

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

УДК 551.510.41

ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА МНОГОЛЕТНЕГО ТРЕНДА
СТРАТОСФЕРНОГО ОЗОНА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ НАД ЮЖНЫМ РЕГИОНОМ РОССИИ

© 2009 г. Ионов Д. В.

Научно-исследовательский институт физики Санкт-Петербургского государственного университета,
физический факультет

E-mail: ionov@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 17.03.2009 г.

Представлены результаты анализа долговременных изменений концентрации стратосферного озона по данным многолетних измерений спутниковой аппаратуры SAGE II в 1984–2005 гг. Получены оценки линейного тренда содержания озона в трех 10-км слоях (15–45 км) над территорией России, ограниченной 40°–50° с.ш./30°–50° в.д. Показано, что максимальная скорость снижения концентрации озона наблюдалась в верхней стратосфере (35–45 км) – около 3% за 10 лет.

ВВЕДЕНИЕ

Наряду с существенным истощением озонового слоя, наблюдавшимся последние десятилетия в Антарктике, многочисленные экспериментальные данные указывают и на некоторое сокращение содержания озона в стратосфере других регионов планеты. Так, согласно последнему отчету Всемирной метеорологической организации (ВМО) о состоянии озонового слоя [Scientific..., 2007], общее содержание озона (ОСО) к 2005 г. уменьшилось на 3–5% от уровня значений 1980 г. по наблюдениям в средних широтах обоих полушарий. Наиболее быстрое снижение концентрации озона было отмечено в верхней стратосфере (~40 км) и составило 7–9% за 10 лет [Newchurch et al., 2000; Steinbrecht et al., 2006].

Долговременный дистанционный мониторинг атмосферного озона, как общего содержания в вертикальном столбе атмосферы, так и распределения по высоте, осуществляется наземными и спутниковыми средствами измерений. Так, наиболее длинный ряд непрерывных и точных измерений ОСО получен по данным наблюдений на станциях, оборудованных спектрофотометрами Добсона [Dobson, 1957] и Брюера [Brewer, 1973], а также фильтровым озонометром М-124 [Шаламянский, 1993]. Глобальное картирование ОСО в разные периоды осуществлялось спутниковой аппаратурой TOMS [Heath, Krueger et al., 1975], GOME [Burrows, Weber et al., 1999] и, позднее, OMI [Levelt, Hilsenrath et al., 2006]. Помимо ОСО, специальная методика UMKENR [Gotz, Meetham et al., 1934] позволяет определять сглаженное вертикальное распределение озона из наземных измерений рассеянного в зените УФ-излучения (выполненных, например, спектрофотометрами

Добсона или Брюера). Среди наземных дистанционных методов оперативного определения вертикального профиля озона следует выделить также лидарные измерения в УФ-области спектра, а также измерения линий эмиссии озона радиометрами высокого разрешения в микроволновом диапазоне. Значительный объем информации о вертикальном распределении озона накоплен благодаря прямым измерениям концентраций озона с помощью озонозондов, запуски которых регулярно осуществляются на сети станции, начиная с 1970 г. С конца 1970-х гг. начались глобальные спутниковые измерения вертикального профиля озона: по надирным измерениям рассеянного солнечного УФ-излучения аппаратурой SBUV (Solar Backscattered Ultra-Violet [Bhartia, Wellemeyer et al., 2004]), а также по затменным измерениям прямого солнечного излучения в видимой области спектра аппаратурой SAGE I, II, III (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment [McCormick, Zawodny et al., 1989]) и позднее, в 1991 г., в ИК-области аппаратурой HALOE (HALogen Occultation Experiment [Russell, Gordley et al., 1993]).

Анализ региональных долговременных изменений поля озона над территорией России проводился, например, в работе [Кароль и др., 2006], где рассматривается межгодовое изменение ОСО за 1973–2002 гг. по измерениям сети наземных станций Росгидромета. Кроме того, постоянный мониторинг полей ОСО осуществляется в Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета, результаты которого в виде ежеквартальных обзоров о состоянии озонового слоя над территорией Российской Федерации публикуются в журнале “Метеорология и гидрология”. В настоящем исследовании впервые получены оценки долговременных изменений со-

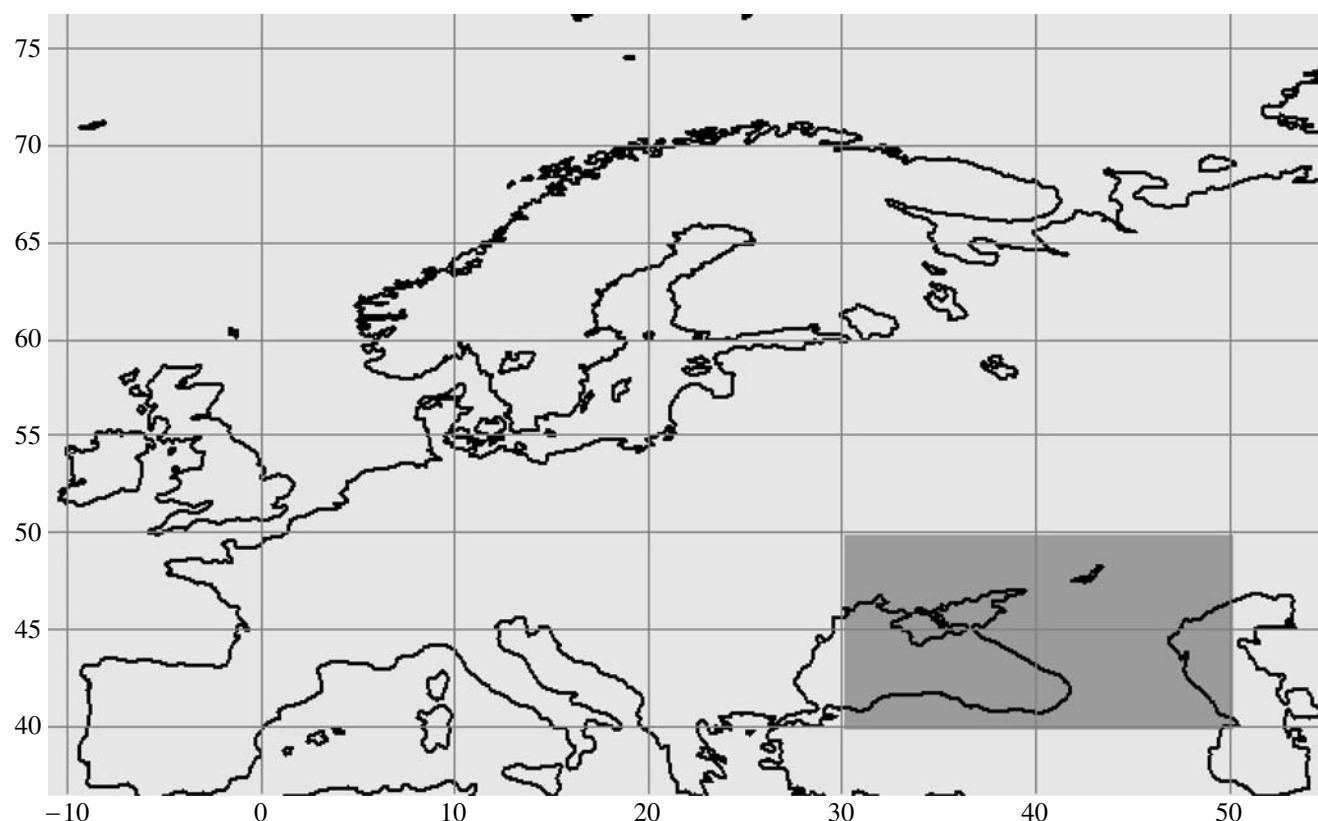


Рис. 1. Район исследования тренда концентрации стратосферного озона по данным измерений аппаратурой SAGE II в 1984 – 2005 гг. (темная заливка, 40°–50° с.ш./30°–50° в.д.).

держания озона в нескольких слоях стратосферы над Южным регионом России, на основе анализа данных спутниковых измерений в 1984–2005 гг.

АНАЛИЗ ДАННЫХ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕРЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ АППАРАТУРЫ SAGE II

Наиболее длительный и однородный ряд непрерывных измерений вертикального распределения озона в атмосфере был получен с помощью аппаратуры SAGE II. Прибор представляет собой семиканальный солнечный фотометр для регистрации прямого излучения, прошедшего толщу атмосферы по касательной трассе, на различных прицельных высотах при восходе или заходе Солнца. Эти измерения позволяют, в частности, определять профиль концентрации озона с вертикальным разрешением ~1 км, дважды за одно обращение спутника вокруг Земли (при общем количестве обращений – 14 в сут). SAGE II был запущен в октябре 1984 г. и успешно проработал до августа 2005 г., обеспечив почти 21 год измерений.

Для анализа вертикальной структуры тренда озона использовались данные глобальных измерений спутниковой аппаратурой SAGE II, выполнявшиеся в период с ноября 1984 г. по май 2005 г.

(данные получены с официального сайта SAGE II, <http://www-sage2.larc.nasa.gov>). Вертикальные профили содержания озона ежемесячно усреднялись по трем 10-км слоям: 15–25, 25–35 и 35–45 км. К сожалению, пространственно-временное разрешение и охват измерений SAGE II таковы, что позволяют получить относительно полный ряд наблюдений лишь в узком широтном поясе 40°–50° с.ш. Кроме того, с середины 2000 г. в результате неполадок системы наведения прибора на Солнце, количество измерений существенно сократилось. В настоящей работе нами был рассмотрен участок пояса 40°–50° с.ш., ограниченный сектором 30°–50° в.д. и представляющий таким образом Южный регион Российской Федерации (рис. 1). Общее количество измерений SAGE II, выполненных в указанном регионе в исследуемый период, составило 1082. Средние значения ОСО в вертикальном слое 15–55 км, полученные по результатам всех измерений SAGE II, представлены на рис. 2. Значительное снижение ОСО, наблюдающееся в 1991–1992 гг., обусловлено мощным вулканическим выбросом сульфатного стратосферного аэрозоля (см. ниже).

Анализ долговременных изменений содержания озона основан на решении стандартного уравнения множественной регрессии методом наименьших квадратов. Для аппроксимации вре-

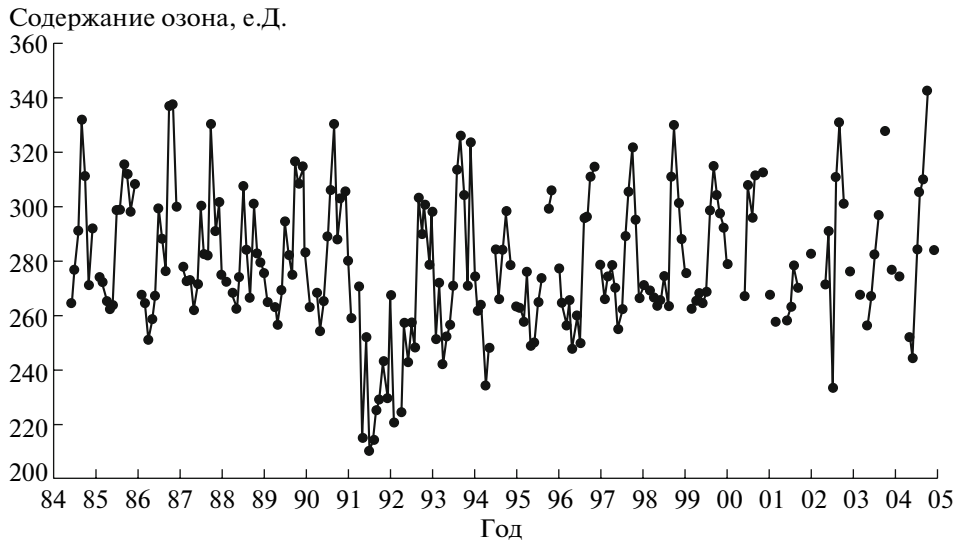


Рис. 2. Временной ряд среднемесячных значений общего содержания озона в слое 15–55 км по данным измерений аппаратурой SAGE II (40°–50° с.ш./30°–50° в.д.) в 1984–2005 гг.

менного ряда среднемесячных значений озона использовалась модельная функция, состоящая из линейного тренда и сезонного хода, а также основных компонент межгодовой изменчивости озона – квазидвухлетнего колебания, солнечной активности и содержания стратосферного аэрозоля:

$$Y_t = A + BX_t + C\mu_t + DQ_t + ES_t + FP_t + N_t, \quad (1)$$

где Y_t – значение содержания озона для месяца t ; X_t – порядковый номер месяца с января 1984 г.; N_t – остаток ряда (отклонение от аппроксимации); A – начальное значение ряда; B – коэффициент линейного тренда; C , D , E и F – коэффициенты компонент сезонного хода μ_t , индекса квази-двухлетнего колебания Q_t , солнечной активности S_t и вулканического стратосферного аэрозоля P_t . Погрешность определения годового тренда определяется по формуле [Weatherhead et al., 1998]

$$\sigma_B \approx \left[\frac{\sigma_N}{n^{3/2} \sqrt{1 - |\phi|}} \right], \quad (2)$$

где n – длина ряда в годах; σ_N – вариация остатка ряда N_t ; а ϕ – автокорреляция N_t , рассчитанная для модели стационарного процесса

$$N_t = \phi N_{t-1} + \varepsilon_t, \quad (3)$$

где ε_t – белый шум остатка ряда N_t . По результатам анализа N_t значение автокорреляции ϕ было принято равным 0.1. Согласно общепринятому критерию, величина тренда считается статистически значимой при выполнении условия $|B/\sigma_B| > 2$ [Weatherhead et al., 1998].

В качестве индекса стратосферного квазидвухлетнего колебания (QBO) использовались данные о среднемесячной скорости зонального ветра на уровнях 10 и 50 ГПа, полученные по ре-

зультатам регулярного радиозондирования в экваториальной области (данные получены с интернет-сайта <http://www.geo.fu-berlin.de>). Индексом солнечной активности являются данные о среднемесячном потоке радиоизлучения, полученные по измерениям радиотелескопа на частоте 2800 МГц в Канаде, 45°–49° с.ш. (данные получены с интернет-сайта <http://www.ngdc.noaa.gov>). За индекс содержания вулканического стратосферного аэрозоля были взяты данные среднемесячного коэффициента аэрозольного рассеяния на высоте 24 км, полученные по измерениям лидара на длине волны 589 нм, станция Sao Jose dos Campos в Бразилии, ~23° ю.ш. (данные получены с интернет-сайта <http://www.laser.inpe.br>). Указанные индексы (или так называемые регрессоры) в виде временного хода среднемесячных значений представлены на рис. 3. Следует отметить резкий скачок индекса стратосферного аэрозоля, сохранявшийся в течение нескольких лет, последовавший после знаменитого извержения вулкана Пинатубо на Филиппинах в июне 1991 г. (рис. 3з).

Рассчитанные согласно (1) тренды в виде скорости изменения содержания озона в % за 10 лет, представлены в таблице. Оценки трендов (и погрешности их определения) приведены как для отдельных 10-км слоев, так и для ОСО в слое 15–55 км. Все полученные значения трендов отрицательны, что говорит об общей тенденции истощения озонового слоя. Однако исходя из расчетов погрешностей определения тренда, статистически значимым является лишь отрицательный тренд в слое 35–45 км, где содержание озона уменьшается в среднем на ~3% за 10 лет. Оценки тренда в других слоях (в том числе – и в общем содержании) существенно ниже, а погрешности их определения превышают критерий статистической значимости.

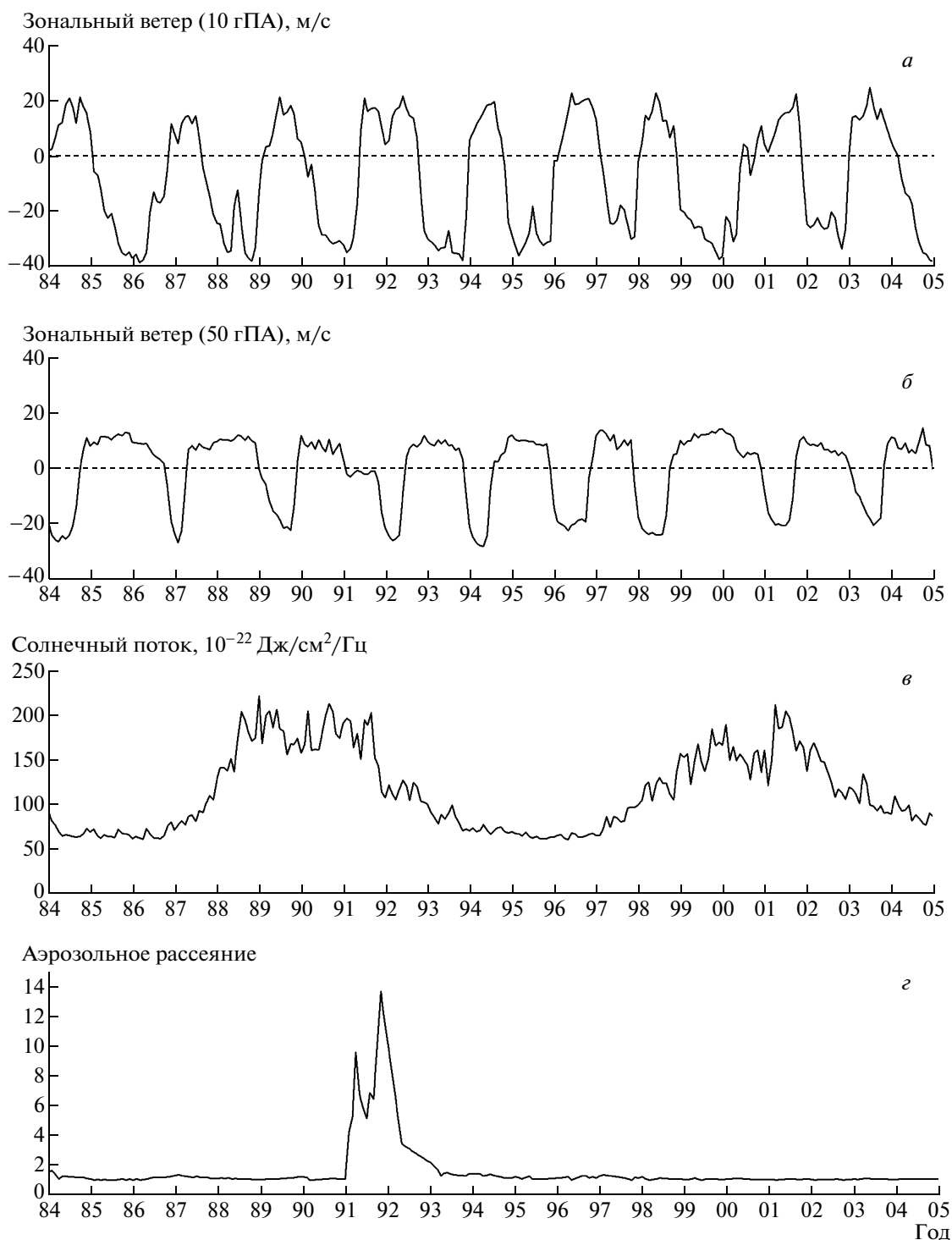


Рис. 3. Индексы основных компонент межгодовой изменчивости озона, учитываемых в анализе многолетнего тренда: квазидвухлетние колебания (а и б), солнечная активность (в) и содержание стратосферного аэрозоля (г).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты не вполне согласуются с данными аналогичной работы [Newchurch *et al.*, 2000], где была получена оценка линейного тренда -8.0 ± 2.0 за 10 лет, рассчитанная на основе анализа данных глобальных измерений SAGE II

на высотах ~ 40 км в широтном поясе $40^\circ-50^\circ$ с.ш. Однако, в отличие от настоящего исследования, в этой работе использовались данные более ранних измерений спутниковых приборов SAGE I и SBUV. Авторами работы [Newchurch *et al.*, 2000] были рассмотрены существенно другой времен-

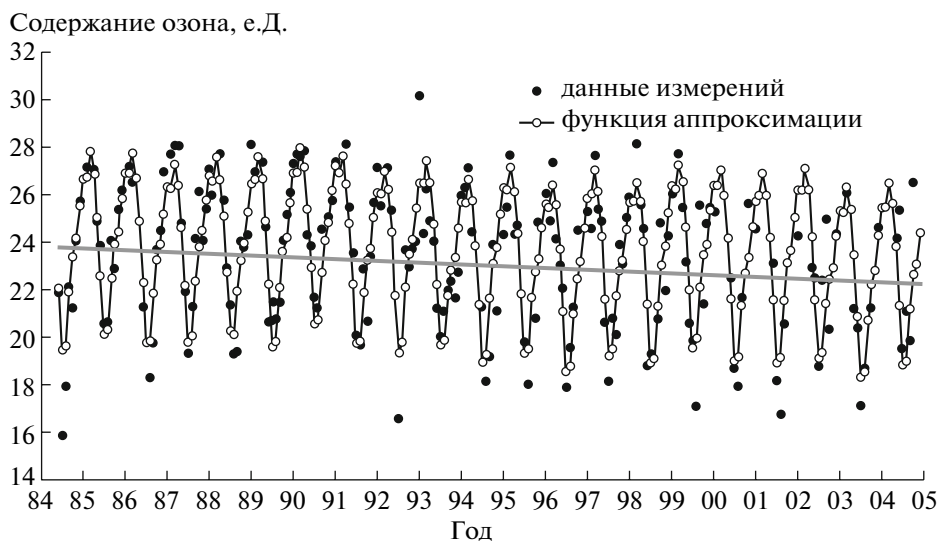


Рис. 4. Анализ тренда содержания озона в слое 35–45 км по данным измерений аппаратурой SAGE II (40°–50° с.ш./30°–50° в.д.) в 1984–2005 гг. Прямая линия — оценка линейного тренда.

ной период (с 1979 г. по 1998 г.), и несколько другой вертикальный слой (38–43 км). Вместе с тем в обеих работах был выявлен максимальный статистически значимый отрицательный тренд на высотах ~40 км.

Подробно результат анализа тренда озона в слое 35–45 км представлен на рис. 4, который содержит временной ряд измерений SAGE II, с аппроксимирующей его функцией и компонентой линейного тренда. Следует отметить, что поскольку содержание озона в этом слое в среднем составляет лишь ~7% от общего содержания в вертикальной толще, полученная величина отрицательного тренда вносит незначительный вклад в оценку сокращения общего содержания, составляющий всего ~0.2% за 10 лет. Отметим также, что в более поздних, по сравнению с [Newchurch et al., 2000], работах были выявлены тенденции восстановления озонового слоя, начиная с конца 1990-х гг. (см., например [Li, Cunnold et al., 2002; Newchurch et al., 2003; Zanis, Maillard et al., 2006]). В целом большинство аналогичных исследований указывает на невозможность аппроксими-

мации долговременного тренда озона линейной функцией. Так, например, в работе [Звягинцев, Кадыгров и др., 2003] показано, что долговременные изменения зонально осредненных значений ОСО в 1979–2001 гг. не имеют однонаправленного характера и не сводятся, таким образом, к убыли. По мнению международного коллектива авторов отчета ВМО [Scientific..., 2007], замедление спада и последующий рост содержания озона в верхней стратосфере, наблюдавшиеся последнее десятилетие, обусловлены достигнутым сокращением выбросов хлорфторуглеродов. К сожалению, поскольку используемый нами ряд данных, полученных аппаратурой SAGE II, существенно неполон, начиная с 2000 г. и обрывается в 2005 г. (см. рис. 2), мы не можем здесь подтвердить или опровергнуть эти результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам анализа данных спутниковых измерений SAGE II в 1984–2005 гг. определен тренд долговременных изменений содержания стратосферного озона в районе 40°–50° с.ш./30°–50° в.д. Показано, что в приближении линейного тренда содержание озона в исследуемый период сокращалось на всех уровнях (15–55 км). Максимальная скорость спада наблюдалась в вертикальном слое 35–45 км и составила $-3.1 \pm 0.7\%$ за 10 лет.

Автор выражает благодарность профессору Санкт-Петербургского государственного университета Ю.М. Тимофееву за ценные замечания и помощь в подготовке статьи.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 06-05-64987, 06-05-64909), а также Министерства

Скорости изменения содержания озона в % за 10 лет (линейный тренд), рассчитанные по данным спутниковых измерений SAGE II в 1984–2005 гг. для различных вертикальных слоев атмосферы (40°–50° с.ш./30°–50° в.д.)

Высота, км	Тренд, %
15–25	-0.29 ± 1.02
25–35	-0.73 ± 0.63
35–45	-3.13 ± 0.67
15–55	-0.67 ± 0.65

образования и науки РФ (гранты РНП.2.1.1.1138, РНП.2.2.1.1.3846).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[Звягинцев, Кадыгров и др., 2003] Звягинцев А.М., Кадыгров Н.Е., Крученицкий Г.М. Анализ временных рядов общего содержания озона по данным спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 4. С. 29–37.

[Кароль, Сыроваткина и др., 2006] Кароль И.Л., Сыроваткина О.А., Соломатникова А.А. и др. Анализ межгодовых изменений общего содержания озона над территорией России в 1973–2002 гг. по данным измерений наземных станций // Метеорология и гидрология. 2006. № 4. С. 19–28.

[Шаламянский, 1993] Шаламянский А.М. Озонометрическая сеть СНГ // Метеорология и гидрология. 1993. № 9. С. 100–104.

[Bhartia, Wellemeyer et al., 2004] Bhartia P.K., Wellemeyer C.G., Taylor S.L. et al. Solar Backscatter Ultraviolet (SBUV) version 8 profile algorithm, Proc. of the XX Quadrennial Ozone Symp. V. I, 1–8 June 2004, Kos, Greece. Ed. C.S. Zerefos. Int. Ozone Comm., Athens, Greece, 2004. P. 295–296.

[Brewer, 1973] Brewer A.W. A replacement for the Dobson spectrophotometer // Pure and Appl. Geophys. 1973. № 106–108. P. 919–927.

[Burrows, Weber et al., 1999] Burrows J.P., Weber M., Buchwitz M. et al. The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission Concept and First Scientific Results // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56. P. 151–175.

[Dobson, 1957] Dobson G.M.B. Observers' handbook for the ozone spectrophotometer // Ann. IGY. 1957. № 1. P. 46–89.

[Gotz, Meetham et al., 1934] Gotz F.W.P., Meetham A.R., Dobson G.M.B. The vertical distribution of ozone in the atmosphere // Proc. R. Soc. Ser. A. L., 1934. № 145. P. 416–443.

[Heath, Krueger et al., 1975] Heath, D.F., Krueger A.J., Roeder H.R., Henderson B.D. The Solar Backscatter Ultraviolet and Total Ozone Mapping Spectrometer

(SBUV/TOMS) for Nimbus 7 // Opt. Eng. 1975. V. 14(4). P. 323–331.

[Levelt, Hilsenrath et al., 2006] Levelt P.F., Hilsenrath E., Leppelmeier G.W. et al. Science objectives of the Ozone Monitoring Instrument // IEEE Trans. on Geosc. and Rem. Sens. 2006. V. 44(5). IGRSD2. P. 1199–1208.

[Li, Cunnold et al., 2002] Li J.L., Cunnold D.M., Wang H.J. et al. A discussion of upper stratospheric ozone asymmetries and SAGE trends // J. Geophys. Res. 2002. V. 107 (D23). P. 4705, doi: 10.1029/2001JD001398.

[McCormick, Zawodny et al., 1989] McCormick M.P., Zawodny J.M., Viega R.E. et al. An overview of SAGE I and II ozone measurements // Planet. Space Sci. 1989. V. 37 (12). P. 1567–1586.

[Newchurch et al., 2000] Newchurch M.J. et al. Upper-stratospheric ozone trends 1979–1998 // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. D11. P. 14625 – 14636.

[Newchurch, Yang et al., 2003] Newchurch M.J., Yang E.-S., Cunnold D.M. et al. Evidence for slowdown in stratospheric ozone loss: first stage of ozone recovery // J. Geophys. Res. 2003. V. 108 (D16). P. 4507, doi: 10.1029/2003JD003471.

[Russell, Gordley et al., 1993] Russell J.M., Gordley L.L., Park J.H. et al. The Halogen Occultation Experiment // J. Geophys. Res. V. 98 (D6). P. 10777–10797.

[Scientific..., 2007] Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006 // WMO. Rep. 2007. № 50. P. 572.

[Steinbrecht et al., 2006] Steinbrecht W. et al. Long-term evolution of upper stratospheric ozone at selected stations of the Network for the Detection of Stratospheric Change (NDSC) // J. Geophys. Res. 2006. V. 111 (D10308), doi:10.1029/2005JD006454.

[Weatherhead et al.] Weatherhead E.C. et al. Factors affecting the detection of trends: Statistical considerations and applications to environmental data // J. Geophys. Res. 1998. V. 103 (D14). P. 17149–17161.

[Zanis, Maillard et al., 2006] Zanis P., Maillard E., Staehelin J. et al. On the turnaround of stratospheric ozone trends deduced from the reevaluated Umkehr record of Arosa, Switzerland // J. Geophys. Res. 2006. V. 111 (D22307), doi:10.1029/2005JD006886.

Vertical Structure of Stratospheric Ozone Longterm Trend, as Deduced from the Satellite Measurements over South of Russia

Ionov D. V.

Scientific and Research Institute of Physics, Physical Department, St. Petersburg State University

The results of the analysis of longterm stratospheric ozone change, based on the multi-year measurements of satellite instrument SAGE II in 1984–2005 are presented. The estimates of linear ozone trend in the three 10-km layers (15–45 km) over the area of Russia within 40–50° N/30–50° S are calculated. The fastest change of ozone content is shown to be observed in the upper stratosphere (35–45 km) – about 3% per decade.