

В.В. Зуев, В.Н. Маричев, П.А. Хряпов

## ОСОБЕННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТРАТОСФЕРНОГО ОЗОНА НАД ТОМСКОМ

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск

Поступила в редакцию 26.03.99 г.

Принята к печати 12.05.99 г.

Проведен сравнительный анализ серий лидарных наблюдений за вертикальным распределением озона (ВРО) в стратосфере над Томском зимой и летом 1998 г. В анализе рассматривались усредненные профили ВРО, полученные по 23 и 26 отдельным ночным профилям озона для зимы и лета соответственно, и профили их изменчивости. Замечено, что при пересечении профилей ВРО на высоте 25 км выше этого уровня содержание озона летом больше, чем зимой, и наоборот, ниже 25 км зимние концентрации озона значительно превосходят летние. Наибольшая изменчивость озона наблюдается в нижней стратосфере на высотах 14–17 км как зимой, так и летом. В зимний период динамика стратосферы формирует значительную относительную изменчивость на высотах выше 25 км. Летом преобладающий вклад фотохимических процессов стабилизирует вариации озона в средней и верхней стратосфере.

При проведении корреляционного анализа между послонным и общим содержанием озона (ОСО) выяснилось, что с ОСО более всего коррелирует содержание озона в верхней части максимума как зимой, так и летом. Таким образом, показано, что основной вклад в изменчивость ОСО вносит верхняя часть озонопаика, а в изменчивость ВРО – слой, расположенные ниже максимума.

Исследование вертикального распределения озона (ВРО) в стратосфере является необходимым звеном в изучении причин и механизмов изменчивости стратосферного озонового слоя. Использование лидарных методов зондирования дает возможность более детального и глубокого исследования вертикальной структуры полей стратосферного озона, поскольку позволяет получать распределение озона с высоким пространственно-временным разрешением в области высот локализации его максимального содержания.

В статье проанализированы серии лидарных наблюдений за стратосферным озоном в 1998 г. на Сибирской лидарной станции [1], относящиеся к разным сезонам с характерным для них высоким (зима) и низким (лето) содержанием озона.

За три летних месяца 1998 г. было получено 26 усредненных ночных профилей озона. В зимние месяцы (январь–февраль этого же года) был накоплен ряд из 23 ночных усредненных профилей озона. Усредненный за ночь профиль озона восстанавливался по суммарному эхосигналу, накопленному по 3–4 сериям измерений, каждая из которых определялась временем накопления лидарного сигнала в режиме счета фотонов ~25 мин. По каждой отдельной серии измерений, в принципе, уже удастся восстанавливать статистически обеспеченный профиль озона до высот 30–35 км с пространственным разрешением по высоте от 0,1 до 0,4 км. Однако за счет накопления суммарного сигнала в течение 1,5–2 ч за ночь естественно достигалось получение более репрезентативных данных о ВРО в нижней половине стратосферы в интервале высот 13–35 км.

Обобщенные результаты зимних и летних лидарных наблюдений за состоянием озоносферы над Томском в 1998 г. в виде среднесезонных озоновых профилей при-

ведены на рис. 1. Здесь же представлены модельный среднеширотный среднегодовой профиль Крюгера и усредненный по двум сезонам озоновый профиль, полученный из лидарных наблюдений. Все профили приведены с пространственным усреднением 2 км.

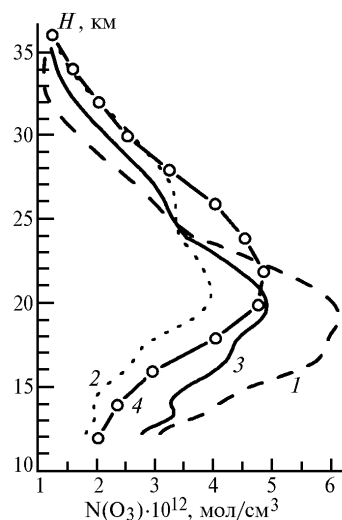


Рис. 1. Сравнение средних зимнего (кривая 1), летнего (2) и усредненного по двум сезонам (3) профилей ВРО над Томском с модельным среднеширотным среднегодовым профилем Крюгера (4)

Различия в поведении ВРО зимой и летом в целом согласуются с данными о сезонном распределении озона для средних широт [2]. Максимум озонового слоя зимой располагается на высоте ~19 км, а летом – вблизи 21 км. Значения концентрации озона в максимумах изменяются

от зимы к лету в 1,5 раза от  $6 \cdot 10^{12}$  до  $4 \cdot 10^{12}$  мол/см<sup>3</sup>. В сравнении с модельным ВРО (кривая 4) усредненный за периоды наблюдений лидарный профиль озона (кривая 3), как видно на рис. 1, имеет некоторые отличия, а именно: более мощный и низкий озоновый максимум, пониженное содержание озона выше максимума и повышенное – ниже. Эти отличия показывают, с одной стороны, климатическую особенность ВРО над Томском, с другой – особенность протекания циркуляционных процессов в периоды наблюдений, когда по данным синоптического анализа чаще наблюдались формирование и развитие циклической циркуляции с более частыми вторжениями арктических воздушных масс в умеренные широты как в тропосфере, так и в нижней стратосфере.

На рис. 2 приведены сезонные профили среднеквадратических отклонений (СКО) значений озоновых концентраций от среднесезонных. Видно, что максимальная изменчивость как в абсолютных (а), так и в относительных (б) единицах и зимой, и летом наблюдается внизу на высотах ниже 17 км. Это, в первую очередь, является отражением отмеченной выше северной периферийности точки наблюдения в Томске. Для нее характерна большая вероятность вторжений в нижней стратосфере арктических масс воздуха с присущими для них высоким содержанием озона и низкой локализацией озонового пика [3]. Большие вариации озона зимой на высотах более 25 км могут быть связаны с деформацией циркумполярного вихря под действием высоких блокирующих антициклонов (например, азиатского) с частым смещением его в средние широты в зимний период [4]. Небольшая изменчивость озона на этих высотах летом, по-видимому, указывает на доминирующую роль фотохимических процессов в формировании озона в стабильном поле солнечной радиации над динамическими процессами. Это проявляется также в хорошем согласии среднелетних и модельных значений концентраций озона на этих высотах.

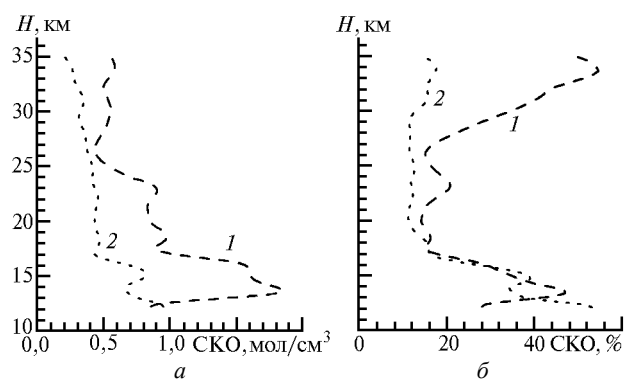


Рис. 2. Зимний (кривая 1) и летний (2) профили СКО в абсолютных (а) и относительных единицах (б)

На рис. 3 приведены межуровневые корреляционные функции ВРО, рассчитанные для слоев толщиной 2 км в интервале высот 14–32 км. Уровень значимости коэффициента корреляции при доверительной вероятности 0,95 составляет величину  $\sim 0,40$ . Вертикальное распределение зимних и летних корреляционных кривых имеет как общие, так и отличительные признаки. На рисунке можно выделить три характерных участка высот: 15–19, 19–27 и 27–31 км. Судя по резкому убыванию

корреляционных кривых на нижнем участке высот, особенно для зимы, можно заключить, что ВРО над Томском определялось выраженной незональностью циркуляции в нижней стратосфере до 19 км. Выше этого уровня до высоты 27 км как зимой, так и летом можно наблюдать рост межуровневых корреляционных связей за счет усиления зональности. При этом коэффициенты корреляции на этих высотах превышают уровень значимости. На третьем участке высот 27–31 км для зимы корреляционные связи сохраняются и даже незначительно возрастают, что связано с отмеченными ранее региональными особенностями вертикальных движений стратосферных воздушных масс над Томском. Летом же в этом участке высот наблюдается резкое убывание корреляции с переходом ее через нуль, что обусловлено преобладающим влиянием фотохимических процессов в средней стратосфере в летний период.

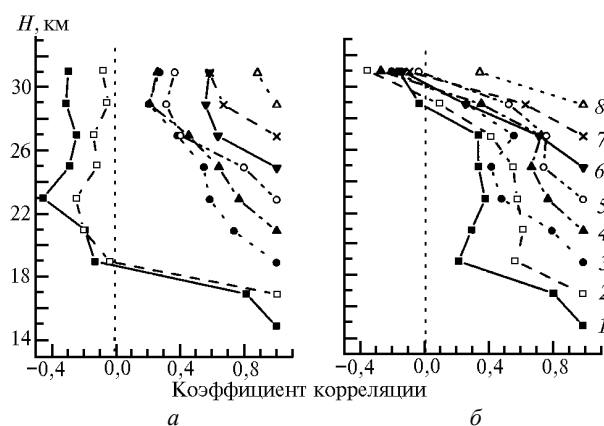


Рис. 3. Межуровневые корреляционные функции содержания озона в слоях 14–16 (кривая 1), 16–18 (2), 18–20 (3), 20–22 (4), 22–24 (5), 24–26 (6), 26–28 (7), 28–30 (8) для зимы (а) и лета (б)

Для тех же слоев толщиной 2 км был выполнен анализ корреляции послойного и общего содержания озона, результаты которого в виде вертикальных профилей коэффициентов корреляции показаны на рис. 4. Ожидается, что более тесная положительная связь должна проявиться в области озонового максимума как снизу, так и сверху, особенно с его наиболее изменчивой нижней частью. Но оказалось, что при уровне значимости 0,4 области достоверной положительной связи ограничены высотами 18–24 км зимой и 20–28 км летом. Сравнивая их с положением сезонных озоновых максимумов, можно констатировать, что как зимой, так и летом с ОСО более всего коррелирует содержание озона в верхней части максимума с удельным содержанием озона около 30%.

Столь неожиданный, на первый взгляд, результат хорошо согласуется с результатами анализа межуровневых озоновых связей, представленных на рис. 3. Значимая межуровневая связь в диапазоне высот 19–27 км указывает на то, что во всем этом диапазоне озоновый слой ведет себя как единое целое. Причем именно в этом слое содержится примерно 30% ОСО. Можно, конечно, предположить, что такая взаимосвязь ОСО и стратосферного озона является отражением специфических климатических особенностей нашего региона либо особенностей наблюдений в 1998 г. По крайней мере, этому факту следует уделить пристальное внимание в будущих исследованиях.

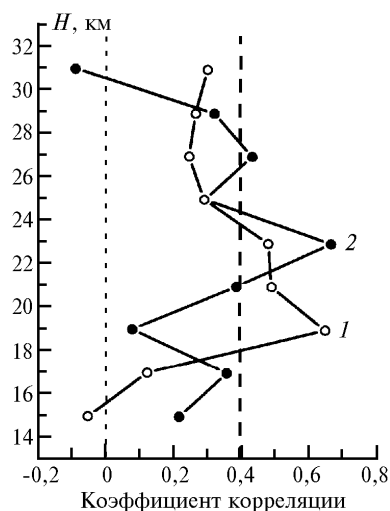


Рис. 4. Корреляция послонного содержания озона с ОСО зимой (кривая 1) и летом (кривая 2)

Рассматривая особенности ВРО над Томском, следует также отметить область высот вблизи 25 км. Интересно обратить внимание на то, что зимний и летний среднесезонные профили ВРО и их изменчивость пересекаются на одной и той же высоте – 25 км. С этой высотой также связаны локальные минимумы корреляции послонного и общего содержания озона.

В заключение авторы благодарят С.И. Долгого и А.В. Невзорова за техническую помощь при проведении измерений и С.В. Смирнова за любезно предоставленный ряд данных по ОСО и обсуждение результатов наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект N 99-05-64943) и Миннауки РФ на установке «Сибирская лидарная станция» (рег. N 01-64).

1. Зуев В.В. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 9. С. 1171–1183.
2. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 648 с.
3. Зуев В.В., Смирнов С.В., Маричев В.Н., Гришаев М.В. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 10. С. 1170–1179.
4. Зуев В.В., Смирнов С.В. // Изв. вузов. Физика. 1998. № 9. С. 75–82.

*V.V. Zuev, V.N. Marichev, P.A. Khryapov. Peculiarities of Stratospheric Ozone Vertical Distribution over Tomsk.*

Comparative analysis of sets of lidar observations over the ozone vertical distribution (OVD) in the stratosphere over Tomsk in summer and winter 1998 has been conducted. The averaged profiles of OVD obtained from 23 and 26 individual high profiles of the ozone for winter and summer, respectively, as well as the profiles of their variability were under analysis. It was noted that above the altitude of the OVD profiles meet (25 km), summer concentration of the ozone is higher than the winter one and, on the contrary, lower 25 km the winter concentration significantly exceeds the summer one. Maximum variability takes place in the low stratosphere at 14–17 km heights both in summer and winter. In winter the atmospheric dynamics forms a considerable relative variability of the ozone at the heights higher 25 km whereas in summer the ozone variation in the central and upper stratosphere is stabilized by intense photochemical processes.

A correlation analysis between layer-to-layer and total ozone content (TOC) has shown most correlation between the TOC and the ozone concentration to be at the maximum height in both seasons. Thus, the top of the ozone maximum layer is shown to contribute mainly into the TOC variability and the layers located lower the maximum – into OVD variability.