

**Б.Д. Белан, А.П. Плотников, Г.Н. Толмачев**

## **Сезонная динамика вертикального распределения тропосферного озона над Западной Сибирью**

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 26.03.2001 г.

По данным самолетного зондирования за 1998–2000 гг. рассматривается сезонный ход вертикального распределения концентрации озона в слое от 0 до 7000 м. Показано, что основное количество тропосферного озона образуется *in situ* во внутреннем слое перемешивания в весенний период года. Изменение концентрации на разных высотах происходит достаточно синхронно, что свидетельствует о незначительности поступления озона из стратосферы. Приведены данные об абсолютных максимумах концентрации озона на всех высотах внутри рассмотренного слоя.

Тропосферный озон, образующийся *in situ*, представляет собой вещество, которое ГОСТом относится к первому классу опасности, что определяет экологическую актуальность его исследования [1, 2]. Имея продолжительное время жизни в тропосфере (от нескольких дней до нескольких месяцев) и интенсивные линии поглощения излучения, тропосферный озон может играть значительную роль в ее парниковом эффекте. По оценкам [3,4], его вклад в дополнительное нагревание воздуха может составлять 8–20% от нагревания, обусловленного поглощением солнечного излучения основными парниковыми газами.

Следовательно, чтобы контролировать экологическую обстановку в конкретном месте и прогнозировать климатические изменения, необходимо иметь сведения о пространственно-временном распределении и изменчивости тропосферного озона

Для измерения вертикального распределения озона в тропосфере используются три метода: шаропилотное, самолетное и лазерное зондирование. Обстоятельства сложились так, что на всей территории России в настоящее время регулярных измерений вертикальных профилей озона не производится ни одним методом. Это приводит к тому, что такая огромная территория не может быть учтена при оценке глобального баланса тропосферного озона.

Начиная с июля 1997 г. Институт оптики атмосферы СО РАН совместно с Национальным институтом исследования окружающей среды (Цукуба, Япония) организовал регулярное самолетное зондирование атмосферы, включая озон, над одним из южных регионов Западной Сибири. Полеты выполняются ежемесячно над лесным массивом вблизи д. Завьялово Новосибирской области. Время вылета самолета-лаборатории выбрано вблизи полудня (13 ч местного времени), когда происходит максимальная фотохимическая генерация тропосферного озона [5]. Продолжительность полета составляет 3 ч, в течение которого производятся измерения вертикального распре-

ления озона, аэрозоля, метеовеличин, интенсивности суммарной солнечной радиации и отбор проб воздуха и аэрозоля на площадках 500, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5500 и 7000 м для последующего лабораторного анализа компонентов озонового цикла и химического состава частиц.

Для измерения концентрации озона на борту самолета-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э» установлен хемилюминесцентный озонометр З-02П, разработанный и изготовленный предприятием ОПТЭК (г. С.-Петербург), который калибруется с помощью генератора озона ГС-2 того же предприятия. По мере необходимости озонометр и генератор поверяются во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. Относительная погрешность этого типа озонометра в диапазоне 5...1000 мкг/м<sup>3</sup> не превышает 15%. Постоянная времени прибора позволяет проводить отсчеты с частотой 1 Гц, что дает вертикальное разрешение по пространству 3–15 м.

Целью настоящей работы является анализ сезонных изменений вертикального распределения концентрации тропосферного озона в слое от поверхности земли до высоты 7000 м.

На рис. 1 приведен временной ход (нормированный на минимальное значение) относительной концентрации озона на трех высотах: 300 м – внутри внутреннего слоя перемешивания [6]; 3000 м – вблизи верхней границы слоя перемешивания [6]; 6600 м – в свободной атмосфере. В расчете использовались данные измерений озона по всем полетам с января 1998 по декабрь 2000 г. Из рис. 1 видно, что на всех высотах изменение концентрации озона происходит достаточно синхронно. Хорошо выделяется годовой ход с максимумом летом или весной в зависимости от года. Причем амплитуды годовых колебаний на разных высотах близки между собой. Это говорит о том, что изменение концентрации озона во всем рассматриваемом слое имеет одинаковую природу. Такой вывод базируется не только на синхронности изменения концентрации озона на разных высотах, но и на

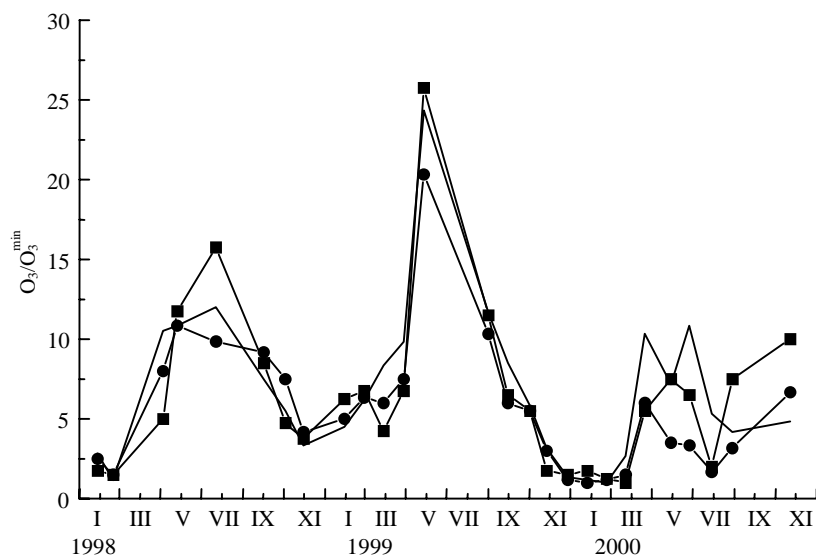


Рис. 1. Концентрация озона на высотах: — — 300 м; ● — 3000 м и ■ — 6600 м над югом Западной Сибири в период с января 1998 по декабрь 2000 г.

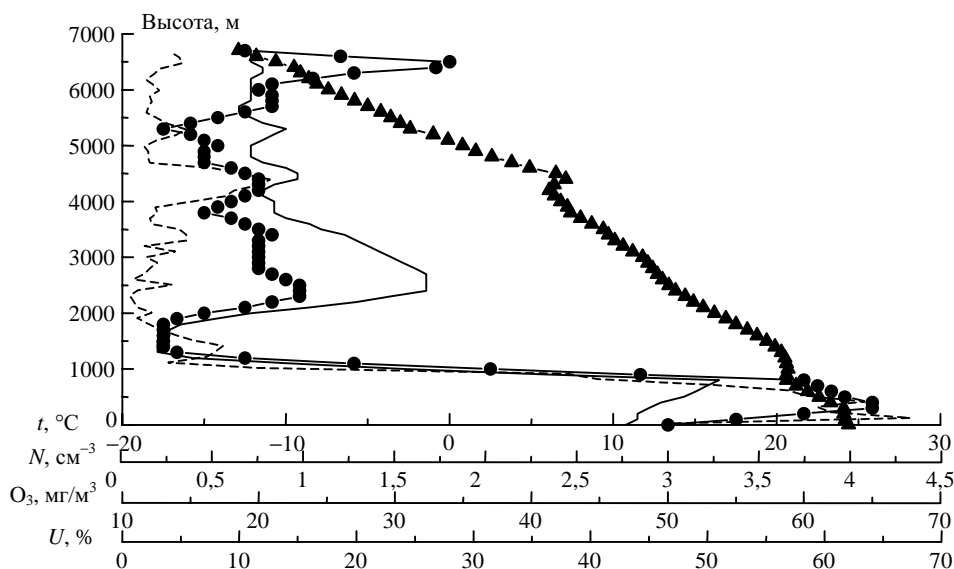


Рис. 2. Вертикальное распределение: ▲▲▲ — температуры воздуха; ---- — счетной концентрации аэрозоля ( $d \geq 0,4$  мкм); ●●● — озона; — — относительной влажности воздуха; 26 июня 2000 г.

анализе вертикального распределения других компонентов воздуха, таких как аэрозоль и водяной пар, которые поступают в воздух с подстилающей поверхности. В качестве подтверждения на рис. 2 приведены вертикальные профили перечисленных характеристик, измеренных в ходе полета 26 июня 2000 г.

Из рис. 2 видно, что максимальные концентрации озона, аэрозоля и водяного пара наблюдаются в нижней части пограничного слоя под слоем инверсии. Выше слоя инверсии их содержание уменьшается в несколько раз. Следовательно, если аэрозоль и водяной пар имеют в качестве источника испарение с подстилающей поверхности, то и озон образуется из таких же испарившихся веществ. Более того, вертикальный ход озона, аэрозоля и водяного пара выше этой инверсии также почти не отличается и хорошо следует за температурной стратификацией, отражая

эффекты накопления примесей под задерживающими слоями. Исключение составляет лишь максимум озона на высоте 6600–6700 м, который не связан с задерживающим слоем. Возможно, это результат дальнего переноса, а возможно, и вторжение из стратосферы.

Для качественной оценки годового хода концентрации озона все профили были разбиты на пять категорий: период зимней депрессии озона (ноябрь, декабрь и январь), начало роста концентрации озона (февраль, март), период весеннего максимума (апрель, май), летняя стагнация озона (июнь, июль, август) и период осенних дождей (сентябрь, октябрь). На рис. 3 представлены средние профили за выбранные периоды. Начало весеннего роста характеризуется увеличением концентрации озона в нижнем слое до 1000 м, в то время как в слое от 3000 до 7000 м все

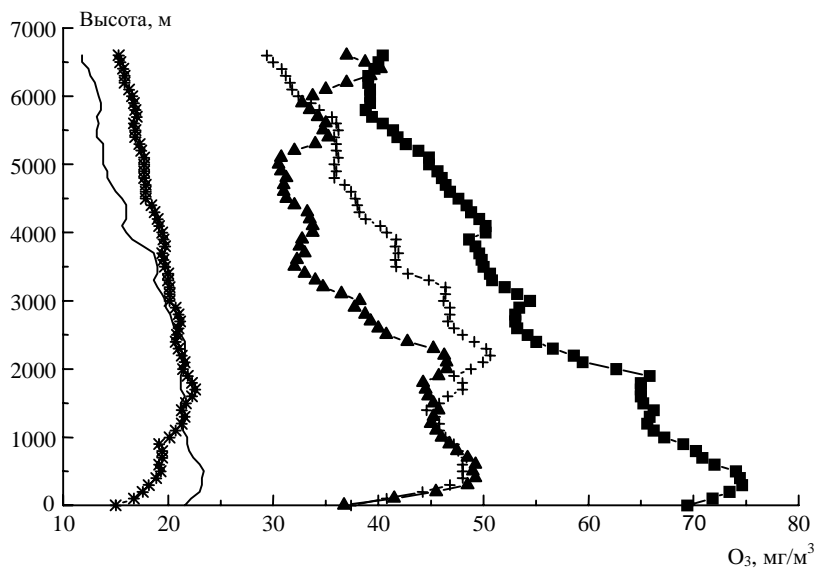


Рис. 3. Средние вертикальные профили концентрации озона: — — февраль, март; —■— — апрель, май; —▲— — июнь, август; —+— — сентябрь, октябрь; —\*— — ноябрь-январь за период 1998–2000 гг.

еще наблюдается спад концентрации озона. В период весеннего максимума (апрель, май) значительно меняется наклон вертикального профиля озона. Это говорит о том, что основная его генерация происходит в пограничном слое атмосферы. Летом, вследствие изменения баланса озона (генерация-сток) в приземном слое, происходит выравнивание вертикального профиля. В слое выше 5000 м наклон летнего профиля озона меняет свой знак, что говорит о возможности проникновения стратосферного озона. Осенью в этом слое не наблюдается такого профиля озона. На фоне продолжающегося падения концентрации в слое от 0 до 1000 метров наблюдается рост содержания озона в слое 2000–5500 м. По-видимому, это связано с переносом озона или озonoобразующих веществ с других

территорий, где продолжительность весенне-летнего максимума озона значительно затянута. Максимальное изменение концентрации озона в слое 0–6600 м наблюдается в период весеннего роста. В среднем за период с февраля-марта по апрель-май в слое 0–6600 м концентрация озона увеличивается на 30–50  $\text{мкг}/\text{м}^3$ , причем внизу значительно сильнее, чем в свободной атмосфере.

В ряде случаев для проведения мини-максимальных оценок бывают необходимы сведения об абсолютной изменчивости исследуемой характеристики. На рис. 4 представлены данные об абсолютных минимальных и максимальных и средних концентрациях озона на каждой высоте по результатам всех полетов.

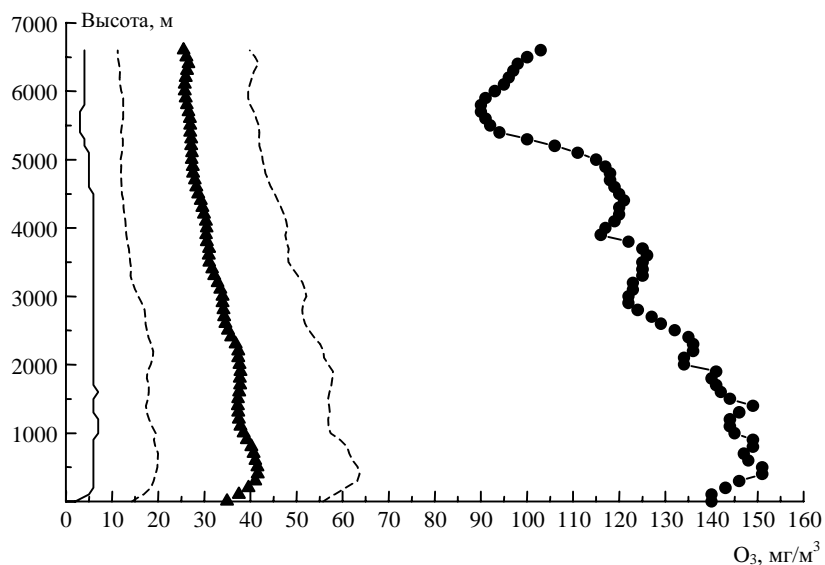


Рис. 4. Абсолютный максимум (●●●), минимум (—) и средняя концентрация озона (▲▲▲)  $\pm$  СКО (----) над югом Западной Сибири за период 1998–2000 гг.

Из рис. 4 видно, что минимальные концентрации озона, составляющие 3–6 мкг/м<sup>3</sup>, могут наблюдаться на любой высоте и не имеют выраженного высотного хода. Максимальные концентрации более изменчивы, хотя в целом отражают падение величины с высотой. Они наибольшие в пограничном слое, наименьшие – в средней стратосфере. Начиная с высоты 5600 м, наблюдается увеличение абсолютных максимумов. Это возможно по двум причинам. Первая – перенос озона из стратосферы. Вторая обусловлена особенностями циркуляции воздуха над Западной Сибирью. В холодный период года, при ультраполярных вторжениях, над этой территорией может наблюдаться очень низкая тропопауза до 7 км. В таком случае верхняя часть профиля может относиться уже к стратосферному озону.

Средний профиль озона ( $\pm$  СКО) лежит в пределах между абсолютными максимумами и минимумами. За счет осреднения более 30 измерений его ход менее изменчив. Максимум концентрации наблюдается во внутреннем слое перемешивания. Затем начинается уменьшение концентрации с 42 до 26 мкг/м<sup>3</sup>. Причем в верхней части профиля не отмечается роста концентрации, подобного абсолютным максимумам. Это еще раз свидетельствует в пользу сказанного выше, что поступление озона из стратосферы процесс не постоянный.

*B.D. Belan, A.P. Plotnikov, G.N. Tolmachev. Seasonal dynamics of vertical distribution of tropospheric ozone above West Siberia.*

Seasonal behavior of vertical distribution of the ozone concentration within the layer from 0 to 7000 m is analyzed by the data of aircraft measurements for the period 1998–2000. It is shown that the tropospheric ozone is mainly formed *in situ* inside the inner mixing layer in the spring period. Variation of the ozone concentration at different heights is sufficiently synchronous, that is indicative of weak income of ozone from the stratosphere. Data on absolute maxima of ozone concentrations at all heights of the layer under study are presented.

Подводя итог, можем сделать следующие выводы. Фотохимическая генерация тропосферного озона происходит во внутреннем слое перемешивания.

Поступление озона из стратосферы в тропосферу значительно меньше, чем его фотохимическая генерация *in situ*.

Максимальное содержание тропосферного озона наблюдается в весенний период, минимальное – в сентябре и феврале.

Работа выполнена на комплексе ЦКП «Атмосфера» (грант РФФИ № 00-05-72014).

1. Перов С.П., Хрзуан А.Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометиздат, 1980. 288 с.
2. Разумовский С.В., Зайков Г.Е. Озон и его реакции с органическими соединениями (кинетика и механизм). М.: Наука, 1974. 322 с.
3. Atmospheric trace gases that are radiatively active and significance to global change // Earth Quest. 1990. V. 40. N 2. P. 10–11.
4. Akimoto H. // Pure and Appl. Chem. 1995. V. 65. № 12. P. 2057–2064.
5. Белан Б.Д., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н. // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 9. С. 826–832.
6. Белан Б.Д. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1044–1054.