

В.В. Зуев, **В.Е. Зуев**, В.Д. Бурлаков, С.И. Долгий, А.В. Ельников,
А.В. Невзоров

Климатология стратосферного аэрозоля и озона по данным многолетних наблюдений на Сибирской лидарной станции

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 30.04.2003 г.

Анализируются и обобщаются данные многолетних лидарных и спектрофотометрических измерений интегральных характеристик и вертикального распределения стратосферного аэрозоля и озона, полученные в течение 17 лет на Сибирской лидарной станции в Томске. Рассматриваются сезонные и квазидвухлетние циклы изменчивости интегральных характеристик и сезонные особенности вертикального распределения аэрозоля и озона на различных высотах стратосферы. Данные многолетних измерений, полученные в одной точке наблюдений, хорошо отражают стратосферные изменения глобального масштаба, связанные с изменениями общей стратосферной циркуляции.

Введение

В радиационных блоках моделей общей циркуляции атмосферы необходимо учитывать рассеивающие и поглощающие свойства стратосферного аэрозольного и озонового слоев, которые влияют на процессы переноса радиации и термический режим атмосферы. Изменения содержания стратосферного аэрозоля необходимо учитывать при анализе баланса малых газовых составляющих атмосферы, особенно входящих в химические циклы разрушения озонового слоя стратосферы. Климатология стратосферного аэрозольного и озонового слоев предполагает изучение географических особенностей их распределения, а также сезонных, годовых, квазидвухлетних и других циклов изменчивости их характеристик. На состояние озоносферы и стратосферного аэрозольного слоя (САС) оказывают влияние природные и антропогенные факторы. Они могут иметь характер кратковременного мощного возмущения (например, взрывные извержения вулканов) или постепенно накапливающегося воздействия, поэтому климатологические исследования результативны при анализе длительных рядов наблюдений.

Регулярные лидарные измерения характеристик САС осуществляются на Сибирской лидарной станции (СЛС) в Томске (56,5° с.ш.; 85,0° в.д.) с 1986 г. Лазерное зондирование вертикального распределения озона (ВРО) в стратосфере ведется на СЛС с 1989 г., а регулярный мониторинг общего содержания озона (ОСО) проводится с 1993 г. с помощью спектрофотометрического озонметра М-124. Наблюдения этого периода отражают состояние стратосферы в условиях ее длительного возмущения взрывным вулканическим извержением (вулкан Пинатубо, июнь 1991 г.) и в фоновые состояния до и после вулканогенного возмущения. При этом

данные измерений в одной точке отражают не столько региональные особенности стратосферных изменений, сколько глобальные изменения стратосферной циркуляции. Результаты проведенных исследований обобщены ранее в [1, 2].

В предлагаемой статье с применением элементов статистического анализа рассматриваются сезонные и квазидвухлетние циклы изменчивости интегрального аэрозольного наполнения стратосферы и ОСО, сезонные особенности вертикального распределения аэрозоля. Рассчитываются среднесезонные профили ВРО, анализируются сезонные изменения концентрации озона на различных высотах. Особое внимание уделяется анализу данных последних лет измерений, которые получены в так называемый «новый» фоновый период с длительным (с 1991 г.) отсутствием взрывных вулканических извержений. Подобное состояние стратосферы еще не наблюдалось и не исследовалось за период измерений современными техническими средствами. При анализе вертикальных профилей распределения стратосферного аэрозоля рассматриваются также данные лидарных наблюдений в других регионах Сибири, которые получены нами в ходе экспедиционных измерений летне-осеннего периода 2001–2002 гг. в Омске (55° с.ш.; 73° в.д.) и Норильске (69° с.ш.; 89° в.д.).

1. Многолетняя изменчивость аэрозольного и озонового слоев в стратосфере над Томском

На рис. 1,а изображен 11-летний ряд интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния $\sum \beta_{\pi}^a$, полученный из данных лазерного зондирования стратосферы на длине волны 532 нм.

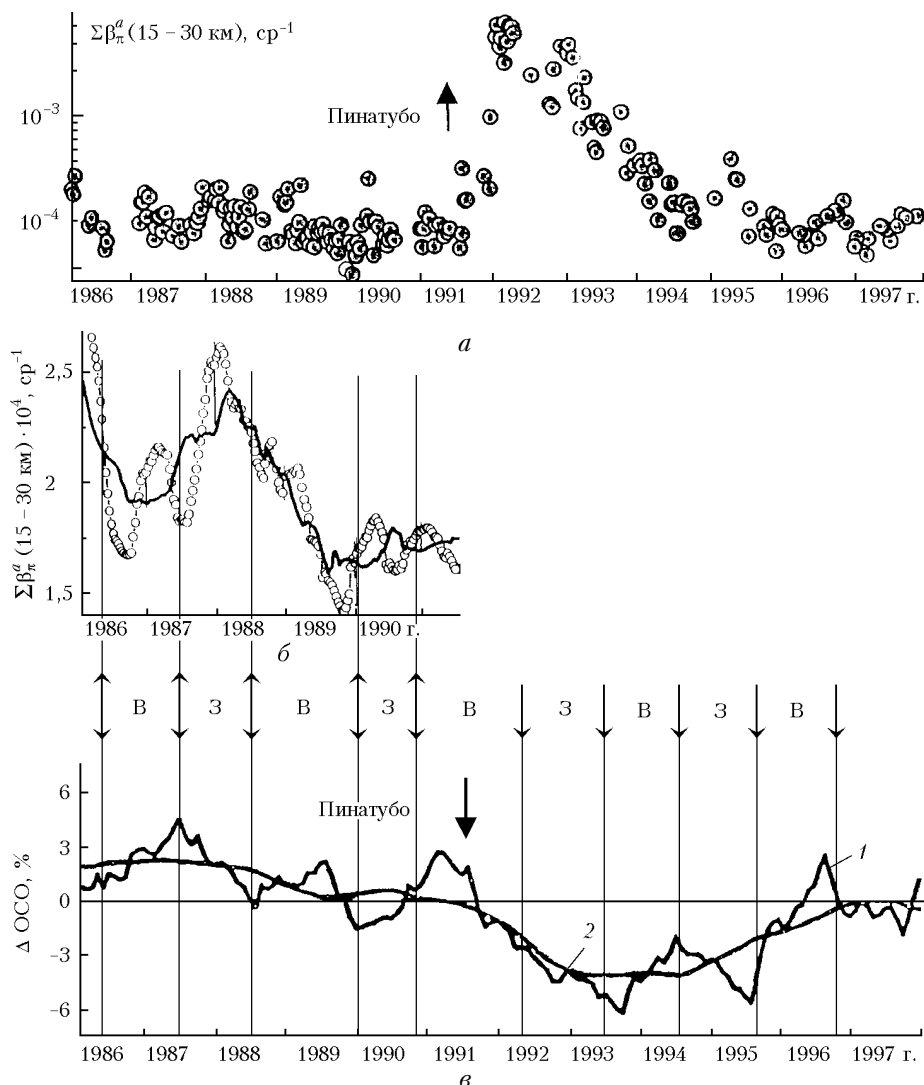


Рис. 1. Временные изменения аэрозольного наполнения стратосферы и ОСО над Томском в 1986–1997 гг.: *а* – общий ход $\Sigma\beta_{\pi}^a$; *б* – ход $\Sigma\beta_{\pi}^a$ в 1986–1991 гг. (кружки), сглаживание годовым скользящим средним (жирная кривая); *в* – отклонения среднемесячных значений ОСО относительно многолетней нормы при сглаживании одно- (кривая 1) и двухлетним (кривая 2) скользящим средним. Стрелками показаны временные интервалы восточной и западной фаз КДЦ

Этот параметр представляет собой коэффициент обратного аэрозольного рассеяния β_{π}^a , проинтегрированный в стратосферном интервале высот (в нашем случае от 15 до 30 км). Он характеризует аэрозольное наполнение стратосферы. На рис. 1, *а* видно, что аэрозольное наполнение стратосферы в указанный период лидарных наблюдений испытывало сильнейшие изменения после извержения вулкана Пинатубо в июне 1991 г. с выраженным ростом почти на два порядка в 1992 г. и медленным спадом до конца представленного ряда наблюдений. Высокая вариабельность значений $\Sigma\beta_{\pi}^a$ в рассматриваемый период не позволяет четко визуализировать сезонные и другие циклы их изменчивости.

На рис. 1, *б* приведен участок ряда $\Sigma\beta_{\pi}^a$ с 1986 по 1991 г. с минимальной вариабельностью. Во временном ходе $\Sigma\beta_{\pi}^a$ на рис. 1, *б* хорошо проявляются

зимние максимумы и летние минимумы аэрозольного содержания. Жирная кривая, полученная сглаживанием сезонных колебаний окном в 1 год, характеризует квазидвухлетний цикл (КДЦ). КДЦ с периодом в среднем около 28 мес связан почти с ежегодным изменением в экваториальной зоне направления восточных и западных зональных ветров на противоположное в интервале стратосферных высот 20–40 км и модулирует всю стратосферную циркуляцию. В связи с этим КДЦ принято разделять на чередующиеся восточную и западную фазы. Приведенные на рис. 1 временные интервалы восточной (В) и западной (З) фаз КДЦ определены на основе временного ряда вертикального среза среднемесячных значений скоростей зонального ветра на уровне 30 гПа (около 24 км) для Сингапура (1° с.ш., 104° в.д.) [3]. На рис. 1, *б* видно, что восточные фазы КДЦ соответствуют спаду и минимальному аэрозольному содержанию стратосферы; запад-

ные фазы — росту и максимальному аэрозольному наполнению. Как сезонные, так и квазидвухлетние циклы, проявляющиеся в поведении $\sum \beta_{\pi}^a$, связаны с изменениями стратосферной циркуляции, определяющими меридиональный перенос стратосферных воздушных масс из тропической зоны в средние и высокие широты [4]. Усиление этого переноса в зимние периоды и периоды западной фазы КДЦ определяют всплески $\sum \beta_{\pi}^a$ в среднеширотной зоне Томска за счет подпитки стратосферного аэрозоля из тропического резервуара.

На рис. 1, в приведены сглаженные окном 1 и 2 года ряды отклонений среднемесячных значений ОСО от многолетнего среднего, составленные из данных наземных измерений ОСО в Томске с помощью озонметра М-124 и данных спутниковой аппаратуры TOMS [5]. На рис. 1, в хорошо проявляется влияние эффекта КДЦ с максимумами или ростом ОСО над Томском в восточной фазе и минимумами или спадом — в западной. Так же как и аэрозоль, озон в нижней стратосфере средних широт является пассивным трассером циркуляционных процессов. Усиление в западной фазе КДЦ меридионального переноса стратосферных воздушных масс из обедненной озоном тропической зоны обуславливает уменьшение ОСО в средних широтах, а ослабление в восточной фазе — увеличение ОСО.

Сглаженный ряд отклонений ОСО окном в 2 года на рис. 1, в позволяет наиболее ярко представить длительный период депрессии стратосферного озона, коррелированный с периодом вулканогенного аэрозольного возмущения стратосферы над Томском после извержения вулкана Пинатубо.

2. Стратосферный аэрозоль в «новый» фоновый период

Минимальное аэрозольное наполнение стратосферы за период измерений современными наземными и космическими средствами наблюдалось в 1979 г. Далее почти 20 лет стратосфера была возмущена вулканогенным аэрозолем чередующихся взрывных извержений вулканов, особенно таких мощных, как Эль-Чичон (1982 г.) и Пинатубо. В этом ряду извержений Пинатубо в 1991 г. был последним. Последующая седиментация вулканогенного аэрозоля привела к медленному очищению стратосферы и достижению «нового» фонового периода в 1998 г., при котором средние значения $\sum \beta_{\pi}^a$ вышли на уровень 1979 г.

На рис. 2 приведены значения $\sum \beta_{\pi}^a$ для «нового» фонового периода, полученные в Томске на СЛС при лазерном зондировании стратосферы на длине волны 532 нм. По уровню среднего значения $\sum \beta_{\pi}^a$ около 10^{-4} ср⁻¹ аэрозольное наполнение действительно вышло на уровень 1979 г., однако наклон прямой линейной регрессии указывает на непрерывно продолжающийся процесс уменьшения аэрозольного наполнения стратосферы в уникаль-

ный период длительного (более 10 лет) отсутствия вулканогенных возмущений стратосферы.

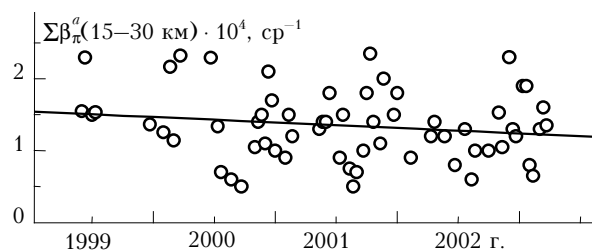


Рис. 2. Временной ход декадно усредненных значений $\sum \beta_{\pi}^a$ «нового» фонового периода. Прямой линией показана линейная регрессия

В [6] нами было определено, что в качестве основного критерия фонового состояния стратосферного аэрозольного слоя для средних широт нужно рассматривать отсутствие значимых различий (менее двух интервалов среднеквадратического отклонения — СКО) в среднесезонных (зима, лето) профилях отношения рассеяния $R(H)$ (отношение суммы коэффициентов обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния к коэффициенту обратного молекулярного рассеяния). Справедливость этого критерия подтвердилась в период релаксации стратосферных возмущений после извержения Пинатубо [7].

На рис. 3, а изображены среднесезонные профили $R(H)$ (зима, лето) в стратосфере над Томском

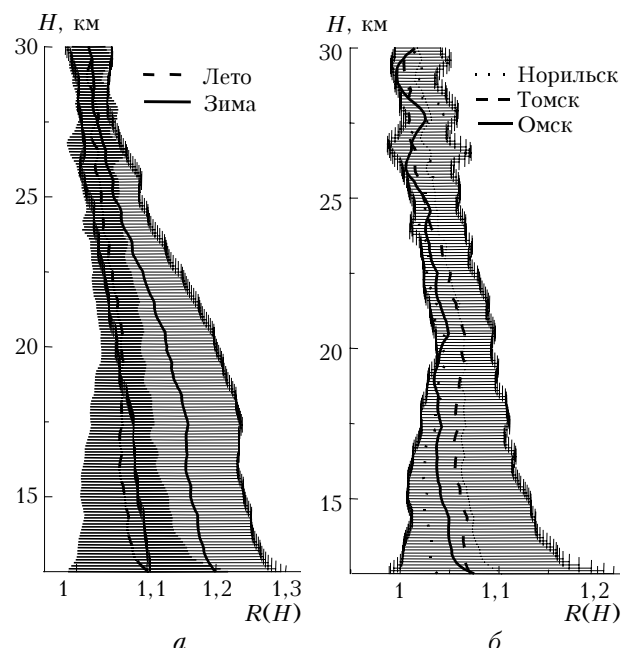


Рис. 3. Вертикальное распределение стратосферного аэрозоля над Томском в период 2000—2003 гг.: а — среднесезонные (лето — зима) профили $R(H)$; б — примеры летних профилей $R(H)$ различных регионов Сибири в коридоре летних СКО для Томска. СКО и их границы показаны затемнением тонкими линиями

по результатам лидарных наблюдений за период с ноября 2000 по март 2003 г. Среднелетний профиль $R(H)$ и его СКО определены по ансамблю из 24

профилей за период 2001–2002 гг. Для определения среднезимнего профиля $R(H)$ и его СКО использовались 42 профиля за период 2000–2003 гг. Видно, что интервалы СКО разных сезонов пересекаются, что соответствует основному критерию фонового состояния стратосферного аэрозольного слоя. Причем по мере непрерывно продолжающегося процесса аэрозольного очищения стратосферы среднесезонные профили $R(H)$ также неуклонно сближаются. С другой стороны, понятно, что сезонные различия радиационно-термического состояния стратосферы всегда будут обуславливать превышения (пусть незначительные) среднезимнего профиля $R(H)$ над среднелетним.

Фоновое состояние САС характеризуется одинаковостью в распределении $R(H)$ не только во времени, но и на большом пространстве. На рис. 3,б изображены единичные летние профили $R(H)$, полученные не только в Томске, но и в экспедиционных измерениях в Омске и Норильске на больших расстояниях — около 800 км на запад и 1400 км на север от Томска. Эти профили не только попадают в интервал летних СКО для Томска, но и в значительной степени повторяют друг друга. Это говорит о высокой однородности пространственного распределения САС в больших масштабах.

3. Климатология стратосферного озона в фоновый период

Длительная депрессия стратосферного озона, обусловленная столь же длительным возмущением стратосферы вулканогенным аэрозолем после извержения Пинатубо, закончилась к 1996 г. С этого момента по настоящее время продолжается фоновый, невозмущенный период состояния стратосферного озонового слоя. На рис. 4,а изображен среднегодовой профиль вертикального распределения озона в стратосфере над Томском по результатам отдельных лидарных наблюдений на СЛС с 1996 по 2003 г. Здесь же изображены среднесезонные профили ВРО для весеннего максимума и осеннего минимума, а на рис. 4,б приведены высотные профили СКО для ВРО весной и осенью. Максимум стратосферного озонового слоя над Томском располагается на высоте около 20 км. Вариативность ВРО усиливается в нижней стратосфере, причем в период весеннего максимума в основном выше, чем в период осеннего минимума.

На рис. 5 в виде гистограмм изображены сезонные изменения концентрации озона на различных высотах стратосферы и стандартные отклонения, определенные по среднесезонным профилям ВРО за период 1996–2003 гг. На рис. 5 хорошо видно, что в нижней стратосфере (ниже 26 км) максимум концентрации озона приходится на зимне-весенний период, а на высотах 30 км и выше максимум приходится на лето. Это отражает преимущественное влияние динамического фактора на изменения ВРО в нижней стратосфере и фотохи-

мического для высот 30 км и выше. В районе велапаузы (около 26 км) проявляется четкая граница

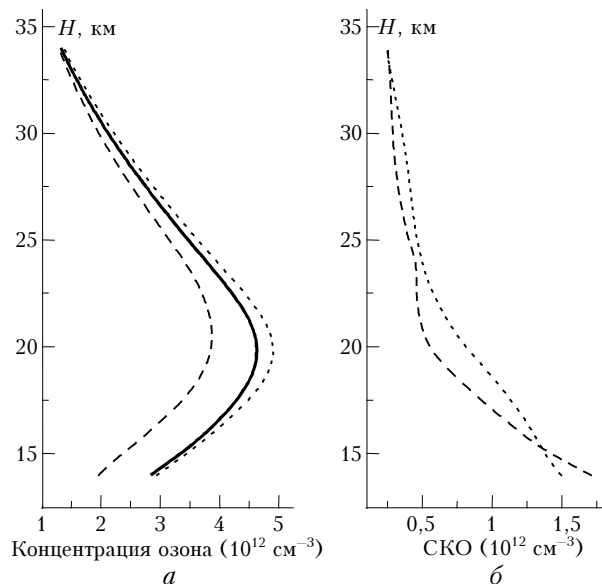


Рис. 4. Вертикальное распределение стратосферного озона над Томском в период 1996–2003 гг.: а — среднегодовой (жирная линия) и среднесезонные (весна — точки, осень — штрихи) профили ВРО; б — соответствующие профили СКО для весны (точки) и осени (штрихи)

мечу двумя областями озоносферы, где превалирует динамический или фотохимический процессы. Сезонный ход озона на этой высоте фактически незначим по амплитуде. Представленные на рис. 5 сезонные изменения концентрации стратосферного озона хорошо согласуются с подобными результатами, приведенными в [8].

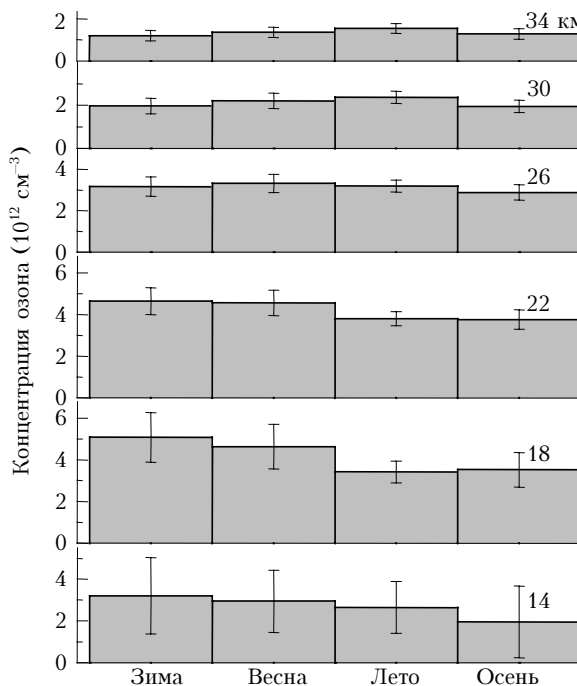


Рис. 5. Сезонные изменения концентрации озона на различных высотах. Вертикальные линии в верхней части гистограмм показывают СКО

На рис. 6 даны среднегодовые профили ВРО над Томском в сравнении со среднегодовым за весь период наблюдений 1996–2001 гг. Для наглядности проявления КДЦ на рис. 6 специально представлен высотный диапазон в области около максимума озонового слоя (17–23 км). Видно, что стратосферный озон над Томском сильно модулируется КДЦ в области своего максимума, что и отражается в квазидвухлетних колебаниях среднеширотного ОСО (см. рис. 1, в).

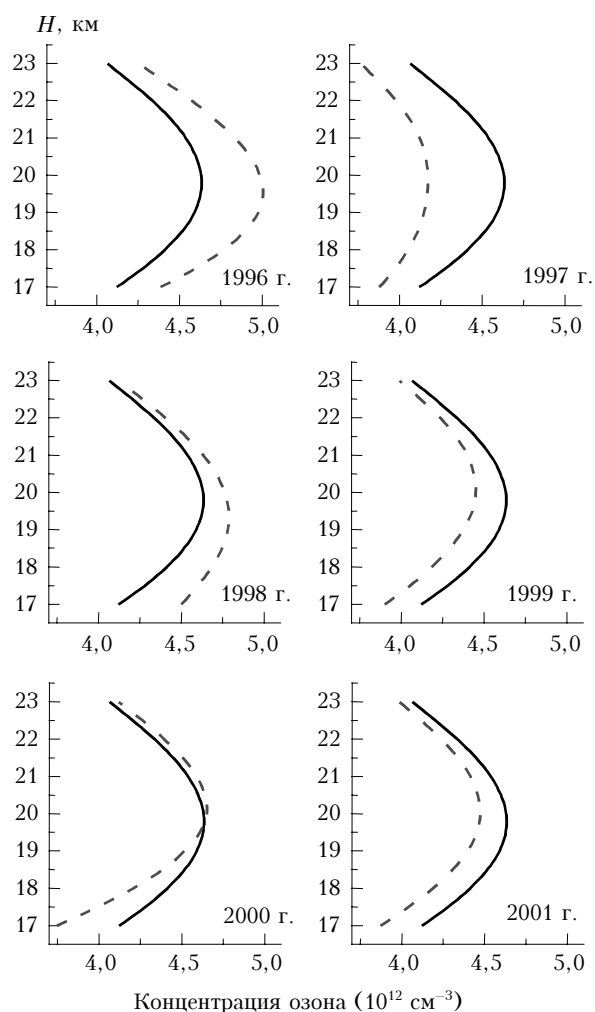


Рис. 6. Квазидвухлетние колебания стратосферного озона над Томском в 1996–2001 гг. в области максимума озонового слоя: сплошная линия – среднее за 1996–2001 гг., штриховые линии – среднее за отдельный год

Заключение

Многолетнее регулярное лазерное зондирование стратосферы над Томском, проводимое на Сибирской лидарной станции более 15 лет, позволяет вывести исследования стратосферного аэрозоля и озона на климатологический уровень. Полученные в одной точке длинные ряды наблюдений в боль-

шей степени отражают не региональные особенности, а процессы планетарного масштаба.

Аэрозоль и озон в нижней стратосфере средних широт выступают как трассеры циркуляционных стратосферных процессов. В их поведении четко проявляется не только сезонная, но и квазидвухлетняя цикличность.

Наиболее значимым явлением в период лидарных наблюдений, конечно, было мощнейшее извержение вулкана Пинатубо в июне 1991 г. Инжекция в стратосферу огромной массы вулканогенных аэрозолей и сернистых газов вызвала увеличение аэрозольного наполнения стратосферы над Томском зимой 1992 г. почти на два порядка. Аэрозольное возмущение стратосферы над Томском продолжалось почти 5 лет, вызывая в этот период выраженную депрессию озоносферы.

«Новое» фоновое состояние стратосферы, наблюдаемое в последние годы при длительном отсутствии вулканогенных возмущений стратосферы, позволяет выделить:

- высокую однородность в пространственно-временных распределениях стратосферного аэрозоля. Процесс аэрозольного очищения стратосферы непрерывно продолжается во всех широтных поясах;
- выраженную зависимость сезонных изменений концентрации озона в нижней стратосфере (ниже 26 км) от динамического фактора, а на высотах 30 км и более – от фотохимического фактора. Высота велопаузы (около 26 км) выступает границей этих двух областей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минпромнауки РФ на установке Сибирская лидарная станция (рег. номер 01-64) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 01-05-64644, 03-05-65105, 02-05-79082, 03-05-79100).

1. Зуев В.В. Дистанционный оптический контроль стратосферных изменений. Томск: МГП «РАСКО», 2000. 140 с.
2. Зуев В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. Лазерное зондирование средней атмосферы / Под общ. ред. В.В. Зуева. Томск: МГП «РАСКО», 2002. 352 с.
3. Langford A.O., O'Leary T.J., Proffitt M.H. Transport of the Pinatubo volcanic aerosol to a northern midlatitude site // J. Geophys. Res. D. 1995. V. 100. № 5. P. 9007–9016.
4. Hitchman M.H., McKay M., Trepte C.R. A climatology of stratospheric aerosol // J. Geophys. Res. D. 1994. V. 99. № 10. P. 20689–20700.
5. <http://toms.gsfc.nasa.gov/teacher/ozone-overhead.html>
6. Зуев В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. Стратосферный аэрозольный слой над г. Томском (56,5° с.ш., 85,0° в.д.) по результатам наблюдений на Сибирской лидарной станции в 1986–1997 гг. // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 3. С. 268–274.
7. Zuev V.V., Burlakov V.D., El'nikov A.V., Ivanov A.P., Chaikovskii A.P., Shcherbakov V.N. Processes of long-term relaxation of SAL in Northern Hemisphere midlati-

tudes after a powerful volcanic eruption // Atmos. Environ. 2001. V. 35. P. 5059–5066.
8. Cloude H., Schonborn F., Steinbrecht W., Vander-

see W. DIAL ozone measurements at the meteorological observatory Hohenpeißenberg: Climatology and trends // Proc. 17-th ILRC. Sendai, Japan. 1994. P. 413–415.

V.V. Zuev, V.E. Zuev, V.D. Burlakov, S.I. Dolgii, A.V. El'nikov, A.V. Nevzorov. **Climatology of stratospheric aerosol and ozone according to data of many-year observations at Siberian Lidar Station.**

We analyze and generalize the data of many-year lidar and spectrophotometric measurements of integrated characteristics of the vertical distribution of stratospheric aerosol and ozone obtained for 17 years at Siberian Lidar Station, Tomsk. We consider seasonal and quasi-biennial oscillation cycles of integrated characteristics and seasonal features of the vertical aerosol and ozone distribution at different heights in the stratosphere. Data of many-year measurements obtained at a single observation point well reflect stratospheric global-scale variations associated with changes in the stratospheric general circulation.