

В.В. Зуев, Б.Д. Белан, Н.Е. Зуева, Г. Инойе<sup>1</sup>, Т. Мачида<sup>1</sup>

## Связь стока углекислого газа из атмосферы над бореальными лесами Сибири с колебаниями озоносферы

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия*

<sup>1</sup>*Национальный институт исследования окружающей среды, г. Цукубо, Япония*

Поступила в редакцию 14.04.2005 г.

Приведены результаты семилетнего ежемесячного мониторинга концентраций  $\text{CO}_2$  на высотах 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4; 5,5 и 7 км, проводимого во время полетов самолета-лаборатории «Оптик-Э» ИОА СО РАН с 1997 г. Результаты показывают неуклонный рост из года в год содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере Сибирского региона, несмотря на то что интенсивность промышленных выбросов в этот период не была высокой. Ежегодные колебания содержания  $\text{CO}_2$  с минимальными значениями летом происходят за счет изменения активности фотосинтеза с максимумом в летний период.

Проведено сравнение ежегодных изменений общего содержания озона для региона самолетных измерений за июнь–июль с соответствующими по времени концентрациями  $\text{CO}_2$  на всех высотах. Максимальная корреляция индексов  $\text{CO}_2$  и ОСО в эти месяцы найдена для высоты измерений 1,5 км. Она составляет –94%, что говорит о сильной зависимости фотосинтетического стока  $\text{CO}_2$  в темнохвойных лесах Сибири от колебаний ОСО, управляющих уровнем УФ-В-радиации.

### Введение

Основной сток углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) из атмосферы над сушей происходит за счет фотосинтеза в растениях. Первое место в этом процессе, как известно, занимают тропические леса, второе место – бореальные. Более половины бореальных лесов расположены в России, причем преимущественно в сибирской тайге.

Активность хлорофилла в хлоропластах растений существенно зависит от уровня самой коротковолновой части радиации Солнца, достигающей земной поверхности, в диапазоне УФ-В 290–320 нм. Увеличение уровня этой радиации снижает активность фотосинтеза [1]. Наиболее сильно этот эффект проявляется в вечнозеленых хвойных породах деревьев, в которых УФ-В-воздействие аккумулируется со временем [2]. Отметим, что таежная зона Сибири в основном представлена темнохвойными породами (пихта, ель и кедровая сосна).

Отклонения уровня УФ-В-радиации в чистой атмосфере полностью контролируются общим содержанием озона (ОСО) в атмосферном столбе за счет поглощения им ее основной части преимущественно в стратосферном озоновом слое – озоносфере, где содержится основное количество атмосферного озона [3]. Таким образом, формируется связь фотосинтетического стока  $\text{CO}_2$  из атмосферы с колебаниями озоносферы.

### Результаты самолетных измерений концентрации $\text{CO}_2$ над таежными лесами Сибири

Регулярные измерения концентраций  $\text{CO}_2$  над южными лесными районами Сибири проводятся с 1997 г. и по настоящее время с помощью самолета-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э» Института оптики атмосферы СО РАН [4], на котором каждый месяц осуществляются заборы внешнего воздуха на высотах 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4; 5,5 и 7 км в специальные колбы. Химический анализ этих проб проводится на аттестованных аналитических стендах в Японии с помощью хроматографии. Параллельно осуществляются измерения  $\text{CO}_2$  с помощью газоанализатора LiCor 6262. В результате получают профили  $\text{CO}_2$ , характеризующие ежемесячные изменения его вертикального распределения. Нижняя часть этих профилей до высот менее 3 км в большей степени отражает региональные изменения. Содержание  $\text{CO}_2$  на высотах более 3 км уже больше связано с глобальными процессами.

На рис. 1 представлены временные ходы средних концентраций  $\text{CO}_2$  для атмосферных слоев 0,5–2 и 3–7 км, усредненных для каждого месяца. Из рис. 1 видно, что в исследуемый период с 1997 по 2004 г. содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере из года в год увеличивалось, хотя интенсивность промышленных выбросов  $\text{CO}_2$  в Сибири, как и в целом в России,

## Анализ связей изменений атмосферных концентраций CO<sub>2</sub> с колебаниями ОСО

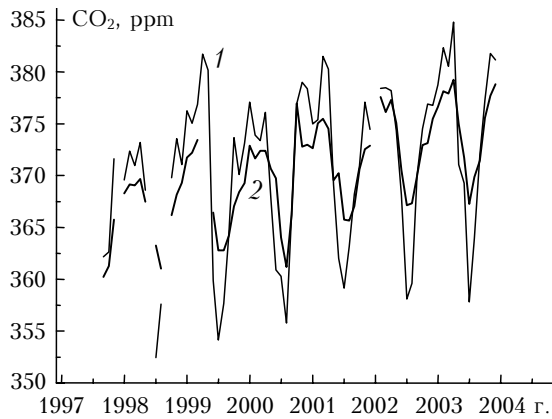


Рис. 1. Временные хода средних концентраций CO<sub>2</sub> для атмосферных слоев: 0,5–2 (1) и 37 км (2), составленные по усредненным для каждого месяца результатам самолетных измерений во время ежемесячных полетов самолета-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э» над лесными массивами юго-западной зоны Сибири

в этот период нельзя считать высокой. На фоне неуклонного роста CO<sub>2</sub> хорошо видны, особенно в нижнем атмосферном слое, годовые колебания с минимальными значениями летом и максимальными зимой из-за усиления стока CO<sub>2</sub>, связанные с активизацией фотосинтеза в теплый (вегетационный) период года.

Более ярко усиление стока CO<sub>2</sub> в летний период видно из сравнения среднесезонных (лето, зима) вертикальных профилей CO<sub>2</sub> (рис. 2).

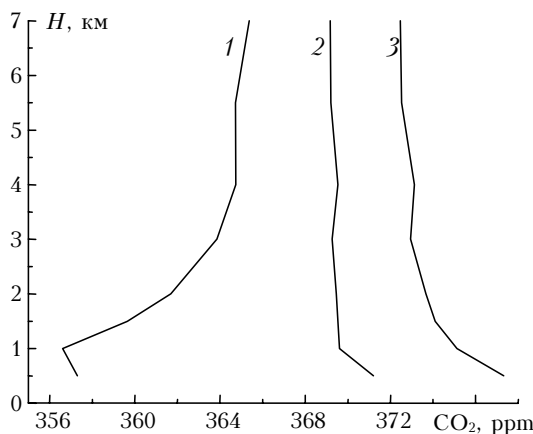


Рис. 2. Сравнение среднесезонных (лето, зима) и среднегодовых вертикальных профилей CO<sub>2</sub>, полученных по результатам самолетных измерений (1 – летний; 2 – среднегодовой; 3 – зимний)

Летом в нижнем (0,5–2 км) слое атмосферы наблюдается «выедание» профиля CO<sub>2</sub> из-за активного фотосинтеза в растительной биоте. Усиленный сток приводит к общему снижению концентраций CO<sub>2</sub> на всех высотах по сравнению с зимним периодом. Зимой, в отсутствие активного стока CO<sub>2</sub> при дополнительных выбросах CO<sub>2</sub> в отопительный сезон, происходит его накопление в атмосфере. Причем форма среднесезонного профиля CO<sub>2</sub> определяет форму среднегодового профиля CO<sub>2</sub>, также приведенного на рис. 2, поскольку основная часть бореальных лесов находится в режиме активного фотосинтеза меньшую часть года.

На рис. 3 представлены вертикальные профили CO<sub>2</sub>, усредненные за июнь–июль за каждый год самолетных измерений с 1997 по 2003 г. Этим месяцам, как видно из рис. 1, соответствуют самые низкие концентрации CO<sub>2</sub> благодаря активному стоку CO<sub>2</sub> в максимуме сезонной инсоляции. Значения ОСО для региона самолетных измерений взяты по данным космической аппаратуры TOMS, они также усреднялись за эти 2 мес.

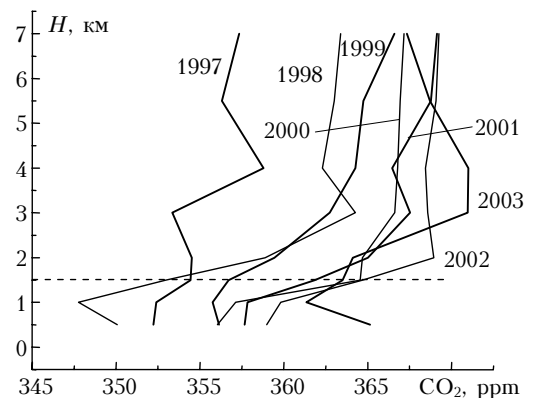


Рис. 3. Вертикальные профили CO<sub>2</sub> (горизонтальной прямой отмечен уровень 1,5 км)

Рассматривалась корреляция ОСО с концентрациями CO<sub>2</sub> на всех высотных уровнях. Максимальная корреляция обнаружена для уровня 1,5 км. Рис. 4, а иллюстрирует выраженное согласие в годовых ходах концентраций CO<sub>2</sub> на высоте 1,5 км и ОСО, усредненных за июнь–июль каждого года. Если вычесть линейные тренды в этих рядах и перевести их в безразмерные индексы путем вычитания среднего и нормировки на среднеквадратические отклонения (СКО), то коэффициент отрицательной корреляции индексов ОСО и CO<sub>2</sub> достигает 94% (рис. 4, б).

Можно предположить, что летние концентрации CO<sub>2</sub> на атмосферном уровне 1,5 км отражают результирующее воздействие таежных лесов на фотосинтетический сток CO<sub>2</sub> примерно в тех же пространственных масштабах, что и масштабы усреднения данных TOMS. Для меньших высот корреляция снижается из-за проявления локальных эффектов, но остается значимой на высоте 1 км. На высотах более 3 км начинают сказываться процессы глобальных масштабов и корреляция становится незначимой. На рис. 5 приведены годовые хода концентраций CO<sub>2</sub> на максимальной высоте измерений 7 км и ОСО, усредненных за июнь–июль каждого года. Коэффициент отрицательной корреляции индексов ОСО и CO<sub>2</sub> в этом случае составляет всего 4%.

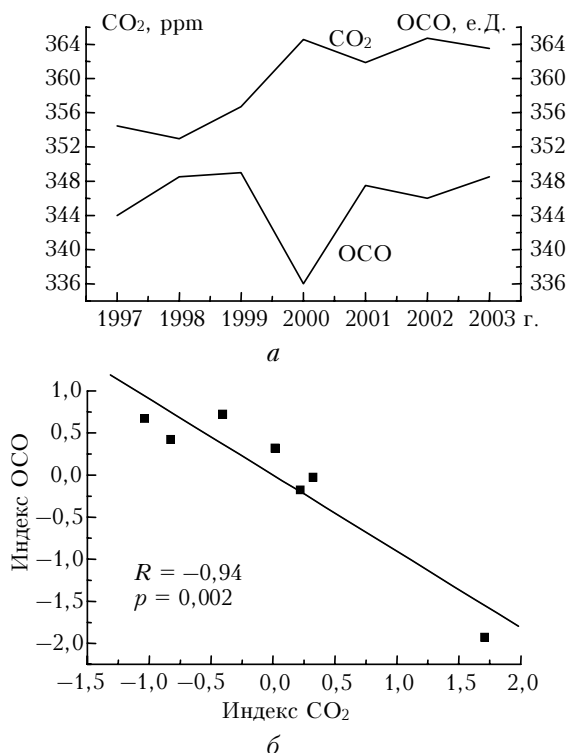


Рис. 4. Годовые хода концентраций CO<sub>2</sub> на высоте 1,5 км и OCO, усредненных за июнь–июль каждого года (а) и корреляция индексов OCO и CO<sub>2</sub> на этой высоте (б)

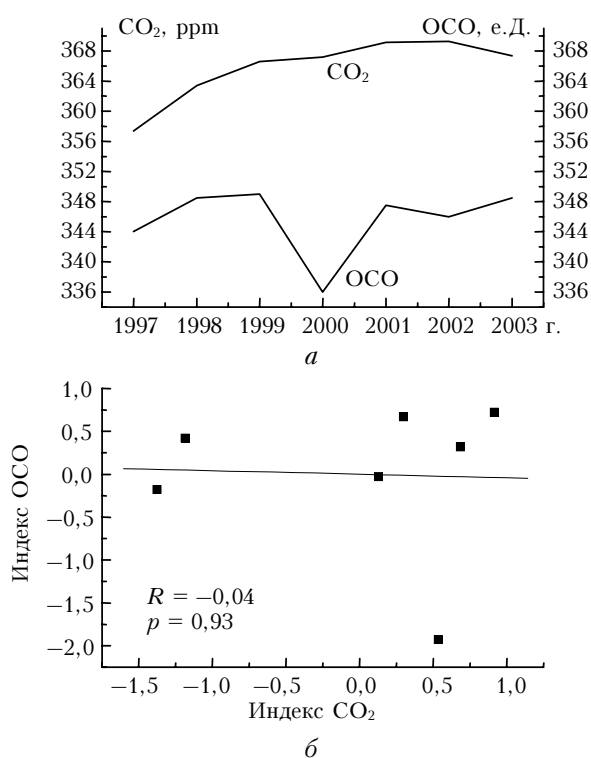


Рис. 5. Годовые хода концентраций CO<sub>2</sub> и OCO (а) и корреляция индексов OCO и CO<sub>2</sub> на высоте 7 км (б)

### Заклучение

Представленные выше результаты корреляционного анализа действительно указывают на существенную связь летних концентраций CO<sub>2</sub> над таежными лесами Сибири с колебаниями озоносферы. Это объясняется быстрым физиологическим откликом растений на изменения уровня УФ-В-радиации. Повышение этого уровня угнетает активность фотосинтеза, растение испытывает стресс. В результате не только снижается сток CO<sub>2</sub>, но и усиливается выброс CO<sub>2</sub> за счет дыхания растений, находящихся в стрессовом состоянии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по интеграционному проекту СО РАН № 95 и грантам РФФИ 03-05-65105, 04-05-64559, 04-05-08010 и 05-05-98003-р-объ-а.

1. Кондратьев К.Я., Донченко В.К. Экодинамика и геополитика. Т. 1. Глобальные проблемы (К.Я. Кондратьев). СПб., 1999. 1032 с.
2. 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. N 142. P. 37–45.
3. Kondratyev K.Ya., Varotsos C.A. Atmospheric Ozone Variability: Implications for climate change, human Health and Ecosystems. Chichester U.K.: Springer PRAXIS, 2000.
4. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М., Ковалевский В.К., Лукьянов О.Ю., Мелешкин В.Е., Микушев М.К., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Покровский Е.В., Сакерин С.М., Терпугова С.А., Толмачев Г.Н., Туманов А.Г., Шаманаев В.С., Щербатов А.И. Самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э» для экологических исследований // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5. № 10. С. 1012–1021.

#### V.V. Zuev, B.D. Belan, N.E. Zueva, G. Inoue, T. Machida. Interrelation between carbon dioxide sink from the atmosphere over boreal forests of Siberia and variations of ozonosphere.

We present the results of seven-year monthly monitoring of CO<sub>2</sub> concentrations at heights 0.5; 1; 1.5; 2; 3; 4; 5.5 and 7 km, performed during flights of airborne laboratory Optik-E of IAO SB RAS since 1997. The results show the steady growth of CO<sub>2</sub> content in the atmosphere of Siberian region from year to year despite the fact that the intensity of industrial emissions was not high in this period. The annual variations of CO<sub>2</sub> content with minimum values in summer are associated with changes of activity of photosynthesis, peaking in summer period.

We compared annual variations of total ozone (TO) for the region of aircraft measurements for two summer months June–July against coincident CO<sub>2</sub> concentrations at all altitudes. Correlation between CO<sub>2</sub> and TO indices in these months is found to be highest for the measurement altitude of 1.5 km. It reaches 94%, indicating that the photosynthetic sink of CO<sub>2</sub> in dark coniferous forests of Siberia strongly depends on TO variations controlling the level of UV-B radiation.