

В.В. Зуев, Н.Е. Зуева, С.Л. Бондаренко

Влияние долгопериодных колебаний озоносферы века на изменчивость глобального содержания CO_2 в атмосфере

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 29.04.2005 г.

Показано, что сток CO_2 из атмосферы за счет фотосинтеза в растительной биоте значимо коррелирует с колебаниями озоносферы в вегетационный период из-за чувствительности хлорофилла к колебаниям уровня УФ-В-радиации. Приводятся результаты реконструкции многовековых изменений индексов общего содержания озона (ОСО) по дендрохронологическим данным, полученных в различных регионах Евразийского континента. Анализ долгопериодных колебаний индексов ОСО показывает, что депрессии стратосферного озона в больших пространственных масштабах в 30-е гг. (природного характера) и последней четверти XX в. (при участии техногенного фактора) не имели аналогов в предшествующей истории, по крайней мере, на протяжении 400 лет. Увеличение уровня УФ-В-радиации в эти периоды угнетало фотосинтез в растительной биоте, вследствие чего происходило значительное увеличение глобального содержания CO_2 в атмосфере. Эти периоды совпадают с периодами глобальных потеплений в XX в.

Введение

В течение последнего тысячелетия глобальное содержание углекислого газа (CO_2) в атмосфере сохранялось на уровне 280 млн^{-1} , но в эпоху индустриальной революции оно значительно возросло, практически достигнув к настоящему времени уровня 360 млн^{-1} [1]. Схожее поведение глобальных температур у поверхности Земли легло в основу моделей глобальных изменений климата вследствие «парникового» эффекта [2–4].

Интересно, что на фоне все время усиливающегося в XX в. индустриального фактора поведение глобальных температур было весьма неоднородным. В этой связи достаточно вспомнить дискуссию о потеплении в 30-е гг. Отметим, что скорости нарастания атмосферных концентраций CO_2 в разные периоды индустриальной эпохи также были различны. Например, с 1956 по 1988 г. концентрации CO_2 увеличились с $315,6$ до $351,2 \text{ млн}^{-1}$, т.е. со скоростью $1,1 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$, а за период 1980–1990 гг. скорость составляла уже $1,6 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$ [1].

Если обратиться к ряду данных глобального содержания CO_2 в атмосфере в XX в. [5], изображенному на рис. 1, а, и вычесть из него полиномиальный (параболический) тренд, приведенный там же, то в результате проявляются два основных максимума изменчивости глобального содержания CO_2 в атмосфере в XX в., приходящихся на 30-е гг. и на конец XX в. С учетом непрерывно возрастающего вклада в глобальный круговорот CO_2 индустриального фактора закономерен вопрос, чем обусловлена эта изменчивость? Какой иной значимый фактор не учитывается в моделях глобального изменения климата?

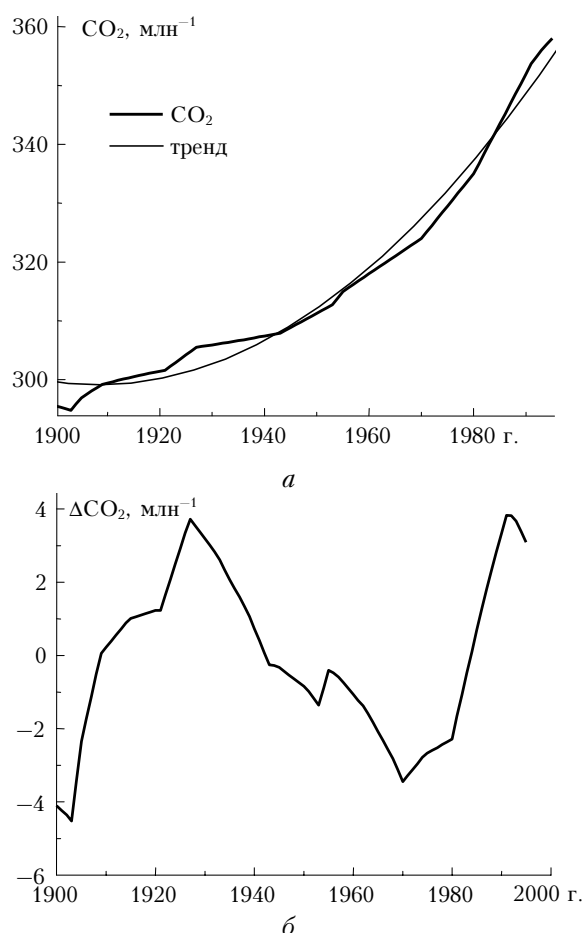


Рис. 1. Временной ход глобального содержания CO_2 в атмосфере в XX в. и его параболический тренд (а), отклонения от этого тренда глобального содержания CO_2 (б)

Постановка проблемы

Если взглянуть на баланс глобального цикла углерода, приведенный в табл. 1 по данным [6], то видно, что вклады в естественный круговорот углерода во много раз превышают вклады техногенного характера. Но природные вклады практически полностью скомпенсированы в углеродном цикле, что и позволяет проявляться в нем уступающему им индустриальному вкладу.

Таблица 1

Баланс глобального цикла углерода, Гт С/год			
Сток из атмосферы		Эмиссия в атмосферу	
Фотосинтез	120	Океан	93
Океан	100	Почва	60
Известковые осадки	2	Дыхание растений	60
		Промвыбросы	6
		Сведение лесов	3
<i>Итого</i>	222	<i>Итого</i>	222

Из табл. 1 видно, что основной сток CO_2 из атмосферы осуществляется за счет фотосинтеза в растительной биоте. Причем подавление фотосинтеза всего на единицы процентов может приводить к дополнительному увеличению содержания CO_2 в атмосфере по объемам, сравнимым или даже превышающим вклады за счет индустриального фактора.

Как известно, угнетающее воздействие на фотосинтез растений оказывает УФ-В-радиация [1]. Уровень УФ-В-радиации, по крайней мере для чистой атмосферы, управляется общим содержанием озона (ОСО) за счет ее поглощения преимущественно в стратосферном озоновом слое – озоносфере [7]. Таким образом, прослеживается связь между изменениями озоносферы и фотосинтетическим стоком CO_2 из атмосферы.

Эта связь однозначно регистрируется, например, по результатам инструментальных измерений ОСО и концентраций CO_2 над таежными лесами Сибири в летний период [8].

Распределение ОСО неоднородно в пространстве и во времени [9]. Обычно даже в одном поясе в умеренных и субполярных широтах зоны с низким ОСО перемежаются с зонами с высоким ОСО под влиянием полярно-фронтовых струйных течений [10]. При интегрировании этих зон в глобальном масштабе должно происходить усреднение воздействия УФ-В-радиации на фотосинтетические процессы, определяющее мало изменяющийся с годами уровень глобального стока CO_2 . Однако, например, в последней четверти XX в. в умеренных и особенно полярных широтах обоих полушарий происходил повсеместный спад ОСО со средней скоростью 2,5% за 10 лет [11]. И это могло привести к «глобальной депрессии фотосинтеза» в растительной биоте, способствующей усиленному росту глобального содержания CO_2 в атмосфере.

Как отмечалось выше, содержание CO_2 в доиндустриальную эпоху в течение почти 1000 лет не испытывало значительных вариаций. Отсюда возникает вопрос, являлось ли событие глобальной депрессии озонового слоя в последней четверти XX в. уникальным для больших пространственных масштабов или все же оно имело аналоги в прошлом на этой временной шкале. Для этого рассмотрим четырехугольник (рис. 2), охватывающий значительную часть поверхности Евразийского континента.

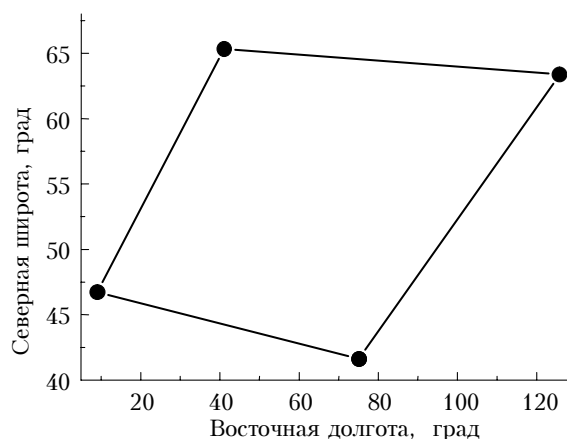


Рис. 2. Схема в плоскости координат анализируемого четырехугольника, охватывающего значительную часть Евразийского континента от Швейцарии на западе до Якутии на востоке, от Киргизии на юге до Ямала на севере

Вершины этого четырехугольника представлены координатами, для которых имеются дендрохронологические данные.

Результаты анализа палеоповедения озоносферы на основе дендрохронологических данных

Влияние УФ-В-радиации на фотосинтез растений позволяет связать изменения ОСО с дендрохронологическими параметрами по следующей цепочке: солнечная радиация – озоносфера (ОСО) – УФ-В-радиация – фотосинтез – рост растения (дендрохронологические параметры). Реакция на УФ-В-воздействие в вечнозеленых растениях может накапливаться со временем и усиленно проявляться за счет куммулятивного эффекта [12]. Наибольшей чувствительностью к УФ-В-воздействию обладают темнохвойные породы деревьев (пихта, ель, кедровая сосна), которые составляют значительную часть бореальных лесов.

Анализ корреляций индексов ОСО и дендрохронологических параметров, методика и результаты реконструкций палеоповедения озоносферы из древесно-кольцевых хронологий хвойных деревьев опубликованы нами ранее в [13–15].

Значения ОСО и дендрохронологические параметры для корреляционного анализа рядов ОСО и древесно-кольцевых хронологий для вершин выбранного четырехугольника, как и ранее, взяты из [16] и [17] соответственно. Результаты этого корреляционного анализа приведены в табл. 2.

Высокие значения коэффициентов корреляции R_{xy} позволяют осуществить устойчивую реконструкцию поведения ОСО (Y_i) в прошлом на основе дендрохронологических данных (X_i) методом линейной регрессии:

$$Y_i = K_0 + K_1 X_i. \quad (1)$$

Коэффициенты регрессии K_0 и K_1 рассчитывались по формулам обобщенной регрессии [18]:

$$K_1 = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \frac{B}{A} \frac{1}{2R_{xy}} \left\{ \left(\frac{A}{B} - \frac{B}{A} \right) + \sqrt{\left(\frac{A}{B} - \frac{B}{A} \right)^2 + 4R_{xy}^2} \right\}, \quad (2)$$

где

$$A = \sqrt{1 - |R_{xy}| \left(\frac{1 - \delta_x^2 / \sigma_x^2}{1 - \delta_y^2 / \sigma_y^2} \right)}, \quad B = \sqrt{1 - |R_{xy}| \left(\frac{1 - \delta_y^2 / \sigma_y^2}{1 - \delta_x^2 / \sigma_x^2} \right)},$$

$$K_0 = \bar{Y} - K_1 \bar{X}. \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) σ_x , σ_y – среднеквадратические отклонения; δ_x , δ_y – среднеквадратические погрешности рядов наблюдений; \bar{Y} и \bar{X} – средние значения рядов Y_i и X_i . Эти формулы, учитывающие реальные погрешности инструментальных измерений ОСО и дендрохронологических параметров (определенные в нашем случае на уровне 2%), позволяют получать более стабильные результаты.

Результаты реконструкции палеоданных ОСО в индексах для координат в вершинах выбранного четырехугольника представлены на рис. 3, а. Здесь же на рис. 3, б приведены периодограммы колебаний ОСО для этих координат.

Таблица 2

Оценка корреляций индексов ОСО и плотности годичных колец хвойных деревьев

Регион	Координаты, с.ш./в. д.	Период, годы	Коэффициент корреляции
Киргизия	41°6′/75°15′	1626–1995	-0,65 ± 0,06
Швейцария	46°7′/9°1′	1537–1995	-0,76 ± 0,04
Россия:			
р. Вилюй	63°4′/125°8′	1568–1991	-0,61 ± 0,06
р. Полуй	65°3′/69°5′	1601–1991	-0,94 ± 0,01

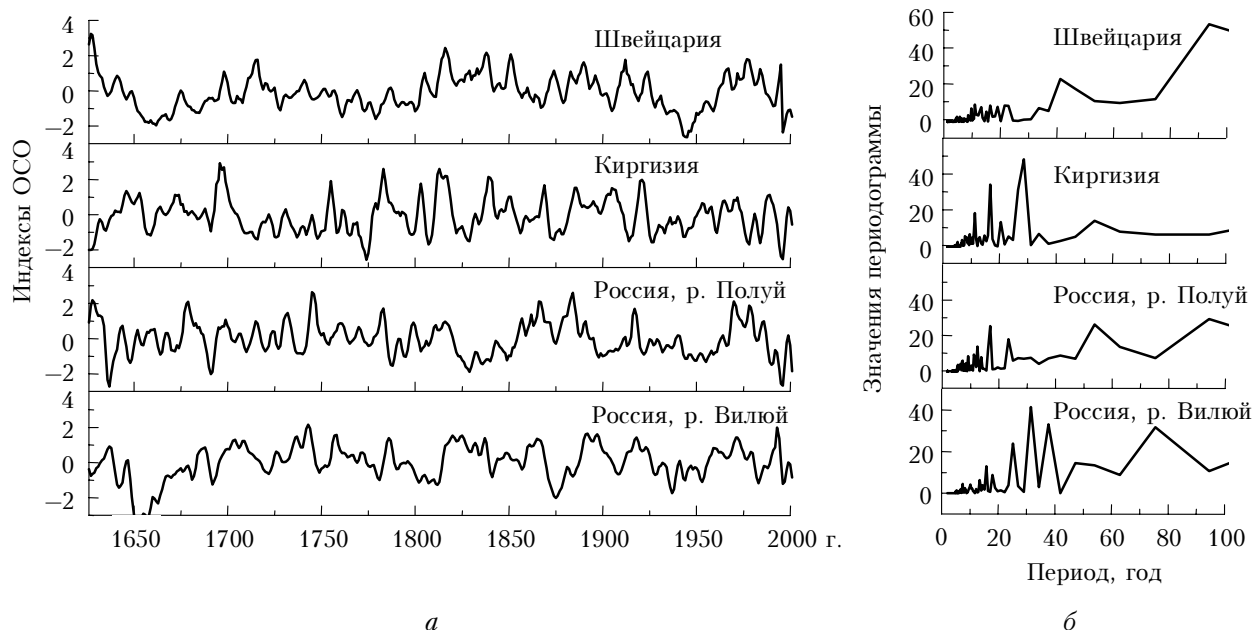


Рис. 3. Результаты реконструкции индексов ОСО из дендрохронологических данных (а) и периодограммы (б) их долгопериодных колебаний

Обсуждение результатов

Во всех колебаниях однозначно проявляются общие периоды, связанные с 11-летним солнечным циклом (11 лет и 22 года). Более низкочастотные колебания ОСО в каждой точке, связанные с долгопериодными колебаниями атмосферной циркуляции, которые стратосферный озон в средних и высоких широтах отслеживает как пассивный трассер, имеют разные периоды.

Проведем сглаживание результатов реконструкции ОСО скользящим окном 22 года и сведем сглаженные ряды (рис. 4, *a*). На рис. 4, *a* видно, что колебания сглаженных рядов происходят несинхронно практически на всем 400-летнем интервале. Это связано с характерной пространственно-временной неоднородностью поля ОСО в таких протяженных масштабах. Синхронизованный спад в долгопериодных колебаниях ОСО на всем анализируемом интервале 400 лет наблюдается только в двух участках XX в.: в 30-е гг. и особенно в последнюю четверть. Именно в эти периоды XX в. наблюдались максимумы изменений глобального CO_2 в атмосфере и максимумы приземных температур.

Из рис. 4, *a* видно, что долгопериодные колебания ОСО в разных регионах происходят, как правило, несинхронно. События 30-х гг. и последней четверти XX в. не имели аналогов на значительной части Северного полушария, по крайней мере в течение последних 400 лет. По-видимому, можно считать, что синхронизованный спад долгопериодных колебаний ОСО в глобальных масштабах — достаточно редкое явление. Можно предположить, что событие 30-х гг. обусловлено случайным совпадением фаз низкочастотных колебаний ОСО природного характера с различными периодами, а события последней четверти XX в. происходили при участии техногенного фактора (выбросы фреонов), усиленного длительным возмущением глобальной стратосферы вулканогеогенным аэрозолем после череды взрывных извержений вулканов [19].

Это предположение подтверждается результатами 50-летних прогнозов долгопериодных изменений

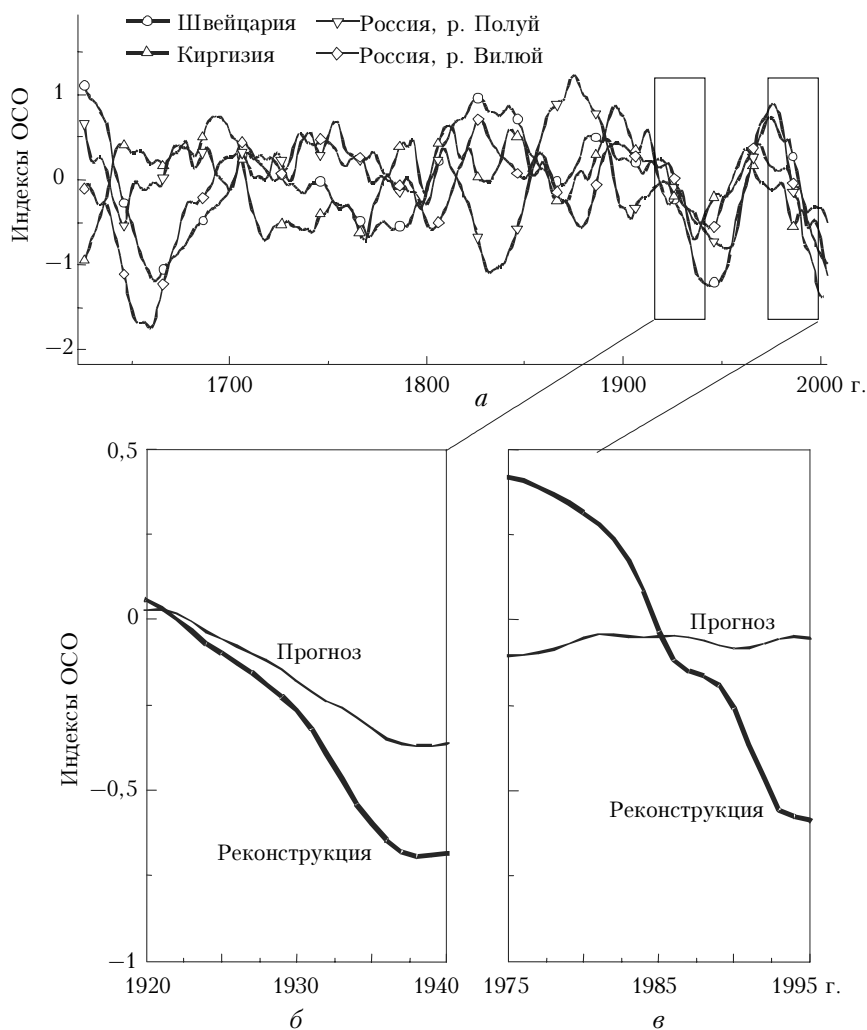


Рис. 4. Временные ходы (*a*) реконструированных индексов ОСО из дендрохронологических данных для четырех координат, сглаженных скользящим окном 22 года, и участки сравнения реконструированных и прогнозируемых для 50 лет индексов ОСО, усредненных для четырех координат на интервалах 1920–1940 гг. (*б*) и 1975–1995 гг. (*в*)

ОСО, проведенных с помощью аппарата «Гусеница» [20] на основе длинных рядов реконструированных данных. На рис. 4,б приведены результаты 50-летнего прогноза поведения ОСО после 1900 г., представленные на интервале 1920–1940 гг. (событие 30-х гг.) в сравнении с реконструированными значениями ОСО, а на рис. 4,в изображены аналогичные данные после 1950 г. на интервале 1975–1995 гг. (событие последней четверти XX в.). Для наглядности на рис. 4,б,в приведены только усредненные кривые временных ходов реконструированных и прогнозируемых значений индексов ОСО для четырех координат в вершинах анализируемого четырехугольника. Видно, что событие 30-х гг. хорошо прогнозировалось на основе предшествующей истории долгопериодных колебаний, а событие последней четверти XX в. явно носило аномальный характер.

Выраженный синхронизованный спад долгопериодных колебаний ОСО в глобальных масштабах должен приводить к «глобальной депрессии фотосинтеза». Отметим, что эти процессы охватывают не только растительность суши, но и водную растительную биоту, в первую очередь фитопланктон. При увеличении уровня УФ-В-радиации в воде разрушаются растворенные органические вещества (РОВ), поглощающие остатки УФ-В-радиации и экранирующие фитопланктон от УФ-В-воздействия [1]. Незащищенный фитопланктон гибнет. Гибель фитопланктона, находящегося в начале трофической цепочки, сказывается на популяции всех водных организмов.

В табл. 3 приведены результаты корреляционного анализа объема уловов корюшки и ряпушки в Ладожском озере и среднемесячных колебаний ОСО в этом регионе.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции R для выборки с 1946 по 1995 г. среднемесячных значений индексов ОСО, сглаженных 2-летним скользящим средним, и улова рыбы в Ладожском озере

Месяц	R
<i>Корреляция между уловом корюшки и ОСО</i>	
Апрель	0,60 ± 0,18
Май	0,62 ± 0,17
Июнь	0,94 ± 0,03
Июль	0,41 ± 0,23
Август	0,60 ± 0,18
<i>Корреляция между уловом ряпушки и ОСО</i>	
Март	0,85 ± 0,07
Апрель	0,86 ± 0,07
Май	0,51 ± 0,21
Июнь	0,67 ± 0,15
Июль	0,33 ± 0,25
Август	0,83 ± 0,09
Сентябрь	0,86 ± 0,07

Видно, что колебания ОСО, контролирующие уровень УФ-В-радиации, значимо сказываются в изменениях популяций этих рыб. Таким образом, спад ОСО в глобальных масштабах должен отразиться снижением активности фотосинтеза и в фитопланктоне.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. Глобальные депрессии стратосферного озона в 30-х гг. и в последнюю четверть XX в. являются редким явлением, не имеющим аналогов в прошлом на временной шкале, по крайней мере с 1600 по 2000 г. Периоды этих озоновых депрессий совпадают с периодами глобальных потеплений в XX в.

2. Глобальное уменьшение уровня общего содержания озона и связанное с этим увеличение УФ-В-радиации в эти периоды приводило к глобальной депрессии фотосинтеза в растительной биоте. В результате нарушался баланс в глобальном углеродном цикле из-за уменьшения стока CO_2 и, как следствие, происходило значительное увеличение содержания CO_2 в атмосфере.

3. Во всех климатических моделях для правильного прогноза глобальных изменений необходимо учитывать возможный фактор глобального усиления УФ-В-радиации.

Мы благодарны Л.А. Кудерскому (Институт озераведения РАН) за любезно предоставленные данные по вылову озерных рыб.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по интеграционному проекту СО РАН № 95 и грантам РФФИ № 03-05-65105, 05-05-98003.

1. Кондратьев К.Я., Донченко В.К. Экодинамика и геополитика. Т. 1. Глобальные проблемы (К.Я. Кондратьев). СПб., 1999. 1032 с.
2. Будыко М.И. Изменения климата. Л.: Гидрометеондат, 1974. 279 с.
3. Houghton J.T. Global Warning. The Complete Briefing. Lion Publ. Oxford, England. 1994. 192 p.
4. Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callander B.A., Hams N., Kattenberg A., Masskell K. (eds). Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Cambridge Univ. Press, 1996. 572 p.
5. ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/climate_forcing/robertson2001/trace_gas.txt
6. Добровольский Г.В., Куст Г.С. Деградация почв – «тихий кризис планеты» // Природа. 1996. № 5. С. 54–63.
7. Kondratyev K.Ya., Varotsos C.A. Atmospheric Ozone Variability: Implications for climate change, human Health and Ecosystems. Chichester U.K.: Springer PRAXIS, 2000. 228 с.
8. Зуев В.В., Белан Б.Д., Зуева Н.Е., Иноие Г., Мачида Т. Связь стока углекислого газа из атмосферы над бореальными лесами Сибири с колебаниями озоносферы // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 7. С. 618–620.
9. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеондат, 1986. 264 с.
10. Гуцин Г.П., Виноградова Н.Н. Суммарный озон в атмосфере. Л.: Гидрометеондат, 1983. 237 с.
11. Черников А.А., Борисов Ю.А., Зуев В.В., Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. Тенденции изменений озонового слоя по наблюдениям с помощью спутниковой аппаратуры TOMS и наземной озонометрической сети // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 6. С. 23–32.
12. Sprtova M., Marek M.V., Nedbal L., Prasil O., Kalina J. Seasonal changes of photosynthetic assimilation of Norway spruce under impact of enhanced UV-B radiation // Plant Sci. 1999. 142. P. 37–45.

13. 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.
14. Зуев В.В., Бондаренко С.Л. Реконструкция палеоповедения озонового слоя из дендрохронологических данных с использованием спутниковых данных TOMS // Исслед. Земли из космоса. 2002. № 6. С. 19–24.
15. Зуев В.В., Бондаренко С.Л. Реконструкция многовекового хода общего содержания озона на основе дендрохронологических данных // Докл. РАН. 2003. Т. 392. № 5. С. 682–385.
16. <http://toms.gsfc.nasa.gov/>
17. <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/treering-wsl.html>
18. Щелканов Н.Н. Обобщенный метод построения линейной регрессии между двумя физическими величинами с учетом их случайных погрешностей. Препр. / Ин-т оптики атмосферы (Томск). 2003. 15 с.
19. Зуев В.В. Лидарный контроль стратосферы. Новосибирск: Наука, 2004. 307 с.
20. <http://www.gistatgroup.com/gus/programs.html>.

V.V. Zuev, N.E. Zueva, S.L. Bondarenko. **Influence of long-period variations of ozonosphere on variability of global CO₂ content in the atmosphere.**

It is shown that CO₂ sink from the atmosphere due to photosynthesis in vegetation biota significantly correlates with variations of ozonosphere in growing season because of the sensitivity of chlorophyll to variations of the level of UV-B radiation. We present the results of reconstruction of multi-secular variations of total ozone (TO) indices from dendrochronologic data for geographically far regions of Eurasian continent. From analysis of long-period variations of TO indices it is shown that depressions of stratospheric ozone on large spatial scales in the 1930s (natural in character) and the last quarter of twentieth century (with participation of anthropogenic factor) had no analogs in preceding history for at least 400 years. The increase of the level of UV-B radiation in these periods depressed photosynthesis in vegetation biota, leading to considerable increase of global CO₂ content in the atmosphere. These periods coincide with periods of global warmings in the twentieth century.