

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ,
ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.53

В.В. Зуев, М.В. Гришаев, С.И. Долгий

**Многолетняя изменчивость озона и диоксида азота
в стратосфере по результатам шестилетних наблюдений
на Сибирской лидарной станции**

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 21.10.2002 г.

Представляются результаты анализа регулярных спектрофотометрических и лидарных измерений вертикального распределения и общего содержания озона и диоксида азота с января 1996 по декабрь 2001 г. Для анализа использовались данные об общем содержании озона по результатам озонметрических наблюдений. Исходными данными для анализа вертикального распределения озона были профили, полученные по результатам лидарного зондирования атмосферы в диапазоне высот 15–30 км. Данные о вертикальном и общем содержании диоксида азота рассчитывались по сумеречным измерениям спектральной яркости неба в зените в диапазоне 430–450 нм.

Во временном ходе общего содержания озона с 1996 по 2001 г. наблюдается положительный статистически незначимый тренд величиной около $(0,11 \pm 0,34)\%$ /год. Для общего содержания диоксида азота в период утренних и вечерних наблюдений характерен большой статистически значимый тренд $(2,8 \pm 0,9)$ и $(1,6 \pm 0,7)\%$ в год соответственно. Предполагается, что столь высокие значения трендов диоксида азота связаны с явлением Эль-Ниньо 1997 г.

Введение

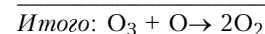
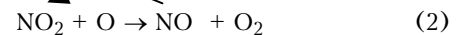
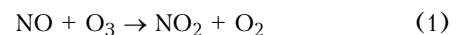
Регулярный ежесуточный мониторинг общего содержания озона (ОСО) над Томском проводится на Сибирской лидарной станции (СЛС) ($56,48^\circ$ с.ш., $85,05^\circ$ в.д.) уже десять лет с помощью озонметра М-124 [1]. Эти наблюдения охватывают периоды сильного вулканического возмущения стратосферы после извержения вулкана Пинатубо в 1991 г., а также и фоновое состояние, наступившего с 1996 г. Подключение в 1995 г. регулярного и ежесуточного режима измерений общего содержания (ОС) и вертикального распределения (ВР) диоксида азота (ДОА) позволило значительно повысить информативность наблюдений, поскольку ДОА является главным индикатором азотного цикла озона в стратосфере, на долю которого приходится более 50% химических превращений стратосферного озона [1]. Измерения ОС и ВР ДОА осуществляются методом спектрофотометрии сумеречного неба в области 430–450 нм вечером и утром при изменении солнечного зенитного угла в диапазоне от 84 до 96 град. Методика определения ВР ДОА по результатам измерений наклонного содержания ДОА при различных углах Солнца опубликована в [2].

Традиционно на СЛС более десяти лет осуществляется лазерное зондирование озоносферы с целью определения вертикального распределения озона (ВРО) в стратосфере. В отличие от пассивных спектрофотометрических методов методов лазерного зондирования зависят от закрытости неба облаками, поэтому ряды данных лазерного зондирования не столь однородны, как данные спектрофотометрических наблюдений. Ясные безоблачные ночи наблюдаются в основном при развитых антициклональных процессах, поэтому ос-

новная масса лидарных наблюдений приходится на зиму в период действия Сибирского (азиатского) антициклона. С другой стороны, зимний период является наиболее интересным для наблюдений, поскольку он характеризуется максимальной изменчивостью озона в стратосфере и интенсификацией стратосферной динамики, в том числе меридионального переноса. Мы проанализировали многолетнюю изменчивость озона и диоксида азота в стратосфере в период ее фоновое состояние с 1996 по 2001 г.

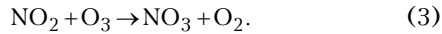
Постановка задачи

Химическая связь озона и диоксида азота характеризуется, в первую очередь, известным циклом каталитического разрушения озона по схеме [1]:

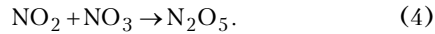


Этот каталитический цикл активен в дневное время суток, когда за счет фотолиза молекул кислорода образуется достаточное количество атомов кислорода, необходимых для реакции (2). Скорость реакций (1), (2) настолько велика, что они обуславливают фотохимическое равновесие для соотношения NO и NO₂ в дневное время. Поэтому изменчивость ДОА в дневное время слабо зависит от динамики атмосферы.

В ночное время более эффективен процесс окисления диоксида азота непосредственно озоном:



Далее происходит образование пятиоксида азота N_2O_5 по реакции



Кроме молекулы-резервуара N_2O_5 образуются также другие молекулы-резервуары, например ClONO_2 или HO_2NO_2 . С восходом Солнца диоксид азота с разной скоростью восстанавливается из молекул-резервуаров за счет их фотоллиза. Инертные молекулы-резервуары способствуют транспорту ДОА в ночное время и частично в дневное. Поэтому, естественно, что в зимний период в средних и тем более полярных широтах с продолжительным периодом темного времени суток изменчивость ДОА должна быть существенно подвержена динамике стратосферы. В первом приближении можно считать, что вечерние сумеречные наблюдения диоксида азота в большей степени отражают процессы фотохимических превращений, а утренние сумеречные наблюдения – динамических процессов.

Согласно химическим реакциям изменчивость озона и диоксида азота должна находиться в противофазе. В реальной атмосфере при совместном воздействии фотохимических и динамических процессов ситуация значительно усложняется. В средних широтах стратосферный озон до высоты почти 30 км является в основном лишь пассивным трассером стратосферной динамики, в то время как изменчивость ДОА в большей степени определяется фотохимическими процессами. Поэтому кратковременные изменения озона и диоксида азота, как правило, слабо коррелированы. Совсем по-иному проявляет себя их долговременная многолетняя изменчивость, особенно в зимний период.

Полученные результаты и их анализ

На рис. 1 изображен временной ряд ОСО, полученный на СЛС с января 1996 по декабрь 2001 г. и пред-

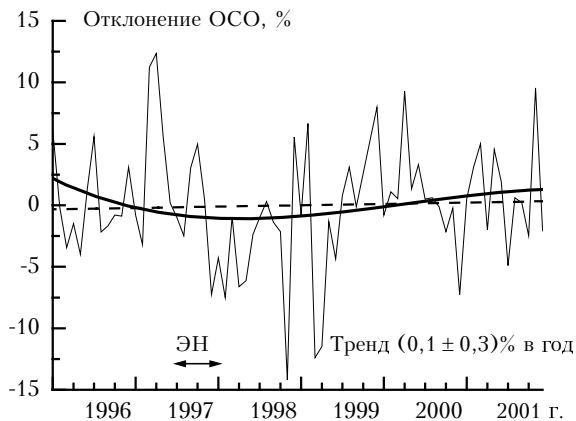


Рис. 1. Временной ход среднемесячных значений ОСО в виде отклонений от многолетнего среднего за шесть лет наблюдений (тонкая линия). Линейный тренд (штриховая линия). Полиномиальное сглаживание (жирная линия). ЭН – период действия явления Эль-Ниньо

ставленный в виде отклонений относительно многолетнего среднего за шесть лет наблюдений. Прямая линия характеризует статистически незначимый слабый положительный тренд ОСО. Линия полиномиальной аппроксимации (полиномом третьей степени) характеризует цикличность колебаний ОСО, в том числе за счет известного цикла квазидвухлетних колебаний (КДЦ).

На рис. 2 представлены аналогичные ряды ОС ДОА по результатам наблюдений в утренние и вечерние

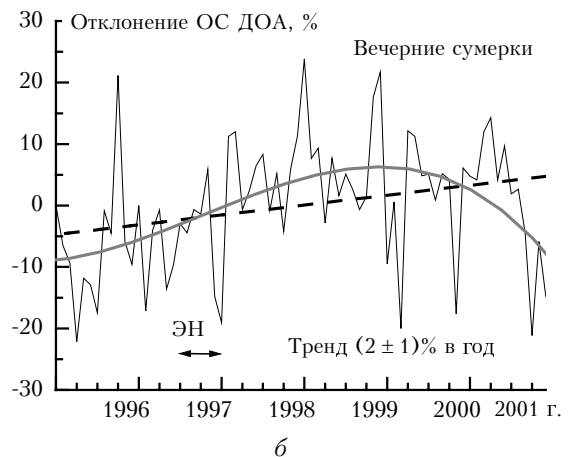
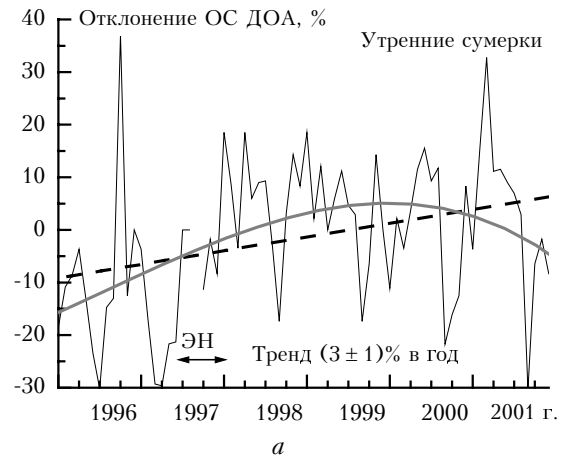


Рис. 2. Временной ход среднемесячных значений ОС ДОА в виде отклонений от многолетнего среднего за шесть лет наблюдений (тонкая линия) в утренние (а) и вечерние (б) сумерки. Обозначения см. в подписи к рис. 1

сумерки в те же годы. Оба ряда характеризуются схожим поведением со статистически значимым сильным положительным трендом. В линиях полиномиальной аппроксимации проявляются значительные колебания, которые в отличие от ОСО сложнее связать с КДЦ. Видно, что ОС ДОА неуклонно повышалось вплоть до 2000 г., после чего наблюдался выраженный спад ОС ДОА. Какой-либо явной связи между поведением ОСО (см. рис. 1) и ОС ДОА (см. рис. 2) не видно.

Рассмотрим поведение ОСО и ОС ДОА в феврале за этот же шестилетний период. Их временные хода приведены на рис. 3 и 4 соответственно. В сравнении с рис. 2 поведение ОС ДОА на рис. 4 в утренние

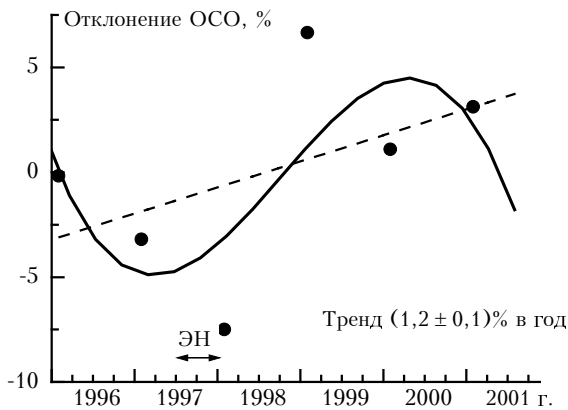


Рис. 3. Временной ход среднефевральских значений ОСО в виде отклонений от многолетнего среднего за шесть лет наблюдений (кружки). Обозначения см. в подписи к рис. 1

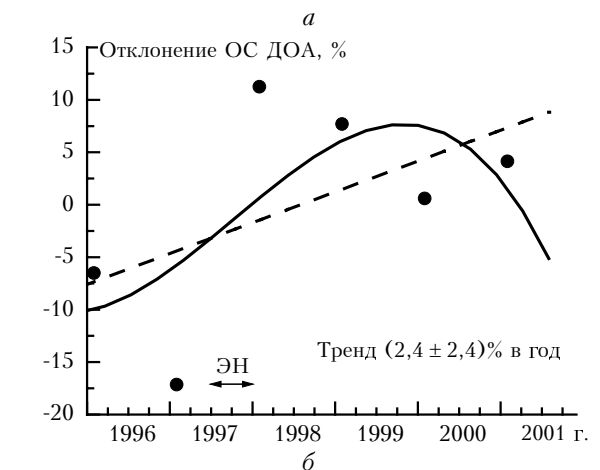
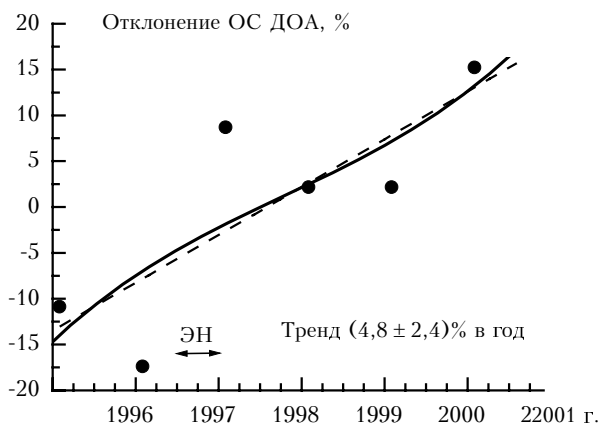


Рис. 4. Временной ход среднефевральских значений ОС ДОА в виде отклонений от многолетнего среднего за шесть лет наблюдений (кружки) в утренние (а) и вечерние (б) сумерки. Обозначения см. в подписи к рис. 1

и вечерние сумерки отличается уже значительно. Поведение среднефевральских значений ОС ДОА в вечерние сумерки (рис. 4, б) в целом повторяет временные хода среднемесячных значений ОС ДОА (см. рис. 2), особенно для кривых полиномиальной аппроксимации. Однако поведение среднефевральских значений ОС ДОА в утренние сумерки (рис. 4, а) характеризуется значительно более крутым положительным трен-

дом и существенно иным ходом линии полиномиальной аппроксимации.

Большой уровень тренда среднефевральских значений ОС ДОА затрудняет сравнительный анализ изменчивости среднефевральских значений ОСО и ОС ДОА (см. рис. 3 и 4 соответственно). Ситуацию можно упростить, если из рассматриваемых временных рядов вычесть линейный тренд. На рис. 5 изображены линии полиномиальной аппроксимации полученных остатков

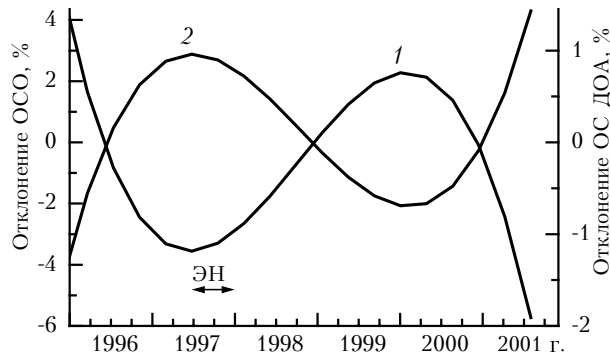


Рис. 5. Временной ход линий полиномиальной аппроксимации остатков среднефевральских значений ОСО (кривая 1) и ОС ДОА утренних сумерек (кривая 2) с вычтенными линейными трендами

среднефевральских значений ОСО и ОС ДОА в утренние сумерки. Налицо зеркальная симметрия в ходе этих кривых. Одинаковая цикличность среднефевральских значений ОСО и ОС ДОА утренних сумерек указывает на преобладающую роль в ней циркуляционных стратосферных процессов, а противофазность колебаний обусловлена химическими реакциями озона и диоксида азота в процессе транспорта воздушных масс в стратосфере.

Значительное увеличение трендов среднефевральских значений ОС ДОА (см. рис. 4) по сравнению с трендами среднемесячных значений ОС ДОА (см. рис. 2), вообще говоря, наводит на мысль о существовании тропического резерва ДОА в период наблюдений. Напомним, что зимний месяц февраль для Северного полушария характеризуется максимальным усилением меридионального переноса воздушных масс в нижней и средней стратосфере из тропического пояса в полярный через средние широты. Можно предположить, что дополнительная генерация ДОА в тропической стратосфере была связана с явлением Эль-Ниньо в 1997 г., которое было самым мощным в XX в. Резкое повышение температуры поверхности океана в гигантских масштабах южной тропической части Тихого океана провоцирует гибель фито- и зоопланктона и как следствие разрыв всех цепочек трофических связей. Усиливающееся разложение биоты должно вызывать увеличение эмиссии закиси азота (N_2O) с обширных территорий глобального масштаба. Молекулы закиси азота, при их фотолизе в стратосфере, как известно, являются основным поставщиком в нее оксидов азота.

Рост ДОА в стратосфере проявился также в статистически значимом положительном тренде среднефевральских значений ВР ДОА с вертикальным разрешением 5 км за шестилетний период наблюдений на СЛС, особенно в диапазоне высот 15–30 км (рис. 6).

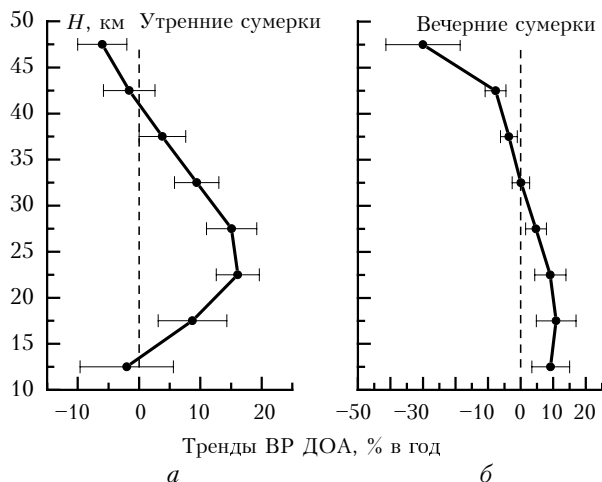


Рис. 6. Тренды среднефевральских значений ВР ДОО с вертикальным разрешением 5 км за шесть лет наблюдений на СЛС с 1996 по 2001 г.

Тренд среднемесячных значений ВРО с вертикальным разрешением 1 км за тот же период в отличие от тренда ВР ДОО – статистически незначимый (рис. 7). Если привести тренды ВРО и ВР ДОО утренних сумерек

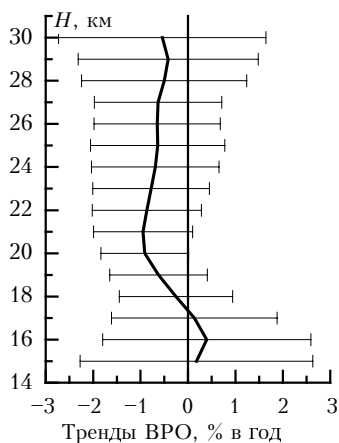


Рис. 7. Тренды среднефевральских значений ВРО с вертикальным разрешением 1 км за шесть лет наблюдений на СЛС с 1996 по 2001 г.

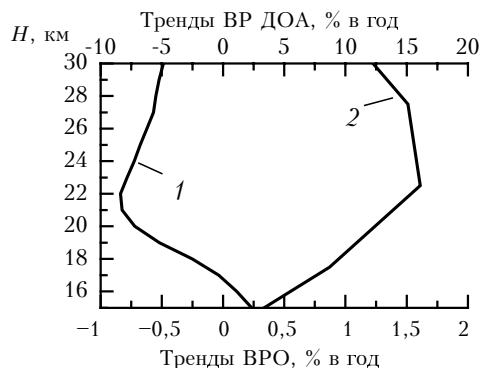


Рис. 8. Сравнение трендов ВРО (кривая 1) и ВР ДОО (кривая 2) утренних сумерек, приведенных к одному вертикальному разрешению 5 км и диапазону 15–30 км

к одному вертикальному масштабу (рис. 8), то наглядно видно, что тенденция увеличения трендов среднефевральских значений ВР ДОО с высотой в диапазоне 15–30 км фактически зеркально отобразилась тенденцией уменьшения с высотой трендов среднефевральских значений ВРО в том же высотном диапазоне. Таким образом, значительный рост диоксида азота в средней стратосфере за счет зимней подпитки из тропического резервуара отразился убылью в ней стратосферного озона, по крайней мере в феврале.

Выводы

Существенно разный вклад фотохимических и динамических процессов в изменчивость озона и диоксида азота в стратосфере средних широт затрудняет анализ связей этих составляющих стратосферы, особенно для кратких периодов наблюдений. Тем не менее анализ многолетней изменчивости позволяет наглядно представить выраженную связь озона и диоксида азота в нижней и средней стратосфере, особенно в зимний период. В этот период с характерной для средних широт большой продолжительностью ночного времени суток существенно возрастает роль транспорта диоксида азота в составе молекул-резервуаров на большие расстояния в стратосфере, в том числе в меридиональном направлении. Возросшее влияние стратосферных циркуляционных процессов на поведение озона и диоксида азота в этот период наиболее ярко проявляется в одинаковой цикличности колебаний среднефевральских значений ОСО и ОС ДОО утренних сумерек.

Значительное увеличение среднефевральских трендов ОС ДОО по сравнению со среднемесячными трендами с учетом фактора максимального усиления меридиональной циркуляции в зимний период указывает на наличие тропического резервуара ДОО в стратосфере в период наблюдений. Наиболее вероятным источником дополнительного диоксида азота в тропической стратосфере в этот период являлась эмиссия закиси азота с гигантских территорий южной экваториальной части Тихого океана во время явления Эль-Ниньо 1997 г.

Рост ДОО в средней стратосфере за шестилетний период наблюдений за счет зимней подпитки из тропического резервуара отразился убылью в ней стратосферного озона, по крайней мере в феврале.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минпромнауки РФ на установке «Сибирская лидарная станция» (рег. № 01-64).

1. Зуев В.В. Дистанционный оптический контроль стратосферных изменений. Томск: «РАСКО», 2000. 140 с.
2. McKenzie R.L., Johnston P.V., McElroy C.T., Kerr J.B., Solomon J.B. Altitude distributions of stratospheric constituents from ground-based measurements at twilight // J. Geophys. Res. D. 1991. V. 96. № 8. P. 15499–15511.

V.V. Zuev, M.V. Grishaev, S.I. Dolgii. **Variations of ozone and nitrogen dioxide in the stratosphere according to the six-year observations at the Siberian Lidar Station.**

The results of analysis of regular spectrophotometric and lidar measurements of vertical distribution and total content of ozone and nitrogen dioxide from January 1996 to December 2001 are presented. For analysis we used the data on total ozone content according to the results of ozonometric observations. The initial data for analysis of vertical ozone distribution were the profiles obtained from lidar atmospheric sensing in the altitude range of 15–30 km. The data on vertical distribution and total content of nitrogen dioxide were calculated using twilight zenith measurements of spectral sky brightness in the wavelength range of 430–450 nm.

In the time behavior of the total ozone from 1996 to 2001, there is a positive statistically insignificant trend of about $0.11 \pm 0.34\%$ a year. For the total nitrogen dioxide, as inferred from the morning (evening) observations, there is a large statistically significant trend of $2.8 \pm 0.9\%$ ($1.6 \pm 0.7\%$) a year. Presumably, the so large trends of nitrogen dioxide are associated with the 1997 El Nino event.