

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ,
ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.42

В.В. Зуев, О.Е. Баженов, В.Д. Бурлаков, А.В. Невзоров

Долговременные тренды, сезонные
и аномальные кратковременные изменения
фонового стратосферного аэрозоля

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 3.08.2007 г.

На основе данных многолетних (1986–2007 гг.) наблюдений на Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы СО РАН в Томске (56,5° с.ш.; 85,0° в.д.) выделены периоды фонового состояния стратосферного аэрозольного слоя и определены тренды изменений фоновой, невулканической компоненты стратосферного аэрозоля (СА). Для периода 1999–2006 гг. слабый отрицательный тренд статистически не значим. Содержание фонового СА в длительный вулканически спокойный период 1997–2007 гг. не претерпевает значимых долговременных изменений под действием природного или антропогенного факторов. Возможны наблюдения кратковременных (несколько дней) аномальных изменений содержания СА под действием природных факторов. Сезонные изменения содержания фонового СА показывают выраженный ход с максимумом в зимний период и минимумом в летний.

Введение

Стратосферный аэрозоль (СА) играет значительную роль в ряде процессов, которые воздействуют на радиационный, температурный и химический баланс атмосферы, в том числе на баланс газов озоновых циклов. Особенно ярко эти эффекты проявляются после мощных вулканических извержений, когда масса сернокислотного СА увеличивается в десятки раз и прямыми измерениями регистрируются значительные радиационно-температурные эффекты [1, 2]. Невулканический, т.е. фоновый, аэрозоль имеет своим источником природную и антропогенную эмиссию с земной поверхности серосодержащих газов, в первую очередь карбонилсульфид СОS и двуокись серы SO₂, которые в ряде химических реакций образуют в стратосфере сернокислотный аэрозоль.

Знание долговременных трендов изменений фонового СА необходимо для определения и прогнозирования его возможных воздействий на радиационный и химический баланс атмосферы. Так, на основе сравнения аэрозольного содержания в фоновые периоды 1979 и 1989–1990 гг. была высказана гипотеза об антропогенном увеличении массы фонового СА до 5% в год [3]. В результате этого по модельным расчетам к 2050 г. оптическая масса СА увеличилась бы более чем на порядок, а средняя приземная температура уменьшилась бы на 1,5° [4]. Однако дальнейшие детальные исследования динамики фонового СА не подтвердили эту гипотезу.

На Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы СО РАН в Томске (56,5° с.ш.; 85,0° в.д.) регулярные лидарные измерения характеристик стратосферного аэрозольного слоя ведутся

с января 1986 г. Основные результаты исследований, полученные для Томска, а также во время экспедиционных измерений в регионах Сибири, опубликованы в работах [5–8]. В настоящей статье рассматриваются долговременные тренды изменений содержания фонового СА, а также его сезонные, усредненные по месяцам, особенности и кратковременные аномальные изменения.

**1. Долговременные тренды изменений
интегрального аэрозольного
наполнения стратосферы**

На рис. 1 представлен временной ряд изменений интегрального в диапазоне высот 15–30 км коэффициента обратного аэрозольного рассеяния B_{π}^a . Эта величина отражает временную динамику общего аэрозольного наполнения стратосферы. Измерения ведутся на длине волны зондирования 532 нм, которая является унифицированной для сети лидарных станций и позволяет сравнивать результаты наблюдений. Прием оптических лидарных сигналов осуществляется зеркалом диаметром 0,3 м с регистрацией сигналов в режиме счета импульсов фототока. Точность измерений величины B_{π}^a не хуже 5%. Техническое описание лидарного комплекса приводится в работе [9]. Каждая точка представляет собой подекадное усреднение данных. Мелкими точками для сравнения показаны некоторые данные измерений для среднеширотной станции Минск (54° с.ш., 28° в.д.) [6]. В данной статье они не анализируются. Не анализируется также период июнь 1991–1996 гг., так как в это время содержание СА определялось аэрозодем вулканического происхождения (влк. Пинатубо).

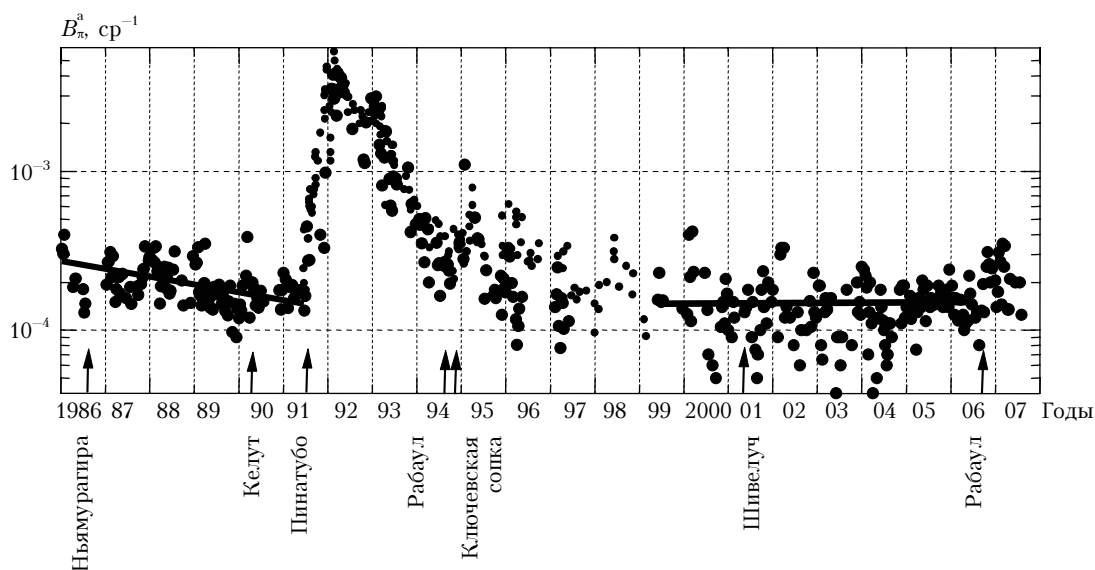


Рис. 1. Временной ход интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния за период 1986–2007 гг.

Стрелками показаны вулканические извержения тропического пояса и средних широт Северного полушария. Характеристики извержений приведены в таблице, которая составлена на основе данных [10]. Данные о времени и высоте выброса последнего извержения влк. Рабаул взяты на сайте вулканической обсерватории Рабаула [13].

Хронология и характеристики вулканических извержений VEI

Вулкан	Координаты, град	Дата	VEI	SO ₂ , Мт	Аэрозоль, Мт
Эль-Чичон	17,0° с.ш.; 93,2° з.д.	Март – апрель 1982	4	8,1	12
Дель-Руиз	4,9° с.ш.; 73° з.д.	13 ноября 1985	3	0,66	–
Ньямурагира	1,4° ю.ш.; 29,2° в.д.	16 июля 1986	4	0,8	–
Пинатубо	15° с.ш.; 120,3° в.д.	12 июня 1991	6(5+)	17–20	30
Келут	7,9° ю.ш.; 112,3° в.д.	10 февраля 1990	4	0,15	–
Рабаул	4,3° ю.ш.; 152,2° в.д.	19 сентября 1994	4?	0,2	–
Ключевская сопка	56,1° с.ш.; 160,6° в.д.	1 октября 1994	4(3?)	0,1	–
Шивелуч	56,6° с.ш.; 161,4° в.д.	22 мая 2001	4?	–	–
Рабаул	4,3° ю.ш.; 152,2° в.д.	7 октября 2006	4?	–	–

По данным наблюдений этой обсерватории высота выброса 7 октября 2006 г. достигла уровня 18 км, что превышает справочную высоту тропической тропопазы для октября (16,3 км). Другие характери-

стики извержения нам пока не известны. Влияние извержений, которые могли проявиться в Томске, выбраны на основании вывода, сделанного в работе [11]. Продукты извержения тропического пояса распространяются со временем по всему глобусу, средних широт – в полушарии, в котором произошло извержение, а высоких широт – преимущественно полярным переносом в соответствующий полярный регион. Кроме того, скорость распространения продуктов извержения от вулканов тропического пояса в средние и высокие широты зависит от сезона и фазы квазидвухлетней цикличности (КДЦ) экваториальных зональных ветров. Перенос из тропического резервуара в средние и высокие широты усиливается в зимний период и в западной фазе КДЦ [14].

В таблице приведена величина VEI – индекс вулканического взрыва: 3 соответствует высоте выброса 3–15 км, 4 – 10–25 км, 5 – > 25 км. Кроме того, для характеристики вулканического взрыва рассматриваются величина выброшенной двуокиси серы и масса образовавшегося СА. Первая определяется с помощью космической спектрометрической техники TOMS, вторая по измерениям солнечного ослабления с помощью космической техники SAGE.

По измерениям в Томске можно с уверенностью сказать, что в январе – апреле 1986 г. регистрировались остаточные следы извержения влк. Дель-Руиз, влк. Пинатубо в 1991–1996 гг. и влк. Рабаул с октября 2006 г. по весну 2007 г. Подробная динамика развития аэрозольного возмущения от последнего извержения рассматривается нами в работе [12]. На рис. 2 приведена динамика аэрозольного наполнения стратосферы над Томском с конца 2004 по весну 2007 г.

Процедура сглаживания показывает наличие повышенного аэрозольного содержания в течение примерно 5 мес после извержения. Быстрое, заметное в Томске, увеличение аэрозольного наполнения стратосферы после извержения (через 10 дней) и последующее его сохранение, возможно, связаны с тем,

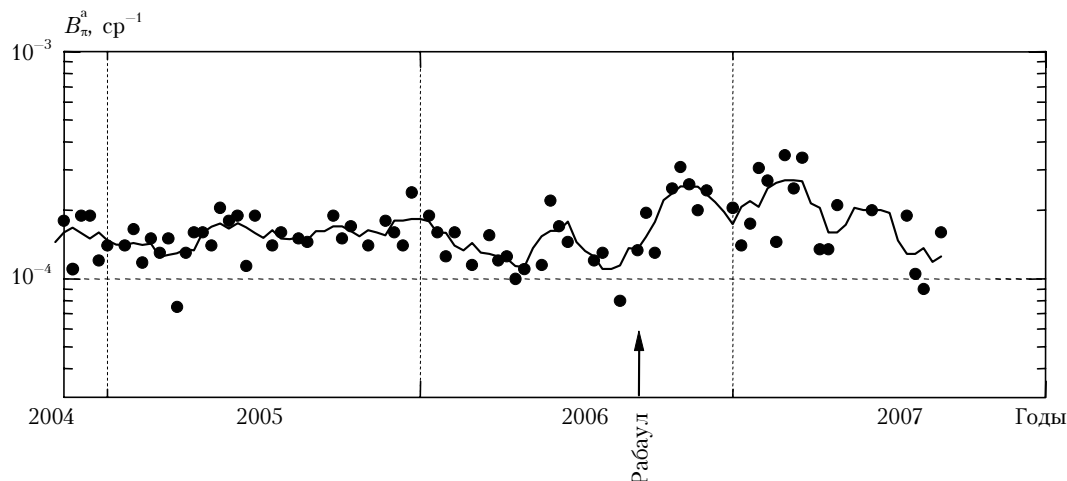


Рис. 2. Временная зависимость интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния над Томском в высотном диапазоне 15–30 км (точки); линия — сглаживание по 5 точкам за период 2004–2007 гг.

что время извержения и последующий период характеризовались западной фазой КДЦ зонального тропического ветра. В этой фазе усиливается меридиональный перенос из тропического пояса в средние широты [14]. Кроме того, этот перенос усиливался в последующий зимний период наблюдений.

Влияние этого извержения сказалось на трендах изменения содержания СА в фоновый период 1999–2006 гг. Тренды рассчитывались на основе линейной регрессии величины B_{π}^a , которая аппроксимировалась прямой вида $B_{\pi}^a = A + Bt$, где A и B — константы; t — время, мес. Тренд для последнего периода 1999–2006 гг. оказался положительным: $A = 1,42476 \cdot 10^{-4}$, $B = 4,79285 \cdot 10^{-8}$, СКО = $5,39 \cdot 10^{-5}$, доверительная вероятность $P = 0,84$, тренд = $(0,4 \pm 4)\%$ в год. Если исключить из анализа данные за октябрь — декабрь 2006 г., когда уже сказывалось присутствие вулканического аэрозоля, то линейная аппроксимация определяется величинами $A = 1,49816 \cdot 10^{-4}$, $B = -1,48511 \cdot 10^{-7}$, СКО = $5,11 \cdot 10^{-5}$, доверительная вероятность $P = 0,53$, тренд = $(-1 \pm 4)\%$ в год.

Для периода 1986–1990 гг.: $A = 2,5062 \cdot 10^{-4}$, $B = -1,50251 \cdot 10^{-6}$ при СКО = $5,09 \cdot 10^{-5}$, $P = 0,0042$; тренд $(-7 \pm 4)\%$ в год.

Таким образом, для периода 1986–1990 гг. наблюдается выраженный отрицательный тренд во временном ходе СА, который обусловлен релаксацией остаточного аэрозоля после извержения влк. Эль-Чичон, Дель-Руиз и, возможно, от более слабых вулканов Ньямурагира и Келут. Нельзя сказать, что в этот период в стратосфере присутствовала чисто фоновая, невулканическая компонента СА.

За период 1999 — сентябрь 2006 г. наблюдается слабый, статистически незначимый отрицательный тренд. Аэрозольное наполнение стратосферы в этот период определяется фоновой невулканической компонентой и не претерпевает каких-либо значимых долговременных изменений. Линейные тренды для периодов 1986–1990 гг. и 1999 — сентябрь 2006 гг. приведены на рис. 1 (прямые линии).

Сравнение уровня содержания СА в 1990 г. и после 1996 г. показывает, что антропогенного увеличения содержания фонового СА не происходит.

2. Сезонные и аномальные изменения в уровне содержания фонового стратосферного аэрозоля

Сезонные (среднемесячные) изменения уровня содержания СА также определялись для двух периодов, когда не было значительных вулканических извержений: 1986–1990 гг. и 1999 — сентябрь 2006 г. Данные за большую часть 1997-го и за 1998 г., когда аэрозольное возмущение стратосферы после извержения влк. Пинатубо уже релаксировало, у нас по техническим причинам отсутствуют.

На рис. 3 представлены среднемесячные значения B_{π}^a для конкретных лет измерений двух периодов, по сумме двух периодов и его усредненные значения за соответствующий период в коридоре СКО.

Общий ход кривой показывает обычно наблюдаемое зимнее увеличение аэрозольного содержания по сравнению с минимальным летним. Это происходит как в условиях вулканического возмущения стратосферы, так и в фоновых условиях и связано с усилением меридионального переноса из тропического пояса в средние широты в зимний период. В результате этого аэрозоль из тропического резервуара поступает в средние и высокие широты.

Вопрос о наличии тропического резервуара фонового СА долгое время оставался дискуссионным. Последние модели фоновых сульфатных аэрозолей, полученные с использованием моделей общей циркуляции атмосферы с включением химических процессов, показывают [15, 16], что образование новых частиц гомогенной нуклеацией происходит преимущественно в тропической нижней стратосфере. И хотя эмиссия с поверхности газовых предшественников СА (SO_2 и COS) в средних широтах Северного полушария выше, чем на экваторе, конвекция из тропосферы

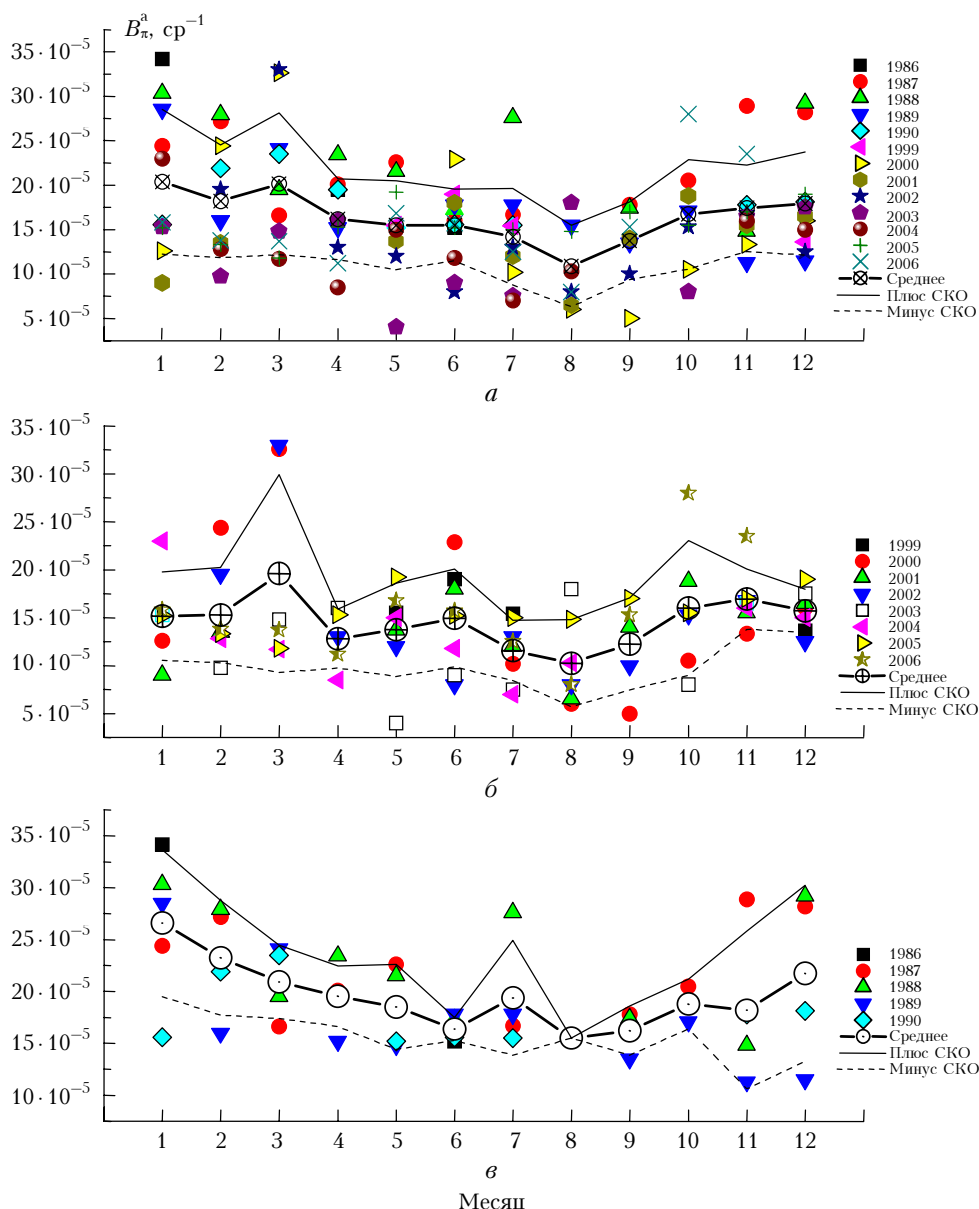


Рис. 3. Среднемесячные значения интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния для определенных лет измерений и его значения, усредненные за соответствующий период в коридоре СКО

в стратосфере в тропическом поясе выше, чем в средних широтах.

В то же время на рис. 3 заметны некоторые аномальные отклонения значений B_{π}^a , которые превышают коридор СКО. Подобные отклонения имеют кратковременный характер (несколько дней) и могут быть связаны с различными физическими процессами в стратосфере. Так, в январе 1995 г. (см. рис. 1) мы наблюдали резкое увеличение интегрального аэрозольного рассеяния и выраженные аэрозольные слои на высотах 15–20 км. Качественный анализ размеров рассеивающих аэрозольных частиц на основе данных 2-частотного зондирования (532 и 1064 нм), а также анализ температурного режима стратосферы по данным аэрологического зондирования показал, что аэрозольные слои имеют характер полярных стратосферных облаков (ПСО) [18]. Редкие

эпизоды зимних наблюдений ПСО регистрируются и на других среднеширотных лидарных обсерваториях. Летом 2002 г. в ходе экспедиционных измерений в г. Норильске на высотах более 25 км мы наблюдали выраженные аэрозольные слои, связанные с прохождением интенсивного метеорного потока Персеид [7].

На рис. 3, *a* заметны мартовские отклонения периода 1999–2006 гг. (рис. 3, *б*) по сравнению с периодом 1986–1990 гг. (рис. 3, *в*). Они появились за счет повышенного аэрозольного содержания в эти месяцы в 2000 и 2002 гг. В работе [17] мы рассматривали процесс образования подобных аномальных аэрозольных слоев на высотах преимущественно выше 20 км. Подробный анализ показал, что их образование связано с процессами внезапных стратосферных потеплений.

Зимние увеличения содержания СА в 1986–1988 гг. (см. рис. 3, а, в) могут быть связаны с выносом остаточного вулканического аэрозоля (влк. Дель-Руиз и Ньямурагира) из тропического резервуара. Увеличение аэрозольного рассеяния в октябре – декабре 2006 г., как уже отмечалось, связано с извержением влк. Рабаул. Нами своевременно не анализировались некоторые другие кратковременные аномальные увеличения СА. В частности, июль 1988 г. (см. рис. 3, а, в), июнь 2000 г. (см. рис. 3, а, б) и некоторые другие менее значительные. Вполне возможно, что летние увеличения также были связаны с метеорными потоками.

Для определения сезонного хода содержания фонового СА использовались абсолютные среднемесячные значения B_{π}^a за период 1999–2006 гг. При этом аномальные мартовские 2000 и 2002 гг. значения были приведены к среднемартовским за период 1999–2006 гг. Значения B_{π}^a для октября – декабря 2006 г. исключались из анализа, поскольку они обусловлены вулканическим аэрозодем. Результаты расчетов представлены на рис. 4. Для получения выраженного сезонного хода применена процедура сглаживания два раза по два. На рис. 4 показаны также коридоры СКО. Наблюдается явное зимнее увеличение содержания СА по сравнению с летним.

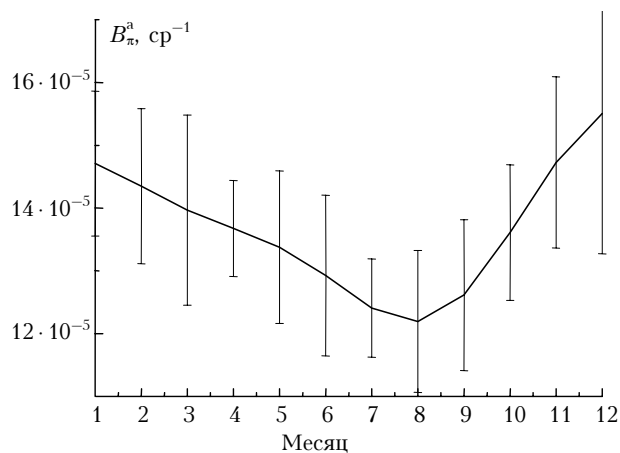


Рис. 4. Временной ход фоновых среднемесячных значений B_{π}^a за период 1999–2006 гг. Вертикальными линиями показаны коридоры СКО

Заключение

За период наблюдений 1986–1990 гг. в стратосфере над Томском наблюдался выраженный отрицательный тренд во временном ходе СА, который обусловлен релаксацией остаточного аэрозоля после извержения влк. Эль-Чичон, Дель-Руиз и, возможно, от более слабых влк. Ньямурагира и Келут. Нельзя сказать, что в этот период в стратосфере присутствовала чисто фоновая, невулканическая компонента СА.

За период 1999 – сентябрь 2006 г. наблюдается слабый, статистически незначимый отрицательный тренд. Аэрозольное наполнение стратосферы в этот период определяется фоновой невулканической компонентой и не претерпевает каких-либо значимых долговременных изменений под действием природ-

ных или антропогенных факторов, что согласуется с данными спутниковых наблюдений SAGE и на сети лидарных станций [10]. В условиях длительного фонового периода возможны кратковременные (несколько дней) аномальные изменения содержания СА под действием природного фактора (метеорные потоки, ПСО, внезапные стратосферные потепления).

Сравнительно слабое извержение вулкана тропического пояса Рабаул (октябрь 2007 г.) с индексом вулканического взрыва 4 (определенного по высоте выброса) уже сказывается на общем тренде аэрозоля за период 1999–2006 гг. в стратосфере средних широт Томска.

Сезонные изменения содержания фонового СА показывают выраженный ход с максимумом в зимний период и минимумом в летний.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (контракт № 02.518.11.7088), Международного научно-технического центра (проект № В-1063) и интеграционного проекта СО РАН № 3.14.

1. McCormick M.P., Thomason L.W., Trepte C.R. Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption // Nature (Gr. Brit.). 1995. V. 373. P. 399–404.
2. Labitzke K., McCormick M.P. Stratospheric temperature increases due to Pinatubo aerosols // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19. N 2. P. 207–210.
3. Hofmann D.J. Increase in the stratospheric background sulfuric acid aerosol mass in the past 10 years // Science. 1990. V. 248. P. 996–1000.
4. Асатуров М.Л. Влияние стратосферного аэрозоля на климат // Метеорол. и гидрол. 1998. № 3. С. 5–12.
5. Zuev V.V., Burlakov V.D., El'nikov A.V. Ten years (1986–1995) of lidar observations of temporal and vertical structure of stratospheric aerosols over Siberia // J. Aerosol Sci. 1998. V. 29. N 10. P. 1179–1187.
6. 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 midlatitudes after a powerful volcanic eruption // Atmos. Environ. 2001. V. 35. P. 5059–5066.
7. Зув В.В., Зув В.Е., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Ельников А.В., Невзоров А.В., Правдин В.Л. Лидарные исследования характеристик фонового стратосферного аэрозоля над регионами Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 2. С. 126–130.
8. Зув В.В., Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Невзоров А.В. Лидарные наблюдения стратосферного аэрозольного слоя средних широт в длительный вулканически спокойный период // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 7. С. 598–603.
9. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В. Модернизация измерительного комплекса Сибирской лидарной станции // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 10. С. 857–864.
10. Deshler T., Anderson-Sprecher R., Jager H., Barnes J., Hofmann D.J., Clemesha B., Simonich D., Osborn M., Grainger R.G., Godin-Beekmann S. Trends in the nonvolcanic component of stratospheric aerosol over the period 1971–2004 // J. Geophys. Res. D. 2006. V. 111. 01201, doi: 10.1029/2005JD006089.
11. Stothers R. B. Major optical depth perturbations to the stratosphere from volcanic eruptions: Pyrheliometric period, 1881–1960 // J. Geophys. Res. D. 1996. V. 101. N 2. P. 3901–3920.

12. Зуев В.В., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В. Аномальное аэрозольное рассеяние в атмосфере над Томском в осенне-зимний период 2006–2007 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. № 6. С. 524–530.
13. <http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm?vnum=0502-14=&volpage=weekly&VErupt=Y&VSources=Y&VRep=Y&VWeekly=Y#oct2006>
14. Hitchman M.H., McKay M., Trepte C.R. A climatology of stratospheric aerosol // J. Geophys. Res. D. 1994. V. 99. N 10. P. 20689–20700.
15. Timmreck C. Three-dimensional simulation of stratospheric background aerosol: first of a multiannual general circulation model simulation // J. Geophys. Res. D. 2001. V. 106. N 22. P. 28313–28332.
16. Takigawa M., Takahashi M., Akiyoshi H. Simulation of stratospheric sulfate aerosols using a Center for Climate System Research/National Institute for Environmental Studies atmospheric GCM with coupled chemistry 1. Nonvolcanic simulation // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 22. P. AAC1/1–AAC1/11.
17. Зуев В.В., Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Смирнов С.В., Хрянов П.А. Вариации отношения рассеяния в верхней стратосфере над Томском в январе–марте // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 11. С. 1005–1010.
18. 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 атмосфер. и океана. 1999. Т. 12. № 3. С. 268–274.

V.V. Zuev, O.E. Bazhenov, V.D. Burlakov, A.V. Nevzorov. **Long-term trends, seasonal, and anomalous short-term variations of background stratospheric aerosol.**

Based on multiyear (1986–2007) observations at Siberian Lidar Station of Institute of Atmospheric Optics SB RAS in Tomsk (56.5°N; 85.0°E), we identified the periods of background state of the stratospheric aerosol layer and determined the trends of variations of the background, non-volcanic component of the stratospheric aerosol (SA). For period 1999–2006, a weak negative trend is statistically insignificant. The content of the background SA in the long volcanically quite period 1997–2007 does not suffer significant long-term changes under the impact of the natural or anthropogenic factors. There is a possibility of observations of short-term (few-day) anomalous variations of SA content under impact of the natural factors. The seasonal variations of the content of background SA show pronounced behavior with maximum in the winter period and minimum in the summer.