

УДК 551.510.4

МНОГОЛЕТНИЕ НАБЛЮДЕНИЯ СТРАТОСФЕРНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ ИМ. А.М. ОБУХОВА РАН: АНАЛИЗ ТРЕНДОВ И МЕЖГОДОВЫХ ВАРИАЦИЙ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ O₃ И NO₂¹

© 2022 г. А.Н. Груздев^a, *, А. Я. Арабов^a, А. С. Елохов^a, В. В. Савиных^a,
И. А. Сеник^a, А. Н. Боровский^a, Н. Ф. Еланский^a

^a Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, Москва, 119017 Россия

*e-mail: a.n.gruzdev@mail.ru

Поступила в редакцию 28.12.2021 г.

После доработки 01.02.2022 г.

Принята к публикации 09.02.2022 г.

Представлены результаты многолетних измерений и анализа временной изменчивости общего содержания (ОС) O₃ и NO₂ на Кисловодской высокогорной (КВНС) и Звенигородской (ЗНС) научных станциях ИФА им. А.М. Обухова РАН. Озонные измерения выполняются с 1989 г. на КВНС по прямому и рассеянному из зенита ультрафиолетовому солнечному излучению. ОС NO₂ измерялось на КВНС по прямому солнечному излучению видимого диапазона утром и вечером с 1981 по 2008 гг. На ЗНС с 1990 г. выполняются измерения содержания NO₂ по рассеянному из зенита солнечному излучению видимой области спектра во время утренних и вечерних сумерек. Анализ многолетней изменчивости данных измерений выполнен с помощью метода множественной линейной регрессии. Получены годовые и сезонно-зависимые оценки линейных трендов O₃ и NO₂. Общей особенностью долговременных тенденций ОС O₃ на КВНС и ОС NO₂ на ЗНС и КВНС являются значительные тренды в зимне-весенний сезон. Тренды ОС NO₂ на обеих станциях отрицательные, и тренд на КВНС сильнее, чем на ЗНС. Тренд ОС O₃ на КВНС изменяет знак с положительного на отрицательный в окрестности 2000-х гг. Для обеих примесей получены оценки вариаций их общего содержания, связанные с внешними (солнечная активность) и циркуляционными факторами.

Ключевые слова: O₃, NO₂, спектрометрические измерения, изменчивость, тренд, межгодовые вариации

DOI: 10.31857/S0002351522030063

1. ВВЕДЕНИЕ

Озон (O₃) и двуокись азота (NO₂) в атмосфере фотохимически взаимосвязаны. Азотный цикл вносит основной вклад в каталитическое разрушение озона в средней стратосфере [1, 2]. В загрязненной тропосфере, содержащей перекисные радикалы, NO₂ может приводить к фотохимическому образованию озона [3, 4]. В свою очередь, соотношение между концентрациями основных компонентов семейства активных азотных примесей, NO и NO₂, зависит, главным образом, от озона [1].

В обычных условиях озон и NO₂ присутствуют в наиболее значительных концентрациях в стратосфере, и их стратосферное содержание дает ос-

новной вклад в общее содержание (ОС) примесей в вертикальном столбе атмосферы. Измерения ОС O₃ и NO₂ в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН выполнялись на протяжении около трех десятков лет в двух пунктах — на Кисловодской высокогорной (КВНС) и Звенигородской (ЗНС) научных станциях. По данным этих измерений получены и опубликованы в разрозненных работах результаты исследований временной изменчивости ОС O₃ и NO₂, включающие оценки линейных трендов и межгодовых вариаций примесей [5–8]. Сопоставление этих результатов между собой выявляет наличие важных общих особенностей долговременной и межгодовой эволюции ОС NO₂ и O₃ на станциях, расположенных в разных географических регионах и отстоящих друг от друга на 1400 км.

Цель настоящей работы состоит в совместном анализе долговременной и межгодовой изменчивости O₃ и NO₂ по результатам многолетних изме-

¹ Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на Всероссийской конференции “Собственное излучение, структура и динамика средней и верхней атмосферы” (Москва, 22–23 ноября 2021 г.).

рений ОС примесей на научных станциях института с использованием единого метода анализа.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПУНКТОВ НАБЛЮДЕНИЙ, ПРИБОРОВ И МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Звенигородская научная станция (55.7° N, 36.8° E) расположена в лесистой сельской местности западного Подмосковья на расстоянии около 40 км к западу от Московской кольцевой автодороги. Ввиду близости к московскому мегаполису, для приземного слоя атмосферы на ЗНС характерны эпизоды загрязнения с высоким содержанием NO_2 , которое может давать значительный, а в случае сильного загрязнения – определяющий вклад в ОС NO_2 в вертикальном столбе атмосферы.

Измерения содержания NO_2 на ЗНС начаты в марте 1990 г. и выполняются по настоящее время по рассеянному из зенита солнечному излучению в видимой области спектра в течение утренних и вечерних сумерек в диапазоне зенитных углов Солнца 84° – 96° с помощью автоматизированного спектрофотометра МДР-23 [9]. Станция входит в состав международной Сети по обнаружению изменений состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change – NDACC), а прибор и метод измерений прошли аттестацию в международных сравнениях приборов и методик, проводившихся под эгидой NDACC.

Уникальной особенностью метода определения содержания NO_2 по результатам измерений на ЗНС состоит в восстановлении вертикального распределения NO_2 и определении его содержания путем интегрирования значений в интересующих нас слоях атмосферы. Это позволяет, в частности, определять содержание NO_2 в вертикальном столбе атмосферы выше подверженного антропогенному загрязнению приземного слоя атмосферы. Именно это содержание мы будем в дальнейшем подразумевать под ОС NO_2 . Более подробные сведения об измерениях содержания NO_2 на ЗНС можно найти в [5, 7, 9]. Укажем, что используемые в работе значения ОС NO_2 на ЗНС соответствуют зенитному углу Солнца 90° .

Кисловодская высокогорная научная станция (43.7° N, 42.7° E) расположена в зоне альпийских лугов Северного Кавказа на высоте 2070 м над уровнем моря в 20 км южнее города Кисловодска и в 50 км к северу от Главного кавказского хребта и горной вершины Эльбрус. Условия наблюдения атмосферных примесей на КВНС преимущественно фоновые, и антропогенное загрязнение со стороны Кисловодска обычно не достигает окрестности станции [10]. Географическое положение КВНС совпадает с активным участком субтропической планетарной высотной фронтальной

зоны над Кавказом и Средней Азией, подверженной сезонным и межсезонным миграциям.

В 1981 г. на КВНС были начаты регулярные измерения ОС NO_2 по прямому солнечному излучению, выполнявшиеся на протяжении 28 лет до 2008 г. Измерения проводились в видимом диапазоне спектра утром и вечером при зенитных углах Солнца от 78° до 88° с помощью спектрометра на базе монохроматора МДР-3. ОС NO_2 в этом диапазоне зенитных углов в течение одного сеанса измерений можно приблизительно считать постоянным [11]. Более подробная информация об измерениях ОС NO_2 на КВНС представлена в [6].

Измерения общего содержания озона выполняются на КВНС с 1989 г. с помощью сетевого калибруемого спектрофотометра Brewer MkII #043 в дневное время по прямому и рассеянному из зенита ультрафиолетовому солнечному излучению. Особенности наблюдений ОС O_3 на КВНС и обработки данных измерений подробно изложены в [8].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты многолетних измерений ОС NO_2 и O_3 представлены на рис. 1. На рис. 1а приведены значения ОС NO_2 на ЗНС по результатам утренних и вечерних измерений. Стратосферное содержание NO_2 испытывает значительный суточный ход с быстрыми изменениями при переходе ото дня к ночи и обратно и более медленными изменениями в течение дня и ночи [9]. Приведенные на рис. 1а значения соответствуют зенитному углу Солнца 90° . На рис. 1б приведены ряды среднемесячных значений ОС NO_2 на КВНС в диапазоне зенитных углов Солнца 78° – 88° по данным утренних и вечерних измерений.

Вечерние значения содержания NO_2 на обеих станциях примерно в 1.5 раза превышают утренние значения, при этом разность между вечерними и утренними значениями в целом несколько больше на КВНС, чем на ЗНС, что обусловлено меньшей географической широтой расположения КВНС по сравнению с ЗНС. Возрастание стратосферного содержания NO_2 в течение дневного времени вызвано фотолизом N_2O_5 и HNO_3 [1, 9].

Стратосферное содержание NO_2 испытывает сильные годовые колебания с зимним минимумом и летним максимумом. Летний максимум ОС NO_2 превышает по величине зимний минимум примерно в четыре раза на ЗНС и в два раза на КВНС. Различие амплитуд годового хода ОС NO_2 в основном вызвано разными значениями годовых минимумов NO_2 : зимние значения ОС NO_2 на КВНС существенно больше, чем на ЗНС.

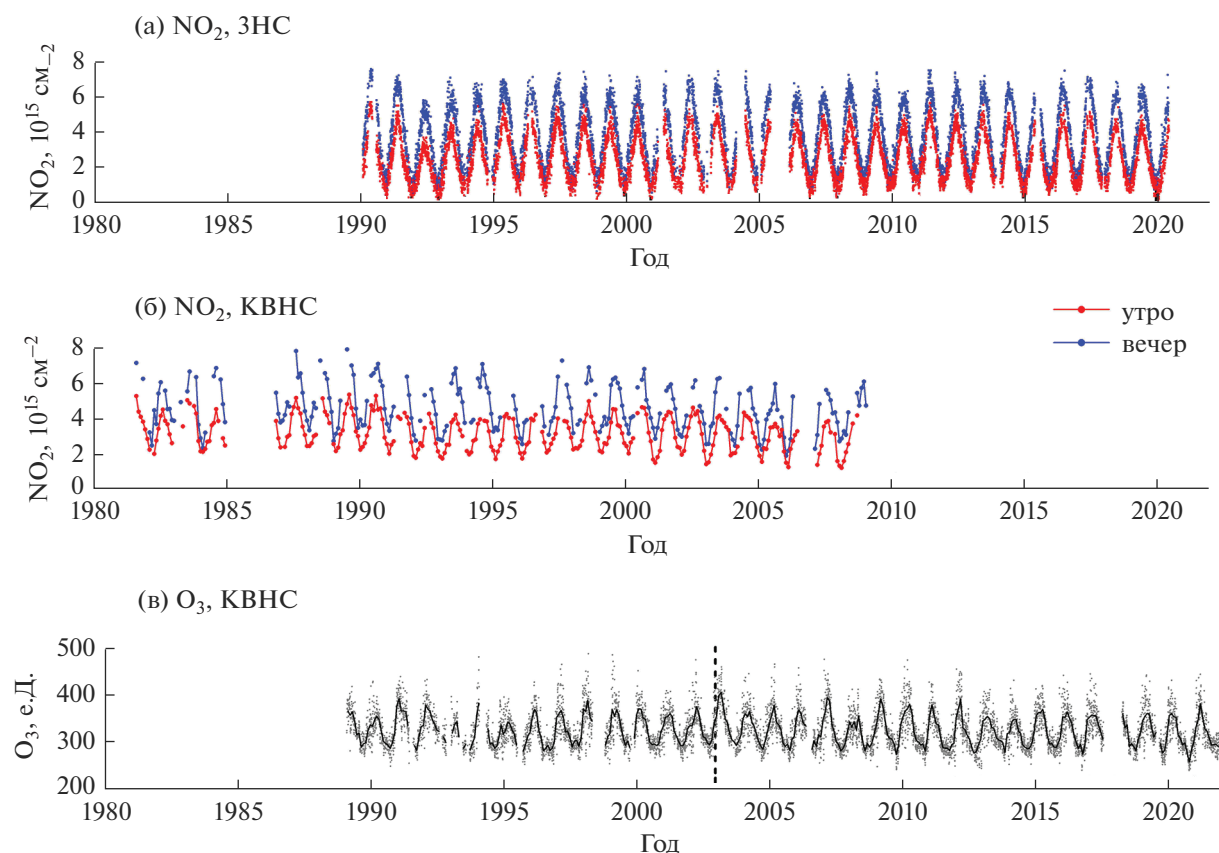


Рис. 1. Общее содержание NO_2 выше приземного слоя атмосферы на ЗНС по результатам утренних (красный цвет) и вечерних (синий цвет) измерений (а), среднемесячные значения общего содержания NO_2 на КВНС по результатам утренних (красный цвет) и вечерних (синий цвет) измерений (б) и среднесуточные (серые точки) и среднемесячные (черная кривая) значения общего содержания озона на КВНС (в). Вертикальная пунктирная линия на графике (в) разграничивает периоды, для которых оценивались озонные тренды.

Среднесуточные и среднемесячные значения ОС O_3 на КВНС приведены на рис. 1в. Годовой ход ОС O_3 характеризуется весенним максимумом (обычно в марте) и осенним минимумом (обычно в октябре). Амплитуда годового хода составляет около 25% от среднегодового значения ОС O_3 .

Рисунок 1 указывает на существенные межгодовые вариации и наличие многолетних изменений ОС NO_2 и O_3 . ОС NO_2 на обеих станциях испытывает долговременное уменьшение, которое на КВНС легко отмечается визуально. Что касается ОС O_3 , то оно в целом возрастало в течение первых 1.5 десятков лет, а затем начало уменьшаться. Вертикальная пунктирная прямая на рис. 1в разграничивает эти периоды. Выбор соответствующей ей даты обоснован ниже.

Предваряя анализ межгодовой и многолетней изменчивости примесей, сопоставим вертикальные распределения O_3 и NO_2 . На рис. 2 показаны среднемноголетние профили O_3 на ЗНС и КВНС и профиль NO_2 на ЗНС в относительных единицах. Значения профилей нормированы на максимальные значения концентраций O_3 и NO_2 . Профиль

NO_2 получен осреднением по всем данным вертикального зондирования NO_2 на ЗНС. Профили O_3 рассчитаны для географических координат ЗНС и КВНС на основе данных реанализа ERA5 (с 1979 г.) по отношению смеси O_3 , температуре и геопотенциальной высоте (<https://cds.climate.copernicus.eu/#!/search?text=ERA5&type=dataset>). Стратосферный максимум O_3 на КВНС расположен несколько выше максимума O_3 на ЗНС, а относительные содержания O_3 в окрестности тропопаузы (~10 км) на двух станциях близки между собой.

Высотный максимум NO_2 расположен значительно выше максимума O_3 , и содержание NO_2 ниже стратосферного максимума падает с уменьшением высоты быстрее, чем содержание O_3 . По этим причинам концентрация NO_2 в слое тропопаузы (~10 км) составляет лишь 2–5% от концентрации на уровне высотного максимума, но относительная концентрация O_3 в окрестности тропопаузы значительно больше. Таким образом, динамические процессы в окрестности тропопаузы и в нижней стратосфере могут влиять на ОС O_3 , не оказы-

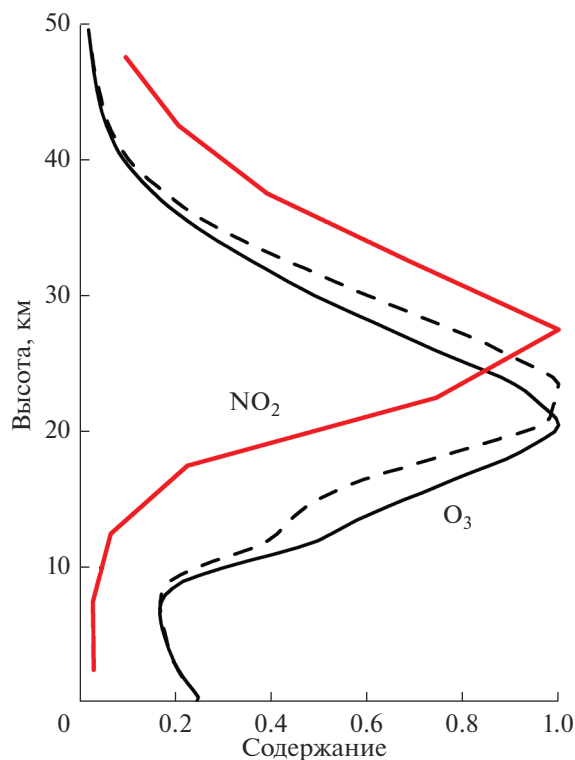


Рис. 2. Среднегодовые профили O_3 на ЗНС (сплошная черная кривая) и КВНС (штриховая черная кривая) по данным реанализа ERA5 и среднегодовой профиль NO_2 на ЗНС по данным наземного зондирования на ЗНС. Значения содержания O_3 и NO_2 нормированы на максимальные значения концентраций.

вая сколь-нибудь значительного влияния на ОС NO_2 . Динамические процессы влияют на содержание NO_2 путем переноса окислов азота NO_x и газовой источников. Содержание NO_x (и содержание NO_2 в их составе) определяется в конечном счете фотолизом газовой источников, и оно относительно мало в слое тропопазы и нижней стратосферы.

Известно, что максимальная (в относительных и абсолютных единицах) изменчивость вертикального распределения O_3 отмечается в слое тропопазы и ее верхней окрестности [12]. Близость КВНС к планетарной высотной фронтальной зоне (ПВФЗ) с ее верхнетропосферным субтропическим струйным течением, по-видимому, является важным фактором изменчивости ОС O_3 на этой станции. Влияние этого фактора на O_3 на КВНС может проявляться на межгодовом и многолетнем масштабах.

4. МЕТОД АНАЛИЗА

Количественные оценки трендов и вариаций ОС O_3 и NO_2 получены с помощью метода множественной линейной регрессии. Регрессионный анализ применялся к среднемесячным значениям

содержания примесей. В регрессионную модель включены в качестве независимых переменных следующие функции и геофизические величины:

1. Линейная (для NO_2) или кусочно-линейная (для O_3) функция для описания линейных трендов. Использование различных аппроксимаций многолетних трендов O_3 и NO_2 на КВНС обусловлено, во-первых, сменой знака тренда O_3 в начале 2000-х гг. при отсутствии таковой в тренде NO_2 , и, во-вторых, отсутствием данных по NO_2 на КВНС после 2008 г. Использование разных аппроксимаций трендов на одной и той же станции логически непротиворечиво. Содержание озона влияет на содержание NO_2 главным образом через соотношение между концентрациями NO и NO_2 в составе суммарной концентрации окислов азота NO_x . Однако тренды NO_x могут иметь другие особенности, нежели тренды O_3 . Кроме того, из-за значительных различий форм вертикальных профилей O_3 и NO_2 вклад динамических и химических процессов в отдельных слоях атмосферы в тренды ОС O_3 и NO_2 будет разным.

2. Оптическая толщина стратосферного аэрозоля (<http://data.giss.nasa.gov/modelforce/strataer/>) — для учета воздействия продуктов извержения вулкана Пинатубо на содержание примесей.

3. Поток радиоизлучения Солнца $F_{10.7}$ на длине волны 10.7 см (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/> и <https://www.spaceweather.gc.ca/solarflux/sx-en.php>) в качестве индекса солнечной активности.

4. Зональная скорость экваториального стратосферного ветра на изобарической поверхности 40 гПа для учета воздействия квазидвухлетней цикличности (КДЦ) в экваториальной стратосфере на содержание примесей.

5. Индекс Ниньо-3.4, характеризующий температуру поверхности воды в экваториальной зоне ($5^\circ S-5^\circ N$) центральной и восточной части ($170^\circ W-120^\circ W$) Тихого океана. Индекс Ниньо-3.4 обычно применяется для определения событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья. В нашей работе использован индекс, представляющий собой среднее по указанной области значение температуры поверхности океана (ТПО). Он был загружен с сайта NOAA <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/> в марте 2020 г. Впоследствии он был заменен на этом сайте значениями аномалий ТПО. Наши расчеты с каждым из этих двух форм индекса Ниньо-3.4 показали, что использование ТПО для нашей задачи предпочтительнее. Отклики O_3 и NO_2 на вариации ТПО в этом случае более четкие и существенные, что приводит к более заметному уменьшению дисперсии остаточного ряда регрессионной модели.

6. Индекс Арктического колебания (АК) (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindi>

ces/list/), характеризующий глобальные особенности атмосферной циркуляции в северном полушарии. Отметим, что мы используем индекс АК вместо индекса Североатлантического колебания, использовавшегося в [7, 8]. Эти индексы тесно взаимосвязаны, но последний имеет “привязку” к региону северной Атлантики, в то время как индекс АК отражает контраст аномалий давления воздуха между более обширной областью Арктики и средними широтами [13].

В регрессионных моделях, применяемых для оценки озонных трендов, используют также специальный индекс, так называемый эквивалентный эффективный стратосферный хлор (equivalent effective stratospheric chlorine – EESC), характеризующий суммарное содержание в стратосфере галогенных (хлор- и бромсодержащих) примесей, дающих вклад в разрушение стратосферного озона [14]. Индекс EESC используется для приписывания (в англоязычной литературе – attribution) долговременных изменений содержания озона определенным процессам – изменению содержания ОРВ. Этот подход применим к озонным данным, осредненным глобально, по полушариям или по зональным поясам, так как осреднение уменьшает долю долговременных изменений, обусловленных динамическими процессами. По этой причине он мало подходит для оценки локальных трендов O_3 . Использование индекса EESC в регрессионной модели для O_3 на КВНС привело бы к ошибочному выводу о том, что ОРВ способствуют не разрушению, а образованию озона (так как коэффициент регрессии ОС O_3 на индекс EESC был бы положительным из-за одинаково направленных трендов ОС O_3 и индекса EESC).

Кусочно-линейная функция, описывающая тренды O_3 , полагается непрерывной. В качестве точки излома (смены углового коэффициента) функции выбрано начало 2003 г. Отметим, что обычно за момент изменения линейного тренда O_3 выбирается 1997 г., примерно соответствующий изменению трендов концентраций ОРВ [14]. В недавнем обстоятельном отчете по озонным трендам [15] тренды стратосферного озона оценивались для периода до 1998 г. и периода с началом в 2000 г. Тщательный визуальный анализ рисунка 1в выявляет положительную долговременную тенденцию ОС O_3 в первой половине интервала измерений и отрицательную тенденцию в последующий период. Приблизительная дата смены знака тенденций – 2002/2003 гг. Это подтверждается регрессионными расчетами с варьированием этой даты при условии минимизации дисперсии остаточного ряда.

Отклик содержания атмосферных примесей на воздействие экваториальной КДЦ, 11-летнего цикла солнечной активности и вариаций ТПО может запаздывать относительно самого воздей-

ствия. Поэтому в регрессионную модель включены не по одному, а по два индекса КДЦ, Ниньо-3.4 и F10.7. Один из индексов в каждой паре получен смещением истинного индекса вперед во времени на величину, при которой отсутствует корреляция между смещенным и истинным индексами, то есть они взаимно ортогональны (независимы). Смещение для КДЦ составило 6 мес., а смещение для индекса Ниньо-3.4 – 14 мес. в пределах периодов наблюдений NO_2 и O_3 . Смещение для индекса солнечной активности составило 33 мес. для периода наблюдений NO_2 на КВНС, 36 мес. для периода наблюдений O_3 и 37 мес. для периода наблюдений NO_2 на ЗНС.

Для КДЦ и солнечного цикла характерно наличие основного, доминирующего, колебания. По смещению между истинным и ортогональным ему индексом можно оценить период осциллирующего суммарного отклика. Для отклика на КДЦ он получается равным двум годам, для отклика на солнечный цикл – 11 годам в случае NO_2 на КВНС и около 12 лет в случаях NO_2 на ЗНС и O_3 . Увеличение оценки периода до 12 лет обусловлено большей длительностью последнего солнечного цикла. По откликам на прямое и ортогональное ему воздействие можно оценить величину и фазу (запаздывание) суммарного отклика. Это возможно, поскольку истинный и смещенный индексы имеют одинаковые амплитуды, формы и периоды колебаний и ортогональны между собой. Однако такой прием неприменим к эффекту Ниньо-3.4, так как индекс Ниньо-3.4 не имеет фиксированного периода колебаний. Такой способ оценки фазы отклика на квазипериодическое воздействие в рамках регрессионной модели впервые применен в [7].

Все искомые коэффициенты в регрессионной модели представлены в виде разложений в ряд Фурье по парам синус-косинус, соответствующим годовой и полугодовой гармоникам, с целью учета годового хода O_3 и NO_2 , сезонной зависимости трендов и сезонной зависимости воздействия других предикторов (см. также [16, 17]). Таким образом, регрессионная модель включает в качестве независимых переменных свободный член, линейный по времени член (в случае NO_2) или два кусочно-линейных члена (в случае O_3 на КВНС), индекс АК, аэрозольную оптическую толщину, ортогональные пары индексов КДЦ, Ниньо-3.4 и F10.7, а также пары Фурье-разложений всех индексов.

Для решения системы уравнений регрессионной модели воспользуемся предложенным в [17] методом, позволяющим учитывать наличие памяти в данных наблюдений в большом диапазоне временных масштабов. В задаче регрессионного анализа она проявляется как автокорреляция остаточного ряда, что ведет к сокращению числа

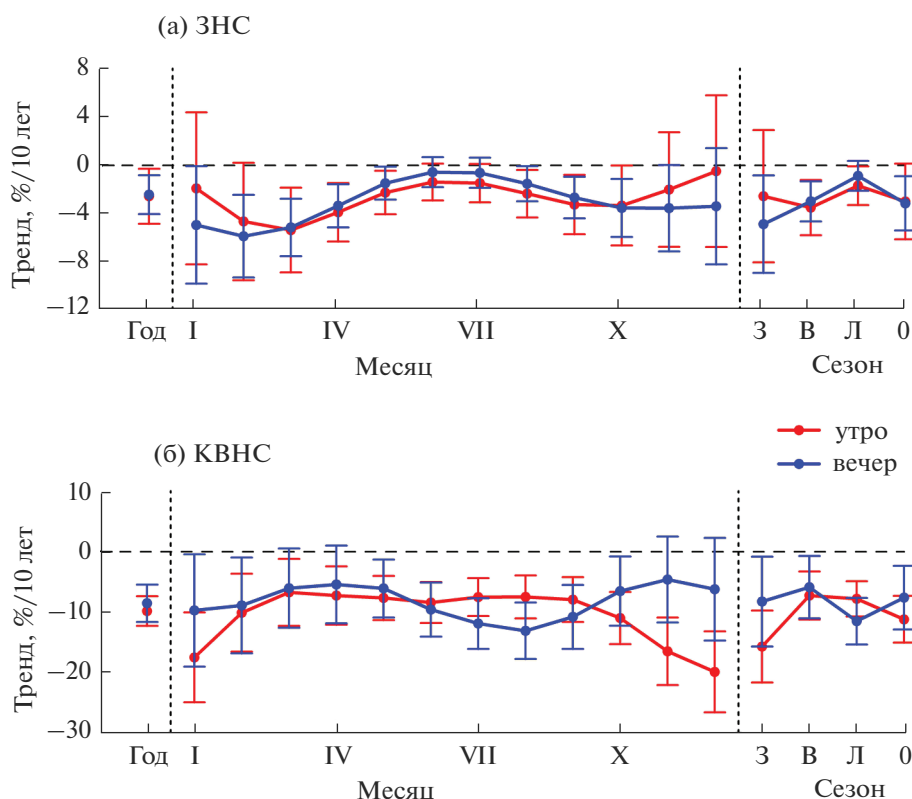


Рис. 3. Годовые, месячные и сезонные оценки трендов ОС NO₂ по результатам утренних (красный цвет) и вечерних (синий цвет) измерений на ЗНС (а) и КВНС (б). Вертикальные отрезки – 95% доверительные интервалы. Вертикальные пунктирные линии разграничивают годовые, месячные и сезонные оценки.

степеней свободы, влияющих на достоверность регрессионных оценок. Метод [17] позволяет произвести коррекцию регрессионных оценок и их доверительных интервалов, используя представление коррелированного остаточного ряда в виде процесса авторегрессии, порядок которого может быть весьма большим. Порядок авторегрессионного процесса (длина памяти) определяется по условию стационарирования дисперсии остаточного ряда (ошибки регрессионной модели) с привлечением автокорреляционного и спектрального анализа ошибки. Представленные в настоящей работе результаты получены при порядке авторегрессионного процесса, равном 90 в случае NO₂ на ЗНС и O₃ и 10 в случае NO₂ на КВНС.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

5.1. Линейные тренды

Годовые, месячные и сезонные оценки линейных трендов ОС NO₂ по результатам утренних и вечерних измерений на ЗНС и КВНС представлены на рис. 3. Значения трендов нормированы на соответствующие многолетние среднегодовые, среднемесячные или среднесезонные значения содержания NO₂.

Тренды NO₂ на обеих станциях отрицательные. Годовые оценки трендов составляют около –2.5% за 10 лет на ЗНС и в пределах от –9 до –10% за 10 лет на КВНС. Годовые оценки трендов, полученных по результатам утренних и вечерних измерений, хорошо согласуются между собой на обеих станциях.

Наиболее значительные тренды NO₂ на ЗНС (в относительных единицах) характерны для зимне-весеннего периода. Скорость уменьшения ОС NO₂ в феврале-марте достигает или превышает (по вечерним данным) 5% за 10 лет. Летние оценки трендов NO₂ на ЗНС (статистически значимые по данным утренних измерений), хотя и слабее при выражении их в относительных единицах, сопоставимы с зимне-весенними значениями в абсолютных единицах.

Месячные оценки утренних и вечерних трендов NO₂ на КВНС не всегда столь же хорошо согласуются между собой количественно, как тренды на ЗНС (по погодным условиям число дней с утренними наблюдениями на КВНС значительно больше, чем число дней с вечерними наблюдениями). Тем не менее, отметим, как важную особенность значительные тренды NO₂ на КВНС в зимний период. Существенное отличие трендов NO₂ над Северным Кавказом по сравнению с ЗНС со-

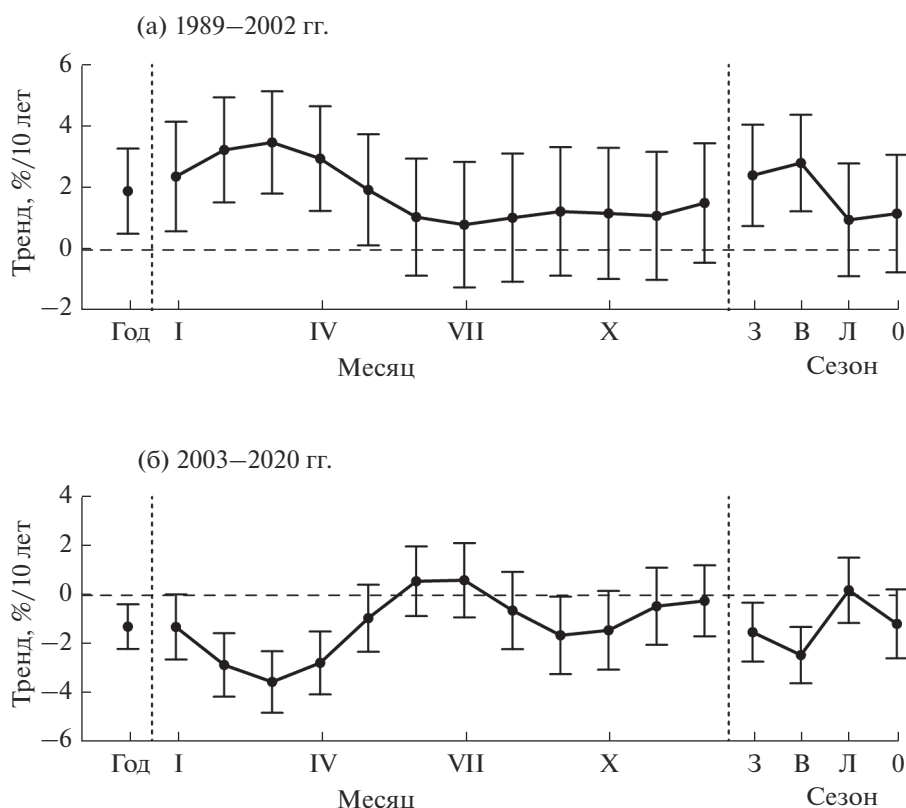


Рис. 4. Годовые, месячные и сезонные оценки трендов ОС O_3 на КВНС для периодов 1989–2002 гг. (а) и 2003–2021 гг. (б). Остальные обозначения см. на рис. 3.

стоит в ярко выраженном летнем тренде ОС NO_2 над Северным Кавказом.

Графики трендов ОС O_3 на КВНС в 1989–2002 и 2003–2021 гг. приведены на рис. 4. В течение первого периода отмечалось уменьшение, а в последующий период – увеличение ОС O_3 . Сразу отметим, что знаки трендов ОС O_3 над Северным Кавказом противоположны знакам трендов зонально осредненных значений стратосферного и ОС озона [14, 15]. Годовая оценка тренда O_3 на КВНС составляет около 2% за 10 лет в 1989–2002 гг. и –1.3% за 10 лет в 2003–2021 гг. Тренды O_3 на КВНС проявляются преимущественно в зимне-весенний сезон. Экстремальные (мартовские) оценки трендов для двух периодов составляют по модулю около 3.5% за 10 лет. Для второго периода также отмечен более слабый отрицательный тренд осенью.

Общая особенность сезонных зависимостей на рис. 3 и 4 – это значительные тренды NO_2 и O_3 в зимний и/или весенний сезоны.

5.2. Эффекты квазидвухлетней цикличности

Отклик ОС O_3 и NO_2 на КДЦ в экваториальной стратосфере будем характеризовать амплитудной и фазовой характеристиками. Значения

размаха колебаний ОС примесей, обусловленных КДЦ, приведены на рис. 5. Наиболее сильный, статистически значимый, отклик ОС NO_2 и O_3 на воздействие экваториальной КДЦ происходит в зимне-весенний период. Межгодовые изменения ОС NO_2 в этот период, связанные с КДЦ, могут существенно превышать 10%, а изменения ОС O_3 составляют около 5%. Значительные квазидвухлетние колебания ОС NO_2 на обеих станциях характерны также для осеннего, а на ЗНС (при исчислении в абсолютных единицах) – и для летнего сезона. Сезонные зависимости амплитуд отклика NO_2 на КДЦ экваториального стратосферного ветра на двух станциях похожи между собой.

Фазовые задержки квазидвухлетних колебаний ОС NO_2 и O_3 относительно КДЦ зональной скорости экваториального ветра на уровне 40 гПа приведены на рис. 6а. Они показаны только для статистически значимых откликов NO_2 и O_3 на воздействие КДЦ. Отрицательные значения фазовой задержки означают опережение колебаний содержания примесей по сравнению с КДЦ скорости ветра. Фаза квазидвухлетних колебаний ОС O_3 на рис. 6а охарактеризована двумя наборами обозначений. Сплошной черной кривой и прямыми крестиками показана фазовая задержка колебаний O_3 относительно колебаний скорости ветра как есть.

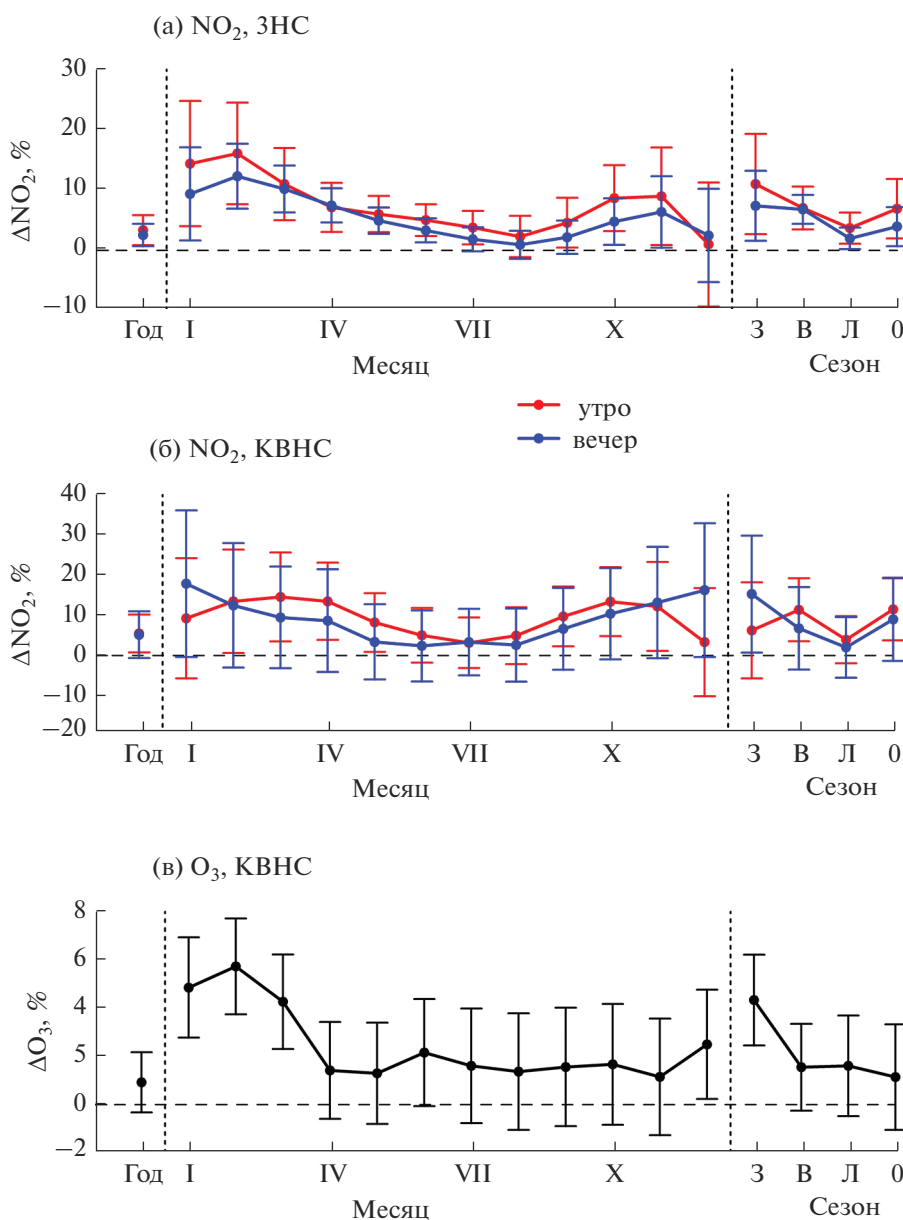


Рис. 5. Годовые, месячные и сезонные оценки величин изменений ОС NO_2 на ЗНС (а) и КВНС (б) по данным утренних (красный цвет) и вечерних (синий цвет) измерений и изменений ОС O_3 на КВНС (в) под влиянием КДЦ в экваториальной стратосфере. См. пояснения в тексте.

Пунктирная черная кривая и косые крестики соответствуют фазовой задержке колебаний O_3 относительно колебаний скорости ветра, противофазным наблюдаемым (то есть сдвинутым на полпериода).

Прежде всего отметим соответствие между собой фаз квазидвухлетних колебаний ОС NO_2 и O_3 , оцененных по годовым оценкам амплитуд откликов ОС примесей на КДЦ (левая часть рис. 6). Годовые оценки фаз близки к нулю. Это указывает на то, что колебания ОС примесей, оцененные по годовым откликам, происходят примерно в фазе с колебаниями экваториальной скорости ветра на уровне 40 гПа.

Рисунок 6а демонстрирует хорошее соответствие между фазами квазидвухлетних колебаний ОС NO_2 на ЗНС, оцененными по результатам утренних и вечерних измерений (ср. сплошные кривые с кружками красного и синего цвета). Фазовая задержка изменяется в течение года в пределах полупериода КДЦ. Ее значения плавно изменяются от зимы к лету (см. среднюю часть рисунка). Квазидвухлетние колебания ОС NO_2 в зимний период опережают колебания скорости экваториального ветра на уровне 40 гПа примерно на 4 мес., а в летние сезоны они несколько запаздывают относительно колебаний скорости вет-

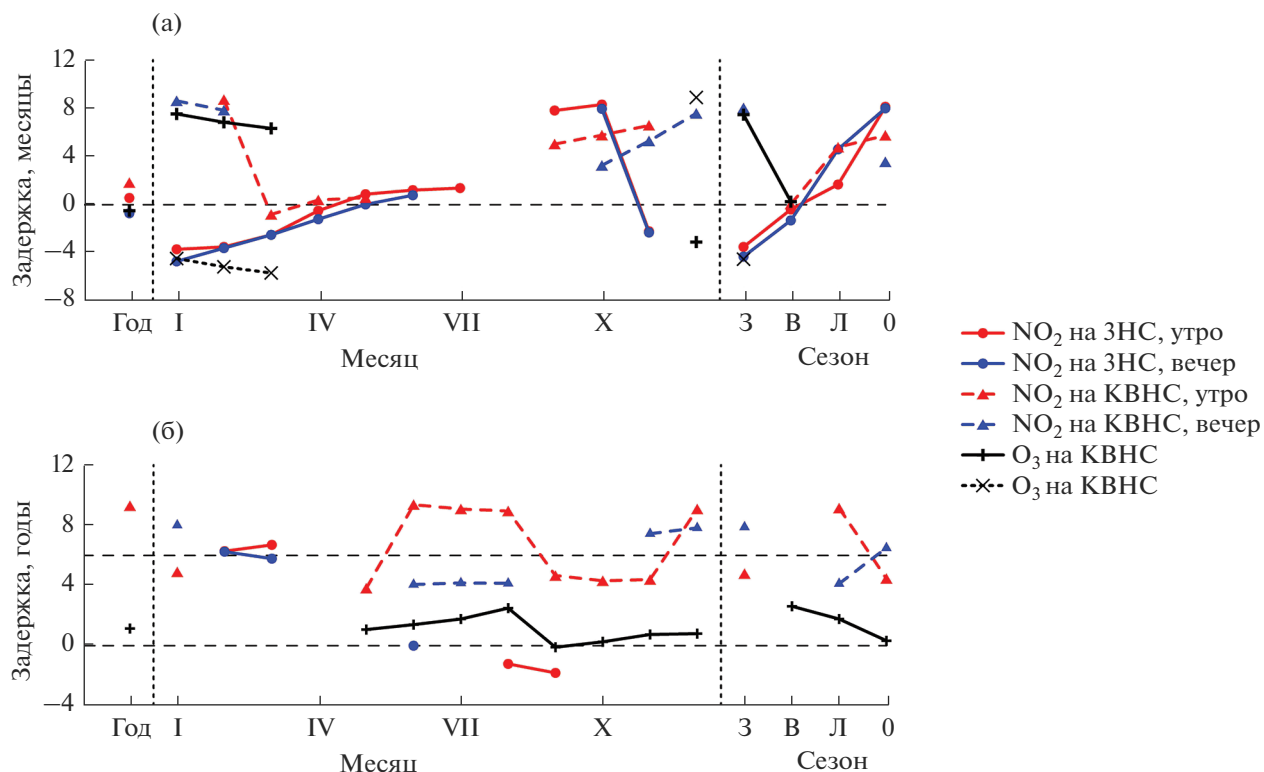


Рис. 6. Задержки откликов ОС NO_2 и ОС O_3 на воздействие КДЦ скорости экваториального ветра на изобарической поверхности 40 гПа (а) и 11-летних колебаний уровня солнечной активности (б) по данным утренних (красный цвет) и вечерних (синий цвет) измерений ОС на ЗНС (кружки и сплошные кривые) и КВНС (треугольники и штриховые кривые) и ОС O_3 на КВНС (крестики и кривые черного цвета). Значение пунктирной кривой и косых крестиков черного цвета объяснено в тексте. Приведены значения задержек, соответствующих только статистически значимым значениям откликов или значениям на грани статистической значимости. Отрицательные значения задержки соответствуют опережению.

ра (см. также правую часть рисунка). В ноябре происходит резкое изменение фазы квазидвухлетних колебаний ОС NO_2 на ЗНС от значений, соответствующих большой задержке, до отрицательных значений, свойственных зимней фазе колебаний ОС NO_2 . Таким образом, квазидвухлетние колебания ОС NO_2 , проявляющиеся в зимние периоды, противоположны по фазе колебаниям, проявляющимся в осенние периоды (правая часть рис. 6а).

Фазовая задержка квазидвухлетних колебаний ОС NO_2 на КВНС (штриховые кривые с треугольниками красного и синего цвета) весной и осенью вполне соответствует фазе колебаний ОС NO_2 на ЗНС. Однако в зимние сезоны колебания ОС NO_2 на КВНС противоположны по фазе колебаниям на ЗНС.

Фазы квазидвухлетних колебаний ОС O_3 (черные кривые с крестиками) и NO_2 на КВНС для января и февраля близки между собой, будучи противоположны фазе колебаний ОС NO_2 на ЗНС. Однако декабрьские оценки фаз колебаний O_3 и NO_2 на КВНС противоположны друг другу (ср. положения косого крестика и синего тре-

угольника). Анализируя сезонные оценки фаз в правой части рис. 6а, видим хорошее соответствие фаз колебаний ОС O_3 и NO_2 на обеих станциях весной (фазовые задержки близки к нулю). Зимой отмечено совпадение по фазе колебаний ОС O_3 и NO_2 на КВНС, которые с хорошей точностью противоположны по фазе колебаниям ОС NO_2 на ЗНС.

5.3. Эффекты 11-летнего солнечного цикла

Изменения ОС примесей в течение 11-летнего солнечного цикла (размах колебаний) показаны на рис. 7. Отклик ОС NO_2 на ЗНС на солнечный цикл в целом за год не выявлен (годовые оценки близки к нулю). Изменения ОС NO_2 на КВНС составляют в целом за год 5–6%, а изменения ОС O_3 — около 1.5%. Однако отклик на солнечное воздействие в отдельные сезоны существенно сильнее.

Значительный эффект солнечного цикла в ОС NO_2 на ЗНС проявился в конце зимы и начале весны (рис. 7а). Колебания NO_2 противофазны 11-летнему солнечному циклу (рис. 6б). В это

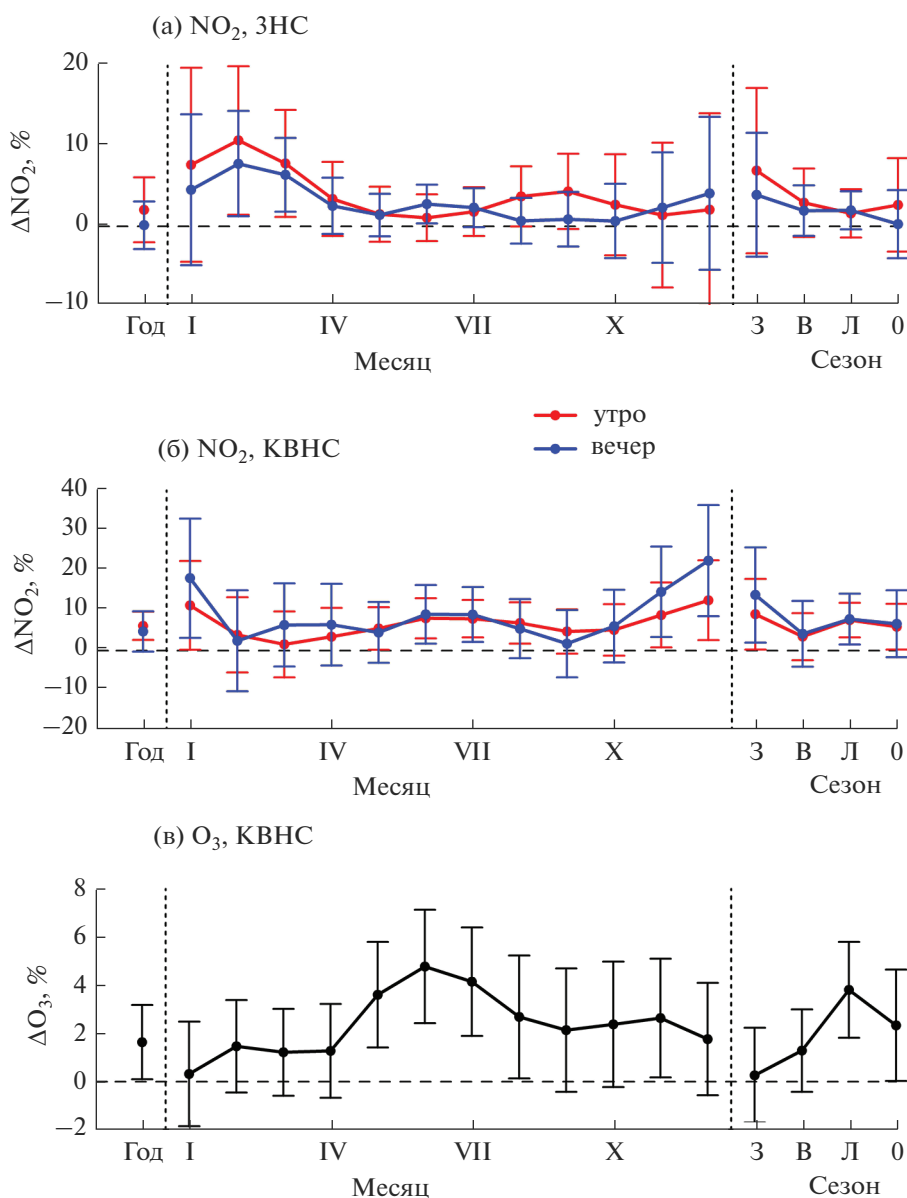


Рис. 7. Годовые, месячные и сезонные оценки величин изменений ОС NO_2 на ЗНС (а) и КВНС (б) по данным утренних (красный цвет) и вечерних (синий цвет) измерений и изменений ОС O_3 на КВНС (в) под влиянием 11-летнего цикла солнечной активности. См. пояснения в тексте.

время года ОС NO_2 на ЗНС в годы минимума солнечной активности в среднем больше, чем в годы максимума солнечной активности на 7–10% (рис. 7а). В летний период, когда прямое (радиационное) воздействие колебаний уровня солнечной активности в средних широтах максимально, эффект солнечного цикла в NO_2 на ЗНС ~3% проявляется приблизительно в фазе с солнечным циклом (рис. 6б).

Солнечный сигнал в ОС примесей на КВНС выявлен в течение большей части года (рис. 7б, 7в). Максимальный (в относительных единицах) отклик ОС NO_2 на КВНС на солнечный цикл проявился зимой. Изменение ОС NO_2 между мини-

мумом и максимумом солнечной активности составило в декабре-феврале 11–13% по данным утренних измерений и около 20% по данным вечерних измерений. Значительный эффект ~7–9% выявлен летом.

Согласно рис. 6б, изменения ОС NO_2 на КВНС, связанные с солнечным циклом, можно грубо считать противофазными ему (значения фазовой задержки распределены вокруг горизонтальной штриховой линии, соответствующей полупериоду солнечного цикла). Таким образом, зимний отклик NO_2 на КВНС и весенний отклик NO_2 на ЗНС на солнечный цикл вполне соответствуют

друг другу по фазе, но летние отклики примерно противоположны между собой по фазе.

Изменения ОС O_3 на КВНС под действием солнечного цикла проявляются в максимальной степени летом, достигая 4.5% (рис. 7в). Изменения, проявляющиеся в течение большей части года, с конца весны по осень, происходят примерно в фазе с солнечным циклом (рис. 6б).

В летне-осенний период, когда эффект солнечного цикла в NO_2 проявляется на обеих станциях и в O_3 , можно отметить некоторые закономерности в соотношении между фазами колебаний ОС примесей. Колебания O_3 на КВНС и NO_2 на ЗНС близки по фазе. Колебания же ОС O_3 и NO_2 на КВНС сильно различаются по фазе, вплоть до противоположности. Противоположность колебаний ОС O_3 и NO_2 на КВНС проявилась и в целом за год (левая часть рис. 6б).

5.4. Эффект вариаций температуры поверхности океана в области Ниньо-3.4

Изменения ОС примесей, связанные с вариациями ТПО в зоне Ниньо-3.4, показаны на рис. 8. Сплошные кривые характеризуют эффект ТПО, проявляющийся в примесях без задержки, а штриховые кривые — эффект, проявляющийся с задержкой 14 мес. (как отклик на смещенный индекс Ниньо-3.4). На рисунке приведены только кривые, содержащие статистически значимые оценки.

В ОС NO_2 на ЗНС выявлен эффект вариаций индекса Ниньо-3.4 без запаздывания (рис. 8а). Максимальный (по модулю) отклик ОС NO_2 на изменения ТПО в зоне Ниньо-3.4 отмечен в зимне-весенний период. Изменения ОС NO_2 достигают 6–7% на одно среднеквадратичное отклонение индекса Ниньо-3.4. Отрицательный знак отклика означает, что ОС NO_2 в зимне-весенние периоды, когда наблюдалось Эль-Ниньо (положительные аномалии ТПО в зоне Ниньо-3.4), в среднем меньше, чем в периоды с Ла-Нинья (отрицательные аномалии ТПО). Мы отмечаем, что эта особенность — повышенная чувствительность ОС NO_2 на ЗНС к исследуемым воздействиям в зимне-весенний период — является общей для эффектов КДЦ, солнечного цикла, Ниньо-3.4, а также для трендов.

По данным вечерних измерений на ЗНС выявлен положительный эффект Ниньо-3.4 (до 2%) в ОС NO_2 в мае–июле, а по данным утренних измерений — отрицательный эффект (около –2.5%) в осенние месяцы. Годовой отклик ОС NO_2 на вариации индекса Ниньо-3.4 выявлен на ЗНС только по данным утренних измерений (–2%).

Эффект Ниньо-3.4 в ОС NO_2 на КВНС выявлен без запаздывания по результатам утренних

измерений (рис. 8б). Сезонная зависимость соответствующей кривой имеет общие черты с утренней кривой на ЗНС, но степень статистической достоверности эффекта Ниньо-3.4 в NO_2 на КВНС в целом недостаточно высока. Отрицательный эффект –5%, находящийся на грани статистической значимости, выявлен только в марте. Наряду с этим отметим хорошее количественное соответствие оценок эффекта и их сезонных зависимостей, полученных по данным утренних и вечерних измерений (доверительные интервалы для вечерних оценок больше, и оценки статистически незначимы на уровне 95%).

Эффект Ниньо-3.4 с запаздыванием 14 мес. (ортогональный эффекту без запаздывания) выявлен в летний период по вечерним данным ОС NO_2 на КВНС (штриховая кривая на рис. 8б). Он близок к 5% в июле и августе. Таким образом, положительные аномалии ТПО в зоне Ниньо-3.4 способствуют через год с небольшим летнему повышению ОС NO_2 на КВНС.

Годовые оценки прямого и запаздывающего эффектов Ниньо-3.4 в ОС NO_2 на КВНС близки к нулю.

Связь ОС O_3 на КВНС с ТПО в области Ниньо-3.4 обнаружена летом при 14-месячном запаздывании (рис. 8в). Изменения ОС O_3 составляют около 2% при изменении ТПО на одно среднеквадратичное отклонение. Отрицательный знак эффекта указывает на то, что положительные аномалии ТПО способствуют понижению примерно через год летнего ОС O_3 на КВНС.

При сравнении откликов ОС примесей на вариации ТПО в зоне Ниньо-3.4 можно отметить определенные закономерности. Общими для NO_2 на двух станциях являются значительные отрицательные эффекты влияния ТПО на ОС NO_2 в зимний и/или весенний сезоны. Отличие же состоит в том, что связь NO_2 на КВНС с индексом Ниньо-3.4 летом проявляется с ощутимым запаздыванием, а на ЗНС без запаздывания. В ОС O_3 , как и в ОС NO_2 на КВНС, выявлен запаздывающий эффект Ниньо-3.4, причем в один и тот же сезон. При этом знаки эффектов в O_3 и NO_2 противоположны. Напомним, что последняя особенность свойственна также изменениям ОС O_3 и NO_2 на КВНС под действием колебаний уровня солнечной активности (см. раздел 5.3).

5.5. Эффекты Арктического колебания

Изменения ОС NO_2 на КВНС под действием Арктического колебания статистически незначимы. Изменения ОС NO_2 на ЗНС и ОС O_3 на КВНС, связанные с АК, приведены на рис. 9. Вариации ОС этих примесей противоположного знака проявляются весной. Эффект АК в ОС NO_2 на

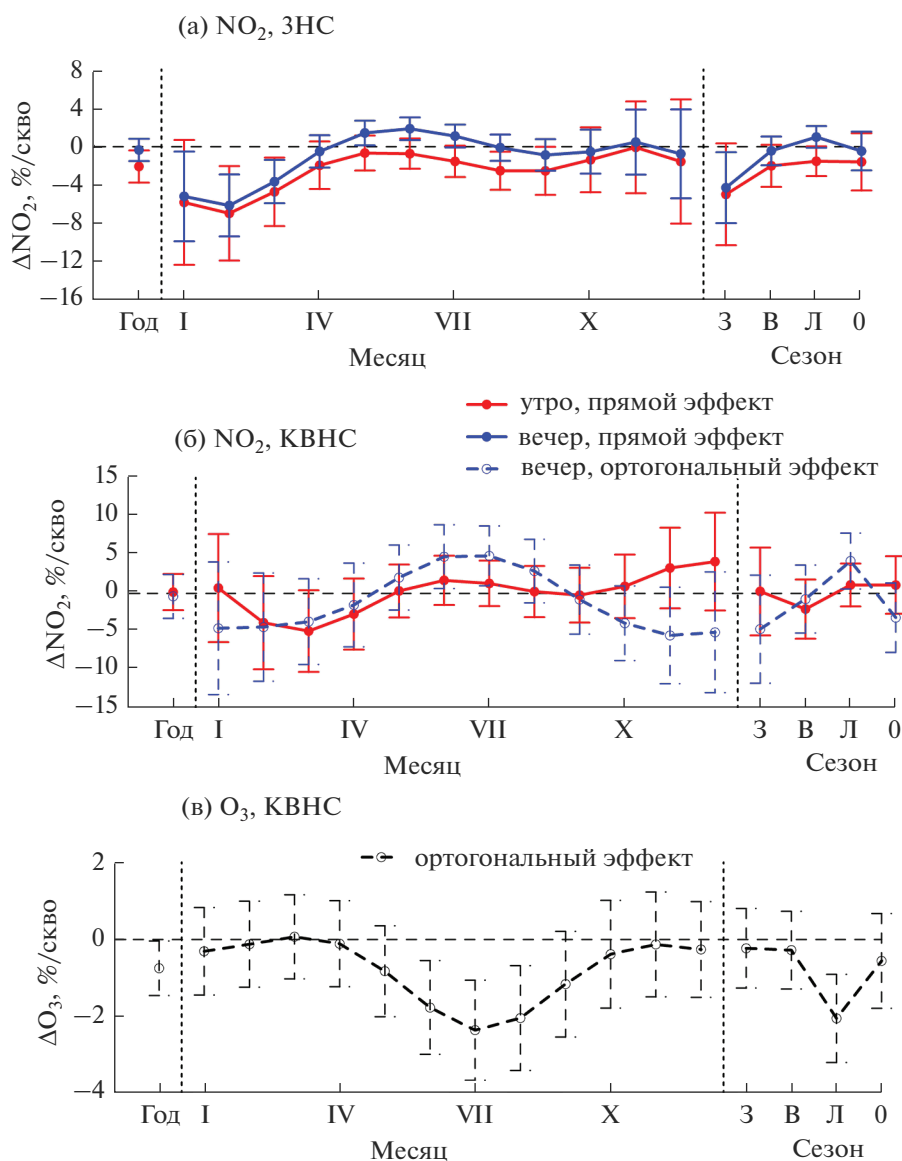


Рис. 8. Годовые, месячные и сезонные оценки изменений ОС NO_2 на ЗНС (а) и КВНС (б) по данным утренних (красный цвет) и вечерних (синий цвет) измерений и изменений ОС O_3 на КВНС (в), связанных с вариациями ТПО в области Ниньо-3.4. Сплошные кривые – эффект изменений ТПО без задержки, штриховые кривые – эффект, запаздывающий относительно ТПО на 14 мес. Единицы – изменение ОС, приходящееся на одно средноквадратичное отклонение индекса Ниньо-3.4.

ЗНС существен и в конце осени. Положительная (отрицательная) фаза АК способствуют уменьшению (увеличению) ОС NO_2 на ЗНС и противоположным изменениям ОС O_3 на КВНС. Изменение ОС, приходящееся на одно средноквадратичное отклонение индекса АК, составляет до -3% для NO_2 и 1% для O_3 . Годовые оценки эффекта АК составляют около -1.5% для ОС NO_2 и менее 0.5% для ОС O_3 .

Оценки изменений ОС NO_2 на ЗНС, связанных с АК близки к приведенным в [7] оценкам изменений, связанных с индексом Североатлантического колебания (САК), однако связь NO_2 с АК в осен-

ний период статистически более достоверна и проявилась с большей силой (рис. 9а), чем связь с САК. Наоборот, чувствительность ОС O_3 на КВНС к вариациям индекса АК (рис. 9б) оказалась меньшей, чем к вариациям индекса САК [8].

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Выполненный анализ показал, что ОС O_3 и NO_2 на ЗНС и КВНС испытывают многолетние тренды и межгодовые вариации, связанные с изменениями уровня солнечной активности и циркуляцион-

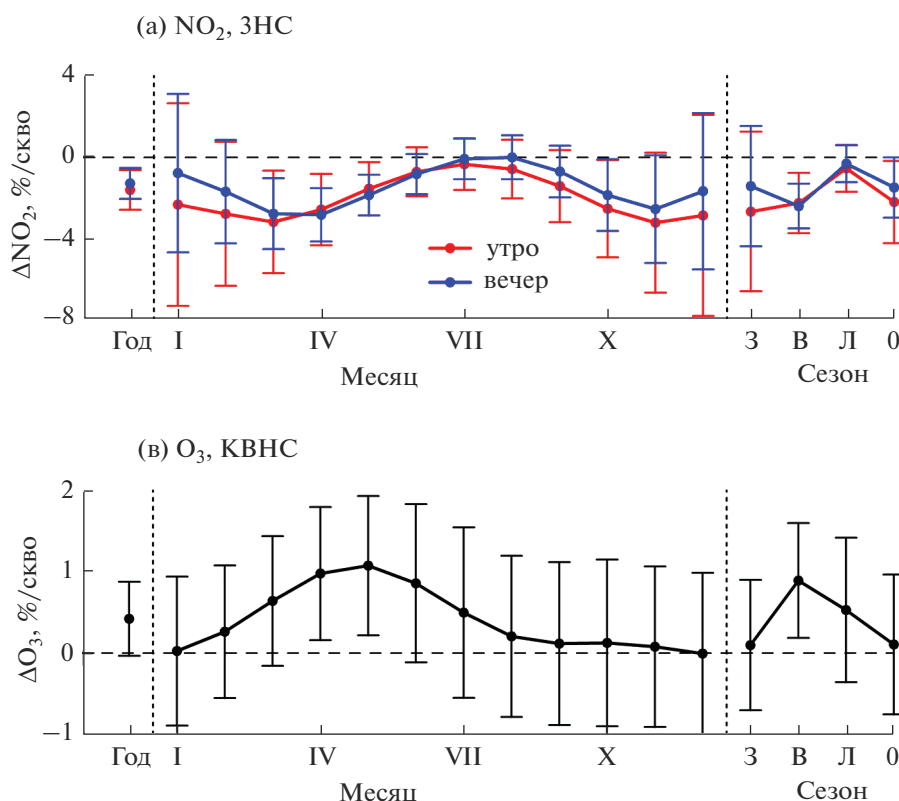


Рис. 9. Годовые, месячные и сезонные оценки изменений ОС NO_2 на ЗНС (а) по данным утренних (красный цвет) и вечерних (синий цвет) измерений и изменений ОС O_3 на КВНС (б) под влиянием Арктического колебания. Единицы – изменение ОС, приходящееся на одно среднеквадратичное отклонение индекса АК.

ными факторами. Среди последних – квазидвухлетняя цикличность в экваториальной стратосфере, вариации температуры поверхности воды в экваториальной зоне центральной и восточной части Тихого океана, крупномасштабные атмосферные процессы, отражающие контраст аномалий давления между средними и полярными широтами северного полушария (Арктическое колебание).

Линейные тренды ОС O_3 и NO_2 и влияние на ОС O_3 и NO_2 указанных циркуляционных факторов и 11-летнего солнечного цикла зависят от сезона. В большинстве случаев эти эффекты наиболее сильно проявляются зимой и/или весной. Такая особенность указывает на важную роль циркуляционных механизмов в межгодовых и многолетних изменениях содержания примесей в этот период. В частности, стратосферные содержания O_3 и NO_2 могут изменяться в результате крупномасштабной эволюции стратосферного полярного вихря. Начало весны характеризуется финальным стратосферным потеплением, сопровождающимся ослаблением и разрушением вихря, и быстрым фотохимическим ростом стратосферного содержания NO_2 . Поэтому содержание NO_2 в этот период, в первую очередь, на ЗНС, может быть особенно чувствительным к факторам, влияющим на стратосферный полярный вихрь.

Имеются важные общие для NO_2 на двух станциях особенности трендов и откликов на солнечный цикл, КДЦ и вариации ТПО. Это, в частности, отрицательные тренды ОС NO_2 на ЗНС и КВНС. С учетом того, что отрицательный тренд ОС NO_2 свойствен также европейской станции Юнгфрауйох (46.6°N , 8°E) [5, 18, 19], долговременное уменьшение ОС NO_2 происходит на большой территории среднеширотного европейского сектора. Отрицательный тренд не находит объяснения в рамках фотохимических механизмов, рассматриваемых без учета влияния атмосферной динамики на распределение и эволюцию атмосферных примесей [5, 20, 21].

Наряду с общими для NO_2 на ЗНС и КВНС особенностями эволюции NO_2 , в изменениях ОС NO_2 на КВНС проявились дополнительные черты, обусловленные, вероятно, низкоширотным по сравнению с ЗНС положением станции. Это значительный отклик NO_2 на солнечный цикл и запаздывающий отклик на вариации ТПО в летний период. Эти же свойства характерны и для изменений ОС O_3 на КВНС. Различия между изменениями ОС NO_2 на двух станциях могут касаться и зимнего сезона. Так, сигналы КДЦ в ОС NO_2 на ЗНС и КВНС в этот период противоположны по фазе.

NO_2 и O_3 в стратосфере фотохимически связаны. Изменения содержания O_3 при прочих равных условиях должно способствовать изменениям содержания NO_2 того же знака в результате образования NO_2 в реакции O_3 с NO [1]. Однако содержание и изменения содержания окислов азота зависят также от газов-источников (N_2O и HNO_3), содержание которых изменчиво в пространстве и во времени. Межгодовые изменения ОС O_3 и NO_2 на КВНС, вызванные одной и той же причиной, могут быть как одинаковыми (изменения под действием КДЦ в январе-феврале, так и противоположными (изменения летних значений ОС под действием солнечного цикла и вариаций ТПО) по знаку. Определенные различия касаются и зимнего сезона. Это, прежде всего, сильный отклик ОС NO_2 на солнечный цикл и отсутствие солнечного сигнала в ОС O_3 зимой.

Различия между трендовыми характеристиками ОС O_3 и NO_2 особенно важны. Изменение знака тренда O_3 на КВНС на рубеже 2000-х гг. и постоянство знака тренда NO_2 указывает на наличие особого фактора, влияющего на изменения ОС O_3 , но не оказывающего заметного влияния на изменения ОС NO_2 на КВНС. Этим фактором могут, вероятно, служить динамические процессы, связанные с динамикой ПВФЗ, влияющие на ОС O_3 через изменения содержания O_3 в окрестности тропопаузы и в нижней стратосфере, поскольку содержание O_3 в этом слое значительно (см. раздел 3 и рис. 2).

В заключение приведем краткие итоги основных результатов.

– Тренды ОС NO_2 на обеих станциях отрицательные.

– Тренд ОС O_3 на КВНС меняет знак в окрестности 2000 г. с положительного на отрицательный.

– Тренды ОС O_3 на КВНС противоположны по знаку трендам зонально осредненных значений ОС O_3 .

– Тренды ОС NO_2 и O_3 в целом наиболее существенны в зимне-весенний период, что указывает на важную роль циркуляционных механизмов в долговременных изменениях ОС O_3 и NO_2 .

– Связь ОС NO_2 и O_3 с 11-летним солнечным циклом в летний период проявляется только на низкоширотной станции (КВНС).

– На обеих станциях отмечена связь ОС NO_2 с солнечным циклом в холодный период года.

– Это указывает на возможную роль атмосферной циркуляции в связи ОС NO_2 с солнечным циклом.

– Существенное влияние на межгодовую изменчивость NO_2 и O_3 оказывают КДЦ, АК и вариации ТПО в области Ниньо-3.4.

– Тренды и чувствительность ОС NO_2 к воздействию 11-летнего солнечного цикла, КДЦ, АК

и ТПО значительно выше, чем тренды и чувствительность к тем же факторам ОС O_3 .

Для полноценной интерпретации полученных результатов необходимо привлекать трехмерные численные модели. Изучение конкретных механизмов долговременных трендов и межгодовых вариаций ОС O_3 и NO_2 может также потребовать дополнительного анализа с привлечением большего числа данных о термодинамических параметрах атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 20-05-00274 (измерения ea ЗНС), и РФФ, проект 21-17-00210 (анализ данных). Результаты измерений ОС NO_2 на ЗНС архивированы NDACC, а данные измерений ОС O_3 на КВНС – WUODC (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre). Данные об индексе солнечной активности $F10.7$ представлены для свободного доступа Национальным центром экологической информации NOAA (NOAA National Center for Environmental Information) и канадским Министерством природных ресурсов (Natural Resources Canada). Данные о зональной скорости экваториального стратосферного ветра подготовлены Свободным берлинским университетом (Freie Universität Berlin). Индекс Ниньо-3.4 представлен Лабораторией физических наук NOAA (NOAA Physical Science Laboratory). Данные об индексе АК представлены Климатическим отделом Университета Восточной Англии (Climatic Research Unit, University of East Anglia). Данные об аэрозольной оптической толщине подготовлены Годдардовским институтом космических исследований НАСА (NASA Goddard Institute for Space Studies). Среднемесячные данные ERA5 для координат ЗНС и УВНС были загружены из Базы климатических данных CDS (Climate Data Store).

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brasseur G.P., Solomon S.* Aeronomy of the middle atmosphere. Dordrecht, the Netherlands: Springer. 2005. 644 p.
2. *Pyle J., Shepherd Th., Bodeker G., Canciani P., Dameris M., Forster P., Gruzdev A., Müller R., Muthama N.J., Pitari G., Randel W.* Ozone and climate: A review of interconnections // Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System. Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons. IPCC Special Report. IPCC, 2005. P. 83–132.
3. *Gradeel T.E., Crutzen J.P.* Atmospheric change. An Earth system perspective, New York, NY: W.H. Freeman and Company. 1993, 446 p.
4. Atmospheric chemistry and global change / Eds Brasseur G.P., Orlando J.J., Tyndall G.S. New York, NY: Oxford University Press. 1999. 688 p.
5. *Груздев А.Н.* Широтная зависимость вариаций стратосферного содержания NO_2 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 3. С. 345–359.

6. Боровский А.Н., Арабов А.Я., Голицын Г.С., Груздев А.Н., Еланский Н.Ф., Елохов А.С., Мохов И.И., Савиных В.В., Сенник И.А., Тимажеев А.В. Вариации общего содержания диоксида азота в атмосфере на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 29–44.
7. Груздев А.Н., Елохов А.С. Изменения общего содержания и вертикального распределения NO₂ по результатам 30-летних измерений на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 99–112. <https://doi.org/10.31857/S0002351521010089>
8. Savinykh V.V., Elansky N.F., Gruzdev A.N. Interannual variations and long-term trends in total ozone over the North Caucasus // Atmos. Environ. 2021. V. 251. 118252.
9. Елохов А.С., Груздев А.Н. Измерения общего содержания и вертикального распределения NO₂ на Звенигородской научной станции // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 6. С. 831–846.
10. Сенник И.А., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Лисицына Л.В., Галактионов В.В., Кортунова З.В. 2005. Основные закономерности временной изменчивости приземного озона на двух разнесенных по высоте станциях (870 и 2070 м) в районе г. Кисловодск // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 1. С. 59–71.
11. Груздев А.Н., Елохов А.С. Валидация результатов измерений содержания NO₂ в вертикальном столбе атмосферы с помощью прибора ОМІ с борта спутника EOS–Ауга по результатам наземных измерений на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С. 477–488.
12. Перов С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 154 с.
13. Thompson D.W.J., Wallace J.M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. № 9. P. 1297–1300.
14. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018 / World Meteorological Organization. Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 58. 2016. Geneva, Switzerland, 588 p.
15. SPARC/IO3C/GAW Report on Long-term Ozone Trends and Uncertainties in the Stratosphere / Ed. I. Petropavlovskikh, S. Godin-Beekmann, D. Hubert, R. Damadeo, B. Hassler, V. Sofieva, SPARC Report No. 9, GAW Report No. 241, WCRP-17/2018. 2019. 78 p.
16. Bodeker G.E., Boyd I.S., Matthews W.A. Trends and variability in vertical ozone and temperature profiles measured by ozonesondes at Lauder, New Zealand: 1986–1996 // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № D22. P. 28661–28681.
17. Груздев А.Н. Учет автокорреляции в задаче линейной регрессии на примере анализа общего содержания NO₂ в атмосфере // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 73–82.
18. Gruzdev A.N. Latitudinal structure of variations and trends in stratospheric NO₂ // Internat. J. Remote Sensing. 2009. V. 30. № 15. P. 4227–4246.
19. Hendrick F., Mahieu E., Bodeker G.E. et al. Analysis of stratospheric NO₂ trends above Jungfraujoch using ground-based UV-visible, FTIR, and satellite nadir observations // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12. P. 8851–8864.
20. McLinden C.A., Olsen S.C., Prather M.J., Liley J.B. Understanding trends in stratospheric NO_y and NO₂ // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № D21. P. 27787–27793.
21. Yela M., Gil-Ojeda M., Navarro-Comas M. et al. Hemispheric asymmetry in stratospheric NO₂ trends // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 13373–13389.

Long-Term Observations of Stratospheric Species at the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS: Analysis of Trends and Interannual Variations in Total Contents of O₃ and NO₂

A. N. Gruzdev¹*, A. Ya. Arabov¹, A. S. Elokhov¹, V. V. Savinykh¹, I. A. Senik¹,
A. N. Borovskii¹, and N. F. Elanskii¹

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky 3, Moscow, 119017 Russia

*e-mail: a.n.gruzdev@mail.ru

Results of long-term measurements and analysis of temporal variability of the total contents (TC) of O₃ and NO₂ at the Kislovodsk High Altitude Scientific Station (KHASS) and the Zvenigorod Scientific Station (ZSS) of the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS are presented. Ozone measurements are carried out since 1989 at the KHASS by direct and zenith-scattered ultraviolet solar radiation. NO₂ TC measurements at the KHASS were done in 1979–2008 by direct solar radiation of visible wavelength range in the morning and evening. At the ZSS, NO₂ measurements are carried out since 1990 by zenith-scattered visible solar radiation during morning and evening twilight. Analysis of long-term variability of the measurement data has been performed using the multivariate linear regression method. Annual and seasonally dependent estimates of the linear trends of O₃ and NO₂ have been obtained. A common feature of the long-term trends in the TCs of O₃ at KHASS and NO₂ at ZSS and KHASS are significant trends in the winter-spring season. The NO₂ trends at the two stations are negative, and the trend at KHASS is stronger than at ZNS. The O₃ trend at KHASS changes sign from positive to negative in the vicinity of the 2000s. For both species, estimates of variations associated with external (solar activity) and circulation factors have been obtained.

Keywords: O₃, NO₂, spectrometric measurements, variability, trends, interannual variations