

В.В. Зуев, С.Л. Бондаренко

## К вопросу о долговременной изменчивости озоносферы: взгляд в прошлое и будущее

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 1.07.2002 г.

Продолжена дискуссия на тему долгопериодной изменчивости озоносферы. Рассматриваются природные факторы, формирующие поведение озоносферы. Реконструкция палеоповедения озоносферы для Арозы (Швейцария) почти на 500 лет позволила сделать прогноз будущих изменений озонового слоя. По прогнозу спад общего содержания озона (ОСО) в последней четверти XX в. не превышает уровня естественных колебаний озоносферы в прошлом и современное состояние «невозмущенной» озоносферы не противоречит периоду смены фазы долгопериодных колебаний. В подтверждение приводится временной ряд ОСО в виде отклонений от многолетнего среднего над Томском с 1996 по 2002 г., который характеризуется статистически незначимым практически нулевым трендом.

Как известно, проблема изменчивости озоносферы остается дискуссионной до настоящего времени. Принципиальным вопросом в исследованиях стратосферного озона является вопрос о роли антропогенного фактора в наблюдаемых изменениях. Существует признанная версия техногенного разрушения озонового слоя Земли. Согласно этой версии поведение самого длинного ряда измерений общего содержания озона (ОСО) в Арозе (Швейцария) трактуется в виде неизменного в среднем до середины 70-х гг. XX в. уровня ОСО с последующим резким его уменьшением со второй половины 70-х гг. (рис. 1, а) [1]. В настоящей статье рассматривается альтернативная версия [2], интерпретирующая поведение этого же ряда ОСО в Арозе как незавершенный цикл долговременных колебаний озоносферы. Аппроксимация ряда синусоидой позволила определить период колебаний озоносферы около 110 лет (рис. 1, б). Прогнозирование последующих изменений озоносферы на основе реконструкции поведения озона в прошлом позволяет уточнить вклад техногенного фактора в этот процесс.

Подчеркнем, что нормальное поведение озоносферы в последнюю четверть XX в. было искажено из-за возросшей активности вулканов взрывного типа в этот период. По спутниковым данным TOMS для координат Томска и данным наземных наблюдений с помощью озонметра М-124, проводимых в Томске на Сибирской лидарной станции (СЛС) [3, 4], составлены временные ряды ОСО над Томском с 1979 по 1999 г. и ход суммарного коэффициента обратного рассеяния  $\beta_{\lambda}^a$  для стратосферы средних широт с 1976 по 1999 г. (рис. 2). Ряд  $\beta_{\lambda}^a$  представляет собой объединенные данные лазерного зондирования стратосферы в Гармиш-Партенкирхене, приведенные для длины волны 694,3 нм [5], а также данные, полученные в Томске на СЛС на длине волны 532 нм [6].

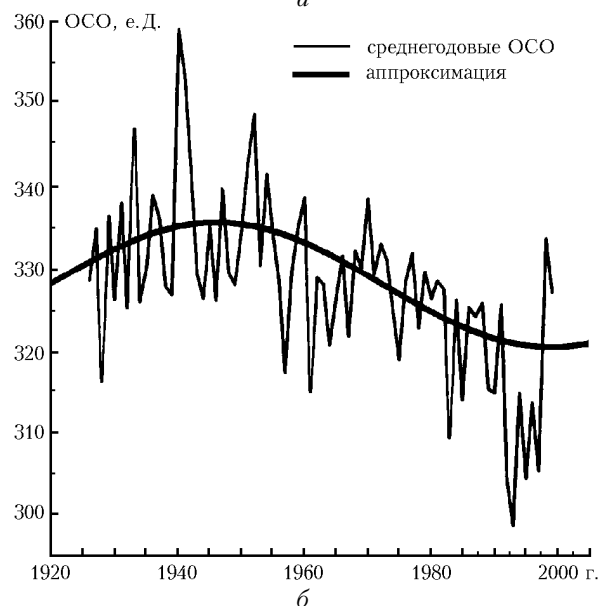
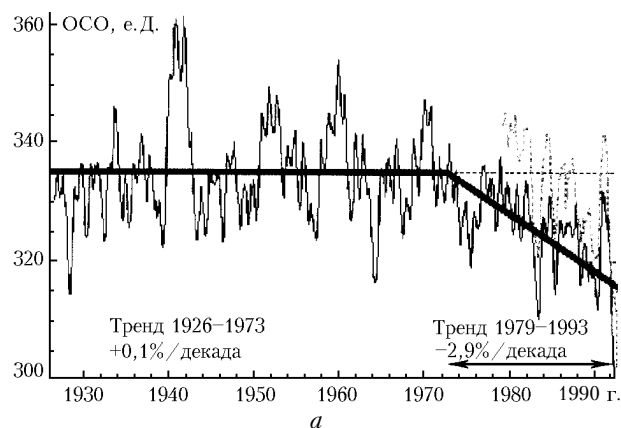


Рис. 1. Поведение ряда измерений ОСО в Арозе (Швейцария). Версия ВМО (а); версия долговременных циклических колебаний озоносферы (б)

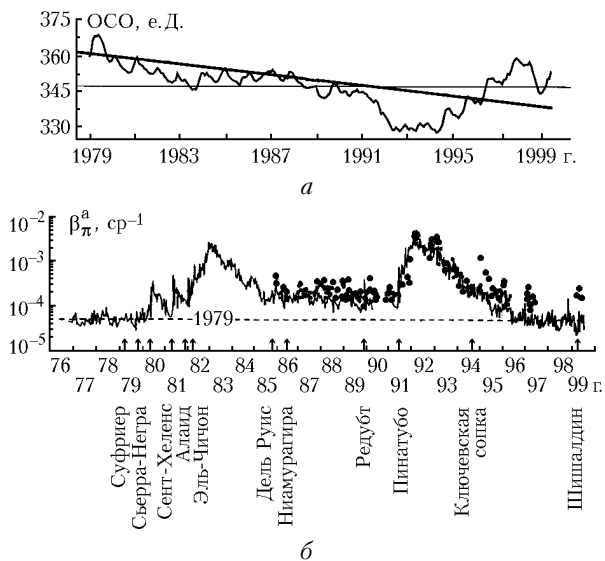


Рис. 2. Временные ряды ОСО над Томском с 1979 по 1999 г. (а) и ход суммарного коэффициента обратного рассеяния  $\beta_{\pi}^a$  для стратосферы средних широт с 1976 по 1999 г. (б)

Из поведения ходов ОСО и  $\beta_{\pi}^a$  на рис. 2 отчетливо видно, что резкий спад ОСО с конца 70-х до первой половины 90-х гг. связан с увеличением аэрозольного наполнения стратосферы после череды извержений вулканов взрывного типа. Мощнейшее извержение в XX в. вулкана Пинатубо в 1991 г. было последним в этом ряду. Оно вызвало наибольшее проседание уровня ОСО, которое достигло своего минимума в 1993 г. В дальнейшем значения ОСО довольно быстро вернулись к нормальному уровню, достигнув уже в 1998 г. уровня 70-х гг. [7]. Таким образом, в основе резкого спада ОСО в средних широтах северного полушария в обозначенный период времени лежит возросшая активность взрывных вулканов – природный фактор, а не влияние техногенных фреонов.

Но в целом даже не вулканизм определяет долговременные изменения озоносферы. Версия долговременных циклических колебаний озоносферы (см. рис. 1, б) подтвердилась при изучении поведения озоносферы в прошлом, которое оказалось возможным реконструировать из дендрохронологических данных (для Арозы) глубиной почти 500 лет.

Дендрохронологические данные представляют собой дискретные (за вегетативный период) временные ряды параметров годичного кольца древесины, характеризующие его ширину и плотность. Все изменения дендрохронологических параметров отражают физический отклик дерева и его экосистемы на воздействия окружающей среды. Эти воздействия всегда многофакторны [8]. Поэтому при выделении конкретных факторов возникает проблема выбора условий, при которых именно выделенные факторы дают более выраженную ответную реакцию в дендрохронологическом сигнале.

Основными факторами воздействия на дендрохронологические данные являются влажность и температура. Доля их влияния на прирост деревьев со-

ставляет около 60% [9]. Однако в настоящее время предлагается рассматривать как значимый фактор уровень УФ-Б солнечной радиации, контролируемый озоновым слоем земной атмосферы [10].

Связь характеристик озонового слоя и дендрохронологических данных (ОСО и плотность годичного кольца древесины соответственно) базируется на воздействии УФ-Б-радиации на рост и продуктивность растений. Озоновый слой, как известно, поглощает коротковолновую часть УФ-радиации. Таким образом, чем меньше ОСО, тем больше уровень УФ-Б-радиации и наоборот. Среди древесных видов наибольшую чувствительность к УФ-Б-излучению имеют хвойные деревья, особенно ель и кедр [11]. Повышение уровня УФ-Б-радиации, как правило, вызывает стресс у таких деревьев. Он проявляется в изменении всех показателей их развития, в том числе морфологических и структурных характеристик деревьев. Стресс приводит к уменьшению кроны, продолжительности жизни и плотности хвои, а также темпов роста поперечного сечения дерева. Стрессовое воздействие УФ-Б-радиации на деревья может проявляться прямо [12] или носить опосредованный характер, в частности из-за нарушения минерального питания, вызванного изменениями под воздействием УФ-Б-радиации популяций микроорганизмов в экосистеме дерева, обеспечивающих это питание. Этот стресс обычно накапливается годами и может проявиться с задержкой в 2–3 года [13].

Ранее нами была показана высокая корреляция между хронологиями среднеарифметического значения минимальной и максимальной плотности (в дальнейшей плотности) годичного кольца для одной из разновидностей хвойных Stone Pine (кедровая сосна) и значениями ОСО, усредненными за вегетационный период (апрель–сентябрь) для местности Арозы [14]. Значимая корреляция  $-0,6$  при вероятностном уровне  $p < 0,0001$  является основанием для реконструкции палеоповедения озонового слоя.

К счастью, для этой местности Швейцарии имеются богатейшая база дендрохронологических данных и самый длинный ряд наблюдений ОСО, а также данные метеонаблюдений, что дает возможность проверить достоверность полученных реконструкций.

Мы использовали недавно опубликованные на сайте Интернет [15] данные WSL-Birmensdorf (Fritz Schweingruber, Швейцария) в виде стандартизированных (без возрастного тренда) индексов отклонений ширины годичного кольца и его плотности. Среднемесячные значения ОСО усреднялись за вегетационный период (апрель–сентябрь) и переводились в безразмерные индексы  $j_x(t)$  по стандартной формуле:  $j_x(t) = [X(t) - \text{mean}] / \text{std}$ , где  $X(t)$  – значение переменной ряда ОСО, mean – среднее значение, а std – среднеквадратическое отклонение этого ряда. Временные ряды индексов ОСО и плотности годичного кольца сглаживались 2-летним скользящим средним, что обеспечивало не только сглаживание квазидвухлетних колебаний ОСО, но и учет запаздывания отклика деревьев на стрессовое воздействие УФ-Б-радиации (в совокупности со сдвигом ряда).

Процедура реконструкции осуществлялась на основе решения уравнения линейной регрессии, в котором индексы средней плотности годичного кольца  $i(t)$  являлись независимой переменной, а реконструируемые индексы ОСО  $J_x(t)$  – зависимой:  $J_x(t) = B_0 + B_1 i(t) + \varepsilon$ , где  $B_0, B_1$  – коэффициенты, рассчитанные в пакете Statistica 5.0, а  $\varepsilon$  – ошибка. Для прогноза наиболее вероятного хода ОСО в ближайшие 30 лет применялся метод «Гусеница» [16], который является аналогом известного метода SSA (Singular Spectrum Analysis).

Результаты реконструкции индексов ОСО  $J_x(t)$  для Арозы, обобщенные по трем дендрохронологиям общей продолжительностью с 1532 по 1998 г., представлены на рис. 3, а.

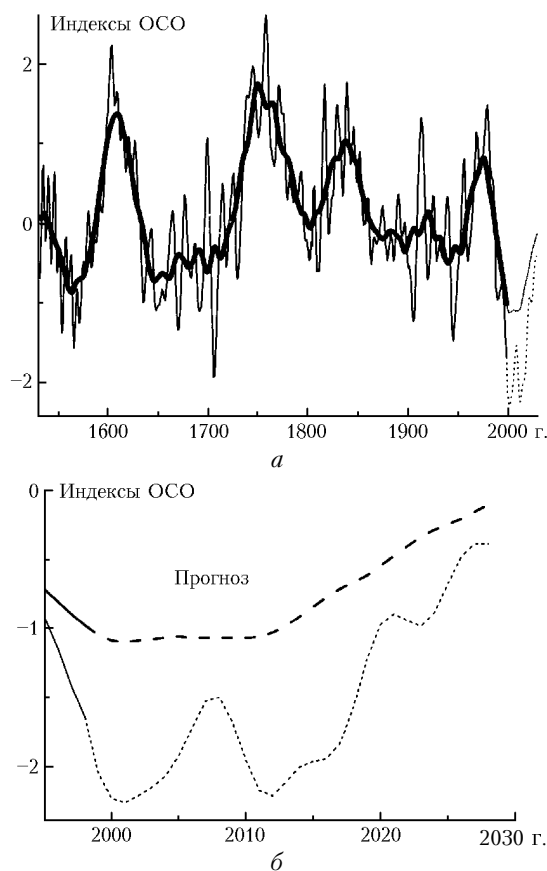


Рис. 3

Поведение кривых наглядно иллюстрирует долгопериодные колебания озоносферы. Спектральный анализ этих колебаний показывает наличие значимых циклов с периодами 11, 22, 47, 77 и 115 лет.

Прогноз возможных изменений индексов ОСО на 30 лет изображен на рис. 3, а штриховыми линиями и на рис. 3, б более масштабно.

Из рис. 3 следует, что уже в первой четверти XXI в. должен произойти рост ОСО и, кроме того, что период изменения фазы долгопериодных колебаний на рубеже XX и XXI вв. характеризуется малой изменчивостью среднего уровня ОСО. Именно такое поведение «невозмущенной» озоносферы регистриру-

ется над Томском в последние годы. Временной ряд ОСО над Томском, полученный на СЛС с 1996 по 2002 г. и изображенный на рис. 4 в виде отклонений от многолетнего среднего, характеризуется статистически незначимым практически нулевым трендом.

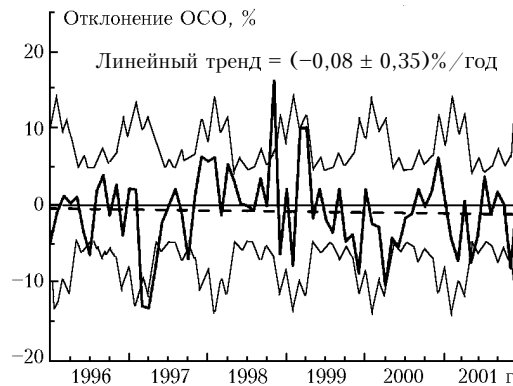


Рис. 4. Отклонения среднемесячных значений ОСО относительно нормы (1979–1989 гг.). Томск, СЛС (56,48° с.ш., 85,05° в.д.), январь 1996 г. – декабрь 2001 г.

Приведенные выше результаты и их обсуждение позволяют сделать следующие выводы.

Во-первых, уровень техногенного влияния на озоносферу сильно преувеличен. Ее поведение формируется в основном природными факторами.

Во-вторых, спад ОСО в последней четверти XX в. не превышает уровня естественных колебаний озоносферы в прошлом.

В-третьих, современное состояние «невозмущенной» озоносферы не противоречит периоду смены фазы долгопериодных колебаний.

1. <http://www.epa.gov/docs/ozone/science/arosa.html>
2. Зуев В.В. Поведение озонового слоя Земли: возможный вариант развития // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 12. С. 1356–1357.
3. Зуев В.В. Сибирская лидарная станция – уникальный экспериментальный комплекс для дистанционного зондирования атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 11. С. 94–99.
4. Зуев В.В. Дистанционный оптический контроль стратосферных изменений. Томск: МГП «Раско», 2000. 140 с.
5. Jäger H. and Homburg F. A new aerosol background level in the stratosphere? Lidar observations of the period 1976 to 1997 // Abstract of papers presented at 19th International Laser Radar Conference. Annapolis, Maryland. 1998. July 6–10. P. 335–338.
6. Zuev V.V., Burlakov V.D., Ef'nikov A.V., Ivanov A.P., Chaikovskii A.P., Sherbakov V.N. Process of long-term relation of stratospheric aerosol layer in Northern Hemisphere midlatitudes after a powerful volcanic eruption // Atmos. Environ. 2001. N. 35. P. 5059–5066.
7. Черников А.А., Борисов Ю.А., Зуев В.В., Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М., Петров С.П. Тенденции изменений озонового слоя по наблюдениям с помощью спутниковой аппаратуры TOMS и наземной озонометрической сети // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 6. С. 23–32.
8. Ваганов Е.А., Шацкин А.В. Рост и структура годичных колец хвойных. Новосибирск: Наука, 2000. 232 с.

9. *Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Mazena V.S.* Дендрохронологические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука, 1996. 246 с.
10. *Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H., Harris I.C., Jones P.D., Shiyatov S.G., Vaganov E.A.* Low-frequency temperature variations from a northern tree ring density network // *J. Geophys. Res. D.* 2001. V. 106. N 3. P. 2929–2941.
11. *Noble R.J.* Ultraviolet-B radiation effects on early growth of conifer seedlings, <http://www.rycomusa.com/aspp1997/45/0442.shtml>
12. *Laakso K., Huffunen S.* Effects of ultraviolet-B radiation (UV-B) on conifers // *Environ. Pollution.* 1998. N 99. P. 313–328.
13. *Laakso K.* Effects of ultraviolet-B radiation (UV-B) on needle anatomy and glutathione status of field-grown pines. Department of Biology, Oulu, Finland, 1999. 150 с.
14. *Зуев В.В., Бондаренко С.Л.* Взаимосвязь долгопериодной изменчивости озонового слоя атмосферы с обусловленной УФ-В воздействием изменчивостью плотности древесины // *Оптика атмосф. и океана.* 2001. Т. 14. № 12. С. 1–4.
15. <http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/treering-wsl.html>
16. *Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница»:* Сб. трудов / Под ред. Д.Л. Данилова и А.А. Жиглявского. СПб.: Санкт-Петербургский университет, 1997. С. 73–104. <http://www.gistatgroup.com/gus/>

***V.V. Zuev and S.L. Bondarenko. On long-term variability of the ozonosphere: outlook to the future and into the past.***

The paper continues the debate concerning the long-term variability of the ozonosphere. The natural factors influencing the behavior of the ozonosphere are considered. The reconstruction of paleobehavior of the ozonosphere above Arosa, Switzerland, for almost 500 years has allowed us to predict the future variations of the ozone layer. According to the prediction, the total ozone decline in the last quarter of the twentieth century does not exceed the natural variations of the ozonosphere in the past, and the current state of the «unperturbed» ozonosphere does not contradict the period of phase change of long-period variations. This is supported by total ozone time series presented in terms of deviations from multiyear average above Tomsk from 1996 to 2002, which is characterized by statistically insignificant near-zero trend.