

УДК 551.510.534

Изменчивость и тренды общего содержания озона в период 1979–2014 гг.

А.М. Звягинцев¹, П.Н. Варгин¹, С. Пешин^{2*}

¹Центральная аэрологическая обсерватория

141700, г. Долгопрудный Московской области, ул. Первомайская, 3, Россия

²Центр мониторинга и исследования окружающей среды, Метеорологическая служба Индии,
110003, Нью-Дели, Индия

Поступила в редакцию 8.06.2015 г.

Исследованы изменчивость и тренды общего содержания озона (ОСО) в период 1979–2014 гг. с использованием среднемесячных данных базы реанализа ERA-Interim в различных широтных поясах и данных, измеренных спутниковой аппаратурой TOMS/SBUV/OMI. Оценены вклады в изменчивость осредненного по различным широтным зонам и среднеглобального ОСО Арктического и Антарктического колебаний, квазидвухлетних колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере, Эль-Ниньо–Южного колебания, среднезонального меридионального потока тепла в нижней стратосфере, солнечной активности (СА), содержания в стратосфере озоноразрушающих соединений (ОРС) и вулканических аэрозольных частиц. Изменения глобального ОСО могут быть удовлетворительно описаны регрессионной зависимостью от ОРС и СА, в отдельных широтных зонах для более точного количественного описания временного хода ОСО следует дополнительно учитывать некоторые из перечисленных выше факторов влияния.

Ключевые слова: общее содержание озона, изменения озонового слоя, тренд озона, циркуляция стратосферы, метод множественной регрессии; total ozone content, ozone layer changes, ozone trend, circulation of atmosphere, multiple regression analysis.

Введение

Поглощая коротковолновое излучение Солнца, стратосферный озон защищает земную биосферу от опасных доз ультрафиолетовой (УФ) радиации. Основная масса озона (~90%) находится в стратосфере, а максимум его концентрации в зависимости от широты и сезона располагается на высотах 20–25 км. Пространственное распределение озона и его изменение во времени определяются фотохимическими и динамическими процессами. Уменьшение стратосферного озона приводит к увеличению УФ-радиации, достигающей поверхности Земли. Поглощая уходящую от Земли длинноволновую радиацию, озон участвует в парниковом эффекте в тропосфере.

Долгое время считалось, что значительное разрушение озонового слоя наблюдается в зимне-весенний период над Антарктикой. Однако рекордное за годы наблюдений разрушение озона в Арктике весной 2011 г. показало, что, несмотря на действие заключенного более 20 лет назад Монреальского протокола, и здесь могут неожиданно возникать крупные отрицательные озоновые аномалии [1]. В результате вызванный ими повышенный уровень УФ-радиации на поверхности может наблюдаться

и над населенными регионами высоких широт Северного полушария. По информации Мирового центра данных озона и УФ-радиации в Торонто, Канада (WOUDS; <http://www.woudc.org>), с 20 по 31 марта 2011 г. озоновая аномалия с отклонениями от многолетних климатических значений до ~20% наблюдалась над Скандинавией и северо-западом европейской территории России (Мурманская и Архангельская области, Республика Карелия) и до 40% над Новой Землей и севером Западной и Центральной Сибири [2]. При этом повышенные уровни УФ-радиации были зафиксированы в конце марта и апреле 2011 г., в том числе и в Москве [3]. Озоновая аномалия 2011 г. подтвердила сохраняющуюся актуальность продолжения исследований озонового слоя и его изменений [4].

В 2014 г. в рамках Программы ООН по окружающей среде опубликован подготовленный ведущими специалистами из разных стран мира очередной оценочный доклад о состоянии озонового слоя [5]. В докладе отмечено, что в последние годы (2008–2013 гг.) спутниковые и наземные измерения свидетельствуют о том, что содержание озона в широтном поясе 60° ю.ш. – 60° с.ш. на 2%, в умеренных широтах Северного полушария (35–60° с.ш.) на 3,5% и умеренных широтах Южного полушария (35–60° ю.ш.) на 6% ниже средних значений за период до возникновения озоновой аномалии (1964–1980 г.). Сообщается, что согласно модельным оценкам восстановление озонового слоя

* Анатолий Михайлович Звягинцев (zvyagintsev45@yandex.ru); Павел Николаевич Варгин (p_vargin@mail.ru); Сунил Пешин (sk.peshin@imd.gov.in).

к уровню 1970-х гг. может быть достигнуто во второй половине текущего века. Однако снижение температуры стратосферы, связанное с увеличением концентраций парниковых газов (и в первую очередь двуокиси углерода CO_2), способно замедлить восстановление озонового слоя. Долговременные изменения стратосферного озона, составляющего большую часть общего содержания озона (ОСО), могут быть связаны и с другими факторами, в частности с увеличением поступления в стратосферу антропогенных газов: метана CH_4 и двуокиси азота N_2O , выбросы которых не контролируются Монреальским протоколом [6]. На восстановление озонового слоя может оказать влияние и связанное с изменением климата усиление меридиональной циркуляции атмосферы [5].

В последние годы на основе анализа спутниковых данных зафиксировано снижение содержания в атмосфере озоноразрушающих соединений (ОРС) [5]. По мнению ряда ученых, появились первые признаки восстановления озонового слоя, т.е. выявлено начало положительного тренда. В этой связи основными темами исследований озонового слоя, активно проводимых во многих странах, в настоящее время являются анализ факторов, определяющих долговременную изменчивость озонового слоя, и выявление его долговременной изменчивости с помощью методов множественной регрессии.

Первые исследования трендов ОСО были проведены в начале 1990-х гг. с использованием данных наземных станций наблюдений [7] и первых спутниковых данных [8]. Отрицательный тренд был выявлен и в стратосферном озоне [9]. В нашей стране изменчивость глобального ОСО исследовалась в [10–12], а ОСО над территорией России – в [13, 14].

В последние два года в ведущих научных журналах опубликовано более десятка статей, посвященных анализу долговременной изменчивости озонового слоя. Остановимся кратко на результатах некоторых из них. Объединенные данные ОСО для области от 65° ю.ш. до 65° с.ш. и за период 1979–2012 гг., измеренные спутниковыми приборами TOMS/SBUV/OMI и GOME/SCIAMACHY/GOME-2, показали, что в экваториальной области доминирующими процессами, определяющими изменчивость ОСО в единицах Добсона (± 7 е. Д.), являются квазидвухлетние колебания, в более высоких широтах – Арктическое и Антарктическое колебания, а также волновая активность (ВА) (± 10 е. Д.) [15]. Влияние 11-летнего цикла солнечной активности от максимума до минимума во всех широтных зонах составляет ~ 10 е. Д. Установлено, что функция EESC (Equivalent Effective Stratospheric Chlorine; характеризует изменение содержания ОРС в атмосфере) может применяться для описания долговременного тренда ОСО.

С использованием данных ОСО за период с 1970 по 2013 г., измеренных спутниковым прибором SBUV, выявлен статистически значимый положительный тренд ОСО во внетропических широтах с учетом функции EESC за весь период [16].

Однако при использовании функции EESC для периода стабилизации (2000–2013 гг.) статистически значимого тренда ОСО не выявлено. Этот результат свидетельствует, что пока (в период стабилизации содержания ОРС) длина временных рядов озона недостаточна для получения достоверных оценок, использовать функцию EESC для определения трендов озона нужно с осторожностью. Последний вывод подтвержден и в [17].

Важность учета неопределенностей, возникающих при расчете влияющих на изменчивость ОСО факторов, и возможный рост ошибок оценок тренда ОСО из-за увеличения числа используемых в моделях регрессоров отмечены в [18].

С использованием спутниковых данных SBUV проанализирована долговременная изменчивость ОСО отдельно в тропосфере, нижней и верхней стратосфере в различные сезоны [19]. Начиная с 2005 г. выявлено различие между трендами ОСО в спутниковых данных и в результатах модельных расчетов на основе уменьшения содержания в атмосфере ОРС: к концу анализируемого периода (2012 г.) в спутниковых данных уровень ОСО на 2–3% меньше, чем в модельных расчетах.

На основе статистической модели и базы данных ОСО за период 1979–2007 гг., составленной на основе спутниковых данных в Институте атмосферных и водных исследований Новой Зеландии, выявлены региональные особенности влияния Арктической и Антарктической осцилляций на ОСО в средних и высоких широтах Северного и Южного полушарий соответственно [20], а также Эль-Ниньо–Южного колебания [21].

Исследовать влияние увеличения концентраций парниковых газов и уменьшения содержания ОРС на озоновый слой в настоящее время и в будущем можно только с использованием химико-климатических моделей. Например, для периода 1960–2010 гг. удалось проанализировать влияние на озоновый слой изменения содержания в атмосфере ОРС, отделив от него влияние изменчивости естественных динамических процессов и тропосферного озона [22]. Показано, что с конца 1990-х гг., когда содержание ОРС достигло максимума, связанное с ним разрушение озона уменьшилось примерно на 10%. Также установлено, что увеличение концентраций парниковых газов в течение XXI в. может привести к более раннему (в начале зимы) образованию низких температур, достаточных для возникновения полярных стратосферных облаков в Арктике, из-за чего увеличится средняя продолжительность жизни полярного вихря [23]. Модельные расчеты показали возможность формирования значительных отрицательных аномалий озона в Арктике лишь в отдельные годы.

Приведенные выше результаты свидетельствуют о сложности определения ожидаемого восстановления озонового слоя и актуальности исследований его долговременной изменчивости.

В настоящей статье дан анализ изменчивости ОСО в период 1979–2014 гг. с использованием объединенных данных спутниковых измерений и данных

реанализа ERA-Interim и оценен вклад факторов, влияющих на долговременную изменчивость ОСО. В разд. 1 описаны основные факторы, определяющие изменчивость озонового слоя, в разд. 2 – используемые данные и методы анализа, в разд. 3 представлены полученные результаты, в разд. 4 – основные выводы.

1. Факторы, определяющие изменчивость озонового слоя

Общее содержание в обоих полушариях сильно варьируется в зависимости от широты. Максимальные значения ОСО наблюдаются в средних и высоких широтах. Это происходит благодаря тому, что образующийся в тропической стратосфере озон переносится за счет меридиональной циркуляции в средние и высокие широты. Наибольшие значения ОСО наблюдаются в зимне-весенний сезон также из-за усиления переноса из тропиков. В тропиках сезонные изменения ОСО значительно слабее, чем в средних и высоких широтах. Подробный анализ особенностей распределения и изменчивости озонового слоя представлен в [24].

На временных масштабах около недели вариации ОСО в значительной степени определяются динамическими процессами синоптического масштаба (циклоны, антициклоны, струйные течения). На ОСО оказывают влияние как горизонтальные, так и вертикальные перемещения воздушных масс. Например, обедненные озоном воздушные массы могут поступать в средние – высокие широты из тропиков или из области стратосферного полярного вихря. Связь ОСО с вертикальными движениями проявляется в корреляционной зависимости ОСО с уровнем тропопаузы. Так называемые озоновые «мини-дыры» возникают в области антициклона, характеризующегося высоким уровнем тропопаузы. В случае устойчивого блокирующего антициклона такие аномалии ОСО могут сохраняться длительное время, обеспечивая повышенные значения УФ-радиации.

На больших временных масштабах (межгодовых и более) на ОСО влияют:

– *Арктическое и Антарктическое колебания*

Арктическое и Североатлантическое колебания (АК и САК), отражающие изменения динамики стратосферы и тропосферы Арктики, связаны как с квазипериодической изменчивостью, так и с долговременными изменениями ОСО. Показано, что в период 1979–1994 гг. до 30–40% отрицательных трендов среднегодовых и мартовских значений ОСО (когда наблюдаются его наибольшие аномалии) в средних и высоких широтах были связаны с изменением индекса САК, осредненного за период январь–март [25]. Аналогично Антарктическое колебание (ААК) влияет на ОСО в полярных регионах Южного полушария.

– *Солнечная активность (СА)*

В зависимости от фазы 11-летнего цикла солнечной активности максимальная амплитуда колебаний ОСО составляет до 2% в полярных широтах [26].

– *Квазидвухлетний цикл колебаний зонального ветра в стратосфере (КДК)*

Амплитуда колебаний КДК в ОСО вне тропиков составляет 2–4%. КДК также влияет на глобальные климатические характеристики, а через модуляцию распространения планетарных волн в стратосфере – на разрушение стратосферного полярного вихря. В экваториальной области (10° ю.ш. – 10° с.ш.) и субтропиках (15–25° ю.ш. или с.ш.) сигнал КДК противоположен по фазе [15].

– *Аэрозольные частицы*

В последние 40 лет основные изменения содержания аэрозоля в атмосфере были связаны с двумя сильнейшими извержениями вулканов – Эль Чичон в Мексике в 1982 г. и Пинатубо на Филиппинах в 1991 г., которые привели в течение примерно двух лет после извержения к потеплению тропической стратосферы на 2–3° за счет поглощения солнечной радиации вулканическим аэрозолем. Связанное с этими вулканами увеличение содержания аэрозоля в атмосфере привело к снижению стратосферного озона. В течение двух лет после извержения влк. Пинатубо наблюдалось уменьшение ОСО на 5–10% [15].

– *Эль-Ниньо–Южное колебание (ЭНЮК)*

ЭНЮК – важнейшее колебание параметров атмосферы и океана в тропиках, влияющее на динамические процессы во внетропических широтах. В экваториальной области и субтропиках связанные с ЭНЮК колебания ОСО составляют ~1% с периодом обычно около четырех лет. По данным озонзондов и спутниковым наблюдениям выявлены колебания ОСО, связанные с ЭНЮК [27, 28].

– *Озоноразрушающие соединения*

В условиях полярной стратосферы при температурах ниже –80 °С внутри стратосферного полярного вихря образуются полярные стратосферные облака, на которых при появлении весной солнечного света происходит активация ОРС, в результате чего наблюдается значительное разрушение стратосферного озона. Для оценки изменения содержания в атмосфере ОРС принято использовать функцию EESC, описывающую временной ход эффективного эквивалентного содержания хлорсодержащих (озоноразрушающих) соединений в стратосфере [29].

– *Волновая активность*

Распространение потоков ВА из тропосферы в стратосферу в зимне-весенние сезоны в высоких широтах влияет на динамический режим Арктики и Антарктики: в годы с большей ВА температура полярной стратосферы выше, скорость зонального ветра меньше, а стратосферный полярный вихрь слабее и менее устойчивый. В результате в полярном вихре образуется и сохраняется меньше полярных стратосферных облаков (ПСО), из-за чего значительного разрушения стратосферного озона в весенний сезон не происходит. Сильное распространение потоков ВА из тропосферы в стратосферу может приводить к возникновению внезапных стратосферных потеплений (ВСП), в результате которых резко увеличивается температура полярной

стратосферы (следовательно, сокращаются количество и объем ПСО), скорость зонального ветра изменяет свое направление с западного на восточное, а полярный вихрь ослабляется, смещается от полюса или делится на две части. Продолжительность разрушения стратосферного озона в весенний период зависит от времени наступления финального ВСП, завершающего зимний период циркуляции стратосферы. Таким образом, именно динамические условия определяют межгодовую изменчивость разрушения стратосферного озона в полярной стратосфере [15]. Для оценки распространения ВА из тропосферы в стратосферу используют среднезональный меридиональный поток тепла (ПТ) в нижней стратосфере (на 100 гПа), осредненный по области 40–75° с.ш.

2. Источники данных и методы обработки

Для анализа использовались глобальные среднемесячные данные ОСО европейского реанализа ERA-Interim с разрешением $1,5 \times 1,5^\circ$ [30] и данные измерений с помощью инструментов TOMS, SBUV и OMI на спутниках США.

Метод множественной линейной регрессии

Как и во многих других работах (например, [15–17]), анализ изменчивости ОСО проведен методом множественной линейной регрессии при использовании модели с кусочно-линейными трендами (КЛТ); за рубежом модель известна под названием PWLT (PieceWise Linear Trend):

$$\Delta X(m) = X(m) - X_0(m) = \text{const} + T_{79}m\theta(-m) + T_{97}m\theta(m) + \sum k_i(m)\text{Reg}_i(m) + \text{res}(m), \quad (1)$$

где $\Delta X(m) = X(m) - X_0(m)$ – отклонения (аномалии) наблюдаемых значений ОСО $X(m)$ от многолетних средних значений $X_0(m)$ в месяце m ; T_{79} , T_{97} – коэффициенты линейных трендов в 1979–1996 и 1997–2013 гг. соответственно; $\theta(m)$ – тета-функция («ступенька»), равная нулю при $m < 0$ и единице при $m > 0$, отсчитываемом с января 1997 г.; $\text{Reg}_i(m)$ – регрессоры (факторы, влияющие на ОСО) с коэффициентами $k_i(m)$; $\text{res}(m)$ – остаток со средним, равным 0, превращающийся после авторегрессионного разложения в «белый шум». Члены $T_{79}m\theta(-m)$ и $T_{97}m\theta(m)$ описывают кусочно-линейные тренды КЛТ79 и КЛТ97 с линейной частью в периоды 1979–1996 и 1997–2014 гг. соответственно.

В качестве регрессоров $\text{Reg}_i(m)$ использованы среднемесячные значения потока солнечной активности $F_{10,7}(m)$, $QBO(m)$ и $QBO(m+7)$ – индекса квазидвухлетних колебаний зонального ветра в тропической стратосфере на уровне 30 гПа [$QBO(m+7)$ сдвинуто на 7 мес по отношению к $QBO(m)$]; $HF(m)$ – среднезонального меридионального потока тепла; $AO(m)$ – индекса Арктического колебания; $ENSO(m)$ – индекса Эль-Ниньо–Южного колебания; $Vol(m)$ – содержания вулканического аэрозоля (рис. 1).

Источники получения временных рядов данных ОСО и регрессоров представлены в таблице.

Среднемесячные значения ПТ $\bar{v}T'$, где v' , T' – отклонения от среднезональных значений меридионального ветра и температуры соответственно, были рассчитаны с использованием данных реанализа.

Учтено, что коэффициенты при регрессорах имеют сезонный ход:

$$k_i(m) = k_{i0}(1 + k_{is}\sin(2\pi m/12) + k_{ic}\cos(2\pi m/12)), \quad (2)$$

или в эквивалентном представлении:

$$k_i(m) = k_{i0}(1 + k_{it}\cos(2\pi(m - m_{0i})/12)). \quad (2')$$

Кроме регрессионной модели (1) проведены расчеты с EESC-моделью, где вместо членов КЛТ79 и КЛТ97 (или только первого из них) использован член $k_{EESC}EESC(m)$, где $EESC(m)$ – функция, описывающая эффективное эквивалентное содержание хлорсодержащих (озоноразрушающих) соединений в стратосфере.

Из-за того что Земля имеет сферическую форму, при расчете среднеглобальных значений ОСО учитывались различные вклады широтных поясов (обусловленные различием в их площади) в экваториальной, среднеширотной и полярной областях. С этой целью для используемых значений ОСО на 30 широтных поясах от Южного до Северного полюса (с шагом по широте 6°) рассчитываются весовые коэффициенты:

$$B_i = -\cos(i \cdot \pi/30) + \cos((i-1) \cdot \pi/30),$$

где $i = 1, 2, \dots, 30$ – нумерация широтных поясов от Южного до Северного полюса. Значения рассчитанных коэффициентов показывают, что вклад в среднеглобальное значение широтной области в 6° вблизи полюса примерно в 20 раз меньше, чем вклад аналогичной области в 6° на экваторе.

Перечень использованных данных и их источники в Интернете

ОСО и регрессоры	Интернет-ресурсы
ОСО ERA-Interim	http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-moda/
ОСО TOMS/SBUV/OMI	ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/MergedOzoneData/sbu_v86_mod.int_lyr.70-13.za.r3.txt
АК, ААК	http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/teleconnections.shtml
СА	ftp://ftp.geolab.nrcan.gc.ca/data/solar_flux/monthly_averages/
КДК	http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/qbo.data
Аэрозольные частицы	http://data.giss.nasa.gov/modelforce/strataer/
ЭНЮК	http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei
Эффективное содержание стратосферных хлорных соединений	http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/automailer/

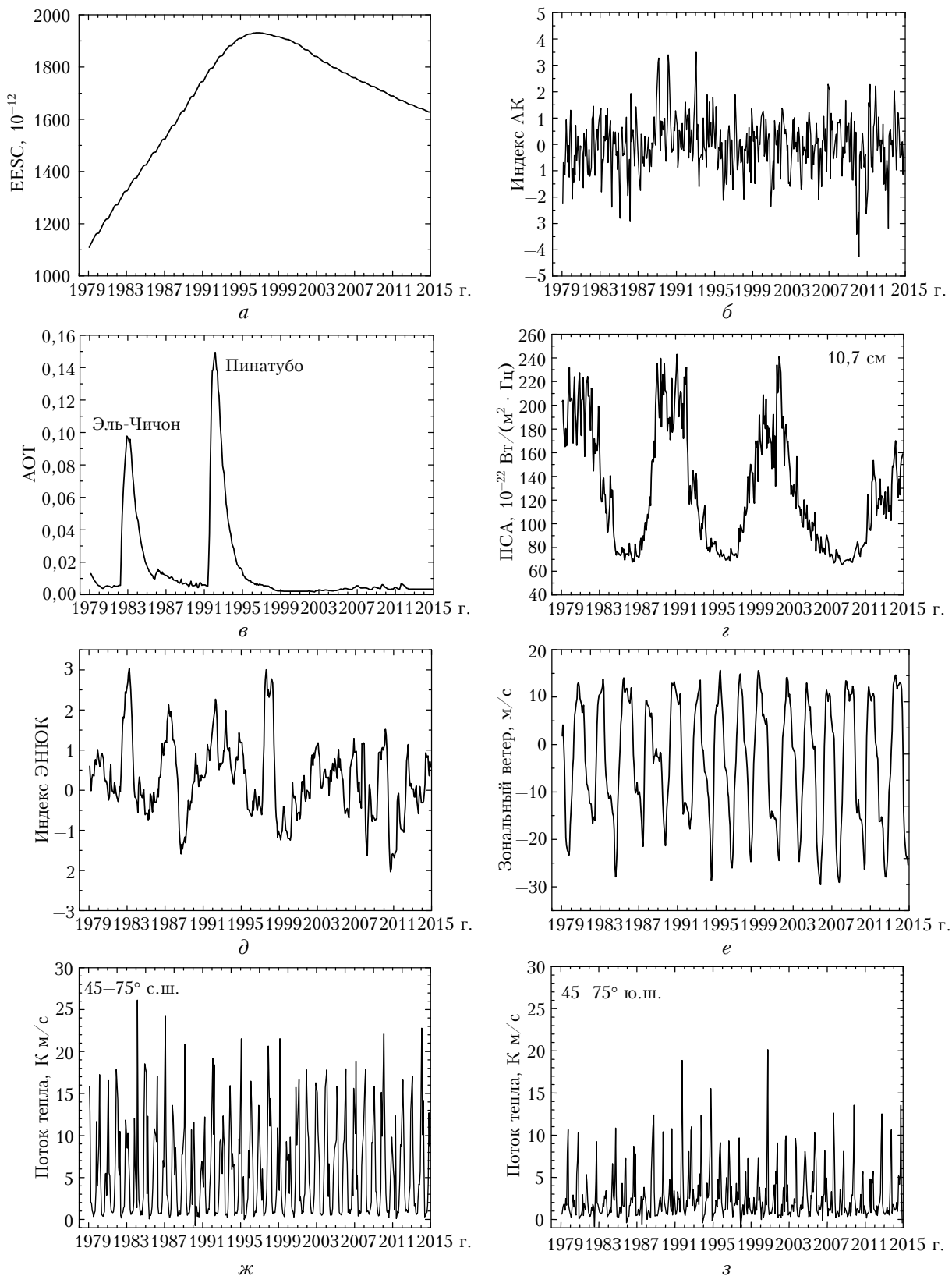


Рис. 1. Среднемесячные значения в период 1979–2014 гг. регрессоров, используемых в модели: эквивалентная эффективная концентрация ОРС в единицах отношения смеси «рртv» или 10^{-12} – EESC (а); индекс Арктического колебания – АК (б); оптическая толщина аэрозоля на длине волны 550 нм – АОТ (в); поток солнечной активности (ПСА) на длине волны 10,7 см в единицах 10^{-22} Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{Гц}$) (г); индекс Эль-Ниньо–Южного колебания (ENSO) (д); скорость зонального ветра на уровне 30 гПа на экваторе (е); среднезональный поток тепла на уровне 100 гПа, осредненный по области 45–75° с.ш. (ж) и 45–75° ю.ш. (з)

Затем вычисляются среднеглобальные значения ОСО:

$$\text{ОСО}_{\text{глоб}} = \frac{\sum_{i=1}^{30} \text{ОСО}_i \cdot B_i}{\sum_{i=1}^{30} B_i},$$

где ОСО_i — среднезональное ОСО в области широт i .

После этого рассчитывались аномалии среднеглобальных значений ОСО путем вычитания из соответствующих среднемесячных значений, осредненных за 36-летний период (с 1979 по 2014 г.), значений ОСО.

Для оценки степени влияния каждого регрессора на изменчивость ОСО проведено нормирование временных рядов регрессоров. С этой целью временные ряды отклонений (или аномалий) регрессоров от их средних за весь период значений разделены на соответствующие стандартные отклонения. После этого среднее по времени временных рядов аномалий регрессоров становится равным нулю, а их стандартное отклонение — единице.

3. Результаты и их обсуждение

Рассмотрим изменчивость ОСО в тех регионах и в те месяцы, когда наблюдаются наибольшие отрицательные аномалии, связанные с разрушением озона внутри стратосферного полярного вихря в марте в Северном полушарии и сентябре в Южном. На рис. 2, *a* показан ход изменений ОСО по данным ERA-Interim в различных широтных областях в весенний сезон, когда в обоих полушариях наблюдались наиболее значительные изменения ОСО.

Также представлен ход среднегодового глобального ОСО и ОСО в экваториальной области, где их сезонная изменчивость слаба. Отчетливо видны все наиболее значительные аномалии ОСО в последние 36 лет, в частности весенняя озоновая аномалия в Антарктике (озоновая дыра) и ее эволюция, а также весенние аномалии ОСО в Арктике в 1990, 1995, 1997 и 2011 гг., положительная аномалия ОСО в Антарктике в 2002 г., когда там отмечалось единственное за все время наблюдений главное внезапное стратосферное потепление. Рис. 2, *a* иллюстрирует, что если в период примерно с 1979 по 1996 г. вариации ОСО в умеренных и высоких широтах обоих полушарий сопровождались его постоянным уменьшением, то в период начиная с 1997 г. заметных однонаправленных изменений ОСО не наблюдается. Также незаметно однонаправленного изменения ОСО в экваториальных широтах за весь рассматриваемый период, а сами вариации здесь значительно меньше. Временной ход для среднеглобального ОСО подобен ходу ОСО для умеренных и высоких широт, но существенно более сглажен (рис. 2, *б*), что, по-видимому, связано с перетеканием озоновых масс из одних широтных поясов в другие в процессах циркуляции. Во временном ходе среднеглобального ОСО визуально хорошо заметен 11-летний цикл с выраженными минимумами в середине 1990-х

и 2000-х гг.; предыдущий минимум также просматривается, хотя не столь же четко, поскольку наблюдался на фоне выраженного понижения ОСО.

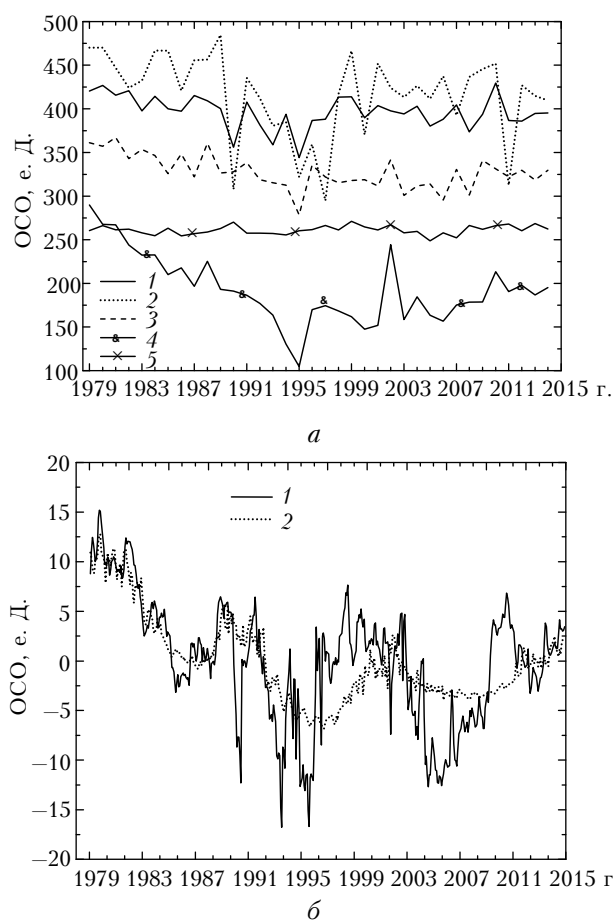


Рис. 2. Среднемесячные значения общего содержания озона, осредненные для марта по широтным поясам 42–60° с.ш. (1) и 72–90° с.ш. (2), среднегодовые по поясу 12° ю.ш. – 12° с.ш. (3) и осредненные для сентября по поясам 90–72° ю.ш. (4) и 60–42° ю.ш. (5) (*a*). Среднемесячные аномалии глобального ОСО (1) и их регрессионная модель (2), учитывающая влияние СА и содержание в атмосфере ОРС в период 1979–2014 гг. (*б*)

Для выявления природы изменчивости среднемесячных рядов ОСО в различных широтных зонах применен линейный регрессионный анализ. В качестве влияющих на ОСО факторов использованы КДК, СА, АК для Северного и ААК для Южного полушария, ЭНЮК, вулканические выбросы аэрозольных частиц в стратосферу, эквивалентное эффективное содержание стратосферных хлорных соединений (ЭЭСХ; его удовлетворительным приближением является пара КЛТ, один из которых заканчивается, а другой начинается в 1997 г.). Эти факторы используются в современных регрессионных моделях, описывающих изменчивость озонового слоя [15–17].

Прежде всего была исследована совместимость баз данных по результатам спутниковых наблюдений с помощью аппаратуры TOMS/SBUV/OMI и данных реанализа ERA-Interim. Считается, что

точность спутниковых наблюдений в тропических и умеренных широтах составляет около 3%, а в полярных погрешности выше [31]. Также известно, что данные ERA-Interim в тропических и умеренных широтах обычно отличаются от спутниковых не более чем на ± 5 е. Д. или около $\pm 3\%$ [30]. В полярных регионах, особенно в зимний сезон, различия значительно больше, возможно, из-за пониженной точности спутниковых наблюдений и сложности моделирования озона в этих регионах в течение всех сезонов. Установлено, что для спутниковых данных и данных реанализа ОСО регрессионные коэффициенты в модели (1) совпадают (с точностью до погрешностей их определения), однако коэффициент детерминации (показывающий долю вариации изменчивости ОСО, которая объясняется в регрессионной модели) для спутниковых наблюдений оказывается выше (рис. 3).

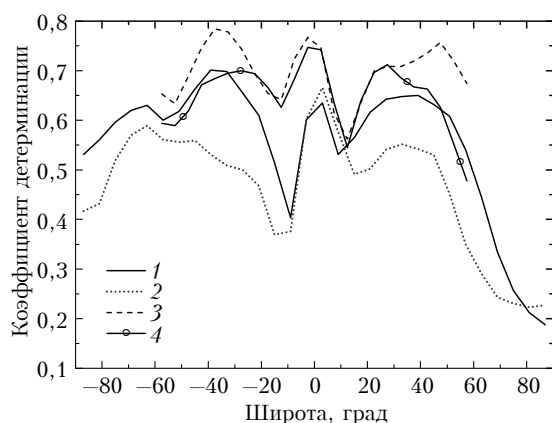


Рис. 3. Коэффициенты детерминации регрессионных моделей ОСО для различных баз данных в различные периоды: база данных ERA-Interim в периоды 1979–1996 гг. (1) и 1979–2014 гг. (2), база данных TOMS/SBUV/OMI в периоды 1979–1996 гг. (3) и 1979–2014 гг. (4)

Коэффициенты детерминации модели среднемесячных ОСО в зонах шириной 5° , рассчитанных по спутниковым измерениям в период 1979–2014 гг., в диапазоне от 60° ю.ш. до 60° с.ш. составляют от 0,5 до 0,8. По нашему мнению, различие коэффициентов детерминации для различных баз данных свидетельствует о большей близости к «истине» спутниковых данных, чем данных реанализа, однако высокий коэффициент детерминации моделей в обоих случаях и подобие их зависимостей от широты указывают на возможность использования и тех, и других данных. Высокая эффективность моделей обеспечивается, в частности, за счет учета различного влияния большинства регрессоров в различные сезоны года.

Недостатками спутниковых данных ОСО являются пропуски в течение продолжительных периодов времени, отсутствие наблюдений в высоких широтах в зимние месяцы и худшая точность в высоких широтах, где изменчивость озона особенно велика. Преимуществом данных реанализа ERA-Interim является их наличие по всей территории Земли и отсутствие пропусков, что позволяет рас-

считывать глобальное ОСО и среднее ОСО по всему земному шару.

Наиболее понятна и проста в интерпретации изменчивость глобального ОСО, которое имеет сравнительно небольшой сезонный ход (по сравнению с сезонным ходом ОСО в умеренных и высоких широтах) с амплитудой ~ 6 е. Д., вызванный, по-видимому, различиями циркуляции в обоих полушариях и приводящий, в частности, к различиям в температуре стратосферы.

Наиболее эффективными оказываются два влияющих фактора: изменение содержания в атмосфере ОРС и СА. Представляется, что долговременные изменения ОСО в период 1979–2014 гг. вызваны в первую очередь изменениями содержания хлор- и бромсодержащих соединений в стратосфере и модуляцией, вызванной 11-летней солнечной цикличностью, что согласуется с выводами ряда предыдущих работ, в частности [21]. Коэффициент детерминации представления хода остатков глобального ОСО с использованием этих двух влияющих факторов составляет 0,49 (см. рис. 2, б). Влияние КДК, АК и вулканических извержений, хотя и является статистически значимым с доверительной вероятностью $p = 0,95$, доводит коэффициент детерминации лишь до 0,52. В части оценки сезонного хода и солнечной активности на глобальное ОСО наши результаты близки к оценкам [12], однако эти авторы почти проигнорировали роль ЭЭСХ, без учета которых объяснить долговременные изменения ОСО крайне затруднительно [22].

Гораздо больше факторов влияют на изменчивость ОСО в различных широтных зонах. Размах сезонного хода ОСО возрастает по направлению от низких широт к высоким от нескольких е. Д. в экваториальной области до почти 200 е. Д. в полярных областях. В тропической области доминирует влияние КДК (± 12 е. Д.), в умеренных и высоких широтах — АК и ААК (± 8 и ± 5 е. Д. соответственно), особенно в весенний период. Солнечная активность вызывает вариации ОСО практически на всех широтах (в южных полярных широтах от -6 до $+10$ е. Д., в остальных поясах — от -3 до $+6$ е. Д.) во все сезоны. Влияние потоков тепла проявляется лишь в высоких широтах обоих полушарий в зимне-весенний период (до ± 8 е. Д.) и имеет сравнительно невысокие доверительные вероятности (до $p \sim 0,8-0,95$). Заметное влияние ЭНЮК (до ± 4 е. Д.) наблюдается в широтном поясе от 35° ю.ш. до 25° с.ш. и влияние противоположного знака — в поясе от 25° ю.ш. до 60° с.ш. Извержения вулканов Пинатубо в июне 1991 г. и Эль-Чичон в марте–апреле 1982 г. вызвали уменьшение ОСО до 30 и 18 е. Д. соответственно в умеренных и высоких широтах Северного полушария, особенно сильные в весенний период; влияние извержений в Южном полушарии в несколько раз слабее, чем в Северном. Представленные оценки влияния совпадают (с точностью до погрешностей расчетов) с оценками других авторов и по другим данным за несколько более короткий период времени [15, 16].

Декадные (с характеристическим временем порядка 10 лет и более) изменения ОСО, особенно сильные в весенний период, связаны с вариациями солнечной активности и, весьма вероятно, с изменениями ЭЭСХ. Поскольку долговременных изменений солнечной активности (которая определяется по числам Вольфа с 1750 г. и индексу $F_{10,7}$ 1947 г. соответственно) не отмечено, то ее влияние на изменения ОСО возможно лишь в ограниченном диапазоне и длительный долговременный тренд ОСО оно вызвать не может. На протяжении до нескольких десятков лет изменение ОСО может быть вызвано также изменениями САК (или АК) [25]. Ранее неоднократно сообщалось о положительных трендах ОСО в период начиная с 1997 г. в различных регионах мира [32–34]. В модели с КЛТ для периода 1979–2014 г. в умеренных и высоких широтах статистически значимыми оказываются отрицательный в период 1979–1996 гг. (рис. 4) и положительный в период 1997–2014 гг. тренды ОСО.

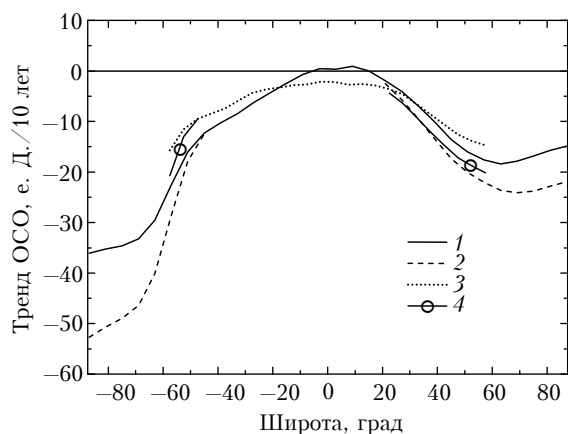


Рис. 4. Рассчитанные значения тренда ОСО в период 1979–1996 гг. с использованием базы данных ERA-Interim для всех среднемесячных значений (1) и отдельно для марта в Северном и сентября в Южном полушарии (2), а также базы данных TOMS/SBUV/OMI для всех среднемесячных значений ОСО (3) и отдельно для марта в Северном и сентября в Южном полушарии (4)

Изображенный на рис. 4 тренд ОСО практически такой же, как и в ранее опубликованных работах [10, 11, 15, 32]. Уменьшение ОСО, наблюдаемое после 1979 г., закончилось в середине 1990-х гг. Линейный тренд ОСО составлял от 12–16 е. Д. за 10 лет в широтных зонах 55–60° до статистически незначимого в экваториальных широтах. Вместе с тем отдельно для периода 1997–2014 гг. линейный тренд ОСО практически во всех широтных поясах становится статистически незначимым, можно считать, что состояние ОСО в этот период стабилизируется. Последний результат получен ранее авторами [16] при использовании объединенных данных спутниковой аппаратуры SBUV в период 1979–2013 гг.

Использование регрессионной модели с двумя КЛТ в периоды 1979–1996 и 1997–2014 гг. (КЛТ79

и КЛТ97 соответственно) практически во всех широтных зонах более эффективно, чем с параметром ЭЭСХ (рис. 5).

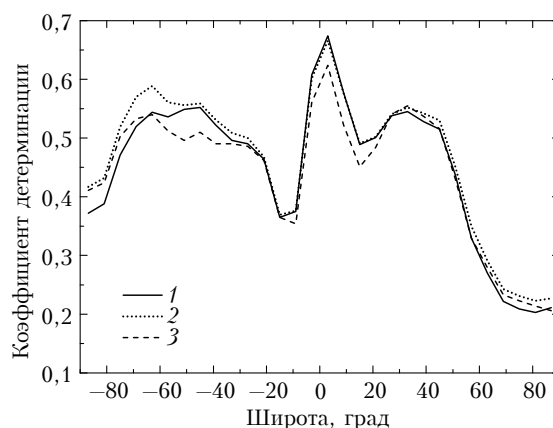


Рис. 5. Коэффициенты детерминации для регрессионных моделей ОСО из базы данных ERA-Interim, использующих два кусочно-линейных тренда КЛТ79 и КЛТ97 (1), функцию ЭЭСХ и один кусочно-линейный тренд КЛТ97 (2), только функцию ЭЭСХ (3)

Однако еще более эффективным является использование модели с параметром ЭЭСХ и КЛТ97. В широтной области 45–90° ю.ш. ее коэффициент детерминации выше, чем для модели с двумя КЛТ. В последнем случае коэффициент при КЛТ97 в значительной части широтных зон статистически значим, но гораздо меньше по абсолютной величине и противоположного знака, чем коэффициент в модели с двумя КЛТ. Это означает, что использование параметра ЭЭСХ для значительной части широтных зон переоценивает рост ОСО в период после 1996 г. Причиной такой переоценки могут быть погрешности использованного хода ЭЭСХ, неучет происходящих климатических изменений, а также погрешности наблюдений. Отметим, что в областях 90–80° ю.ш. и 30–90° с.ш. может быть использована модель, включающая только ЭЭСХ без КЛТ97.

Заключение

Проведенный анализ долговременной изменчивости ОСО за период 1979–2014 гг. с использованием спутниковых данных TOMS/SBUV/OMI и данные реанализа ERA-Interim и метода множественной регрессии позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Временной ход среднемесячных среднезональных рядов ОСО хорошо описывается регрессионной моделью, в которой в качестве регрессоров используются квазидвухлетний цикл колебаний зонального ветра в стратосфере, солнечная активность, Арктическое и Антарктическое колебания, Эль-Ниньо–Южное колебание, извержения вулканов, волновая активность, содержание в атмосфере озоноразрушающих соединений, кусочно-линейные тренды. Высокая эффективность модели обеспечивается, в частности, за счет учета различного влияния

регрессоров в различные сезоны года. Коэффициенты детерминации модели среднемесячных аномалий ОСО в зонах шириной 5°, рассчитанных по измерениям инструментов TOMS/SBUV/OMI в период 1979–2014 гг., в диапазоне широт от 60° ю.ш. до 60° с.ш. составляют от 0,5 до 0,8, в полярных широтах – меньше.

2. Различные регрессоры по-разному влияют на ОСО в различных широтных зонах. Влияние КДК и СА на изменчивость ОСО заметно на всех широтах, АК и ААК – в умеренных и высоких широтах Северного и Южного полушария соответственно, ЭНЮК – в тропических широтах, вулканических извержений – в тропических широтах Южного полушария и везде в Северном полушарии, ПТ – в полярных широтах обоих полушарий, ЭЭСХ и КЛТ – везде, кроме экваториальной области.

3. Уменьшение ОСО наблюдалось в умеренных и высоких широтах обоих полушарий в период с 1979 по 1996 г. Линейный тренд ОСО составлял от 12–16 е. Д. за 10 лет в широтных зонах 55–60° обоих полушарий до статистически незначимого в экваториальных широтах. В период с 1997 по 2014 г. состояние ОСО стабилизировалось, линейный тренд ОСО практически во всех широтных поясах является статистически незначимым, что согласуется с результатами зарубежных исследований [15, 16].

4. Ход глобального ОСО в период 1979–2014 гг. количественно удовлетворительно описывается регрессионной моделью с двумя параметрами: ЭЭСХ и солнечной активностью. Коэффициент детерминации этой модели – около 0,5. Статистически значимым является также влияние АК, КДК и извержений вулканов, однако их общий вклад существенно меньше.

5. Коэффициент детерминации модели для данных спутниковых наблюдений TOMS/SBUV/OMI выше, чем по данным реанализа ERA-Interim, что, по-видимому, указывает на более высокое качество данных спутниковых наблюдений (там, где они имеются).

6. Для описания изменений ОСО в период 1979–2014 гг. наиболее высокий коэффициент детерминации имеет модель, использующая ЭЭСХ и КЛТ, начинающийся с 1997 г. В широтной области 45–80° ю.ш. ее коэффициент детерминации заметно выше, чем для модели с двумя КЛТ. В широтных областях 90–80° ю.ш. и 30–90° с.ш. модель, использующая только ЭЭСХ, не требует введения дополнительного линейного тренда.

1. Manney G.L., Santee M.L., Rex M., Livesey N.J., Pitts M.C., Veefkind P., Nash E.R., Wohltmann I., Lehmann R., Froidevaux L., Poole L.R., Schoeberl M.R., Haffner D.P., Davies J., Dorokhov V., Gernandt H., Johnson B., Kivi R., Kyrö E., Larsen N., Levelt P.F., Makhtas A., McElroy C.T., Nakajima H., Parrondo M.C., Tarasick D.W., von der Gathen P., Walker K.A., Zinoviev N.S. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 // *Nature*. 2011. V. 478, N 7370. P. 469–475.

2. Звягинцев А.М., Кузнецов Г.И., Кузнецова И.Н. Весенние аномалии озонового слоя над Россией // *Метеорол. и гидрол.* 2013. № 5. С. 5–13.
3. *Эколого-климатические* характеристики атмосферы в 2011 г. по данным метеорологической обсерватории МГУ / под ред. Н.Е. Чубаровой и др. М.: МАКС Пресс, 2012. 230 с.
4. Варгин П.Н., Груздев А.Н. Что происходит с озоновым слоем в настоящее время? // *Вестн. РАН*. 2013. Т. 83, № 4. С. 354–358.
5. WMO Ozone Report N 55. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. Geneva: WMO, 2014.
6. Wang W., Tian W., Dhomse S., Xie F., Shu J., Austin J. Stratospheric ozone depletion from future nitrous oxide increases // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 23. P. 12967–12982.
7. Bojkov R., Bishop L., Hill W.J., Reinsel G.C., Tiao G.C. A statistical trend analysis of revised Dobson total ozone data over the northern hemisphere // *J. Geophys. Res.* D. 1990. V. 95, N 7. P. 9785–9807.
8. Stolarski R.S., Bloomfield P., McPeters R.D., Herman J.R. Total ozone trends deduced from Nimbus 7 TOMS data // *Geophys. Res. Lett.* 1991. V. 18, N 6. P. 1015–1018.
9. Stolarski R., Bojkov R., Bishop L., Zerefos Ch., Stachelin J., Zawodny J. Measured Trends in Stratospheric Ozone // *Sci.* 1992. V. 256, N 5055. P. 342–349.
10. Черников А.А., Борисов Ю.А., Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М., Перов С.П. Изменчивость озонового слоя в период 1979–1999 гг. // *Оптика атмосф. и океана*. 2000. Т. 13, № 1. С. 100–105.
11. 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.
12. Бекорюков В.И., Глазков В.Н., Кокин Г.А. Долговременные изменения глобального озона // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2009. Т. 45, № 5. С. 607–616.
13. Титова Е.А., Кароль И.Л., Шаламянский А.М., Клягина Л.П., Соломатникова А.А. Статистический анализ и сравнение эффектов внешних факторов, влияющих на поле общего содержания озона над территорией России в 1973–2007 гг. // *Метеорол. и гидрол.* 2009. № 7. С. 48–64.
14. Звягинцев А.М., Ананьев Л.Б., Артамонова А.А. Изменчивость общего содержания озона над территорией России в 1973–2008 гг. // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 3. С. 1990–1995.
15. Chhade W., Weber M., Burrows J. Total ozone trends and variability during 1979–2012 from merged data sets of various satellites // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 13. P. 7059–7074.
16. Frith S., Kramarova N., Stolarski R., McPeters D., Bhartia P., Labow G. Recent changes in total column ozone based on the SBUV Version 8.6 Merged Ozone Data Set // *J. Geophys. Res.* D. 2014. V. 119, N 16. P. 9735–9751.
17. Kuttippurath J., Bodeker G., Roscoe H., Nair P. A cautionary note on the use of EESC-based regression analysis for ozone trend studies // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42, N 1. P. 162–168.
18. Knibbe J.S., van der A R.J., de Laat A.T.J. Spatial regression analysis on 32 years of total column ozone data // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 16. P. 8461–8482.
19. Krzyzscin J. The ozone recovery in the NH extratropics: The trend analyses of the SBUV/SBUV-2 merged ozone data in the 1979–2012 period // *Atmos. Environ.* 2014. V. 98. P. 17–24.

20. Frossard L., Rieder H.E., Ribatet M., Staehelin J., Maeder J.A., Di Rocco S., Davison A.C., Peter T. On the relationship between total ozone and atmospheric dynamics and chemistry at mid-latitudes – Part 1: Statistical models and spatial fingerprints of atmospheric dynamics and chemistry // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 1. P. 147–164.
21. Rieder H.E., Frossard L., Ribatet M., Staehelin J., Maeder J.A., Di Rocco S., Davison A.C., Peter T., Weihs P., Holawe F. On the relationship between total ozone and atmospheric dynamics and chemistry at mid-latitudes – Part 2: The effects of the El Niño/Southern Oscillation, volcanic eruptions and contributions of atmospheric dynamics and chemistry to long-term total ozone changes // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 1. P. 165–179.
22. Shepherd T.G., Plummer D.A., Scinocca J.F., Heggin M.I., Fioletov V.E., Reader M.C., Remsburg E., von Clarmann T., Wang H.J. Reconciliation of halogen-induced ozone loss with the total-column ozone record // *Nature Geosci.* 2014. V. 7, N 5. P. 443–449.
23. Langematz U., Meul S., Grunow K., Romanowsky E., Oberländer S., Abalichin J., Kubin A. Future Arctic temperature and ozone: The role of stratospheric composition changes // *J. Geophys. Res. D.* 2014. V. 119, N 5. P. 2092–2112.
24. Fioletov V. Ozone climatology, trends, and substances that control ozone // *Atmosphere-Ocean.* 2008. V. 46, N 1. P. 39–67.
25. Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. Об оценках трендов общего содержания озона в Европе и их связях с изменениями общей циркуляции атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 1997. Т. 10, № 9. С. 1045–1052.
26. Soukharev B.E., Hood L.L. Solar cycle variation of stratospheric ozone: Multiple regression analysis of long term satellite data sets and comparisons with models // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. D20314. DOI: 10.1029/2006JD007107.
27. Randel W.J., Cobb J.B. Coherent variations of monthly mean total ozone and lower stratospheric temperature // *J. Geophys. Res. D.* 1994. V. 99, N 3. P. 5433–5447.
28. Xie F., Li J., Tian W., Zhang J., Shu J. The impacts of two types of El Niño on global ozone variations in the last three decades // *Adv. Atmos. Sci.* 2014. V. 31, N 6. P. 1113–1126.
29. Newman P., Daniel J., Waugh D., Nash E. A new formulation of equivalent effective stratospheric chlorine (EESC) // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7, N 17. P. 4537–4552.
30. Dragani R. On the quality of the ERA-Interim ozone reanalyses: comparisons with satellite data // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2011. Pt. A. V. 137, N 658. P. 1312–1326.
31. WMO Ozone Report N 43. SPARC/IOC/GAW Assessment of trends in the vertical distribution of ozone. Geneva: WMO, 1998. 293 p.
32. Dhomse S., Weber M., Wohltmann I., Rex M., Burrows J. On the possible causes of recent increases in northern hemispheric total ozone from a statistical analysis of satellite data from 1979 to 2003 // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6, N 5. P. 1165–1180.
33. Звягинцев А.М., Ананьев Л.Б., Артамонова А.А. Изменчивость общего содержания озона над территорией России в 1973–2008 гг. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 3. С. 190–195.
34. Salby M.L., Titova E.A., Deschamps L. Changes of the Antarctic ozone hole: Controlling mechanisms, seasonal predictability, and evolution // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. D10111. DOI: 10.1029/2011JD016285.

A.M. Zvyagintsev, P.N. Vargin, S. Peshin. Total ozone content variability and trends during 1979–2014.

Long-term variability and trends of total ozone content (TOC) over the period 1979–2014 are analyzed using monthly mean total ozone ERA-Interim reanalysis data and TOMS/SBUV/OMI satellite data. Influence of Arctic and Antarctic oscillation (AO and AAO), quasi-biennial oscillation of zonal wind in tropical stratosphere (QBO), El-Niño Southern oscillation (ENSO), poleward heat fluxes (HF), solar activity (SA), equivalent effective chlorine loading (EESC), and volcanic aerosol (VA) in stratosphere on the variability of global mean and averaged over different latitudinal belts TOC was investigated. Our results show that the variability of global TOC may be satisfactorily described by EESC and SA. The inclusion in the regression of QBO, AO, AAO, HF, ENSO and VA is necessary to describe TOC variability in certain latitudinal belts more accurately.