УДК 551.510.4: 551.510.41; 551.510.534

# СОПОСТАВЛЕНИЕ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ТРЕНДОВ И МЕЖГОДОВЫХ ВАРИАЦИЙ СОДЕРЖАНИЯ NO<sub>2</sub> В АТМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ (ПРИБОР ОМІ) И НАЗЕМНЫХ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА СТАНЦИЯХ СЕТИ NDACC © 2024 г. А. Н. Груздев\*, А. С. Елохов

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

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

Поступила в редакцию 15.02.2024 г. После доработки 07.05.2024 г. Принята к публикации 29.05.2024 г.

Выполнено сопоставление результатов анализа долговременных трендов и межгодовых вариаций содержания  $NO_2$  в атмосфере по данным измерений с помощью прибора OMI (Ozone Monitoring Instrument) с борта спутника EOS-Aura в 2004–2020 гг. с результатами аналогичного анализа по данным независимых спектрометрических сумеречных измерений по рассеянному из зенита солнечному излучению на станциях Сети по обнаружению изменений состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change – NDACC). По тем и другим данным получены сезонно-зависимые оценки линейных трендов  $NO_2$  и вариаций содержания  $NO_2$  под действием 11-летнего цикла солнечной активности и крупномасштабных циркуляционных факторов, таких как Арктическое и Антарктическое колебания, вариации температуры поверхности океана в области Ниньо 3.4 и квазидвухлетняя цикличность зонального ветра в экваториальной стратосфере. Для межгодовых вариаций стратосферного содержания  $NO_2$  в среднем по всем станциям получено неплохое соответствие между оценками на основе спутниковых и наземных данных, но соответствие между оценками трендов заметно хуже. Наилучшее соответствие между результатами анализа получено для ст. Звенигород. Для стратосферного содержания  $NO_2$  оно отмечено в 80–90% случаев, а соответствие для тропосферного содержания практически 100%-е.

**Ключевые слова:** NO<sub>2</sub>, спектрометрические измерения, OMI, NDACC, сопоставление, тренды, межгодовые вариации, квазидвухлетняя цикличность, 11-летний солнечный цикл, Арктическое колебание, Антарктическое колебание, множественная линейная регрессия

DOI: 10.31857/S0002351524040066 EDN: JHGHFE

# ВВЕДЕНИЕ

Окислы азота NO и NO<sub>2</sub> играют ключевую роль в фотохимическом балансе атмосферного озона, дают существенный вклад в антропогенное загрязнение нижней тропосферы. Их источником в стратосфере служит фотолиз закиси азота N<sub>2</sub>O [Brasseur and Solomon, 2005], а антропогенным источником в тропосфере – сжигание ископаемого топлива – выбросы автомобилей и тепловых станций [Seinfeld and Pandis, 2006].

Содержание NO<sub>2</sub> определяется не только фотохимическими процессами, эмиссией в атмосферу, но и атмосферным переносом в составе семейства окислов азота. При этом NO<sub>2</sub> в стратосфере зачастую оказывается более чувствительной к воздействию циркуляционных факторов и вариаций уровня солнечной активности, чем озон, являясь, тем самым, хорошим индикатором этих процессов [Груздев и др., 2017, 2022]. Среди циркуляционных факторов влияния на NO<sub>2</sub> – такие как квазидвухлетняя цикличность в экваториальной стратосфере (КДЦ), Арктическое колебание (АК), внезапные стратосферные потепления, Эль-Ниньо – Южное колебание [Zawodny et al., 1991; Liley et al., 2000; Агеева и Груздев, 2017; Агеева и др., 2017; Груздев и Елохов, 2021; Груздев и др., 2022]. Их воздействие и влияние 11-летнего солнечного цикла (СЦ) определяют значительную часть межгодовой изменчивости NO<sub>2</sub>.

Измерения содержания NO<sub>2</sub> в стратосфере выполняются дистанционно спектрометрическими методами с поверхности земли и со спутников. Продолжительность наиболее длительных наземных измерений составляет около трех десятилетий, а на отдельных станциях и более. Ряд наземных станций с наблюдениями  $NO_2$  включены в состав Сети для обнаружения изменений состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change – NDACC). Используемые на ней приборы и методики прошли поверку в международных сравнениях.

В ряде работ получены оценки долговременных трендов содержания  $NO_2$  в столбе стратосферы по данным наземных измерений [Liley et al., 2000; Груздев, 2008; Cook et al. 2009; Gruzdev, 2009; Hendrick et al., 2012; Боровский и др., 2016; Yela et al., 2017]. Величина и знак трендов  $NO_2$  в столбе стратосферы варьируют в зависимости от географического положения станции; при этом можно отметить наличие их региональных особенностей [Груздев, 2008; Gruzdev 2009; Груздев и др., 2022]. В работе [Груздев и Елохов, 2021] получены первые оценки трендов вертикального распределения  $NO_2$ .

Попытки интерпретации стратосферных трендов  $NO_2$  с помощью численных фотохимических моделей не дали удовлетворительного объяснения их величины и знакопеременности [Fish et al., 2000; McLinden et al., 2001; Груздев, 2008]. В работе [Груздев, 2008] получена аналитическая зависимость трендов  $NO_2$  от трендов  $N_2O$ , озона и температуры. Вклады этих факторов в тренд  $NO_2$  могут компенсировать друг друга и, завися от широты и региона, влиять на величину и знак тренда  $NO_2$ .

Сеть наземных станций с наблюдениями  $NO_2$ немногочисленна, неоднородна и недостаточна для получения адекватной информации о глобальном поле  $NO_2$ . Учет наблюдаемых трендов  $NO_2$  в стратосфере необходим в важной проблеме разрушения стратосферного озона под действием озоноразрушающих веществ — хлорфторуглеродов (ХФУ). Неучет отрицательного тренда  $NO_2$ ведет к недооценке, а неучет положительного тренда — к переоценке вклада ХФУ в разрушение стратосферного озона [Груздев, 2009].

Пространственное распределение приземного и, в целом, нижнетропосферного содержания  $NO_2$  в высокой степени неоднородно. Долговременные тренды  $NO_2$  в нижней тропосфере в значительной степени определяются антропогенными и биогенными эмиссиями [Ossohou et al., 2019; Fortems-Cheiney et al., 2021]. Прибор OMI (Ozone Monitoring Instrument), установленный на спутнике EOS-Aura, позволяет проводить измерения о содержании  $NO_2$  в столбах стратосферы и тропосферы с высоким горизонтальным разрешением и практически глобальным охватом [Levelt et al., 2018], а продолжительность наблюдений  $NO_2$ , начатых в октябре 2004 г., приближается к двум десяткам лет. Таким образом, данные OMI вполне можно использовать для анализа многолетней изменчивости  $NO_3$ .

В работе [Dirksen et al., 2011] получена оценка линейного тренда стратосферного содержания  $NO_2$  по данным OMI за 5 лет измерений в окрестности новозеландской станции Лаудер. Она оказалась достаточно близкой к оценке тренда, полученного по данным наземных измерений. Более активно данные OMI привлекаются для анализа трендов тропосферного содержания  $NO_2$  [Hilboll et al., 2013; Schneider et al., 2015; Ossohou et al., 2019; Fortems-Cheiney et al., 2021; Jiang et al., 2022].

В первые годы работы прибора ОМІ была выполнена валидация его данных по результатам независимых наземных измерений, в том числе, с использованием данных NDACC [Boersma et al., 2008; Celarier et al., 2008; Ionov et al., 2008; Kramer et al., 2008; Груздев и Елохов, 2009; Gruzdev and Elokhov, 2010]. Соответствие между данными спутниковых и наземных измерений обычно характеризуют разностью (невязкой), коэффициентами линейной корреляции и регрессии между ними. Доминирующая особенность временной изменчивости NO, в стратосфере – годовой ход, и результаты валидации в терминах указанных характеристик без учета сезонных различий можно считать вполне удовлетворительными и даже хорошими.

Учет сезонной зависимости существенно влияет на согласие между данными. Кроме того, имеются другие факторы влияния на соответствие данных, такие как облачность и загрязнение нижней тропосферы окислами азота [Груздев и Елохов, 2023]. В работах [Груздев и Елохов, 2023, 2024] (далее ГЕ1 и ГЕ2, соответственно) предпринято систематическое сопоставление данных ОМІ с данными измерений на станциях NDACC. Корреляция между данными, как правило, резко ухудшается на межгодовом и, в еще большей степени, межсуточном масштабах. Очевидно, что ухудшение корреляции на межгодовом масштабе может влиять на соответствие между характеристиками межгодовых вариаций и долговременных трендов, оцениваемых по данным спутниковых и наземных измерений. По этой причине использованию спутниковых данных для анализа долговременной изменчивости должна предшествовать валидационная часть — поверка полученных результатов по результатам аналогичного анализа независимых данных.

Настоящая работа служит продолжением работ [ГЕ1, ГЕ2]. Ее цель — получение оценок межгодовых вариаций и линейных трендов  $NO_2$  по данным OMI в сравнении с оценками, полученными на основе данных измерений на станциях NDACC.

# ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Спектрометр ОМІ измеряет рассеянную атмосферой Земли солнечную радиацию в ультрафиолетовой и видимой областях спектра. Пространственное (горизонтальное) разрешение составляет 13×24 км<sup>2</sup> в надире. Для определения содержания NO<sub>2</sub> используется видимая часть спектрального диапазона. По результатам измерений восстанавливается содержание NO<sub>2</sub>. Стандартными продуктами измерений являются содержания NO, в вертикальных столбах тропосферы и стратосферы и общее содержание (ОС) NO<sub>2</sub>. В настоящей работе использованы данные измерений, полученные при пролетах спутника над окрестностями наземных станций (https://avdc.gsfc.nasa. gov/pub/data/satellite/Aura/OMI/V03/L2OVP/ OMNO2/). Благодаря приблизительно полярной солнечно-синхронизованной орбита спутника, измерения выполняются в дневное время.

В качестве наземных использованы данные наблюдений на станциях NDACC. Рис. 1 показывает расположение станций, данные которых использованы в настоящей работе. Подробная информация приведена в [ГЕ1, ГЕ2] Две станции расположены в арктической области, две находятся на побережье Антарктиды, по три станции – в средних широтах северного (СП) и южного (ЮП) полушарий и две станции – в тропиках ЮП. Три южнополушарные станции расположены на океанических островах.

На подавляющем большинстве станций используются два типа спектральных приборов: спектрометры SAOZ производства Франции и сканирующие монохроматоры [ГЕ1]. Наблюдения NO<sub>2</sub> выполняются во время утренних и/или вечерних сумерек на восходе и заходу Солнца в окрестности зенитных углов Солнца 90° по рассеянному из зенита солнечному излучению видимого спектрального диапазона. Данные находятся в открытом доступе по адресу https://ndacc. larc.nasa.gov/instruments/uv-visible-spectrometer. По измеренным спектрам рассеянной радиации методом DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) определяется так называемое наклонное содержание NO<sub>2</sub> [Елохов, Груздев, 2000; Platt and Stuts, 2008]. По нему на всех станциях, кроме ст. Звенигород, определяется ОС NO<sub>2</sub>. Оно рассчитывается путем деления наклонного содержания на воздушную массу NO<sub>2</sub>, значение которой задается априори.

На ст. Звенигород по результатам измерений наклонного содержания  $NO_2$  путем решения обратной задачи восстанавливается вертикальное распределение  $NO_2$  и по нему рассчитываются значения содержания  $NO_2$  в столбах стратосферы и тропосферы, а также OC  $NO_2$  [Елохов, Груздев, 2000].

Из-за особенностей метода сумеречных зенитных наблюдений OC  $NO_2$ , определяемое в наземных измерениях (кроме ст. Звенигород), лучше соответствует по величине стратосферному продукту OMI [ГЕ1, ГЕ2]. Используемый на ст. Звенигород уникальный метод наблюдений  $NO_2$  с восстановлением вертикального профиля  $NO_2$  позволяет получать значения содержания  $NO_2$  в столбах стратосферы и тропосферы, т.е. продукты, эквивалентные продуктам OMI [Елохов и Груздев, 2000; Груздев и Елохов, 2021].

Согласно работе [Висsela et al., 2013], глобальная усредненная погрешность измерений содержания NO<sub>2</sub> в тропосферном столбе с помощью прибора OMI составляет около  $10^{15}$  молекул/см<sup>2</sup> в безоблачных условиях, а при сплошной облачности она увеличивается примерно втрое. Относительная погрешность определения содержания NO<sub>2</sub> в тропосфере в загрязненных регионах при облачности может достигать 100%. Погрешность определения содержания NO<sub>2</sub> в стратосферном столбе составляет около  $0,2 \cdot 10^{15}$  молекул/см<sup>2</sup>.

Случайная погрешность определения содержания  $NO_2$  в стратосфере в наземных измерениях зависит от станции и составляет порядка  $0.1 \cdot 10^{15}$  молекул/см<sup>2</sup> и менее [ГЕ1].

Случайная погрешность определения содержания  $NO_2$  в нижних слоях тропосферы (это касается только ст. Звенигород) зависит от уровня и стабильности загрязнения. Относительная погрешность варьируется от 5% до 100. Средние долгосрочные абсолютные погрешности определения содержания  $NO_2$  в приземном слое атмосферы (ПСА) составляют 0.24 · 10<sup>15</sup> и 0.29 · 10<sup>15</sup> молекул/см<sup>2</sup> утром и вечером соответственно, что равняется примерно 20% от средних долгосрочных значений содержания  $NO_2$ .

Из-за различной геометрии наблюдений горизонтальное разрешение наземных и спутниковых данных отличается. Разрешение результатов измерений на приборе ОМІ находится в пределах нескольких десятков километров (13 км х 24 км в надире). При наземных сумеречных зенитных наблюдениях в Звенигороде горизонтальное разрешение тропосферных данных определяется главным образом полем зрения прибора и составляет несколько сотен метров, то есть данные относятся к небольшой окрестности станции [ГЕ1].

Горизонтальное разрешение данных о содержании NO, в стратосферном столбе, полученных в результате наземных измерений на станциях NDACC, составляет сотни километров [ГЕ1]. Алгоритм определения содержания NO<sub>2</sub> в стратосфере по результатам измерений на приборе OMI в районах с тропосферным загрязнением использует сглаживание по прямоугольной области размером в несколько сотен километров [Bucsela et al., 2013]. Сглаживание приводит к удалению из стратосферного поля NO, неоднородностей с масштабами, меньшими, чем масштаб усреднения. Таким образом, масштаб сглаживания стратосферных данных ОМІ над станциями с тропосферным загрязнением окислами азота сопоставим по порядку величины с горизонтальным разрешением (масштабом усреднения) данных наземных измерений. Однако, положения областей, к которым относятся спутниковые и наземные данные, различаются. Стратосферные данные ОМІ относится к районам, включающим станцию, в то время как наземные данные относится к районам, смещенным в сторону Солнца.

Ошибки измерений, различия в пространственном разрешении спутниковых и наземных данных и различия в расположении областей, представленных данными, могут приводить к расхождениям между данными и, как следствие, к расхождениям между результатами их анализа.

Результаты наземных и спутниковых измерений были подвергнуты статистической проверке с целью отбраковки из них больших выбросов [ГЕ1]. Поскольку NO<sub>2</sub> имеет значительный суточный ход, результаты наземных измерений пересчитывались ко времени спутниковых наблюдений в окрестности станций путем интерполяции/экстраполяции с поправкой на нелинейные фотохимические изменения NO<sub>2</sub>, обусловленные суточным ходом [ГЕ1].

Размер окрестности, из которой делается выборка данных ОМІ, влияет на результаты сопоставления. Соответствие между спутниковыми и наземными данными улучшается при уменьшении окрестности до размеров, сопоставимых с горизонтальным разрешением спутниковых измерений, но при этом количество доступных для сопоставления данных значительно сокращается [ГЕ1].

Результаты валидации в [ГЕ1, ГЕ2] получены по данным ОМІ из окрестностей станций с радиусом 10 км. Этот же критерий применен в настоящей работе для станций со значительным уровнем тропосферного содержания NO<sub>2</sub>. Это станции Звенигород, От-Прованс, Иссык-Куль, Бауру и Лаудер [ГЕ2]. Для остальных станций, а это полярные и островные станции, радиус окрестности принят равным 30 км с целью увеличения доступных для сопоставления данных, количество которых относительно невелико в полярных регионах.

#### МЕТОД АНАЛИЗА

Для анализа вариаций и трендов NO<sub>2</sub> использованы среднемесячные данные. Анализ выполнен с помощью модели множественной линейной регрессии. Ее основные особенности описаны, например, в [Груздев и Елохов, 2021].

Линейную регрессионную модель удобно записать в матричной форме [Драпер и Смит, 2007]:

$$Y = X\beta + \varepsilon, \tag{1}$$

где Y — вектор наблюдений длины *n* (анализируемый ряд), X — матрица предикторов (независимых переменных) размера ( $n \times p$ ), p — число предикторов,  $\beta$  — вектор неизвестных коэффициентов (искомых коэффициентов регрессии) длины p,  $\varepsilon$  — вектор ошибок (остатков) длины *n* (остаточный ряд).

В качестве предикторов (независимых переменных) использованы следующие функции:

константа (единица); линейная по времени функция, описывающая линейный тренд; индекс Арктического (в СП) и Антарктического (в ЮП) колебаний (АК и ААК, соответственно) (https://psl. noaa.gov/data/climateindices/list/) для учета влияния на NO<sub>2</sub> стратосферного полярного вихря; зональная скорость экваториального стратосферного ветра на изобарической поверхности 40 гПа (http://www.geo.fu-berlin.de/en/met/ag/strat/ produkte/qbo/index.html) для учета эффекта КДЦ в NO<sub>2</sub>; индекс Ниньо 3.4, характеризующий среднюю температуру поверхности воды в экваториальном поясе Тихого океана 170°W-120°W по долготе и 5°N-5°S по широте (https://psl.noaa.gov/ data/climateindices/list/) - для учета влияния на NO, крупномасштабных процессов, связанных с Эль-Ниньо – Южным колебанием; поток радиоизлучения Солнца F10.7 (https://www.ngdc.noaa. gov/stp/space-weather/ и https://www.spaceweather. gc.ca/solarflux/sx-en.php) в качестве индекса солнечной активности.

Отклик содержания атмосферных примесей на воздействие циркуляционных факторов и 11-летнего солнечного цикла (СЦ) может запаздывать относительно самого воздействия [Груздев, 2011, 2014; Агеева и Груздев, 2017]. Поэтому в регрессионную модель включены не по одному, а по два индекса КДЦ, Ниньо 3.4 и *F*10.7. 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). Для периода совместных спутниковых и наземных наблюдений NO<sub>2</sub> смещение составило 6 мес. для КДЦ, 16 мес. для индекса Ниньо-3.4 и 35 мес. для индекса солнечной активности.

489

Для КДЦ и СЦ характерно наличие основного, доминирующего колебания. Поэтому по откликам на прямое и ортогональное ему воздействие можно приблизительно оценить величину и фазу (запаздывание) суммарного отклика. Этот прием неприменим к эффекту Ниньо 3.4, так как период колебаний индекса Ниньо 3.4 изменяется в широких пределах.

Все искомые коэффициенты регрессионной модели ( $\beta_k$ , k=1, ..., p в формуле (1)) представлены в виде разложений в ряд Фурье по парам синус-косинус, соответствующим гармоникам годового цикла с целью учета годового хода NO<sub>2</sub>, сезонной зависимости трендов NO<sub>2</sub> и сезонной зависимости воздействия других предикторов на NO<sub>2</sub>. В разложении коэффициент при тренде использованы три гармоники: годовая, полугодовая и третьгодовая, а в разложении остальных коэффициентов – годовая и полугодовая гармоники.

Таким образом, регрессионная модель включает в качестве независимых переменных свободный член, линейный по времени член (тренд), индекс АК или ААК, ортогональные пары индексов КДЦ, Ниньо 3.4 и *F*10.7, а также члены с парами Фурье-разложений, — всего 47 переменных.

Для решения системы уравнений регрессионной модели использован предложенный в [Груз-



**Рис.** 1. Расположение станций NDACC с измерениями содержания NO<sub>2</sub> сумеречным методом.



**Рис.** 2. (а–б): Годовая (левая часть), месячные (средняя часть) и сезонные (правая часть графиков) оценки размаха колебаний стратосферного содержания NO<sub>2</sub> по данным OMI (красный цвет) и общего содержания NO<sub>2</sub> по наземным данным (синий цвет) на ст. Реюньон (а) и Кергелен (б) под действием 11-летнего солнечного цикла. Вертикальные отрезки – 95% доверительные интервалы. (в–г): Задержка колебаний NO<sub>2</sub>, вызванных 11-летним солнечным циклом, на ст. Реюньон (в) и Кергелен (г) относительно 11-летнего солнечного цикла.

дев, 2019] метод, позволяющий учитывать наличие памяти в данных наблюдений в широком диапазоне временных масштабов. Ее учет ведет к увеличению доверительных интервалов искомых коэффициентов регрессии и тем самым повышает степень надежности регрессионных оценок, избавляя от, возможно, ложных статистических выводов, которые могут быть при заниженных значениях доверительных интервалов.

# РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Рассмотрим и сопоставим по данным спутниковых и наземных измерений тренды и изменения содержания NO, под действием циркуляционных и солнечного факторов. Значения трендов и амплитуды вариаций NO<sub>2</sub>, если специально не оговорено, представлены в процентах относительно соответствующих по времени значений содержания NO<sub>2</sub>, полученных осреднением по месяцам, сезонам и за год. При такой нормировке зимние оценки трендов и вариаций стратосферного содержания NO<sub>2</sub> при равных абсолютных значениях будут больше, а летние оценки меньше, чем прочие оценки, ввиду зимнего минимума и летнего максимума NO, в стратосфере [ГЕ1]. Рассмотрим последовательно изменения содержания NO, под действием внешнего фактора – 11-летнего СЦ,

циркуляционных факторов – КДЦ, АК и ААК, вариаций ТПО в области Ниньо 3.4 и в виде многолетних линейных трендов.

Качество соответствия между результатами анализа спутниковых и наземных данных будем характеризовать количественными показателями, сведенными в таблице. Считаем, что согласие между данными имеется, если соответствующие наземная и спутниковая оценки статистически незначимы на уровне 0.05 или значимы и имеют одинаковые знаки. В таблице для всех станций представлены числа случаев соответствия (ЧСС) между данными по каждому фактору (столбцы 3-7 и в сумме по всем факторам (столбцы 9, 10). При этом принимаем в расчет только годовые и сезонные оценки. В скобках приведены ЧСС со статистически значимыми оценками. Жирным курсивом выделены максимальные по каждому факторам и в сумме по всем факторам ЧСС. Они определенны отдельно для полярных и неполярных станций, так как на полярных станциях отсутствуют зимние данные. В столбце 8 приведены суммарные по факторам числа таких случаев. В третьей и четвертой снизу строках даны суммарные по станциям ЧСС. Две последние строки содержат процентные доли ЧСС для стратосферного и тропосферного содержаний NO<sub>2</sub> на ст. Звенигород.



**Рис.** 3. Аналогично рис. 2, но для ст. От-Прованс (а, в) и Звенигород (б, г). Для ст. Звенигород использованы значения стратосферного содержания NO<sub>2</sub>.

#### Эффект 11-летнего солнечного цикла

На рис. 2 приведены примеры сезонных зависимостей откликов NO, на 11-летний СЦ на ст. Реюньон Кергелен в ЮП. Станции расположены в одном долготном секторе. Для них получено наилучшее соответствие между спутниковыми и станционными оценками воздействия СЦ на NO<sub>2</sub>. ЧСС для ст. Реюньон равно максимальному значению 5 из пяти, а для станции Кергелен оно равно 4, причем все согласующиеся между собой оценки статистически значимы (столбец 3 в таблице). Магнитуда годового отклика составляет около 10% на ст. Реюньон и 5% на ст. Кергелен (рис. 2а, б). Максимальное воздействие приходится на зиму, минимальное - на лето. Изменения содержания NO2 в течение СЦ в летние сезоны составляют около 5%, а в зимние месяцы достигают 20% на ст. Реюньон и 15% на ст. Кергелен 15% на ст. Кергелен. Отметим, что при нормировке отклика NO, не на среднемесячные/среднесезонные (как на рис. 2а, б). а на среднегодовое содержание NO<sub>2</sub>, разность между зимними и летними оценками уменьшается благодаря годовому ходу NO<sub>2</sub>.

Фазовая задержка отклика  $NO_2$  на СЦ на ст. Реюньон во все сезоны и в целом за год составляет около 3 лет (рис. 2в), то есть близка к <sup>1</sup>/<sub>4</sub> периода солнечного цикла. Таким образом, изменения стратосферного содержания  $NO_2$  на ст. Реюньон,

связанные с 11-летним СЦ, примерно ортогональны колебаниям уровня солнечной активности.

Согласно рис. 2г, вариации содержания  $NO_2$  на ст. Кергелен, вызванные влиянием СЦ, большую часть года следуют за уровнем солнечной активности с запаздыванием 1-2 года. Задержка в весенние периоды, оцененная по наземным данным, возрастает до 3 лет.

На рис. 3 представлены магнитуды и фазы откликов  $NO_2$  на СЦ на ст. От-Прованс и Звенигород, для которых также выявлено хорошее соответствие между откликами, полученными по данным наземных и спутниковых измерений. Станции находятся в европейском долготном секторе и различаются по широте на 12°.

Форма сезонной зависимости магнитуды отклика на ст. От-Прованс при сдвиге на полгода похожа на форму зависимостей на рис. 2 для среднеширотной и тропической станций в ЮП. Максимум магнитуды около 10% приходится на лето, минимум — на осенне-зимний период (рис. 3а).

Сезонные зависимости магнитуд откликов NO<sub>2</sub> на ст. Звенигород (рис. 36) и Соданкюля в основных чертах противоположны по форме на сезонной зависимости на ст. От-Прованс. Одна-ко при нормировке магнитуды на среднегодовое значение содержания NO<sub>2</sub> формы сезонных зависимостей откликов NO<sub>2</sub> на этих станциях становятся похожими. Таким образом, отклики NO<sub>2</sub> на



**Рис.** 4. Зимние (а), весенних (б), летние (в) и годовые (г) оценки изменений стратосферного содержания NO<sub>2</sub> по данным OMI (красный цвет) и общего (для ст. Звенигород – стратосферного) содержания NO<sub>2</sub> по наземным данным (синий цвет) под отклика NO<sub>2</sub> на воздействие 11-летнего цикла солнечной активности в зависимости от широты. Единицы – магнитуда (размах) колебаний NO<sub>2</sub> в течение полного солнечного цикла. Вертикальные отрезки – 95% доверительные интервалы. Концы доверительных интервалов, выходящие за пределы графиков, обрезаны. Номера станций соответствуют столбцу 1 таблицы.

СЦ на ст. Кергелен, Реюньон, От-Прованс, Звенигород и Соданкюля при нормировке на среднегодовые значения содержания NO<sub>2</sub> принимают максимальные значения в одно время: летом на станциях СП и зимой на станциях ЮП.

Фазовая задержка отклика  $NO_2$  на ст. Звенигород обычно незначительно отличается от нуля (рис. 3г). Это характерно также для фазы отклика на ст. От-Прованс в течение трех сезонов с весны по осень (рис. 3в). Однако задержка в зимний сезон равна 6 мес. Таким образом, отклик  $NO_2$ на воздействие 11-летнего СЦ в зимние сезоны От-Прованс находится примерно в противофазе с СЦ и с откликом  $NO_2$  на ст. Звенигород.

Согласно третьей снизу строке таблицы, соответствие между откликами стратосферного содержания  $NO_2$  на СЦ по спутниковым и наземным данным отмечено в целом по всем станциям в 70% случаев, причем эффект СЦ в  $NO_2$  выявлен на статистически значимом уровне в 41% случаев (или в 59% от ЧСС). Эффект СЦ выявлен весной и на арктических станциях.

Широтные распределения зимних, весенних, летних и годовых оценок магнитуды (размаха) и фазовой задержки колебаний стратосферного содержания NO<sub>2</sub>, обусловленных 11-летним СЦ приведены на рис. 4 и 5. Годовой отклик NO<sub>2</sub> на СЦ в СП в целом статистически значим по тем

и другим данным (на ст. Скорсбисунн только по наземным данным) с магнитудой в пределах от 4% до 9% (рис. 4г). Годовой отклик по данным OMI, как правило, заметно меньше, чем по наземным данным, но не противоречит им ввиду взаимно пересекающихся доверительных интервалов. Обратное соотношение амплитуд годовых откликов отмечено в средних широтах ЮП. Оценки, полученные по данным OMI, статистически значимы на всех среднеширотных станциях ЮП, однако годовой отклик на СЦ по наземным данным выявлен лишь на ст. Кергелен. Наиболее значительный годовой отклик NO<sub>2</sub> на СЦ (5–10%) получен в тропиках ЮП.

Сезонные статистически значимые оценки магнитуд откликов NO<sub>2</sub> на СЦ варьируют в пределах примерно от 5% до 25% в зависимости от станции и сезона (рис. 4а—в). Максимальное значение 25% получено для зимнего отклика NO<sub>2</sub> по результатам наземных измерений на ст. Звенигород (рис. 4а). Довольно сильный отклик с магнитудой 10—13% выявлен весной в Арктике (рис. 5б). В летние сезоны, когда можно ожидать наиболее сильное неопосредованное влияние колебаний уровня солнечной активности на состав атмосферы (например, через фотохимические процессы при незначительной роли атмосферной циркуляции), отклик NO<sub>2</sub> на среднеширотных европейских станциях и в Ар-



**Рис. 5.** Задержка зимнего (а), весеннего (б), летнего (в) и годового (г) откликов стратосферного содержания NO<sub>2</sub> по данным OMI (красный цвет) и общего (для ст. Звенигород – стратосферного) содержания NO<sub>2</sub> по наземным данным (синий цвет) на воздействие 11-летнего цикла солнечной активности в зависимости от широты. Номера станций соответствуют столбцу 1 таблицы.

ктике заключен в пределах 7–10% (рис. 4в). Он сильнее, чем в средних широтах ЮП.

Рассмотрим широтное распределение фазы отклика  $NO_2$  на СЦ. Если рассматривать только статистически значимый результат (рис. 4г), то годовой отклик  $NO_2$  на СЦ в средних и тропических широтах ЮП следует за СЦ с запаздыванием на несколько лет (рис. 5г). Задержка годового отклика  $NO_2$  в СП по данным ОМІ также положительная и варьирует с широтой в пределах 0-3 лет. Годовой отклик по наземным данным на европейских станциях СП (см. рис. 1) находится в фазе с уровнем солнечной активности. При этом годовые оценки вариаций содержания  $NO_2$  по наземным данным под действием СЦ на неевропейских станциях Иссык-Куль и Скорсбисунн находятся в противофазе друг с другом.

Изменения содержания  $NO_2$  в европейском секторе СП в летние сезоны следуют за уровнем солнечной активности без задержки (рис. 5в), но задержка на арктической ст. Скорсбисунн составляет 2–3 года. По контрасту с СП статистически значимый летний отклик  $NO_2$  в средних широтах (по данным OMI) и тропиках ЮП запаздывает относительно СЦ примерно на ¼ периода.

Отметим довольно хорошее соответствие зимних задержек отклика  $NO_2$ , полученных по спутниковым и наземным данным, в СП, тропиках и на ст. Кергелен в ЮП (рис. 5а).

#### Эффект квазидвухлетней цикличности

493

Соответствие между откликами NO<sub>2</sub> на КДЦ в экваториальной стратосфере по спутниковым и наземным данным отмечено в целом по всем станциям в 66% случаев, при этом ненулевой эффект КДЦ в NO<sub>2</sub> выявлен в 43% случаев (в 65% от ЧСС) (третья снизу строка таблицы). Средние показатели для эффекта КДЦ близки к средним показателям для эффекта СЦ. Лучшее согласие между спутниковыми и наземными оценками эффекта КДЦ в полярных областях получено для ст. Скорсбисунн (причем по всем четырем оценкам), а на остальных станциях – для среднеширотных европейских и тропических станций.

На рис. 6а, б приведены сезонно зависимые магнитуды откликов стратосферного содержания NO<sub>2</sub> на КДЦ в экваториальной стратосфере на станциях Бауру и Звенигород. Характер сезонных зависимостей для двух станций одинаков. Им свойственны зимние максимумы (~12% на обеих станциях со значениями 13–17% в середине зимы). Эффект КДЦ с магнитудой 3% на ст. Звенигород выявлен и в целом за год.

Сезонные зависимости фаз откликов NO<sub>2</sub> на КДЦ на двух станциях совершенно различны (рис. 6в, г). Фаза колебаний NO<sub>2</sub> на ст. Звенигород в зимние сезоны противоположна фазе в другие сезоны. Изменения содержания NO<sub>2</sub> под действием экваториальной КДЦ в период с весны по осень находятся примерно в фазе (с задержкой до

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА



Рис. 6. (а-б): Годовая (левая часть), месячные (средняя часть) и сезонные (правая часть графиков) оценки размаха колебаний стратосферного содержания NO, по данным OMI (красный цвет) и общего (для ст. Звенигород – стратосферного) содержания NO, по наземным данным (синий цвет) на ст. Бауру (а) и Звенигород (б) под действием экваториальной КДЦ. Вертикальные отрезки – 95% доверительные интервалы. (в-г): Задержка квазидвухлетних колебаний NO, на ст. Бауру (в) и Звенигород (г) относительно колебаний скорости экваториального ветра на уровне 40 гПа.

3 мес.) с колебаниями скорости ветра, а изменения в зимние сезоны происходят примерно в противофазе с колебаниями скорости ветра. Наряду с этим близкие к противофазным к скорости ветра колебания содержания NO, на ст. Бауру характерны для летних сезонов (рис. 6в). Изменения содержания NO, весной (по тем и другим данным) и осенью (только по наземным данным) здесь находятся примерно в фазе с КДЦ скорости ветра, а изменения в зимние сезоны ортогональны им, опережая их примерно на ¼ периода КДЦ. Сезонные зависимости фаз откликов NO<sub>2</sub> на экваториальную КДЦ на тропической ст. Бауру в ЮП и среднеширотной ст. Звенигород в СП в общих чертах противоположны друг другу.

Годовые оценки магнитуд откликов NO, на КДЦ по спутниковым и наземным данным (около 3%) хорошо согласуются между собой. Вполне хорошее соответствие годовых оценок фаз колебаний NO<sub>2</sub>, характеризуемых задержкой в несколько месяцев, отмечено для ст. Звенигород (рис. 6г). Однако годовые отклики NO<sub>2</sub> на ст. Бауру но данным OMI и станционным данным противоположны по фазе друг другу (рис. 6в). Задержка по данным OMI близка к нулю и не сильно отличается от задержек годовых откликов на ст. Звенигород. Годовой отклик по наземным измерениям на ст. Бауру находится в противофазе с КДЦ скорости ветра.

Рассмотрим отклики NO2 на КДЦ на других станциях. Лучшее согласие амплитудных и фазовых характеристик отклика NO<sub>2</sub> с характеристиками, полученными для ст. Бауру, выявлено на ст. Реюньон, близкой по широте к ст. Бауру, но расположенной в восточном полушарии (рис. 1). Наилучшее соответствие отклика NO, на КДЦ с откликом на ст. Звенигород отмечено на ст. Соданкюля. Соответствие откликов NO<sub>2</sub> на других станциях откликам на ст. Бауру или Звенигород проявляется фрагментарно, в отдельные сезоны.

На рис. 7 показаны широтные распределения зимних, весенних, летних и годовых оценок магнитуд (размаха) колебаний стратосферного содержания NO, под действием экваториальной КДЦ. Сразу отметим вполне хорошее качественное и количественное соответствие между оценками, полученными по данным ОМІ и по наземным данным. Максимальный эффект ~15% отмечен на ст. Звенигород (№ 3) зимой, в то время как на ближайшей к ней по широте западноевропейской ст. От-Прованс (№ 4) зимний эффект вдвое-втрое слабее (рис. 7а). Изменения содержания NO<sub>2</sub> под действием КДЦ в зимний период в средних широтах ЮП находятся в тех же пределах, 5-8% (для

494



**Рис.** 7. Аналогично рис. 4, но для отклика NO<sub>2</sub> на КДЦ зональной скорости ветра на уровне 40 гПа в экваториальной стратосфере. Единицы – магнитуда (размах) колебаний NO<sub>2</sub> в течение полного цикла КДЦ.

ст. Кергелен только по данным OMI), а на тропических станциях достигают 10%.

В весенний период сигнал КДЦ в NO<sub>2</sub> с магнитудой от 5% до 10% (От-Прованс) выявлен в европейском секторе (одновременно по данным ОМІ и наземным данным — только на ст. Звенигород), включая полярную ст. Соданкюля (рис. 76). Близкий по амплитуде эффект получен по наземным данным в средних и тропических широтах ЮП (на ст. Лаудер (№ 8) — также по данным ОМІ). Эффект КДЦ на тропических станциях также уверенно выявляется, но с заметно большей амплитудой по спутниковым данным.

495

Статистически значимый эффект КДЦ в летний сезон выявлен по тем и другим данным для всех станций, кроме антарктических станций

Таблица. Число случаев соответствия между сезонными и годовыми оценками, полученными по наземным и спутниковым данным, по каждому фактору, сумма предельных значений и общая сумма таких случаев. В скобках — число случаев со статистически значимыми оценками. Жирным курсивом выделены максимальные по каждому фактору значения при этом значения для полярных и неполярных станций рассматриваются по отдельности.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Станция	Широта, градусы	СЦ	КДЦ	AO/AAO	Ниньо 3.4*	Тренд	Сумма случаев с максимальными значениями	Сумма общая	Сумма общая, %
1.Скорсбисунн**	70.48 N	3 (1)	4 (2)	4	8(1)	3	19 (4)	22 (4)	92 (17)
<ol> <li>Соданкюля<sup>**</sup></li> </ol>	67.37 N	2 (1)	2 (2)	3	8 (2)	3	8 (2)	18 (5)	75 (21)
3. Звенигород страт.	55.7 N	4 (3)	4 (4)	4 (2)	9(1)	4(1)	17 (6)	25 (11)	83 (37)
3. Звенигород троп.	55.7 N	5 (1)	5 (3)	5 (2)	10 (2)	5 (2)	30 (10)	30 (10)	100 (33)
4. Обс. От-Прованс	43.94 N	4 (3)	4 (3)	4(1)	6 (2)	2 (1)	4 (3)	20 (10)	67 (33)
5. Иссык-Куль	42.62 N	4 (2)	0	2	7	3 (2)	0	16 (4)	53 (13)
6. о.Реюньон	21.1 S	5 (5)	4 (4)	4	5	2	9 (9)	20 (9)	67 (30)
7. Бауру	22.3 S	4 (4)	4 (3)	4(1)	8	0	4 (3)	20 (8)	63 (27)
8. Лаудер	45.04 S	2	3 (3)	3	8	1 (1)	0	17 (4)	57 (13)
9. о. Кергелен	49.3 S	4 (4)	3(1)	2 (1)	7	3 (3)	0	19 (9)	63 (30)
10. о. Маккуори	54.5 S	1	2 (2)	5 (1)	9	3	14 (1)	20 (3)	67 (10)
11, Дюмон-Дюрвиль**	66.67 S	3	3	4	8(1)	3	15(1)	21 (1)	88 (4)
12. Ноймайер***	70.63 S	3	4	4	8	4	23	23	96
Все станции***		39 (23)	37 (24)	43 (6)	91 (7)	32 (9)	143 (42)	243 (69)	72 (21)
Все станции**, %		70 (41)	66 (43)	77 (11)	81 (6)	57 (16)	43 (13)	72 (21)	
Звенигород страт, %		80 (60)	80 (80)	80 (40)	90 (10)	80 (20)	57 (20)	83 (37)	
Звенигород троп, %		100 (20)	100 (60)	100 (40)	100(20)	100 (40)	87 (27)	100 (33)	

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 60 № 4 2024



**Рис. 8.** Аналогично рис. 5, но для отклика NO<sub>2</sub> на КДЦ зональной скорости ветра на уровне 40 гПа в экваториальной стратосфере.

и арктической ст. Скорсбисунн ( $\mathbb{N}$  1) (рис. 7в). Магнитуда везде примерно одинаковая, около 5%, но на ст. Реюньон ( $\mathbb{N}$  6) по данным ОМІ она в 1.5 раза больше.

В осенний период эффект КДЦ большей частью слабее, чем в другие сезоны. Однако выделяется ст. Соданкюля (№ 2), где эффект достигает 8%.

Годовые оценки эффекта КДЦ, полученные по спутниковым и наземным данным, достаточно хорошо соответствуют друг другу (рис. 7г). Их значения в европейском секторе составляют 3–5%, но на ст. Скорсбисунн (№ 1) достигают 10%. Статистически значимые годовые оценки эффекта КДЦ в ЮП меньше, чем в СП – на уровне нескольких процентов.

Широтные распределения фазовой задержки колебаний NO<sub>2</sub> относительно колебаний скорости экваториального ветра с зимнего по летний сезоны и в целом за год приведены на рис. 8. Отрицательная задержка означает, что колебания NO<sub>2</sub> опережают колебания скорости экваториального ветра на уровне 40 гПа.

Рис. 8 указывает на значительную зависимость фазы отклика NO<sub>2</sub> на КДЦ от сезона и широты. Отметим некоторые основные закономерности. Весенняя и годовая (на ст. Бауру ( $\mathbb{N}_{2}$  7) – только по данным OMI) задержки на тропических станциях ЮП близки к нулевым (рис. 8б, г). Колебания NO<sub>2</sub> под действием КДЦ в зимние сезоны на несколько лет опережают колебания скорости ветра (рис. 8а). Колебания NO<sub>2</sub> в летние сезоны на ст. Бауру ( $\mathbb{N}_{2}$  7) происходят примерно в противофазе с колебаниями скорости ветра, а на ст. Реюньон (№ 6) они ортогональны колебаниям скорости ветра, опережая их на ¼ периода КДЦ (рис. 8в).

Колебания NO<sub>2</sub> весной, летом и в целом за год на большинстве станций СП (рис. 86-г), весной в средних широтах ЮП (на ст. Кергелен (№ 9) – только по наземным данным; рис. 86) следуют за колебаниями скорости ветра без задержки или с небольшой задержкой (менее 6 мес.). Колебания NO<sub>2</sub> в зимние сезоны на ст. Звенигород (№ 3, рис. 8а) и летние сезоны на ст. Скорсбисунн (№ 1, рис. 8б) примерно противоположны по фазе колебаниям скорости ветра.

Задержка возрастает в сторону положительных значений с увеличением широты в средних широтах обоих полушарий зимой (рис. 8а), летом в ЮП (рис. 8в) и весной (в ЮП только по наземным, а в СП – только по спутниковым данным; рис. 8б). Резкое изменение фазы колебаний NO<sub>2</sub>, примерно на полпериода КДЦ, от приблизительно со-фазных до противофазных с колебаниями скорости ветра, происходит зимой в средних широтах СП (при переходе от ст. От-Прованс (№ 4) к ст. Звенигород (№ 3)) и летом в арктических широтах (при переходе от ст. Соданкюля (№ 2) к ст. Скорсбисунн (№ 1).

# Эффекты Арктического и Антарктического колебаний

Отклики NO<sub>2</sub> на AK, AAK и вариации TПО в области Ниньо 3.4 рассчитаны как изменения содержания NO<sub>2</sub> при изменении индексов на 2<sub>0</sub>,



**Рис.** 9. Весенние оценки (а) изменений стратосферного содержания NO<sub>2</sub> по данным OMI (красный цвет) и общего (для ст. Звенигород – стратосферного) содержания NO<sub>2</sub> по наземным данным (синий цвет) под влиянием Арктического в СП и Антарктического в ЮП колебаний и осенние оценки (б) изменений стратосферного содержания NO<sub>2</sub>, связанных с запаздывающим на 16 мес. воздействием вариаций ТПО в зоне Ниньо 3.4. Единицы – изменение содержания NO<sub>2</sub> при изменении индексов АК, ААК или Ниньо 3.4 на два среднеквадратичных отклонения (2σ). Вертикальные отрезки – 95% доверительные интервалы. Концы доверительных интервалов, выходящие за пределы графиков, обрезаны. Номера станций соответствуют столбцу 1 таблицы.

где σ – среднеквадратичные отклонения (СКО) индексов АК, ААК и Ниньо 3.4, рассчитанные по эмпирическим данным.

Значение ЧСС для отклика стратосферного содержания NO<sub>2</sub> на AK и AAK довольно велико (77% согласно третьей снизу строке таблицы), но оно включает главным образом статистически незначимые оценки. Статистически значимый эффект AK в СП, одновременно по спутниковым и наземным данным, выявлен лишь весной на среднеширотных европейских ст. Звенигород ( $\mathbb{N}$  3) и От-Прованс ( $\mathbb{N}$  4, рис. 9а). Эффект AAK в средних широтах ЮП выявлен летом. Эффекты AK/AAK на полярных станциях не выявлены (столбец 4 таблицы). Отрицательные знаки эффектов AK/AAK указывают на обратную связь откликов NO<sub>2</sub> с интенсивностью полярного вихря.

Максимальный, в противофазе с индексом AK, эффект в NO<sub>2</sub> отмечен по спутниковым и наземным данным на ст. Звенигород (№ 3, рис. 9а). Изменения содержания NO<sub>2</sub> составляют 5–7% при изменении индекса AK на двойное CKO. Эффект AAK в ЮП имеет тот же порядок величины.

# Эффект вариаций температуры поверхности океана в области Ниньо 3.4

Эффект влияния вариаций ТПО в зоне Ниньо 3.4 на стратосферное содержание  $NO_2$  в подавляющем большинстве случаев не выявлен на статистически значимом уровне ни по сезонам, ни в целом за год (столбец 6 таблицы), и высокий показатель ЧСС для него (81%) обусловлен статистически незначимыми оценками. Эффект вариаций ТПО выявлен в основном на полярных станциях.

На рис. 96 приведено широтное распределение запаздывающего (с задержкой 16 месяцев) откли-

ка стратосферного содержания NO<sub>2</sub> в осенние сезоны на вариации ТПО в зоне Ниньо 3.4. Отклики NO<sub>2</sub> на арктических станциях Скорсбисунн (№ 1) и Соданкюля (№ 2) противоположны по знаку и составляют около -20% и 15%, соответственно. Отрицательный знак отклика означает, что содержание NO<sub>2</sub> уменьшается после явлений Эль-Ниньо (высокая ТПО в области Ниньо 3.4) и возрастает после явлений Ла-Нинья.

Положительный отклик ~20% на вариации ТПО без задержки отмечен в осенние сезоны на антарктической ст. Дюмон-Дюрвиль.

#### Линейные тренды

Значение ЧСС для линейных трендов является минимальным среди всех факторов (третья и четвертая снизу строки таблицы). При этом статистически значимые тренды стратосферного содержания NO<sub>2</sub> одновременно по спутниковым и наземным данным в среднем по всем станциям выявлены в четверти случаев. Лучшее согласие между спутниковыми и наземными оценками трендов получено для ст. Звенигород и Ноймайер (столбец 7 таблицы).

Сезонно-зависимые оценки трендов стратосферного содержания  $NO_2$  при обычной нормировке (на среднемесячные, среднесезонные и среднегодовые значения содержания  $NO_2$ ) приведены на рис. 10а. Максимальные тренды выявлены зимой (до 20–30% за 10 лет в декабре-январе при сезонных оценках 17–18% за 10 лет). Согласие между спутниковыми и наземными оценками получено для всех четырех сезонов. Однако годовые оценки не согласуются между собой: по данным ОМІ отмечен тренд 3% за 10 лет, но по наземным данным годовой тренд не выявлен. Основная причина расхождения годовых оценок раскрывается

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА



**Рис.** 10. Годовая (левая часть), месячные (средняя часть) и сезонные (правая часть графиков) оценки линейного тренда стратосферного (а) и тропосферного (б) содержаний NO<sub>2</sub> по данным OMI (красный цвет) и результатам измерений на ст. Звенигород (синий цвет) нормированные на соответствующие среднегодовые, среднемесячные или среднесезонные значения содержания NO<sub>2</sub> (а) и на одну и ту же величину – среднегодовое содержание NO<sub>2</sub> (б). Вертикальные отрезки – 95% доверительные интервалы.

на рис. 10б, где значения трендов приведены при нормировке на одно и то же значение – среднегодовое содержание NO<sub>2</sub>. Высокие положительные значения трендов 10% за 10 лет в летние месяцы по данным OMI обеспечившие вклад в годовую положительную оценку тренда по данным OMI.

Довольно высокие значения ЧСС (3) для трендов при наличии статистически значимых оценок получены для ст. Кергелен и Иссык-Куль (таблица). Сезонно-зависимые оценки трендов на этих станциях приведены на рис. 11. На обеих по наземным и спутниковым данным выявлены годовые тренды около -3% за 10 лет и 7% за 10 лет, соответственно. Несмотря на согласие годовых оценок, сезонные зависимости трендов по тем и другим данным сильно различаются. Различны не только числовые значения большинства месячных и сезонных оценок, но и формы сезонных зависимостей. Поэтому совпадение годовых оценок трендов выглядит случайным. По крайней мере, оно не подкрепляется видимым образом анализом сезонных и месячных оценок трендов.

Рассмотренные примеры указывает на то, что при анализе долговременных трендов NO<sub>2</sub> следует учитывать возможность их сезонной зависимости. Отметим, что наличие сезонного хода разностей между данными наземных и спутниковых измерений не влияет на различия сезонных зависимостей трендов, поскольку влияние разности между данными на результаты регрессионного анализа устраняется путем учета годового хода NO, в регрессионной модели.

Широтные распределения зимних, весенних, летних и годовых оценок трендов стратосферного содержания NO<sub>2</sub> приведены на рис. 12. На островных станциях Кергелен и Маккуори (№ 9

и 10) в ЮП получены отрицательные  $(-3\% \div -5\%)$ за 10 лет), а на ст. Иссык-Куль (№ 5) в СП — положительные (около 7% за 10 лет) статистически значимые годовые оценки трендов, близкие по значению для тех и других данных (рис. 12г).

В средних и тропических широтах ЮП весной, летом и в целом за год выявлены отрицательные, а на некоторых станциях в СП – положительные тренды по данным ОМІ.

Основная особенность стратосферных трендов NO<sub>2</sub> в зимние сезоны — высокие положительные значения трендов ~15% за 10 лет на ст. Звенигород (№ 3, рис. 12а). В остальные сезоны и в целом за год тренды NO<sub>2</sub> на ст. Звенигород по тем и другим данным статистически незначимы.

# Межгодовые вариации и тренды NO<sub>2</sub> в тропосфере на ст. Звенигород

Для ст. Звенигород возможно сопоставление вариаций и трендов тропосферного содержания NO<sub>2</sub>. Согласно таблице, для него получены максимально высокие показатели соответствия, (столбец 10 таблицы).

Годовые и сезонные оценки линейных трендов и изменений тропосферного содержания NO<sub>2</sub> под воздействия СЦ и циркуляционных факторов на ст. Звенигород приведены на рис. 13а. Для сравнения на рис. 13б приведены аналогичные оценки для стратосферного содержания NO<sub>2</sub>.

По данным обоих приборов выявлен эффект АК в тропосферном содержании NO<sub>2</sub> зимой и в целом за год (группа оценок на рис. 13а, соответствующая обозначению «АК» на горизонтальной оси). Зимние оценки составляют около -60% и -80%, а годовые оценки – около -20% и -40% при изменении индекса АК на два СКО по данным ОМІ и ст. Звенигород, соответственно.



**Рис.** 11. Годовая (левая часть), месячные (средняя часть) и сезонные (правая часть графиков) оценки линейного тренда стратосферного содержания NO<sub>2</sub> по данным OMI (красный цвет) и общего содержания NO<sub>2</sub> по наземным данным (синий цвет) на ст. Кергелен (а) и Иссык-Куль (б). Вертикальные отрезки – 95% доверительные интервалы.

Вариации ТПО в зоне Ниньо 3.4 также отражаются на тропосферном содержании NO<sub>2</sub> на ст. Звенигород в зимние сезоны. Эффект в NO<sub>2</sub>, проявившийся без запаздывания, составляет  $-40\% \div -50\%$  при изменении индекса Нинио 3.4 на два СКО (группа оценок, соответствующая обозначению «ТПОпр»). Изменения содержания NO<sub>2</sub>, следующие за индексом Ниньо 3.4. с запаздыванием 16 мес., составляют около -30%и -50% по данным ОМІ и ст. Звенигород, соответственно (оценки, соответствующие обозначению «ТПОорт»).

Связь NO<sub>2</sub> с экваториальной КДЦ выявлена осенью, зимой и в целом за год (оценки, соответствующие обозначению «КДЦ»). При этом сигнал КДЦ в NO<sub>2</sub>, согласно наземным измерениям, намного сильнее, чем по данным ОМІ. Годовые оценки магнитуды изменений содержания NO<sub>2</sub> под действием КДЦ достигают 80% и 30% по данным наземных и спутниковых измерений, соответственно. Максимальный эффект КДЦ отмечен в зимние сезоны с магнитудой около 140% и 60%, согласно наземным и спутниковым данным, соответственно. Осенние оценки эффекта КДЦ в NO<sub>2</sub> несколько меньше: около 130% и 40%, соответственно.

Отклик NO<sub>2</sub> на КДЦ происходит примерно в противофазе с колебаниями скорости экваториального ветра на уровне 40 гПа; фазовая задержка составляет 0-2 месяца (см. фазовую кривую в правой части рис. 13а, соответствующую обозначению «КДЦф»).

Связь тропосферного содержания NO<sub>2</sub> с 11-летним СЦ проявилась в зимние сезоны. Магнитуда отклика составляет около 50% и 80% по спутниковым и наземным данным, соответственно (обозначение «СЦ» на горизонтальной оси в левой части рис. 13а), а фазовая задержка

невелика, 0-2 года (обозначение «СЦф» в правой части рис. 13а).

Тренд  $NO_2$  в тропосфере выявлен зимой и в целом за год (оценки, соответствующие обозначению «Тр»). Зимний тренд составляет около 70% и 120% за 10 лет по спутниковым и наземным данным, соответственно, а годовые оценки примерно равны 30% за10 лет.

Таким образом, установлена связь межгодовой изменчивости NO<sub>2</sub> в тропосфере на ст. Звенигород с крупномасштабными циркуляционными факторами и 11-летним СЦ. Эта связь, как и долговременные тренды, проявляется преимущественно в зимние сезоны.

Сравнивая полученные результаты с результатами аналогичного анализа стратосферных данных (рис. 13б), можно отметить следующее. Тренды и отклики NO, в тропосфере на воздействие всех факторов многократно сильнее, чем в стратосфере. Формы сезонных зависимостей трендов и откликов в стратосфере и тропосфере похожи. Годовые оценки трендов NO2 в тропосфере статистически значимые в отличие от стратосферы. Обратное соотношение отмечено для годового отклика NO<sub>2</sub> на СЦ: годовой отклик выявлен лишь в стратосфере. Фазовые задержки откликов NO, на СЦ в тропосфере и стратосфере практически одинаковы. Задержки откликов на КДЦ в тропосфере и стратосфере зимой близки между собой, а в другие сезоны и в целом за год примерно противоположны по фазе.

# ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наилучшее соответствие между результатами анализа наземных и спутниковых данных о стратосферном содержании NO<sub>2</sub> получено для ст. Звенигород. Значение ЧСС в целом по всем факторам составляет 83% от полного числа сопостав-



**Рис. 12.** Зимние (а), весенние (б), летние (в) и годовые (г) оценки линейного тренда стратосферного содержания NO<sub>2</sub> по данным OMI (красный цвет) и общего (для ст. Звенигород – стратосферного) содержания NO<sub>2</sub> по наземным данным (синий цвет) в зависимости от широты. Вертикальные отрезки – 95% доверительные интервалы. Концы доверительных интервалов, выходящие за пределы графиков, обрезаны. Номера станций соответствуют столбцу 1 таблицы.

ляемых оценок, при этом в 33% случаев (40% от полного ЧСС) сопоставляемые оценки статистически значимы (столбец 10 таблицы). Значения ЧСС по отдельным факторам значительно больше, чем в среднем по всем станциям (ср. данные во второй и третьей снизу строках таблицы). Для тропосферного содержания NO<sub>2</sub> отмечены 100%-е значения ЧСС (столбец 10 и последняя строка таблицы), и треть сопоставляемых оценок статистически значимы (столбец 10).

Большие значения ЧСС характерны для арктической ст. Скорсбисунн и антарктических станций (столбец 10). Однако они получены в отсутствие зимних данных и в основном за счет статистически незначимых оценок (строка 9). Соответствие в случае статистически незначимых оценок легко получить при больших доверительных интервалах, свойственных этих станциям (рис. 4, 6, 9, 12).

Потеря согласия между вариациями и трендами  $NO_2$  по спутниковым и наземным данным на других станциях в сравнении со ст. Звенигород может быть вызвана отсутствием разделения содержания  $NO_2$  в наземных данных на стратосферную и тропосферную части. Это может быть важным для районов, подверженных загрязнению ПСА (например, для ст. От-Прованс). Причиной потери согласия на фоновых станциях может быть существенно разное горизонтальное разрешение наземных и стратосферных спутниковых данных (см. раздел 2). Общей причиной потери согласия для всех станции, кроме ст. Звенигород, может быть априорное задание воздушной массы NO<sub>2</sub>, которая считается либо постоянной, либо обычно очень слабо варьируется по сравнению с воздушной массой на ст. Звенигород (см. табл. 2 в [ГЕ1]). Кроме того, идеального соответствия нельзя ожидать из-за ошибок измерений.

Контраст соответствия результатов анализа спутниковых и наземных данных на ст. Звенигород по сравнению с другими станциями в наибольшей степени проявился в трендах. Значения ЧСС для трендов на ст. Звенигород столь же велики, как и значения для остальных факторов (две последние строки в таблице). Соответствие для трендов на других станциях заметно хуже, чем для остальных факторов (3-я и 4-я строки в таблице). Это указывает на необходимость особой осторожности при анализе трендов NO<sub>2</sub> по данным OMI. Наряду с этим пример ст. Звенигород позволяет рассчитывать на применимость стратосферных и тропосферных данных OMI для этой задачи.

Приведенные в работе результаты получены на сильно сокращенном объемн данных измерений (см. раздел 2). Они могут существенно отличаться от результатов, основанных на полном объеме данных. Однако данная работа имела задачей валидацию задачу — проверку соответствия вариаций и трендов по наземным и спутниковым данным, — а не оценку реальных трендов и вариаций NO<sub>2</sub>.



Рис. 13. (а): левая часть графика: годовые (отдельные точки) и сезонные (кривые с точками) оценки изменений тропосферного содержания NO<sub>2</sub> по данным OMI (красный цвет) и результатам измерений на ст. Звенигород под влиянием AK (обозначение AK на горизонтальной оси), вариаций ТПО в области Ниньо 3.4 без задержки (ТПОпр) и с задержкой на 16 месяцев (ТПОорт), КДЦ в экваториальной стратосфере (КДЦ) и 11-летнего солнечного цикла (СЦ), а также оценки линейных трендов NO<sub>2</sub> (Тр). Правая часть графика: фазовые задержки откликов NO<sub>2</sub> на КДЦ скорости экваториального ветра на уровне 40 гПа (обозначение КДЦф на горизонтальной оси) и на 11-летний солнечный цикл (СЦф). (б): аналогично (а), но для стратосференого содержания NO<sub>2</sub>. Вертикальные отрезки – 95% доверительные интервалы. Концы доверительных интервалов, выходящие за пределы графика, обрезаны.

# ИТОГИ

Подведем основные итоги работы. Выполнено сопоставление результатов анализа межгодовых вариаций и долговременных трендов  $NO_2$ в атмосфере по данным измерений с помощью спутникового прибора ОМІ в 2004—2020 гг. с результатами аналогичного анализа данных наземных спектрометрических сумеречных измерений на станциях NDACC. Сопоставление для ст. Звенигород выполнено на основе данных измерений содержания  $NO_2$  в вертикальных столбах стратосферы и тропосферы. На других станциях NDACC измеряется только общее содержание  $NO_2$ , которому сопоставлено содержание  $NO_2$  в стратосфере, полученное в измерениях на приборе OMI.

По спутниковым и наземным данным получены сезонно-зависимые оценки линейных трендов NO<sub>2</sub> и вариаций содержания NO<sub>2</sub> под действием 11-летнего цикла солнечной активности и крупномасштабных циркуляционных факторов, связанных с КДЦ экваториального стратосферного ветра, Арктическим и Антарктическим колебаниями, вариациями ТПО в зоне Ниньо 3.4. Оценки трендов и откликов NO<sub>2</sub> на воздействие солнечного цикла и циркуляционных факторов, характер их сезонных зависимостей, как и степень соответствия между спутниковыми и наземными оценками зависят от станции. Степень соответствия характеризуется числовым показателем – числом случаев соответствия, определяемым по сезонным и годовым оценкам.

В среднем по всем станциям получено неплохое соответствие для межгодовых вариаций стратосферного содержания  $NO_2$ . Соответствующие значения ЧСС в основном находятся в пределах 70-80% от общего числа случаев сопоставления. Соответствие между оценками трендов заметно хуже, со средним значением ЧСС 57%.

Наилучшее согласие между результатами анализа получено для ст. Звенигород. Соответствие для стратосферного содержания NO<sub>2</sub> наблюдается в 80–90% случаев, а для тропосферного содержания оно 100%-е.

Результаты работы показали, что наличие сезонной зависимости может быть очень существенно при анализе трендов и межгодовых вариаций содержания NO<sub>2</sub>. Годовые оценки трендов и вариаций следует интерпретировать с учетом сезонной зависимости. Характерный случай — когда тренд или отклик NO<sub>2</sub> на СЦ или другой фактор не выявляется на основе годовой оценки (оценка статистически незначима), однако искомый эффект уверенно выявляется через сезонные оценки.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты измерений содержания NO<sub>2</sub> с помощью прибора ОМІ в окрестностях наземных станций подготовлены Центром валидации данных Аура (Aura Validation Data Center) Годдардского центра космических полетов НАСА (NASA Goddard Space Flight Center). Использованные в работе данные наземных измерений общего содержания NO, находятся в свободном доступе в базе данных NDACC (NDACC Data Host Facility). Авторы благодарны всем, обеспечивающим проведение наземных измерений, обработку и подготовку данных: В.П.Синякову и М.Д. Орозалиеву (Киргизский национальный университет), A. Pazmino, F. Goutail, J.-P. Pommereau, C. David, J. Jumelet (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observation Spatiales, France: Institut Pierre-Simon Laplace, France), R. Querel, P. Johnston (National Institute of Water and Atmospheric Research, New Zealand), N. Jepsen (Danish Meteorological Institute), R. Kivi (Finnish Meteorological Institute), T. Portafaix (Université de la Réunion), G. Held (Universidade Estadual Paulista, Brazil), M. Tully (Bureau of Meteorology Australia), G. Hansen (Norwegian Institute for Air Research, Norway), U. Friess (Institute of Environmental Physics, University of Heidelberg, Germany).

Авторы благодарны рецензентам за полезные замечания.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 20–17–00200 (анализ долговременных трендов и межгодовых вариаций содержания NO<sub>3</sub>).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агеева В. Ю., Груздев А. Н. Сезонные особенности квазидвухлетних вариаций стратосферного содержания NO<sub>2</sub> по результатам наземных измерений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 74–85.
- Агеева В. Ю., Груздев А. Н., Елохов А. С., Мохов И. И., Зуева Н. Е. Внезапные стратосферные потепле-

ния: статистические характеристики и влияние на общее содержание NO<sub>2</sub> и O<sub>3</sub> // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 5. С. 545–555. DOI: 10.7868/S0003351517050014.

- Боровский А. Н., Арабов А. Я., Голицын Г. С., Груздев А. Н., Еланский Н. Ф., Елохов А. С., Мохов И. И., Савиных В. В., Сеник И. А., Тимажев А. В. Вариации общего содержания диоксида азота в атмосфере на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 29–44.
- *Груздев А. Н.* Широтная зависимость вариаций стратосферного содержания NO<sub>2</sub> // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 3. С. 345–359.
- *Груздев А. Н.* Чувствительность стратосферного озона к долговременным изменениям содержания двуокиси азота и соляной кислоты // Доклады АН. 2009. Т. 427. № 3. С. 384–387.
- *Груздев А. Н.* Квазидвухлетние вариации общего содержания NO<sub>2</sub> // Доклады АН. 2011. Т. 438. № 5. С. 678–682.
- *Груздев А. Н.* Оценка влияния 11-летнего цикла солнечной активности на содержание озона в стратосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54. № 5. С. 678–684.
- *Груздев А. Н.* Учет автокорреляции в задаче линейной регрессии на примере анализа общего содержания NO<sub>2</sub> в атмосфере // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 73–82.
- *Груздев А. Н., Елохов А. С.* Валидация результатов измерений содержания NO<sub>2</sub> в вертикальном столбе атмосферы с помощью прибора OMI с борта спутника EOS-Aura по данным наземных измерений на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С. 477–488.
- *Груздев А. Н. Елохов А. С.* Изменения общего содержания и вертикального распределения NO<sub>2</sub> по результатам 30-летних измерений на Звенигородской научной станции ИФА им. А. М. Обухова РАН // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 99–112.
- *Груздев А. Н., Елохов А. С.* Сопоставление результатов многолетних измерений содержания NO<sub>2</sub> в стратосфере и тропосфере с помощью спутникового прибора ОМІ с результатами наземных измерений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 1. С. 88–111. DOI: 10.31857/ S0002351523010054.
- *Груздев А. Н., Елохов А. С.* Сопоставление данных о содержании NO<sub>2</sub> в атмосфере по результатам спутниковых (OMI) и наземных (NDACC) измерений // Оптика атмос. океана. 2024. Т. 37. Принято к печати.
- *Груздев А. Н., Кропоткина Е. П., Соломонов С. В., Елохов А. С.* Зимне-весенние аномалии содержания O<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> в стратосфере над московским регионом в 2010 и 2011 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 223–231. DOI: 10.7868/S0002351517020031
- Груздев А. Н., Арабов А. Я., Елохов А. С., Савиных В. В., Сеник И. А., Боровский А. Н., Еланский Н. Ф. Много-

летние наблюдения стратосферных примесей в Институте физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН: Анализ трендов и межгодовых вариаций общего содержания О<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 3. С. 318–332. DOI: 10.31857/S0002351522030063.

- *Елохов А. С., Груздев А. Н.* Измерения общего содержания и вертикального распределения NO<sub>2</sub> на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 6. С. 831–846.
- *Драпер Н. Р., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. М.: Издательский. дом «Вильямс», 2007. 912 с.
- *Brasseur G. P., Solomon S.* Aeronomy of the middle atmosphere. Dordrecht, the Netherlands: Springer. 2005. 644 p.
- Boersma K. F., Jakob D. J., Eskes H. J., Pinder R. W., WangJ., van der A R. J. Intercomparison of SCIAMACHY and OMI tropospheric NO<sub>2</sub> columns: Observing the diurnal evolution of chemistry and emissions from space // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № D16S26. doi: 10.1029/2007JD008816.
- Celarier E.A., Brinksma E.J., Gleason J. F., Veefkind J. P., Cede A., Herman J. R., Ionov, D., Goutail F., Pommereau J. P., Lambert J. C., van Roozendael M., Pinardi G., Wittrock F., Schonhardt A., Richter A., Ibrahim O. W., Wagner T., Bojkov, B. Mount G., Spinei E., Chen C. M., Pongetti T. J., Sander S. P., Bucsela E. J., Wenig M. O., Swart D. P. J., Volten H., Kroon M., Levelt P. F. Validation of Ozone Monitoring Instrument nitrogen dioxide columns // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № D15S15.

doi:10.1029/2007JD008908.

- *Cook P.A., Roscoe H. K.* Variability and trends in stratospheric NO<sub>2</sub> in Antarctic summer, and implications for stratospheric NO<sub>y</sub> // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 2601–3612.
- Dirksen R. J., Boersma K. F., Eskes H. J., Ionov D. V., Bucsela E. J., Levelt P. F., Kelder H. M. Evaluation of stratospheric NO<sub>2</sub> retrieved from the Ozone Monitoring Instrument: Intercomparison, diurnal cycle, and trending // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. D08305.
- Fish D. J. Roscoe H. K., Jonston P. V. Possible cause of stratospheric NO<sub>2</sub> trends observed at Lauder, New Zealand // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27. № 20. 3313–3316.
- Fortems-Cheiney A., Broquet G., Pison I., Saunois M., Potier E., Berchet A., Dufour G., Siour G., van der Gon H. D., C. Dellaert S. N., Boersma K. F. Analysis of the anthropogenic and biogenic NO<sub>x</sub> emissions over 2008–2017: Assessment of the trends in the 30 most populated urban areas in Europe // Geophys. Res. Lett. 2021. V. 48. e2020GL092206.
- *Gruzdev A. N.* Latitudinal structure of variations and trends in stratospheric NO<sub>2</sub> // International Journal of Remote Sensing. 2009. V. 30. No. 15. P. 4227–4246.
- Gruzdev A. N., Elokhov A. S. Validation of Ozone Monitoring Instrument NO<sub>2</sub> measurements using ground based NO<sub>2</sub> measurements at Zvenigorod, Russia // Internat. J. Remote Sens. 2010. V. 31. № 2. P. 497–511. doi: 10.1080/01431160902893527.

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

- Hendrick F., Mahieu E., Bodeker G. E. et al. Analysis of stratospheric NO<sub>2</sub> trends above Jungfraujoch using ground-based UV-visible, FTIR, and satellite nadir observations // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12. P. 8851–8864.
- *Hilboll A., Richter A., Burrows J. P.* Long-term changes of tropospheric NO<sub>2</sub> over megacities derived from multiple satellite instruments // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 4145–4169.
- Ionov D. V., Timofeyev Y. M., Sinyakov V. P., Semenov V. K., Goutail F., Pommereau J.-P., Bucsela E. J., Celarier E. A., Kroon M. Ground-based validation of EOS-Aura OMI NO<sub>2</sub> vertical column data in the midlatitude mountain ranges of Tien Shan (Kyrgyzstan) and Alps (France) // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, D15S08, doi:10.1029/2007JD008659.
- Jiang Z., Zhu R., Miyazaki K., McDonald B.C., Klimont Z., Zheng B., Boersma F.K., ZhangQ., Worden H., Worden J. R., Henze D. K., Jones D. B.A., van der Gon H.A.C.D. Decadal variabilities in tropospheric nitrogen oxides over United States, Europe, and China // J. Geophys. Res. Atmos. 2022. V. 127. e2021JD035872.
- Kramer L. J. Leigh R. J. Remedios J. J., Monks P. S. Comparison of OMI and ground-based in situ and MAX-DOAS measurements of tropospheric nitrogen dioxide in an urban area // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. D16S39.
- *Levelt P.F., Joiner J., Tamminen J. et al.* The Ozone Monitoring Instrument: overview of 14 years in space // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. P. 5600–5745.
- Liley J. B., Johnston P. V., McKenzie R.L., Thomas A. J., Boyd I. S. Stratospheric NO<sub>2</sub> variations from at Lauder, New Zealand // J. Geophys Res. 2000. V. 105. № D9. P. 11633–11640.
- *McLinden C.A., Olsen S. C., Prather M. J., Liley J. B.* Understanding trends in stratospheric NO<sub>y</sub> and NO<sub>2</sub> // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № D21. P. 27787–27793.
- Ossohou M., Galy-Lacaux C., Yoboué V., Hickman J. E., Gardrat E., Adon M., Darras S., Laouali D., Akpo A., Ouafo M., Diop B., Opepa C. Trends and seasonal variability of atmospheric NO<sub>2</sub> and HNO<sub>3</sub> concentrations across three major African biomes inferred from long-term series of ground-based and satellite measurements // Atmos. Environ. 2019. V. 207. P. 148–166.
- Platt U., Stutz J. Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS), Principle and Applications / Berlin: Springer Verlag/ 2008. 597 p. ISBN978–3– 540–21193–8. DOI: 10.1007/978–3–540–75776–4.
- Schneider P., Lahoz W.A., van der A R. Recent satellitebased trends of tropospheric nitrogen dioxide over large urban agglomerations worldwide // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 1205–1220.
- *Seinfeld J. H., Pandis S. N.* Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons. 2006. 1225 p.
- Yela M., Gil-Ojeda M., Navarro-Comas M. et al. Hemispheric asymmetry in stratospheric NO<sub>2</sub> trends // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 13373–13389.

том 60 № 4 2024

Zawodny J. M., McCormick M. P. Stratospheric Aerosol and Gas Experiment-II Measurements of the quasibiennial oscillations in ozone and nitrogen dioxide // J. Geophy. Res. 1991. V. 96. № D5. P. 9371–9377. Yin H., Sun Y., Notholt J., Palm M., Liu C. Spaceborne tropospheric nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) observations from 2005–2020 over the Yangtze River Delta (YRD), China: variabilities, implications, and drivers // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22. P. 4167–4185.

# COMPARISON OF LONG-TERM TRENDS AND INTERANNUAL VARIATIONS OF THE NO<sub>2</sub> CONTENT IN THE ATMOSPHERE ACCORDING TO SATELLITE (OMI) AND GROUND-BASED SPECTROMETRIC MEASUREMENTS AT NDACC STATIONS

# A.N. Gruzdev\*, A.S. Elokhov

Obukhov Institute of Atmospheric Physics 119017 Moscow, Pyzhevsky 3 \*E-mail: a.n.gruzdev@mail.ru

Results of analysis of long-term trends and interannual variations of the NO<sub>2</sub> content in the atmosphere according to measurements with the Ozone Monitoring Instrument (OMI) aboard the EOS-Aura satellite in 2004–2020 are compared to the results of a similar analysis of the NO<sub>2</sub> content derived from independent spectrometric twilight NO<sub>2</sub> measurements by zenith-scattered solar radiation at stations of the Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC)). According to both the data, seasonally dependent estimates of linear NO<sub>2</sub> trends and variations of the NO<sub>2</sub> content under the influence of the 11-year cycle of solar activity and large-scale circulation factors such as the Arctic and Antarctic Oscillations, variations in ocean surface temperature in the Niño 3.4 zone, and the quasi-biennial oscillation in zonal wind in the equatorial stratosphere have been obtained. In general, a good qualitative and, in some cases, quantitative correspondence between estimates of interannual variations of NO<sub>2</sub> has been obtained. For interannual variations of stratospheric NO<sub>2</sub>, not a bad correspondence between estimates based on satellite and ground-based data has been obtained on average for all stations, but the correspondence between trend estimates is noticeably worse. The best correspondence between the analysis results has been obtained for Zvenigorod station. For stratospheric NO<sub>2</sub>, it was noted in 80–90% of cases, and the correspondence for tropospheric NO<sub>2</sub> is practically 100%.

**Keywords:** NO<sub>2</sub>, spectrometric measurements, OMI, NDACC, comparison, trends, interannual variations, quasi-biennial oscillation, 11-year solar cycle