполне определенно указывает на наличие химических (или фотохимических) механизмов гибели озона в этой области (рис. 5, а). Во всех же озонных аномалиях, наблюдаемых в Северном полушарии, отношение смеси озона при подъеме до высот 30 и более километров всегда монотонно возрастало (см. рис. 5, а), что является серьезным аргументом против гипотезы об определяющей роли хлорфторуглеродов антропогенного происхождения в формировании этих аномалий (тем более что серьезных доводов в защиту такой гипотезы не приводится, а констатируется лишь подобие некоторых формальных характеристик таких аномалий, обычно – провала в профиле ВРО в единицах массовой концентрации или парциального давления (рис. 5, б), с аналогичными антарктическими).

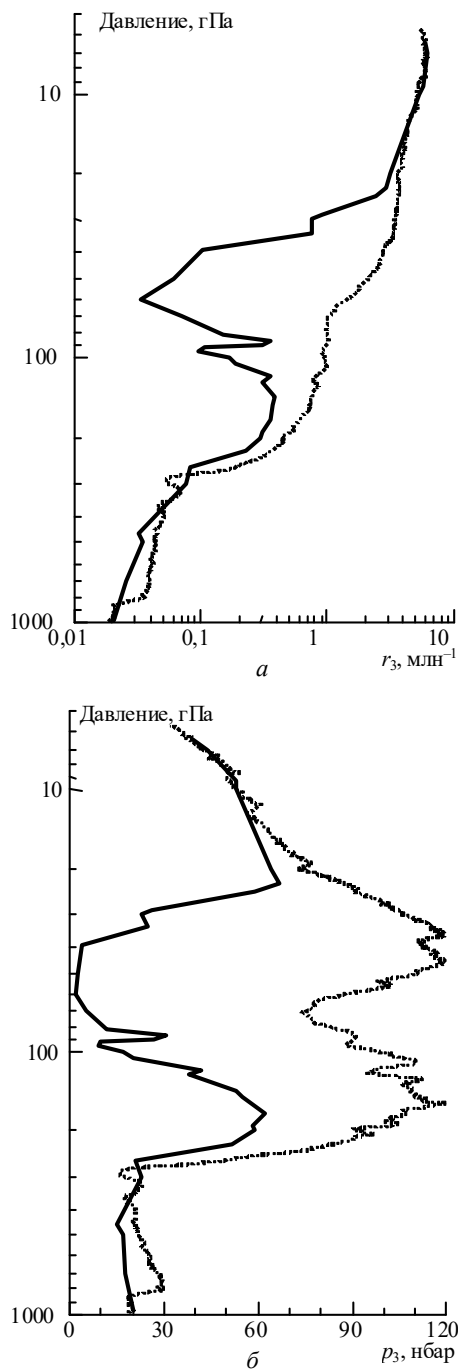


Рис. 5. Профили ВРО на станциях «Сёва» (69° ю.ш., 40° в.д.) 22 сентября 1998 г. (сплошная линия) и «Якутск» (62° с.ш., 130° в.д.) 19 марта 1995 г. (штриховая)

В работе [6] приведены дополнительные аргументы в пользу преимущественно динамической, а не химической природы озоновых аномалий, наблюдаемых в Северном полушарии, в частности положительный знак трендов высоты и ширины озонового максимума (в единицах массовой концентрации) и тот факт, что в аномалиях основное уменьшение концентрации озона практически всегда наблюдается в области ниже озонового максимума. Другие аргументы против «фреоновой» гипотезы уменьшения озонового слоя в глобальном масштабе содержатся в работах [4, 7, 14].

Для отображения наблюдаемых тенденций изменений озонового слоя на рис. 6 приведены широтные зависимости среднезональных трендов ОСО за время работы аппаратуры TOMS на спутниках Nimbus-7 и Метеор-3М, а также за то же время и дополнительно за три полных года на спутнике Earth Probe. Средний тренд ОСО за период с ноября 1978 г. по октябрь 1999 г. по всему земному шару и по Северному полушарию (с учетом различий площадей в различных широтных зонах по 10°) составил -2,5 и -2,2 % за десятилетие соответственно. В обзоре [2] было указано, что в период с января 1979 до весны 1994 г. скорость спада ОСО в средних широтах обоих полушарий составляла 4–5% за 10 лет (эти оценки многократно использовались для того, чтобы аргументировать и форсировать запреты Монреальского протокола на производство так называемых «озоноразрушающих» веществ). В последнем обзоре ВМО [3], охватывающем наблюдения, проведенные до конца 1997 г., уже было указано, что над средними широтами Северного и Южного полушарий долговременное (декадное) уменьшение озона с 1991 г. замедлилось и линейная экстраполяция озоновых характеристик неприменима к настоящему времени (хотя модели, описывающие поведение озонового слоя, указывают на заметные отклонения от линейности только в гораздо более отдаленном будущем).

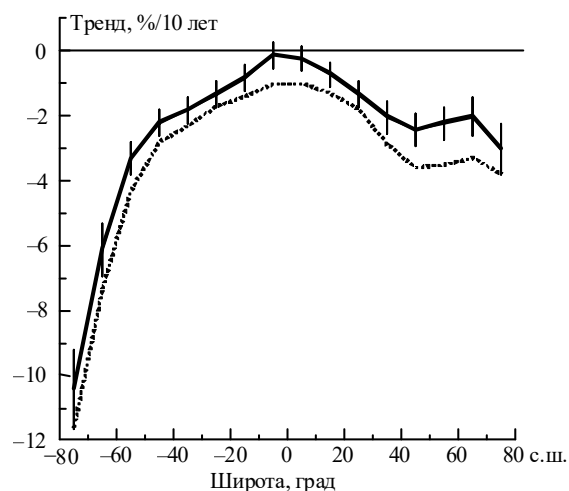


Рис. 6. Среднезональные тренды ОСО за период с ноября 1978 по октябрь 1994 г. (штриховая линия) и с ноября 1978 по октябрь 1999 г. (сплошная линия с погрешностью $\pm 2\sigma$) по данным аппаратуры TOMS

Согласно [3, 16] общее содержание озоноразрушающих газов в тропосфере достигло своего максимума в 1994 г. и в настоящее время начало медленно уменьшаться. В стратосфере пик содержания озоноразрушающих газов ожидается перед 2000 г., после чего озоновый слой будет пребывать в состоянии минимума последующие 10–20 лет, а затем медленно восстанавливаться. Причем подчеркивается, что сам процесс возврата озонового слоя к уровню 1970-х гг. нельзя будет выявить в течение последующих 20 лет из-за естественной изменчивости и влияний на озоновый слой наблюдаемых глобальных климатических изменений. Между тем из рис. 6 хорошо видно, что учет наблюдений последних трех лет существенно изменяет оценки трендов ОСО в средних и высоких широтах Северного полушария [17], что вызывает сомнения в справедливости исходного положения об определяющей роли

антропогенных выбросов хлорфторуглеродов в изменениях озонового слоя.

В настоящее время установлена связь изменений озонового слоя и климатообразующих факторов, в первую очередь солнечной активности [3, 12, 18], явления Эль-Ниньо/южного колебания (ЭНЮК) [19], североатлантического колебания (САК) [20, 21]. В частности, известно, что параметры, характеризующие САК, испытывают значимые изменения во времени, что отражается также на долговременных изменениях ОСО [22]. Весьма сложной и требующей обязательного решения является проблема изменений содержания водяного пара в атмосфере и влияния этих изменений на озоновый слой.

Оценивая в целом состояние озонового слоя по данным спутниковых наблюдений на протяжении двух последних десятилетий, можно сделать следующие выводы:

– за рассматриваемый период понижение глобального среднегодового значения ОСО происходит со скоростью примерно 2,5% за десятилетие;

– в средних и высоких широтах Северного полушария в период 1987–1997 гг. это понижение в значительной мере вызвано возрастанием частоты появления и степени выраженности отрицательных аномалий ОСО. В период 1995–1997 гг. в высоких широтах Северного полушария дефицит ОСО достигал 40%, временная продолжительность аномалий доходила до 2 мес, а пространственная охватывала значительную часть территории России;

– на протяжении последних двух лет в средних и высоких широтах Северного полушария отмечается возрастание ОСО до значений, характерных для середины 1970-х годов. Процесс возрастания ОСО в Северном полушарии в последние два года носит глобальный характер и на территории России уже проявился, в частности, в исчезновении главной аномалии в озоновом слое над Россией – весенней «якутской аномалии», по ряду показателей приближавшейся к знаменитой антарктической, а также в исчезновении значимого отрицательного тренда ОСО над европейской территорией России;

– отмеченное в последние два года глобальное возрастание ОСО не может быть объяснено мерами, принятыми для устранения антропогенного воздействия на озоновый слой, так как оно наблюдается в условиях повышенных концентраций хлорфторуглеродов в атмосфере (практически еще не начавших возвращаться к значениям в прединдустриальный период);

– в высоких широтах Южного полушария процесс уменьшения озонового слоя в весенний период продолжался, по крайней мере, до 1998 г. и, возможно, к настоящему моменту уже закончился.

Таким образом, существующие в мире научные представления о состоянии и причинах наблюдаемой эволюции озонового слоя далеки от полноты и, в частно-

сти, не позволяют предугадывать резкие изменения в нем, ввиду чего необходимо продолжать исследования по озонной проблеме в целом. Обязательным критерием оценки истинности моделей, предсказывающих грядущие изменения озонового слоя, должна стать их способность объяснять уже накопленные данные наблюдений.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта РФФИ № 99-05-64977.

Авторы благодарны сотрудникам ЦАО О.В. Стасюку и Т.В. Банковой за любезно предоставленные данные наблюдений TOMS.

1. *Deutsch H.U., Staehelin J.* // Planet. and Space Sciences. 1989. V. 37. N. 12. P. 1587–1599.
2. *WMO. Scientific assessment of ozone depletion: 1994* // WMO Ozone Rep. N. 37.
3. *WMO. Scientific assessment of ozone depletion: 1998* // WMO Ozone Rep. N. 44.
4. *Канюца А.П.* // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 9. С. 1164–1167.
5. *Зуев В.В.* // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 9. С. 1168–1170.
6. *Крученицкий Г. М., Бекорюков В.И., Волощук В.М. и др.* // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 9. С. 1233–1242.
7. *Волковицкий О.А., Гаврилов А.А., Кайдалов О.В.* // Вестник РАН. 1996. Т. 66. № 9. С. 783–786.
8. *Ozone and Ultraviolet Data for the World* // Canad. Environ. Service / WMO, Downsview-Ontario. 1974–1999.
9. *McPeters R., Beach F.* CD-ROM: NIMBUS 7 / TOMS Version 7. O3 Data: 1978–1993 // NASA Goddard Space Flight Center.
10. *McPeters R., Beach F.* CD-ROM: METEOR 3 / TOMS Version 7. O3 and Reflectivity Data: 1991–1994. // NASA Goddard Space Flight Center.
11. *Bojkov R., Fioletov V., Shalamiansky A.* // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. N. D11. P. 22985–22999.
12. *Bojkov R.D., Fioletov V.E.* // Meteorol. and Atmosph. Phys. 1996. V. 58. P. 223–240.
13. *Dobson G.M.B.* Exploring the atmosphere. // Oxford: Clarendon Press, 1968.
14. *Maduro R., Schauerhammer R.* Ozone: Un trou pour rien. // Paris: Alcuin, 1992. 280 p.
15. *Farman J.C., Gardiner B.G., Shanklin J.D.* // Nature. 1985. V. 315. P. 207–210.
16. *Engel A., Schmidt U.* // SPARC newsletter. 1999. N. 13. P. 14–16, III.
17. *Bojkov R.D. and Fioletov V.E.* // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. N. D8. P. 16537–16551.
18. *Черников А.А., Крученицкий Г.М., Звягинцев А.М. и др.* // Метеорология и гидрология. 1999. № 9. С. 118–124.
19. *Черников А.А., Борисов Ю. А., Звягинцев А.М. и др.* // Метеорология и гидрология. 1998. № 3. С. 104–110.
20. *Звягинцев А.М., Крученицкий Г. М.* // Метеорология и гидрология. 1996. № 7. С. 72–77.
21. *Zvyagintsev A.M., Kadygrova T.V., Kruchenitsky G.M. et al.* // Atmospheric Ozone. Proc. XVIII Quadr. Ozone Symp. 1996. P. 101–104.
22. *Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М.* // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 9. С. 1045–1052.

A.A. Chernikov, Yu.A. Borisov, A.M. Zvyagintsev, G.M. Kruchenitsky, S.P. Perov. Variability of ozone layer in 1979–1999.

For the period 1979–1999 the rate of decreasing of yearly mean global column ozone is found to be about 2.5% per decade. Such decreasing in mid- and high-latitudes of the Northern Hemisphere is strongly due to increasing of frequency and magnitudes of negative column ozone anomalies in the period 1987–1997. Increasing of column ozone to values typical for the middle of 1970s has been observed in mid- and high latitudes of the Northern Hemisphere during the last two years. Satellite observations show that the Antarctic ozone «hole», clearly seen in seasonal dependence of column ozone at southern latitudes higher than 60° S still in 1960s and 1980s, continues to enlarge or has achieved its maximum in 1998. Global increasing of column ozone observed in the last two years can not be explained by actions made for elimination of anthropogenic influence on the ozone layer because it is observed under high concentration of atmospheric chlorine and bromine. Scientific explanation of the modern state and reasons of the observed evolution of the ozone layer is not sufficient and, specifically, does not permit one to forecast its sharp changes and formation of some ozone anomalies in the Northern Hemisphere.