

В.В. Зуев

ЛИДАРНЫЕ И СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ СТРАТОСФЕРНОГО ОЗОНОВОГО СЛОЯ НАД ТОМСКОМ

Приведены результаты долговременных комплексных наблюдений за стратосферным озоновым слоем над Томском (юго-западный район Сибири), проводимых на Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы СО РАН. Изменчивость стратосферного озона рассматривается во взаимосвязи с изменчивостью стратосферного аэрозоля, двуокиси азота, температуры и синоптических процессов. Уделено внимание вопросу калибровки лидарных данных.

Введение

Регулярные лидарные наблюдения за стратосферой над Томском начаты в Институте оптики атмосферы СО РАН в 1985 г. с вводом в строй первого стационарного лидара на базе приемного телескопа с диаметром зеркала 1 м [1]. Сначала проводилось лишь зондирование стратификации стратосферного аэрозоля [2], а с 1988 г. дополнительно начато зондирование вертикального распределения стратосферного озона [3]. В 1990 г. в ИОА была введена в строй лидарная станция с приемным телескопом с диаметром зеркала 2,2 м [4], которая совместно с первым крупногабаритным лидаром была объединена в состав Сибирской лидарной станции (СЛС) ИОА. В 1994 г. на СЛС были успешно проведены коррелятивные измерения синхронно с космическим лидаром LITE [5]. В 1995 г. на СЛС получены первые результаты по лазерному зондированию тропосферного озона [6]. Регулярные спектрофотометрические измерения общего содержания озона (ОСО) проводятся на СЛС с 1993 г. с помощью стандартного откалиброванного озонметра М-124. Сумеречные (вечерние и утренние) спектрофотометрические измерения общего содержания и вертикального распределения NO_2 были начаты с 1995 г. [7].

В настоящее время на СЛС в режиме регулярных измерений в безоблачные ночи проводится комплексное лидарное зондирование вертикального распределения аэрозоля, озона и температуры в стратосфере и в режиме практически рутинных измерений наблюдения за ОСО и NO_2 . В ближайшей перспективе – дополнительные каналы измерений общего содержания озона и NO_3 с помощью лунного спектрофотометра и вертикального распределения озона с помощью сумеречного спектрофотометра.

В целом озонный измерительный комплекс СЛС схематично представлен на рис. 1. Этот комплекс является основной частью инициативной программы ИОА по стратосферному и тропосферному озону SATOR.

Некоторые результаты калибровки лидарных данных

Технические характеристики СЛС и методики зондирования стратосферных составляющих и параметров описаны в [8, 9, 10]. Специфической особенностью СЛС является возможность одновременного зондирования озона, температуры и аэрозоля, включая его микроструктуру, с использованием оптического и спектрального разделения лидарных сигналов как на одном приемном телескопе, так и на нескольких телескопах сразу.

Оптическая калибровка всех лидарных сигналов осуществляется по сигналам с высот не менее 30 км, где они в отсутствие аэрозолей формируются только за счет рэлеевского рассеяния, сечение которого пропорционально плотности стратосферного воздуха на этих высотах [11].

Калибровка измеренных лидаром профилей температуры и озона по результатам прямых измерений температуры и концентрации озона с помощью шар-зонда проводилась в июле 1995 г. в рамках измерительной кампании SATOR–95. Всего было выпущено девять шар-зондов. Сравнение удалось провести по трем запускам. Результаты сравнения представлены на рис. 2 и 3. Как видно, лидарные и шар-зондовые данные не противоречат друг другу.

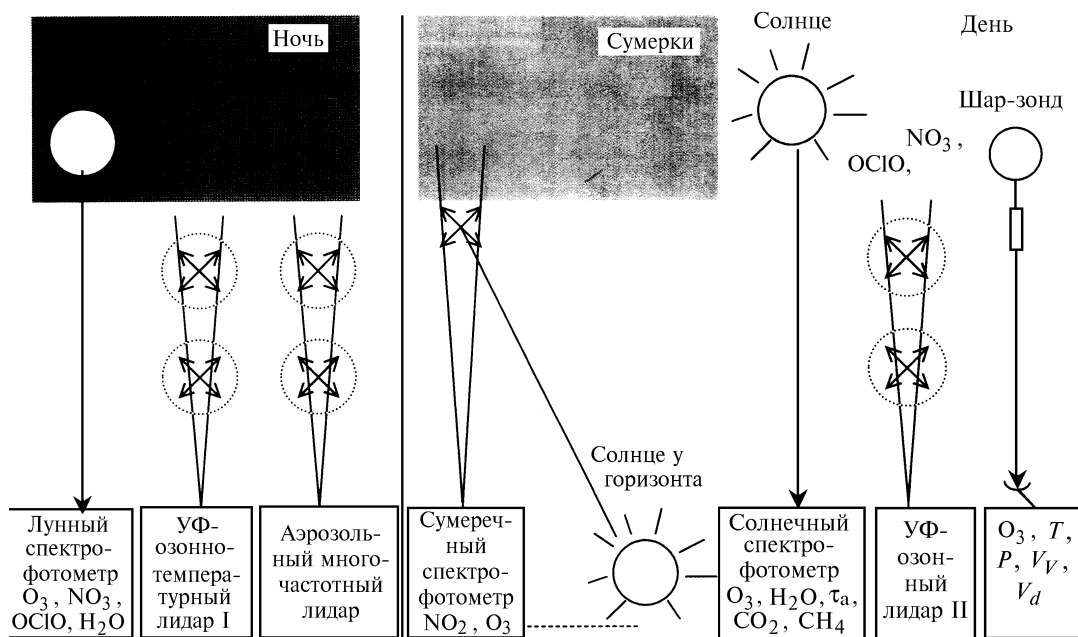


Рис. 1. Схема озонного измерительного комплекса СЛС: τ_a – аэрозольная оптическая толщина; T – температура; P – давление; V_V – скорость ветра; V_d – направление ветра

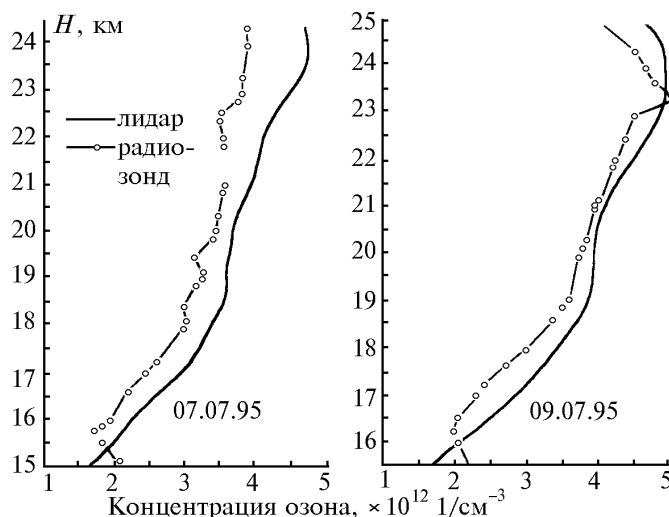


Рис. 2. Профили температуры, полученные лидарным методом и шар-зондом

Хорошее соответствие наблюдается и при сравнении проинтегрированных значений концентраций стратосферного озона, полученных с помощью лидара, с ОСО, измеренным с помощью калиброванного прибора М-124, прошедшего аттестацию в ГГО им. Воейкова в 1994 г.

Своеобразная интеркалибровка была проведена с аэрозольным каналом лидара во время коррелятивных измерений совместно с космическим лидаром LITE в сентябре 1994 г. (рис. 4).

Результаты сравнения данных лазерного зондирования стратосферного аэрозоля, описанные в [5], указывают на их приемлемое соответствие. В отмеченных областях измерена практически одинаковая аэрозольная стратификация, а различие высот этих областей хорошо согласуется с разницей высот тропопаузы над Томском и Алтаем, над которым пролегла орбита «Шаттл'а».

Стратосферный озон и температура

Как известно, поведение стратосферного озона и температуры характеризуется положительной корреляцией. Это связано с тем, что нагревание стратосферы напрямую зависит от количества озона как основного поглощающего солнечную УФ-радиацию в средней атмосфере.

ре газа, а также от влияния на вертикальное распределение температуры и озона одних и тех же динамических факторов – вертикальных токов. Кроме того, скорости химических озонобразующих реакций тем выше, чем выше температура.

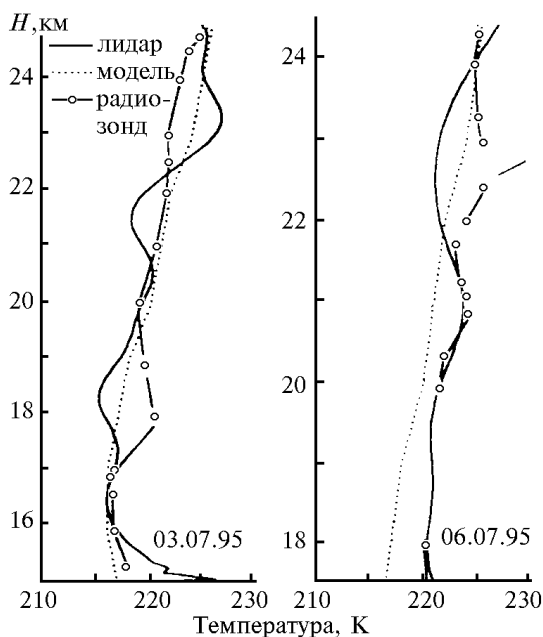


Рис. 3. Профили вертикального распределения озона и температуры

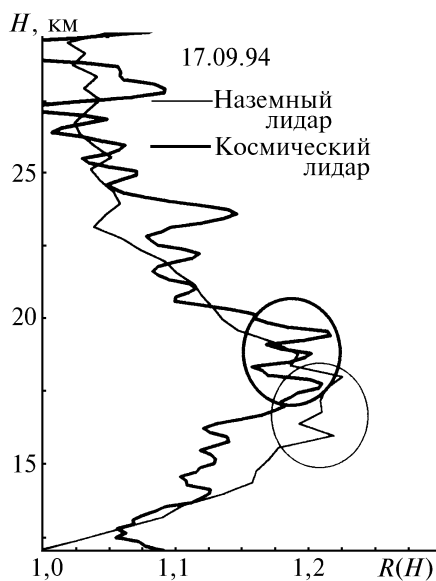


Рис. 4. Профили отношения рассеяния, полученные в сентябре 1994 г. наземным и космическим лидарами

Достаточно интересная ситуация, характеризующая связь вертикального распределения озона и температуры, наблюдалась в феврале 1996 г.

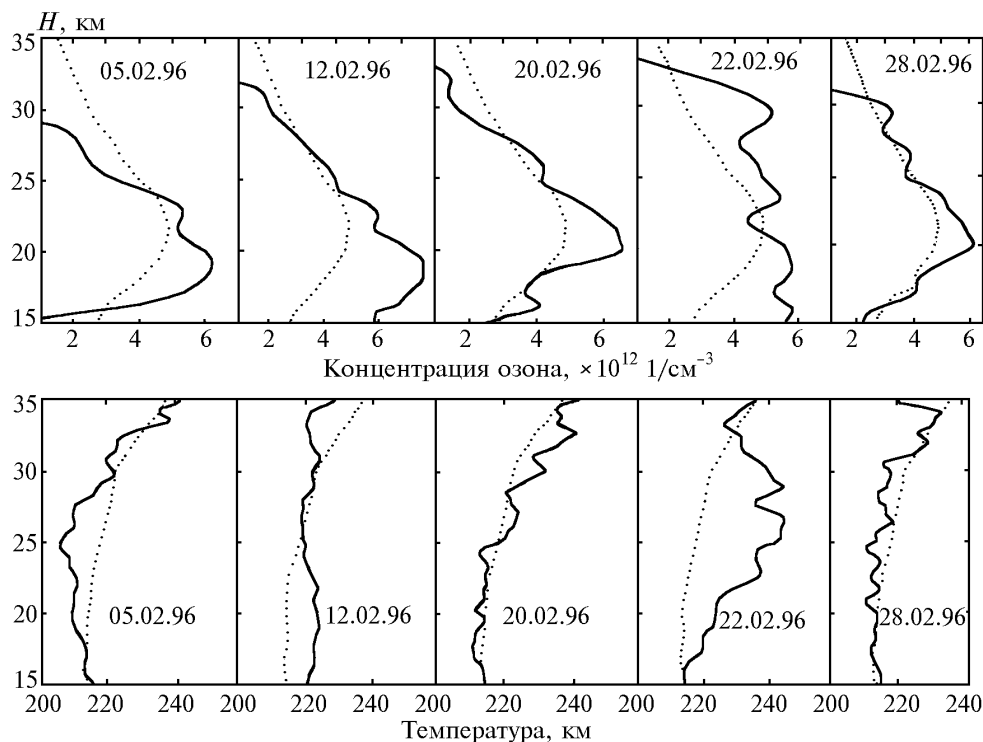


Рис. 5. Динамика вертикальных распределений озона и температуры в феврале 1996 г.

На рис. 5 представлены ночные профили озона и температуры, полученные по данным лидарного зондирования. Так, в начале февраля (05.02.96) умеренному содержанию озона в стратосфере соответствует вертикальный профиль температуры, близкий к модельному. Неожиданное появление большого количества озона в слое 15–25 км, обнаруженное 12 февраля, сопровождалось повышением температуры в этом слое на 10 К. Далее 20.02.96 уменьшение содержания озона в интервале высот 15–25 км происходило с одновременным понижением температуры на этих высотах, при этом лидарный профиль температуры практически совпал с модельным. Очень высокое содержание озона в протяженном слое 15–30 км было отмечено 22 февраля. Значительное увеличение количества стратосферного озона наблюдалось на фоне резкого возрастания температуры в отмеченном слое на 10–30 км. А 28 февраля произошло снижение концентрации озона и возврат распределения температуры к модельному.

Достаточно высокая положительная корреляция между температурой и концентрацией озона, наблюдаемая в профилях вертикального распределения этих параметров (см. рис. 5), говорит о значительном влиянии в средней атмосфере динамических процессов.

Колебания циркумполярного циклонического вихря относительно своего среднего (среднестатистического) положения, которые приводят к фазовому сдвигу (колебаниям) стационарных планетарных волн, определяют интенсивность вертикальных движений и перестройки термобарических полей в нижней атмосфере. Отсюда сочетание различных динамических условий в нижней и средней стратосфере будут обуславливать различные формы профилей вертикального распределения температуры и озона.

Анализ синоптических данных показывает, что высокие значения концентрации озона в средней стратосфере и в целом общего содержания 12 и 22 февраля, которым соответствовали более высокие значения температуры, были обусловлены влиянием передней части высотной ложбины циркумполярного циклона. Циркуляция имела резко выраженную зональность. Для такой ситуации характерны нисходящие движения холодного воздуха на циклонической стороне от высотной фронтальной зоны. Тогда в результате опускания происходит адиабатическое повышение температуры и приток озона сверху.

Отличие ситуаций 1 и 22 февраля было обусловлено несколько иным положением циркумполярного вихря, которое вызвало более интенсивные нисходящие движения в более высоких слоях и, следовательно, увеличение температуры и концентрации озона. Однако в нижней стратосфере подобное положение вихря вызвало слабые восходящие движения, в тропосфере – нисходящие, с формированием теплой области высокого давления.

Вертикальное распределение температуры и озона 5, 20 и 28 февраля (особенно 20-го и 28-го) характерно для среднего положения циркумполярного вихря. Более низкие значения температуры и концентрации озона в средней стратосфере 5 февраля вызваны преобладанием восходящих движений в этом слое, при этом в тропосфере в эти дни наблюдался теплый высокий антициклон.

Стратосферный озон и вулкан Пинатубо

Мощнейшее извержение вулкана Пинатубо на Филиппинах произошло, как известно, 15 июня 1991 г. Уже через две недели (29 июня) в стратосфере над Томском появились первые следы эруптивных облаков на высотах 13–16 км, которые достигли максимальной интенсивности к 9 июля (рис. 6).

Поведение вертикальных профилей стратосферного озона в это время характеризовалось выраженной отрицательной корреляцией с аэрозольными профилями. Причем это нашло также отражение и в поведении интегрального содержания озона, которое в течение 3 суток (с 7 по 9 июля) понизилось почти на 40 %.

Такое поведение стратосферного озона в этот период может объясняться как гетерогенными реакциями озона с аэрозольными составляющими, так и гомогенными реакциями с эмитированными газами, например водородом (H_2). Более подробно последний механизм будет описан ниже в разделе «Стратосферный озон и стратосферные облака».

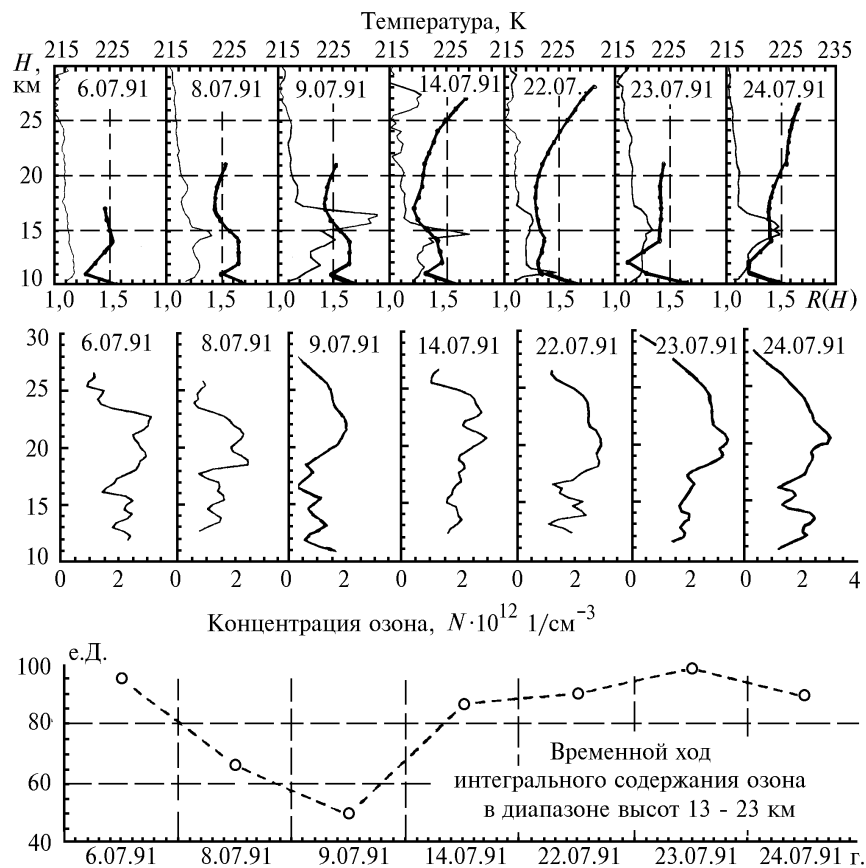


Рис. 6. Суммарное содержание озона в диапазоне высот 12–23 км и вертикальные профили озона, отношения рассеяния и температуры в июле 1991 г. в начальный период появления продуктов извержения вулкана Пинатубо над Томском

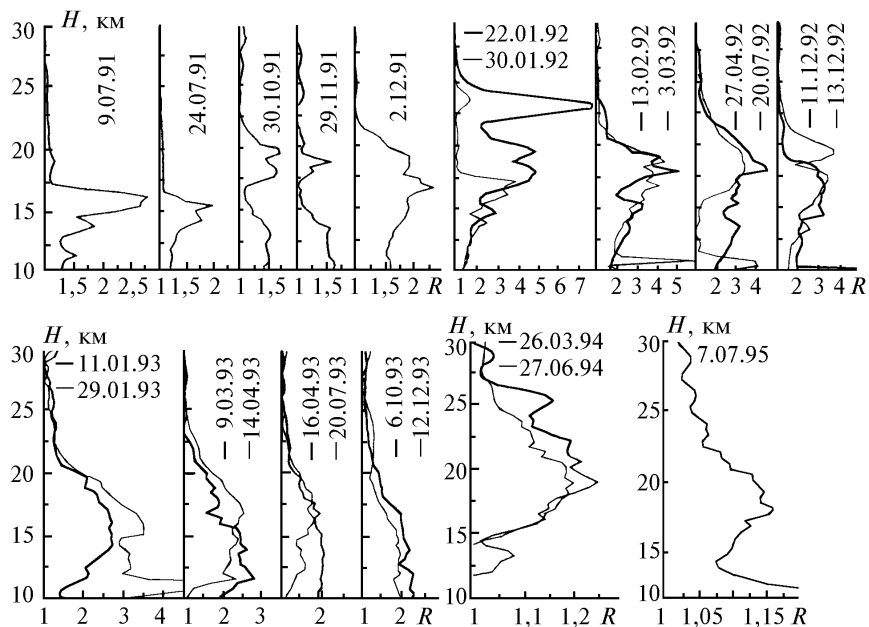


Рис. 7. Типичные профили отношения рассеяния в соответствующие периоды 1991–1995 гг.

На рис. 7 эпизодически представлены наиболее характерные профили аэрозольной стратификации с октября 1991 по июль 1995 г. Как видно, максимальные значения отношения

Лидарные и спектрофотометрические наблюдения

рассеяния $R(H)$ регистрировались с конца января по конец февраля 1992 г. В этот же период регистрировались и минимальные, по сравнению с аналогичным периодом прошлого года, значения концентраций озона в стратосфере (рис. 8). «Выедание» озона в нижней части стратосферного профиля – однозначное проявление «озоновой депрессии». Наличие совпадающих максимумов в профилях R и озона на высоте 21–22 км указывает на меридиональный перенос на этих высотах тропических масс воздуха в средние широты. В целом эти два момента обусловили формирование над территорией России мигрирующих образований, по характеристикам схожих с озоновыми дырами (рис. 9).

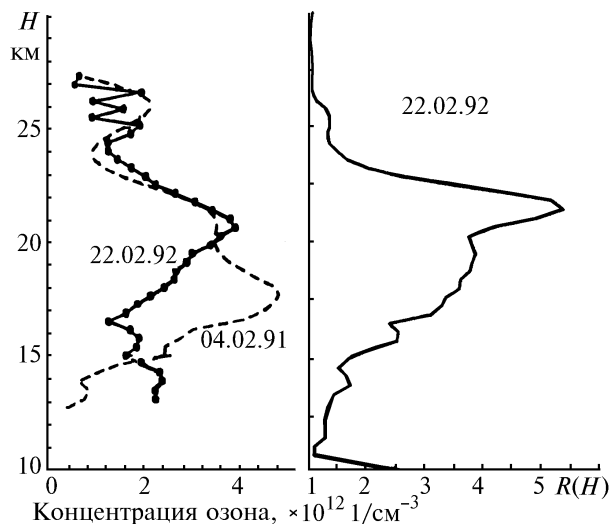


Рис. 8. Вертикальные профили озона и отношения рассеяния в феврале 1992 г. и типичный профиль озона для февраля 1991 г.

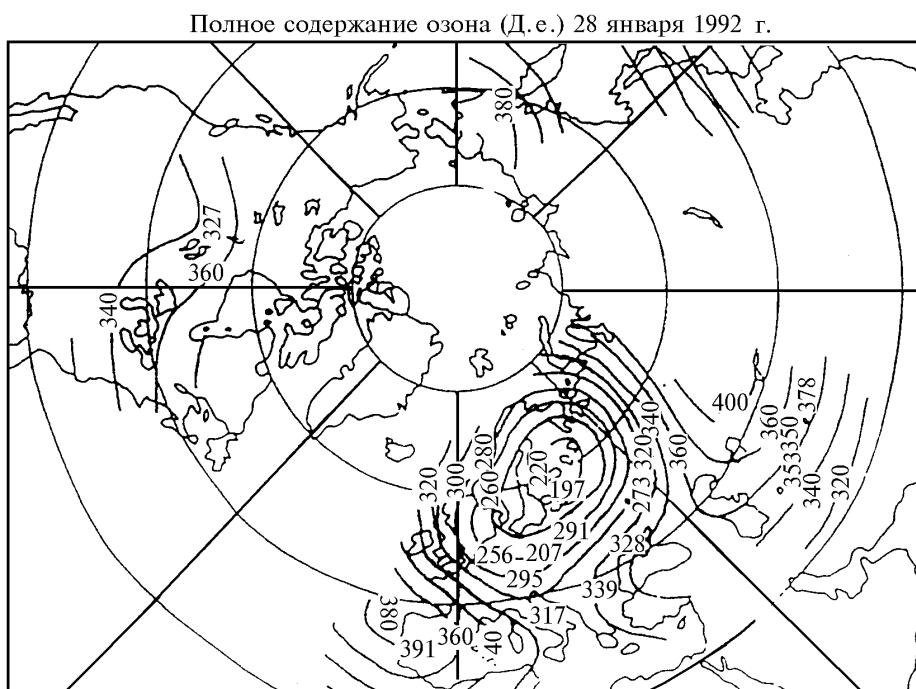


Рис. 9. Поле стратосферного озона, иллюстрирующее образование типа озоновой дыры

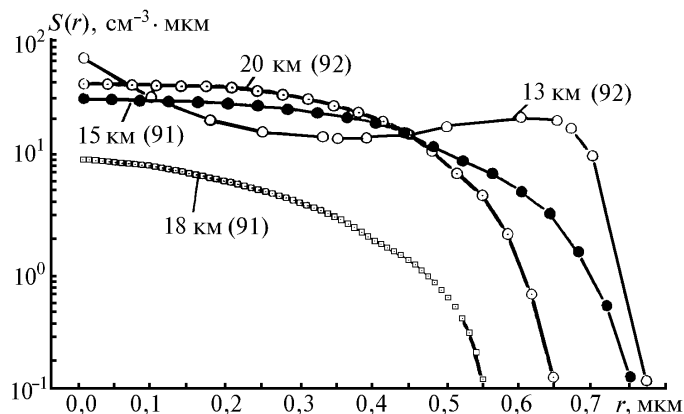


Рис. 10. Спектры размеров вулканогенных аэрозольных частиц в июле 1991 и 1992 гг.

Весной 1992 г. значения $R(H)$ сохранялись довольно высокими. Однако поведение вертикальных профилей озона и аэрозоля в стратосфере стало практически независимым, хотя влияние аэрозольного наполнения стратосферы на формирование вертикального распределения стратосферного озона, особенно в нижней стратосфере, сказывалось еще зимой – весной 1993 г. Сравнение спектра размеров аэрозольных частиц в июле 1991 и апреле 1992 г. указывает на их значительное укрупнение (рис. 10). Это должно было привести в интеграле к уменьшению эффективной аэрозольной поверхности, с которой могли бы взаимодействовать молекулы озона, а следовательно, к снижению активности гетерогенных реакций.

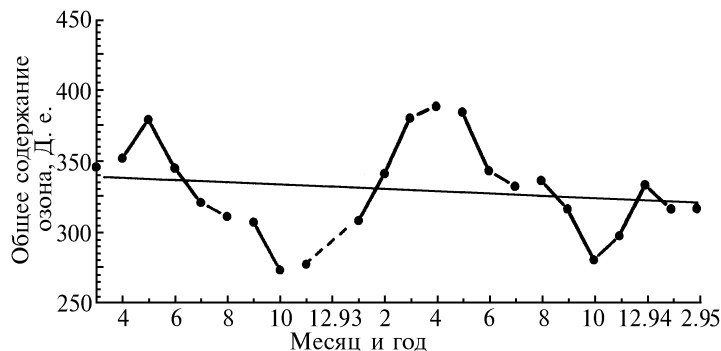


Рис. 11. Временной ход среднемесячных значений СОС над Томском за период с марта 1993 по февраль 1995 г. Прямой линией представлен линейный тренд

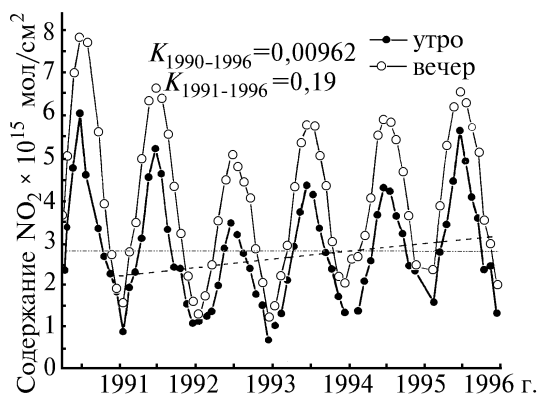


Рис. 12. Временной ход интегрального содержания двуокиси азота

В целом аэрозольное загрязнение сохранялось до лета 1995 г. в течение 5 лет после извержения вулкана Пинатубо. Поведение общего содержания озона в этот период характеризовалось аномальным отрицательным трендом (рис. 11), напрямую не связанным с аэрозольным наполнением стратосферы, поскольку, как отмечено выше, аэрозольно-озонные взаимодействия потеряли

свою значимость уже с весны 1992 г. Таким образом, на аномальный тренд ОСО должен был воздействовать другой фактор. Одним из таких факторов, по-видимому, можно считать поствулканическую депрессию NO_2 в стратосфере (рис. 12). Положительный тренд интегрального содержания NO_2 в стратосфере с 1992 по 1995 г. должен был привести к усилению озонного цикла с «нечетным азотом NO_x », а следовательно, к снижению ОСО. После восстановления интегрального содержания NO_2 в стратосфере значения ОСО также нормализовались.

Еще одним фактором, формирующим поведение ОСО в поствулканический период, можно считать изменившийся в этот период температурный режим в стратосфере и, следовательно, циркуляционный режим, в частности, усиление меридиональной составляющей и вторжение тропических воздушных масс в средние широты в зимний период. С другой стороны, поведение ОСО за весь период наблюдений хорошо коррелировало с изменчивостью атмосферных барических образований, а распределение его по годам хорошо согласуется с квазидвухлетним циклом (рис. 13).

Стратосферный озон и стратосферные облака

Впервые процессы разрушения озонового слоя во взаимосвязи со стратосферными облаками рассматривались в моделях формирования озоновой дыры над Антарктидой [12]. Согласно этой схеме, нашедшей широкое распространение, запертые внутри циркумполярного вихря антарктические массы воздуха сильно выхолаживаются. При достижении стратосферных температур ниже -70°C образуются полярные стратосферные облака (ПСО). При низких температурах на поверхности ледяных кристаллов разрываются связи молекулы – резервуара $\text{ClO}-\text{NO}_2$ с высвобождением хлора, который затем активно включается в процессы каталитического разрушения озона. Таким образом, причинно-следственная связь процессов может быть представлена следующей схемой (а):

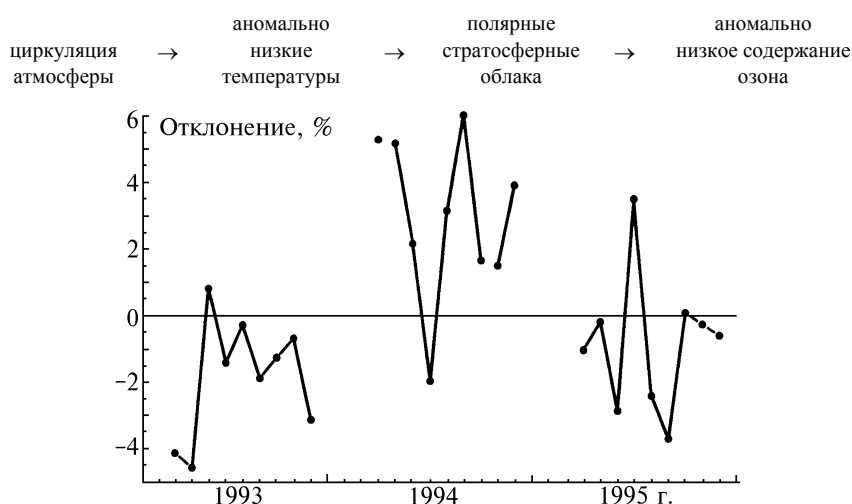


Рис. 13. Отклонения среднемесячных значений ОСО (март – ноябрь) от среднего в Томске в 1993–1995 гг.

Новый оригинальный взгляд на взаимосвязь процессов разрушения озонового слоя и формирования ПСО высказал В.Л. Сывороткин в [13]. Согласно его схеме за счет дегазации планеты Земля в стратосферу могут эмитироваться наиболее легкие газовые фракции: водород (H_2) и метан (CH_4). В стратосфере водород окисляется озоном с образованием водяного пара и кислорода:

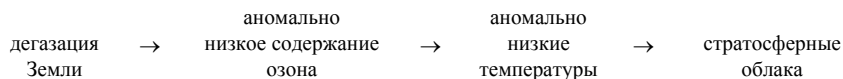


Таким образом, реакция (1) указывает на процессы разрушения озона и перенасыщение стратосферных слоев водяным паром, которое может спровоцировать образование стратосферных облаков. Эмиссия же метана в стратосфере, по В.Л. Сывороткину, должна привести к блокированию хлорного цикла каталитического разрушения озона за счет реакции



с образованием молекулы-резервуара хлористого водорода.

В схеме В.Л. Сывороткина недоопределен один важный фактор, всегда сопутствующий стратосферным облакам: anomalно низкие температуры. Хотя логически этот фактор должен вытекать как следствие реакции (1). Действительно, нагревание стратосферы напрямую связано с содержанием озона, который является основным поглощающим солнечную радиацию компонентом стратосферы. Следовательно, разрушение озонового слоя должно приводить к выхолаживанию стратосферы. Это в свою очередь, в условиях перенасыщенного водяного пара согласно (1), должно стимулировать конденсационные процессы, а затем и процессы кристаллообразования. С учетом вышеизложенного можно построить следующую причинно-следственную цепочку (б):



При сравнении схем (а) и (б) видно, что при наблюдении стратосферы в период озонных anomalий должны регистрироваться главных три фактора: низкие значения концентрации озона, температуры и стратосферные облака. Однако разный характер причинно-следственных связей обуславливает различную временную последовательность событий. Именно этот момент может позволить экспериментально протестировать схемы (а) и (б).

В ряде регулярных лидарных наблюдений стратосферы над Томском, ведущихся на СЛС Института оптики атмосферы с 1986 г., в виде редких эпизодов регистрировалось anomalное повышение значений отношения рассеяния R (отношение суммы коэффициентов обратного рассеяния лазерного локационного излучения на аэрозолях к коэффициенту обратного молекулярного рассеяния), которое через несколько суток исчезало. Так, например, на рис. 14 представлены вертикальные профили R , зарегистрированные на длине волны 1064 нм в январе 1995 г. Максимальные значения R , достигнутые в это время, значительно превышали таковые для других дат зондирования в этом году. На рис. 15 приведены результаты наших наблюдений общего содержания озона (ОСО) с помощью спектрофотометра М-124 и температур в стратосфере. Из рис. 15 видно, что события в стратосфере развивались следующим образом. Минимальные значения ОСО наблюдались 21 января, затем регистрировалось постепенное повышение ОСО. Минимальные значения температур в стратосфере регистрировались чуть позже, 24 января. В это же время наблюдались стратосферные облака. Как видно, ход событий более соответствует схеме (б).

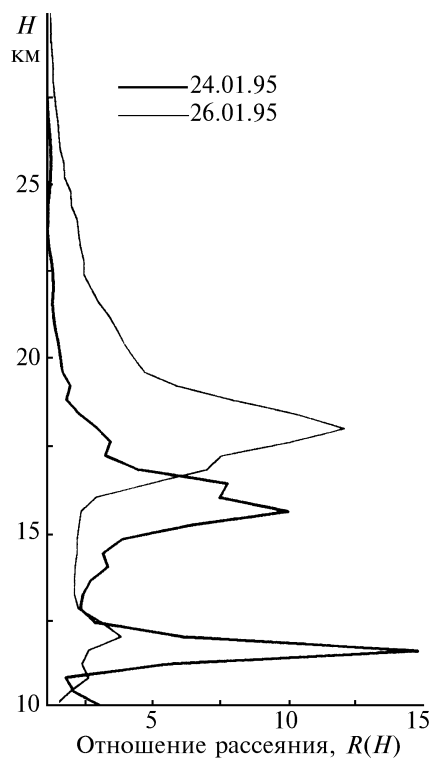


Рис. 14. Вертикальные профили отношения рассеяния на длине волны $\lambda = 1064$ нм в январе 1995 г.

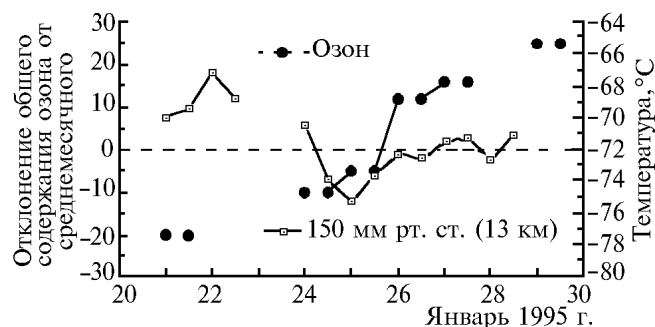


Рис. 15. Временные ходы интегрального содержания озона и температуры на соответствующей миллибарной поверхности (данные шар-зондов), в январе 1995 г.

Конечно, по единичному случаю делать выводы невозможно. Однако эти результаты заставляют нас пристальнее взглянуть на наши ряды данных лидарного зондирования аэрозоля и озона, полученных в июле 1991 г. в течение первого месяца после извержения вулкана Пинатубо. Тогда наблюдалась выраженная отрицательная корреляция аэрозольных и озонных профилей в нижней стратосфере. Она вполне могла бы быть обусловлена схемой (б). По крайней мере, и здесь минимальные температуры регистрировались с временной задержкой по отношению к минимальным значениям интегрального содержания стратосферного озона.

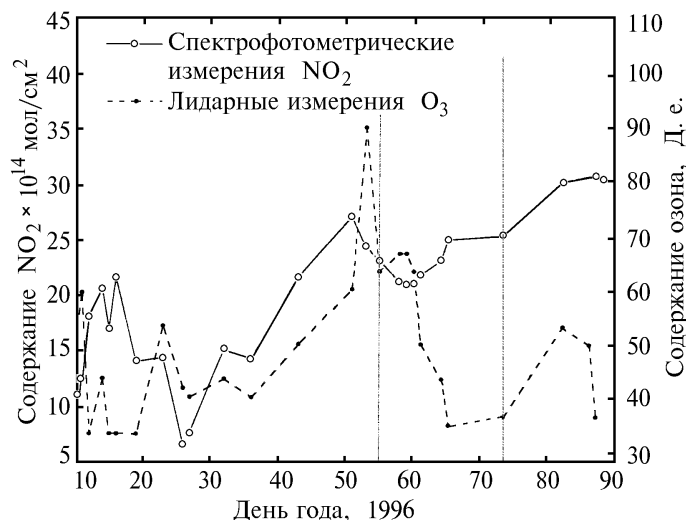
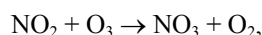


Рис. 16. Временные ходы двуокиси азота и полученного из лидарных данных озона в 1996 г.

Стратосферные озонные ситуации с минимальным вкладом динамических факторов

Изменчивость озона, как известно, обусловлена суперпозицией двух обстоятельств: динамики и химии атмосферы, и разделить их вклады достаточно сложно. А поскольку антропогенный фактор в процессах разрушения озонового слоя связан с химией стратосферы (например, хлорный цикл каталитического разрушения озона, провоцируемый фреонами), его исследование наиболее возможно, когда вклад динамических процессов минимален. Такая ситуация для средних широт обычно характеризуется устойчивой температурной стратификацией при отсутствии в циркуляции стратосферы меридиональной составляющей. Еще одним критерием подобной ситуации может служить анализ взаимного поведения стратосферного озона и компонентов его азотного цикла, в частности NO_2 . Поскольку в темное время суток NO_2 быстро реагирует с O_3 :



с последующими реакциями образования N_2O_5 , то можно ожидать, что в условиях «устойчивой стратосферы» должна наблюдаться выраженная отрицательная корреляция в поведении NO_2 и O_3 . На рис. 16 изображены временные ходы изменчивости содержания ночного озона и вечернего NO_2 в стратосферных слоях 25–30 и 25–35 км соответственно, полученные лидар-

ным и сумеречно-спектрофотометрическими способами. Здесь можно выделить по крайней мере один интервал с 24 февраля (55-й день) по 13 марта (73-й день) 1996 г., когда наблюдается противоположный ход O_3 и NO_2 . В другие дни их поведение неоднозначно. Результаты синоптического анализа показывают, что в указанный интервал времени стратосфера характеризовалась устойчивым зональным переносом воздушных масс. Таким образом, совокупный анализ данных лидарных и спектрофотометрических наблюдений в одной точке позволяет наглядно выделить участки с минимальным вкладом динамических факторов.

Заключение

Многолетние комплексные наблюдения за озоновым слоем над Томском на СЛС Института оптики атмосферы СО РАН показали, что:

– в течение пяти лет после извержения вулкана Пинатубо сохранялось аномальное поведение стратосферного озона. Поэтому, делать какие-либо выводы о тенденциях, проявляющихся в озоновом слое в этот период, практически невозможно. По-видимому, это должно касаться и проблемы регистрации зимой и весной 1995 г. многочисленных озоновых дыр в Восточной Сибири;

– поведение ОСО и ВРО, как правило, хорошо согласуется с циркуляционными процессами и поведением барических образований;

– в химических превращениях стратосферного озона явно проявляется цикл взаимодействий с нечетным азотом NO_x . Для более углубленного изучения химии стратосферы мы планируем в ближайшее время создать каналы спектрофотометрических измерений интегрального содержания NO_3 и ClO . Следует подчеркнуть, что информация об NO_3 должна служить своеобразным индикатором хлорного цикла стратосферного озона, поскольку соотношение $NO_2/O_3/NO_3$ существенно меняется при образовании молекул-резервуаров $ClONO_2$;

– в целом многолетние наблюдения не дают основания утверждать о преимущественной роли антропогенного фактора в деструкции озонового слоя земной атмосферы.

Автор считает приятным долгом выразить благодарность сотрудникам своей лаборатории и признательность коллегам из ИФА РАН Н.Ф. Еланскому, А.С. Елохову и А.Н. Груздеву, любезно предоставившим результаты наблюдений стратосферного NO_2 в Звенигороде.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96–05–64282).

1. Ельников А.В., Маричев В.Н., Шелевой К.Д., Шелефонтьук Д.И. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 4. С. 117–123.
2. Ельников А.В., Зуев В.В., Маричев В.Н. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 6. С. 631–637.
3. Ельников А.В., Зуев В.В., Маричев В.Н., Царегородцев С.И. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N 9. С. 995–996.
4. Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Зуев В.В., Маричев В.Н., Правдин В.Л. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 9. С. 1022–1027.
5. Зуев В.В., Бурлаков В.Д., Гришаев М.В., Ельников А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 3. С. 347–350.
6. Burlakov V.D., Zuev V.V., Evtushenko G.S., Kataev M.Yu., Mitsel A.A., Nevzgov A.V., Troitskii V.O. // SPIE. 1995. V. 2619. P. 270–275.
7. Гришаев М.В., Зуев В.В. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 8. С. 1120–1122.
8. Ельников А.В., Зуев В.В., Маричев В.Н. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 2. С. 201–209.
9. Бондаренко С.В., Ельников А.В., Зуев В.В. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 10. С. 1268–1277.
10. Бондаренко С.В., Бурлаков В.Д., Гришаев М.В., Зуев В.В., Маричев В.Н., Правдин В.Л. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 11–12. С. 1652–1655.
11. Philip M.T., Kent G.S., Ottway M.T. // J. of Atmosph. Scien. 1985. V. 42. N 9. P. 967–974.
12. WMO global ozone research and monitoring project. 1985. Report N 16. P. 1369.
13. Сывороткин В.Л. // Природа. 1993. N 9. С. 35–45.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
28 мая 1996 г.

V. V. Zuev. **Lidar and Spectrophotometric Observations of Stratospheric Ozone Layer over Tomsk.**

The results of the long-term integrated observations of the stratospheric ozone layer over Tomsk (south-west region of Siberia) conducted at the Siberian lidar station of the Institute of Atmospheric Optics SB RAN. The variability of the stratospheric ozone is examined in interrelation with the variability of the stratospheric aerosol, NO_2 , temperature, and synoptical processes. The calibration of the lidar data has received much attention.