

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВАЛИДАЦИИ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
СОДЕРЖАНИЯ NO₂ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРА OMI НА ОСНОВЕ ДАННЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ НА ЗВЕНИГОРОДСКОЙ НАУЧНОЙ СТАНЦИИ

© 2013 г. А. Н. Груздев*, А. С. Елохов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва

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

Поступила в редакцию 9.04.2012 г.

Сравнение результатов наземных измерений содержания NO₂ на Звенигородской научной станции и результатов измерений с помощью прибора OMI на борту спутника EOS-Aura при пролетах спутника над станцией выявило, что среднее расхождение значений “незагрязненной” (главным образом стратосферной) части общего содержания NO₂ за весь срок совместных наблюдений находится в пределах ошибок измерений. Однако содержание NO₂ по спутниковым данным летом меньше значений, получаемых из наземных наблюдений, и больше их зимой. Высокая корреляция между наземными и спутниковыми данными в значительной степени обусловлена годовым ходом NO₂. Корреляция ухудшается при сравнении данных по месяцам. В целом отмечено значительное расхождение между значениями содержания NO₂ в вертикальном столбе тропосферы по данным OMI и данным наземных измерений. Корреляция между спутниковыми и наземными данными, слабая в целом за год, возрастает зимой и весной. Коэффициент корреляции между наземными и спутниковыми данными о “незагрязненной” части общего содержания NO₂ увеличивается, а коэффициент корреляции между данными о тропосферном содержании NO₂ уменьшается с увеличением доли облаков. Отмечено соответствие между отдельными квазирегулярными вариациями внутрисезонного масштаба, выявленными в данных OMI и в наземных данных. Однако годовой ход тропосферного содержания NO₂ в спутниковых данных не соответствует по фазе годовому ходу в данных наземных измерений. Аномалия NO₂ в конце марта–начале апреля 2011 г., вызванная затокком стратосферного воздуха из области арктической озонной “дыры”, отчетливо проявившаяся в результатах наземных измерений на Звенигородской станции, в данных OMI не выявлена.

Ключевые слова: валидация, NO₂, OMI, дистанционное зондирование

DOI: 10.7868/S0205961412060024

ВВЕДЕНИЕ

Число атмосферных параметров, измеряемых со спутников, постоянно расширяется, а методы измерений совершенствуются. Тем не менее, результаты дистанционных измерений со спутников требуют валидации на основе данных независимых измерений. Значительный интерес в атмосферных исследованиях представляют результаты измерений состава атмосферы. Двуокись азота (NO₂), наряду с другими окислами азота, играет важную роль в химии атмосферного озона. Измерения ее содержания в стратосфере особенно важны в связи с проблемой изменений озонового слоя, а измерения содержания в нижней тропосфере — в связи с проблемой антропогенного загрязнения атмосферы.

В 2004 г. Национальным управлением США по авиации и исследованию космического пространства (NASA) запущен спутник EOS-Aura,

научными задачами которого являются исследования озонового слоя, качества воздуха и климата Земли. На спутнике установлены несколько приборов и среди них — прибор OMI (Ozone Monitoring Instrument), разработанный специалистами из Нидерландов и Финляндии и предназначенный для исследования газового и аэрозольного состава атмосферы. Прибор OMI позволяет определять общее содержание (OC) NO₂ в вертикальном столбе атмосферы, а специальная методика анализа и обработки результатов измерений позволяет также оценивать значения содержания NO₂ в загрязненном пограничном слое атмосферы и в вертикальном столбе тропосферы (Voersma et al., 2002). Другим достоинством этой аппаратуры является высокое пространственное разрешение (13 × 24 км² в надире), что наряду с солнечно-синхронизированной орбитой спутника обеспечивает

высокую степень детализации широтно-долготного распределения содержания NO₂.

Результаты валидации данных ОМІ о содержании NO₂ в вертикальном столбе стратосферы с использованием данных спектрометрических измерений на наземных станциях представлены в нескольких работах (Celarier et al., 2008; Ionov et al., 2008; Груздев, Елохов, 2009; Gruzdev, Elokho, 2010). Данные ОМІ о содержании NO₂ в тропосферном столбе также были сопоставлены с результатами независимых (наземных, спутниковых, самолетных) измерений (Voersma et al., 2008; Brinksma et al., 2008; Buscela et al., 2008; Celarier et al., 2008; Irie et al., 2008; Kramer et al., 2008; Wenig et al., 2008; Груздев, Елохов, 2009; Gruzdev, Elokho, 2010). По мере отработки методики обработки данных измерений ОМІ, соответствие между значениями стратосферного содержания NO₂ по результатам спутниковых и наземных измерений в целом улучшалось (Груздев, Елохов, 2009; Gruzdev, Elokho, 2010). Отметим, что оно в значительной степени обусловлено хорошим соответствием особенностей годового хода NO₂, который является доминирующей модой изменчивости NO₂ в стратосфере. Достаточно большой объем данных наблюдений NO₂ со спутника EOS-Aura, накопленный к настоящему времени, позволяет выполнить более тщательную их валидацию, с учетом сезонных особенностей и вариаций NO₂ меньшего временного масштаба.

Цель представленной работы состоит в проведении такой валидации с использованием данных измерений содержания NO₂ на Звенигородской научной станции (ЗНС) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, полученных при пролетах спутника над станцией в период измерений с октября 2004 г. по май 2011 г.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДАННЫХ И МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЯ

Опишем кратко основные особенности данных об NO₂ и методик их получения, которые необходимо учитывать при валидации. Более подробное изложение можно найти в (Voersma et al., 2002; Celarier et al., 2008; Груздев, Елохов, 2009).

Измерения с помощью прибора ОМІ

Прибор ОМІ измеряет рассеянную атмосферой Земли солнечную радиацию в ультрафиолетовой и видимой частях спектра со спектральным разрешением ~0.5 нм и пространственным (горизонтальным) разрешением 13 × 24 км² в надире (Voersma et al., 2002; Celarier et al., 2008). Для определения содержания NO₂ используется спектральный диапазон 415–465 нм. Непосредственно из измерений определяется содержание NO₂ в

наклонном столбе атмосферы. Содержание NO₂ в вертикальном столбе атмосферы получается делением наклонного содержания на величину воздушной массы NO₂, которая зависит от ряда параметров, включающих геометрию наблюдений, альbedo подстилающей поверхности, форму вертикального профиля NO₂, характеристики облачности (высота, плотность, степень покрытия небосвода). Важно, что форма профиля и соответственно значение воздушной массы NO₂ существенно меняются в условиях загрязнения нижней тропосферы, при этом величина воздушной массы сильно зависит от облачности (Voersma et al., 2002). Наличие облачности влияет и на величину воздушной массы в отсутствие нижнетропосферного загрязнения (Voersma et al., 2002; Eskes et al., 2003), однако ее зависимость от доли облачности, согласно (Voersma et al., 2002), не выявляется на фоне естественной изменчивости по причине малой концентрации NO₂ в фоновых условиях в тропосфере.

Процедура получения конечных данных о содержании NO₂ состоит из нескольких этапов, включающих предварительную обработку результатов измерений с целью выявления загрязненных регионов с высокими значениями тропосферного содержания NO₂ и фотохимическое моделирование. В итоге определяется фоновое значение общего содержания NO₂ (считается, что оно составляет “незагрязненную” часть ОС NO₂ в загрязненных районах), собственно ОС NO₂ (оно совпадает с фоновым значением в незагрязненных районах) и содержание NO₂ в загрязненном слое – как разность между ОС NO₂ и фоновым значением. Кроме того, оценивается содержание NO₂ в вертикальном столбе тропосферы, которое складывается из содержания в загрязненном слое и содержания в лежащем выше слое тропосферы в предположении незагрязненного профиля (форма которого предписана по результатам фотохимических моделей). Отметим, что фоновое значение ОС NO₂ определяется осреднением результатов измерений в околосональном направлении вне областей с загрязненной нижней тропосферой, с учетом конфигурации планетарных волн (Voersma et al., 2002; Celarier et al., 2008; Груздев, Елохов, 2009). Поэтому получаемое из измерений ОМІ значение “незагрязненной” части ОС NO₂, вообще говоря, не равняется аналогичной по смыслу величине непосредственно в окрестности ЗНС, что и может служить одной из причин расхождения результатов наземных и спутниковых измерений этой переменной. Другой причиной может служить возможное влияние облачности на фоновое значение ОС NO₂ ввиду недостаточно точной оценки воздушной массы (см. выше).

Случайная ошибка измерений содержания NO_2 в стратосферном столбе (а также в “незагрязненном” столбе атмосферы) при безоблачном небе составляет, по оценкам (Voersma et al., 2002), около 0.2×10^{15} и $0.8 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в незагрязненных и загрязненных условия соответственно. Согласно (Voersma et al., 2002), относительные ошибки оценок содержания NO_2 в тропосферном столбе в безоблачных и облачных условиях составляют около 30 и 60% соответственно, в то время как по оценкам (Wenig et al., 2008) ошибки в безоблачных условиях заключены в большинстве случаев в пределах от 40 до 80%.

В работе использованы данные ОМІ за период с октября 2004 г. по май 2011 г. Использована выборка данных измерений ОМІ над Звенигородом, находящаяся в открытом доступе на сайте Центра валидации данных Aura (Aura Validation Data Center) <http://avdc.gsfc.nasa.gov>. Данные получены нами в мае 2011 г.

Измерения на Звенигородской станции

Звенигородская научная станция (55.7° с.ш., 36.8° в.д.) расположена в сельской местности на расстоянии около 50 км к западу от Москвы. Станция входит в состав международной Сети для обнаружения изменений состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change – NDACC). Измерения содержания NO_2 выполняются по рассеянной из зенита солнечной радиации в спектральном диапазоне 435–450 нм со спектральным разрешением 0.7 нм с помощью спектрофотометра на базе отечественного монохроматора МДР-23. Измерения проводятся во время утренних и вечерних сумерек при зенитных углах Солнца 84° – 96° .

По измеренным спектрам пропускания рассчитываются значения содержания NO_2 в наклонном столбе атмосферы в зависимости от зенитного угла Солнца, а по ним путем решения обратной задачи определяется вертикальный профиль NO_2 (Елохов, Груздев, 2000; Груздев, Елохов, 2009). Профиль представлен десятью слоями шириной 5 км и тонким пограничным слоем, толщина которого априори неизвестна. Ядро обратной задачи составляют значения воздушных масс указанных слоев NO_2 , которые рассчитываются с помощью сферической модели рассеяния с учетом рефракции и одномерной фотохимической модели. Назначение фотохимической модели – описание фотохимических изменений концентрации NO_2 в течение сеанса измерений.

Суммирование значений содержания NO_2 в соответствующих слоях позволяет получать содержание NO_2 в вертикальном столбе тропосферы (0–10 км), содержание в вертикальном столбе стратосферы (10–50 км), ОС NO_2 (0–50 км), а

также содержание NO_2 выше пограничного слоя атмосферы, который наиболее часто подвергается антропогенному загрязнению.

Случайная ошибка определения содержания NO_2 в стратосферном столбе находится в пределах между 0.3×10^{15} и $0.6 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (Груздев, Елохов, 2009). Случайная ошибка содержания NO_2 в нижней тропосфере сильно зависит от условий наблюдений и обычно заключена в пределах 5–100% (Груздев, Елохов, 2009). Например, она мала в стабильных условиях с большим содержанием NO_2 под приземной инверсией и велика при малых значениях содержания NO_2 в приземном слое.

Сечения поглощения NO_2 зависят от температуры (Vandaele et al., 1998). Мы использовали сечения поглощения при фиксированном значении температуры 220 К, близком к типичной температуре в слое стратосферного максимума NO_2 на широте Звенигорода зимой. Согласно (Груздев, Елохов, 2009), в пренебрежении температурной зависимостью сечений поглощения NO_2 стратосферное содержание NO_2 по нашим измерениям, в среднем занижено летом примерно на 4%, или на $0.15 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Содержание NO_2 в приземном слое занижено в среднем на 14% зимой (при -10°C) и 17% летом (при 10°C).

С другой стороны, значения содержания NO_2 в нижней тропосфере завышены из-за отсутствия учета многократного рассеяния. Завышение составляет около 45% в безоблачных условиях (Груздев, Елохов, 2009). В облачных условиях при высоком альбедо подстилающей поверхности оно может быть больше.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ

Прежде чем выполнить сопоставление данных, из них статистическим методом были отбракованы выбросы (Груздев, 2008).

Данные наблюдений, предназначенные для сопоставления, должны по возможности максимально соответствовать друг другу по месту и времени наблюдений. Мы использовали данные спутниковых измерений в 30-км окрестности станции.

NO_2 испытывает сильный суточный ход (Елохов, Груздев, 2000; Груздев, Елохов, 2009), и сопоставляемые данные измерений должны быть приведены к одинаковому времени. Поэтому результаты наземных наблюдений NO_2 интерполировались по времени к моментам, соответствующим наблюдениям со спутника. Методика интерполяции подробно изложена в работе (Груздев, Елохов, 2009).

Благодаря солнечно синхронизованной орбите спутника, измерения с помощью прибора ОМІ над Звенигородом обычно выполнялись дважды в день, в разное время. При сопоставлении с дан-

ными наземных измерений использованы результаты и тех и других измерений, при этом результаты наземных измерений в нужный день интерполировались к соответствующим (различным) моментам измерений со спутника.

Общие характеристики

Сравнение результатов спутниковых и наземных наблюдений выполним для двух величин, измеряемых со спутника: “незагрязненной” части ОС NO₂ и содержания NO₂ в толще тропосферы. Первой из них сопоставим значение содержания NO₂ в вертикальном столбе атмосферы, за исключением пограничного слоя, полученное по результатам наземных измерений (эта величина включает содержания NO₂ в двух тропосферных и восьми стратосферных 5-км слоях). Оно характеризует незагрязненную часть ОС NO₂ и отражает главным образом содержание NO₂ в стратосфере. Второй величине сопоставим интегральное содержание NO₂ в слое 0–10 км по результатам наземных измерений, представляющее собой сумму содержаний NO₂ в пограничном слое и двух 5-км тропосферных слоях.

На рис. 1а, б показаны значения незагрязненной части ОС NO₂ и значения содержания NO₂ в тропосферном столбе по результатам измерений на приборе ОМІ и по данным наземных измерений, интерполированным ко времени наблюдений со спутника. Данные приведены только для тех дней, для которых имеются результаты и спутниковых, и наземных измерений. Разрывы в данных на рисунке обусловлены перерывами в наземных измерениях. Данные измерений со спутника на рис. 1а в целом достаточно точно ложатся на данные наземных измерений. Этого, вообще говоря, нельзя сказать о тропосферном содержании NO₂ (рис. 1б). Диапазон изменений тропосферного содержания NO₂ по наземным измерениям существенно больше, чем по измерениям со спутника. И те, и другие значения зачастую значительно превосходят значения незагрязненной части ОС NO₂.

Различия между данными наземных и спутниковых измерений тропосферного содержания NO₂ можно частично объяснить значительной неоднородностью полей концентрации NO₂ в зоне загрязнения, что приводит к зависимости получаемого из измерений значения тропосферного содержания NO₂ от степени пространственного осреднения (которая больше при наблюдениях со спутника), а также значительной временной изменчивостью NO₂ в слое загрязнения (Груздев, Елохов, 2009; Gruzdev, Elokho, 2010).

На рис. 1в приведена разность между спутниковыми и наземными данными (спутниковые

минус наземные) о незагрязненной части ОС NO₂. Среднеквадратичный разброс разности составляет 0.44×10^{15} см⁻², или 17% относительно среднегодового значения содержания NO₂. Средняя за весь срок совместных наблюдений разность отрицательна и равняется $-(0.045 \pm 0.019) \times 10^{15}$ см⁻², или $-(1.7 \pm 0.7)\%$ относительно среднего значения содержания NO₂. Значения незагрязненной части ОС NO₂ по данным ОМІ в среднем несколько ниже значений, получаемых из наземных измерений. Однако средняя разность мала и находится в пределах точности наземных и спутниковых измерений. Сопоставление с результатами работ (Груздев, Елохов, 2009; Gruzdev, Elokho, 2010) выявляет последовательное уменьшение среднего и среднеквадратичного значений разности, что, по-видимому, свидетельствует о совершенствовании методики определения содержания NO₂ с помощью прибора ОМІ.

Корреляционная диаграмма значений незагрязненной части ОС NO₂ на рис. 2а демонстрирует достаточно хорошую корреляцию между результатами наземных и спутниковых измерений. Коэффициент корреляции для полного периода измерений составляет 0.92, а коэффициент линейной регрессии спутниковых данных на наземные данные – 0.88. Разброс точек относительно прямой регрессии примерно одинаков для различных участков диаграммы. Затемненные круговые области на рис. 2а соответствуют экстремумам годового хода NO₂. Сопоставляя рис. 2а и рис. 1а, отметим, что высокая корреляция значений незагрязненной части ОС NO₂ в определенной степени обусловлена годовым ходом.

Корреляция между значениями тропосферного содержания NO₂ за полный период наблюдений низкая (рис. 2б), как и следовало ожидать, исходя из рис. 1б. Коэффициент корреляции составляет всего 0.2. Сопоставляя новые результаты с результатами предыдущих работ (Груздев, Елохов, 2009; Gruzdev, Elokho, 2010), мы не можем отметить улучшение соответствия между данными измерений тропосферного содержания NO₂ наземным методом и с помощью прибора ОМІ.

Сезонные особенности

Статистические характеристики сравнения результатов измерений, полученные по всему объему данных, вообще говоря, нельзя распространять на меньшие временные масштабы. Например, кривая среднемесячных значений разности содержаний NO₂ на рис. 1в демонстрирует вполне определенный сезонный ход. Задачи исследования атмосферной изменчивости часто требуют более детального соответствия данных наблюдений реальным данным. Выполним срав-

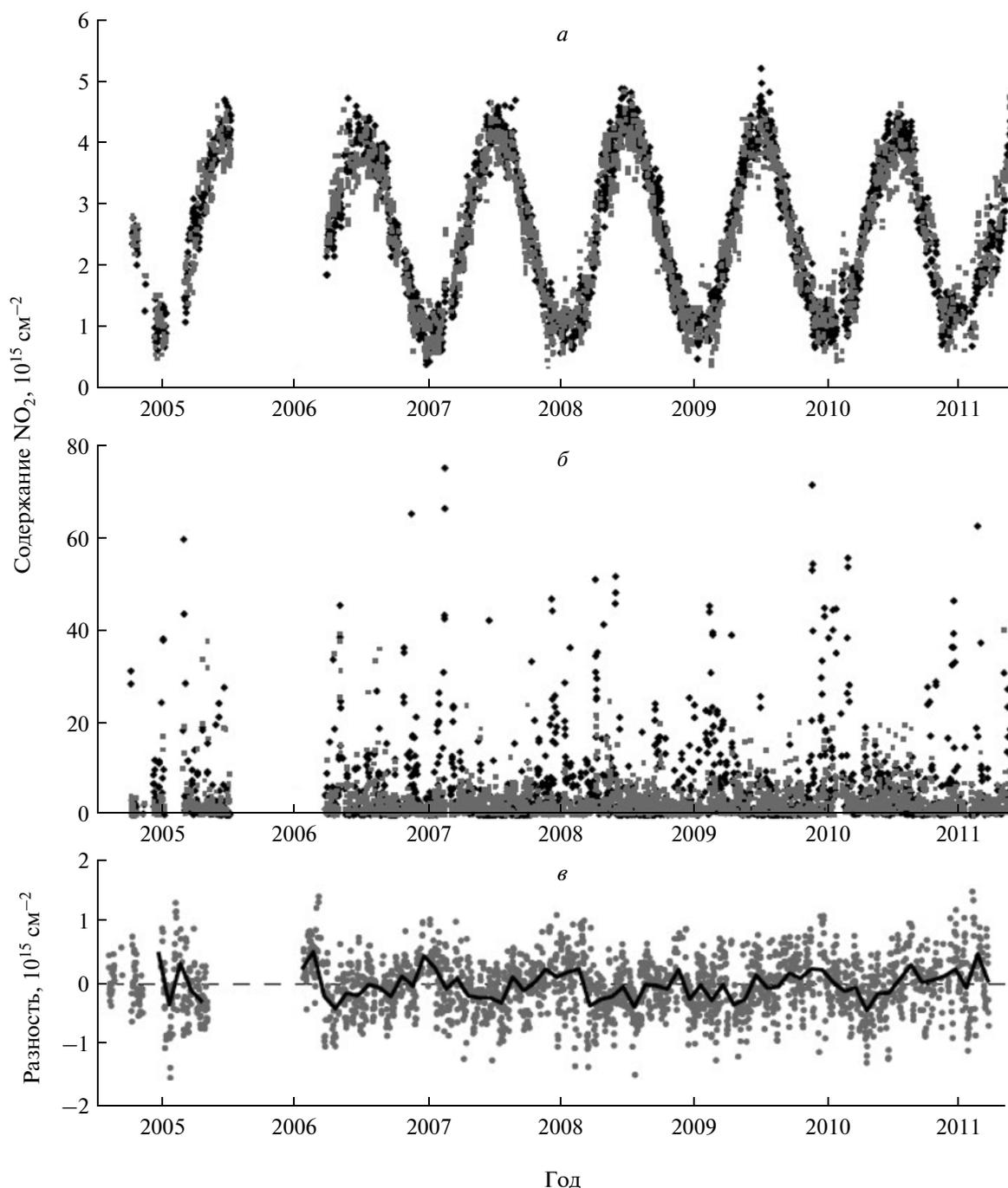


Рис. 1. Незагрязненная часть общего содержания NO₂ (*a*) и содержание NO₂ в вертикальном столбе тропосферы (*б*) над станцией Звенигород по результатам измерений с помощью прибора OMI (серые квадраты) и по данным наземных измерений, интерполированным ко времени наблюдений со спутника (черные ромбы), а также разность суточных (серые кружки) и среднемесячных (черная кривая) значений (спутниковые минус наземные) незагрязненной части общего содержания NO₂ (*в*).

нение данных спутниковых и наземных измерений с учетом сезона.

Рисунки 3*a* и *в* показывают сезонную зависимость разностей значений содержания NO₂, полученных в измерениях на приборе OMI и в наземных измерениях. На рисунках приведены многолетние

среднемесячные и среднесезонные значения разностей, а в их правых частях показаны и средние за полный период наблюдений разности, соответствующие описанным выше результатам. Среднемесячные и среднесезонные разности, как правило, значительно отличаются от последних.

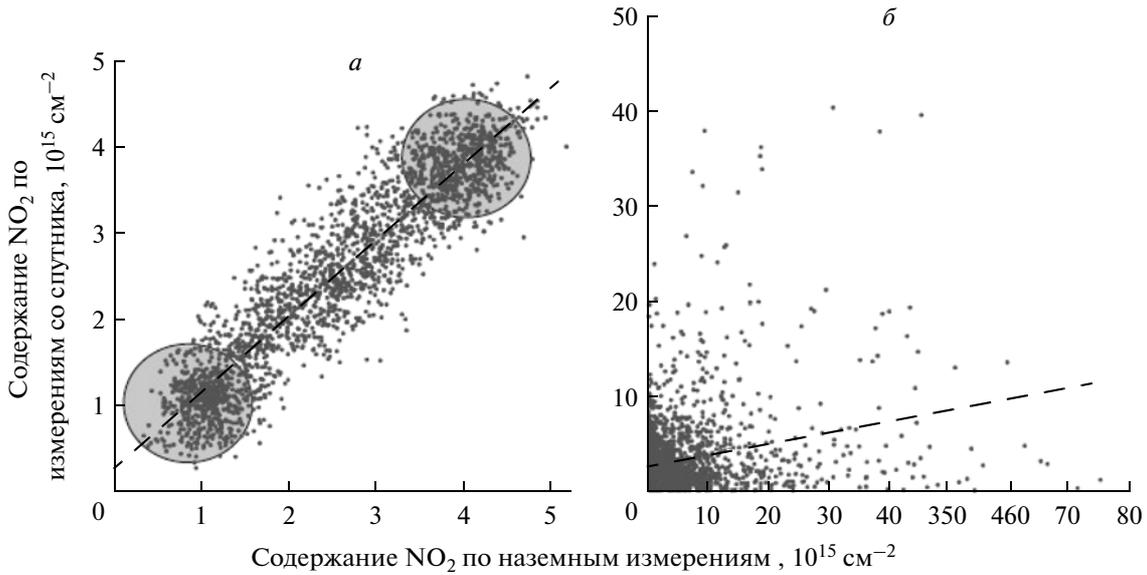


Рис. 2. Корреляционные диаграммы незагрязненной части общего содержания NO₂ (а) и содержания NO₂ в вертикальном столбе тропосферы (б) над станцией Звенигород по результатам наземных и спутниковых измерений. Прямые соответствуют линейной регрессии. Круговые области на рисунке а показывают области зимних и летних значений содержания NO₂.

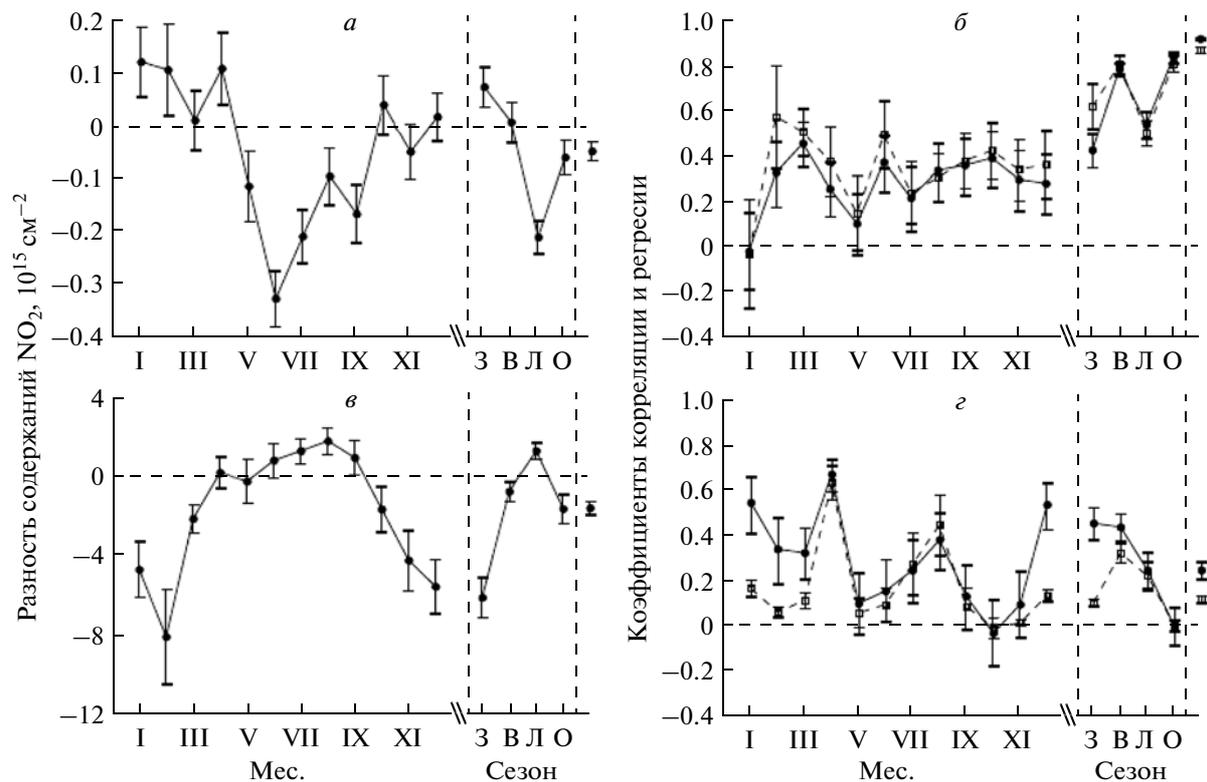


Рис. 3. Разность (спутниковые минус наземные) (а) и коэффициенты корреляции (сплошные кривые) и линейной регрессии (штриховые кривые) (б) между значениями незагрязненной части общего содержания NO₂ по результатам наземных и спутниковых измерений в зависимости от месяца (левее левой вертикальной пунктирной линии), сезона (между пунктирными линиями) и в целом за год (правее правой пунктирной линии). Вертикальные отрезки соответствуют 95%-ным доверительным интервалам. Окончания доверительных отрезков для коэффициентов корреляции утолщены; (в–г) – аналогично (а–б), но для содержания NO₂ в вертикальном столбе тропосферы. Коэффициенты регрессии соответствуют регрессии данных ОМІ на данные наземных измерений.

Значения незагрязненной части ОС NO_2 по спутниковым данным летом меньше значений, получаемых из наземных наблюдений (на величину до $3.4 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, или 7.5%, в июне), и больше их зимой (примерно на $0.1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, или 10%) (рис. 3а). С октября по декабрь разность статистически неотличима от нуля. Наибольшие внутрисезонные изменения разности приходятся на весну и осень, когда максимальны изменения стратосферного содержания NO_2 в годовом ходе (ср. с рис. 1а). Средняя по весеннему сезону разность близка к нулю, однако среднемесячные значения могут отличаться от нуля.

Соответствие по величине между данными наземных и спутниковых измерений содержания NO_2 в тропосферном столбе наилучшее весной и летом, когда разность содержаний NO_2 относительно невелика, и наиболее плохое зимой (рис. 3в). В целом сезонный ход разности тропосферных значений и ход разности стратосферных значений содержания NO_2 противоположны друг другу. Вероятно, это указывает на чувствительность данных ОМІ о незагрязненной части ОС NO_2 к загрязнению нижней тропосферы окислами азота (см. также (Груздев, Елохов, 2009; Gruzdev, Elokho, 2010)).

Рисунок 3б показывает, что месячные коэффициенты корреляции и регрессии для значений незагрязненной части ОС NO_2 значительно меньше, чем коэффициенты, рассчитанные за полный период. В январе корреляция отсутствует совсем. Удивительно, но месячные коэффициенты корреляции для тропосферного содержания NO_2 достигают значений 0.6–0.7 (рис. 3г), превышающих максимальное значение коэффициента корреляции для незагрязненной части ОС NO_2 . Корреляция между спутниковыми и наземными данными о содержании NO_2 в тропосферной толще в целом наиболее сильная в зимне-весенний период. Зимой межсуточные вариации тропосферного содержания NO_2 , определяемого в спутниковых и наземных измерениях, коррелируют между собой относительно хорошо, несмотря на максимальную в этот сезон разность значений содержания NO_2 (ср. рис. 3г и в).

Месячные коэффициенты регрессии значений содержания NO_2 , измеряемых со спутника, на значения содержания NO_2 , получаемые в наземных измерениях, как правило, значительно меньше единицы (рис. 3б и г), а свободные члены в уравнении линейной регрессии всегда положительные. В случае тропосферного содержания NO_2 это, в частности, связано с меньшим диапазоном значений тропосферного содержания NO_2 , измеряемого со спутника, что может быть обусловлено сглаживанием локальных неоднородностей содержания NO_2 в зоне загрязнения погра-

ничного слоя атмосферы. Аналогично вариации незагрязненной части ОС NO_2 , определяемой из спутниковых измерений, сглажены осреднением по большей площади (см. предыдущий раздел), и это приводит, по-видимому, к уменьшению амплитуды вариаций по сравнению с локальными вариациями по результатам наземных измерений.

Невысокие по сравнению с годовыми месячные значения коэффициента корреляции подтверждают сделанное выше предположение о том, что высокая степень статистической связи между измеряемыми со спутника и с земли ежедневными значениями незагрязненной части ОС NO_2 в значительной мере обусловлена годовым ходом стратосферного NO_2 .

Эффект облачности

Мы уже рассматривали зависимость результатов сопоставления от облачности в предыдущих работах (Груздев, Елохов, 2009; Gruzdev, Elokho, 2010). Однако с обновленными данными ОМІ, использованными в настоящей работе, получены новые особенности этой зависимости.

На рис. 4 приведены значения средней разности и коэффициента корреляции между данным ОМІ и результатами наземных измерений, в зависимости от максимальной доли облачности (доля облачности определялась со спутника и соответствовала времени его пролета). Для этого анализа использовались только данные, полученные при значениях доли облаков, равных или меньших заданной максимальной доле. Средняя разность между значениями незагрязненной части ОС NO_2 невелика и находится в пределах ошибок измерения при любой доле облаков (рис. 4а). При этом коэффициент корреляции увеличивается с увеличением максимальной доли облаков, причем наиболее быстро при малых значениях доли облаков. Этот результат можно объяснить экранирующим действием облачности при измерениях со спутника: наличие облачности уменьшает влияние NO_2 , содержащегося в подоблачном слое, на результаты определения незагрязненной части ОС NO_2 . Отметим, что облачность практически не оказывает влияния на результаты зенитных измерений содержания NO_2 в стратосфере с поверхности земли (Елохов, Груздев, 2000; Груздев, Елохов, 2009).

Противоположный характер зависимости коэффициента корреляции от доли облаков получен для тропосферного содержания NO_2 (рис. 4б). Он объясняется той же причиной. В отсутствие облачности нет и ее экранирующего влияния на регистрируемое со спутника рассеянное атмосферой излучение, и корреляционная связь между результатами спутниковых и наземных измерений в этих условиях наилучшая. Отметим, что

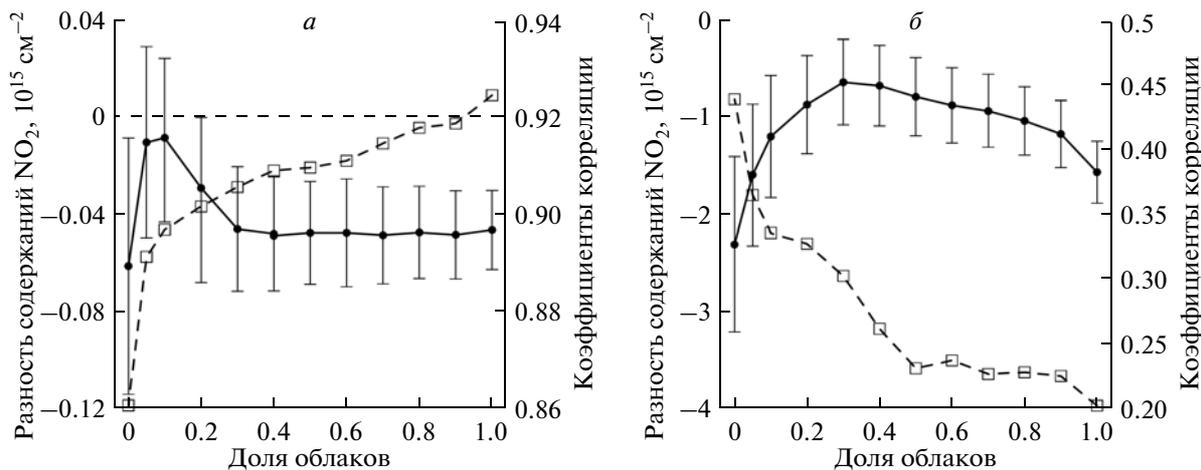


Рис. 4. Средняя разность и коэффициент корреляции между значениями незагрязненной части общего содержания NO₂ (а) и значениями содержания NO₂ в вертикальном столбе тропосферы (б) по данным наземных и спутниковых измерений в зависимости от максимальной доли облачности. Вертикальные отрезки соответствуют 95%-ным доверительным интервалам.

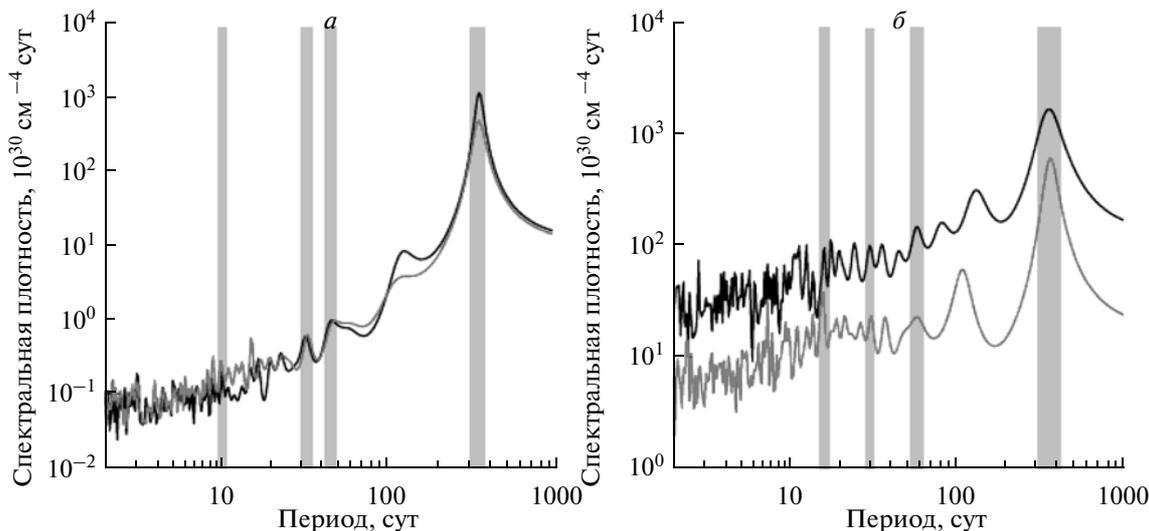


Рис. 5. Спектры мощности флуктуаций значений незагрязненной части общего содержания NO₂ (а) и содержания NO₂ в вертикальном столбе тропосферы (б) по данным наземных (черные кривые) и спутниковых (серые кривые) измерений. Вертикальные серые полосы на рисунке а указывают спектральные пики, соответствующие десятисуточным, квазимесячным, полуторамесячным и годовым, а на рисунке б – двухнедельным, месячным, двухмесячным и годовым вариациям.

средняя разность содержаний NO₂ на рис. 4б при малых значениях доли облаков близка к нулю, с учетом 45%-ной поправки на наземные данные (см. предыдущий раздел) и с учетом доверительных интервалов. Однако мы не можем учесть такого рода поправку в облачных условиях из-за отсутствия ее оценок.

Спектральный и кросс-спектральный анализ

Если причины, приводящие к ухудшению корреляции между данными наземных и спутнико-

вых измерений, имеют случайный характер, то статистическая связь между данными все-таки может проявляться в регулярных и квазирегулярных вариациях. С целью их выявления применим технику спектрального и кросс-спектрального анализа высокого разрешения с использованием метода максимальной энтропии (Кей, Марпл, 1981; Jones, 1978).

На рис. 5 приведены спектры мощности флуктуаций незагрязненной части ОС NO₂ и содержания NO₂ в вертикальном столбе тропосферы по

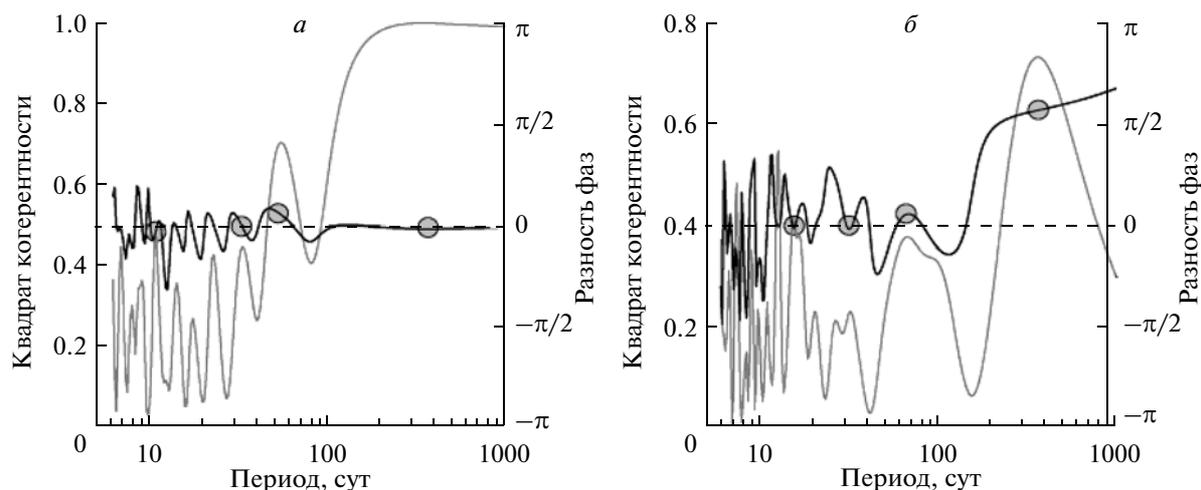


Рис. 6. Спектры когерентности (серые кривые) и спектры разности фаз (черные кривые) между данными спутниковых и наземных измерений “незагрязненной” части общего содержания NO_2 (а) и содержания NO_2 в вертикальном столбе тропосферы (б). Серые кружки на фазовых спектрах соответствуют максимумам спектра когерентности в спектральных полосах, выделенных на рис. 5.

данным наземных и спутниковых измерений. Для расчета спектров использованы среднесуточные данные.

В спектрах незагрязненной части ОС NO_2 кроме сильного годового максимума отметим слабые спектральные максимумы с периодами около 10, 30 и 45 сут, присутствующие в обоих спектрах (рис. 5а). Их небольшие амплитуды обусловлены, в частности, тем, что, согласно спектрально-временному анализу (Gruzdev, Elokhov, 2011; Груздев, 2011), вариации внутрисезонных масштабов проявляются в течение не всего анализируемого периода, а только в ограниченных временных интервалах.

В спектре когерентности между среднесуточными значениями незагрязненной части ОС NO_2 , полученными из спутниковых и наземных измерений, отмечены максимумы в окрестностях этих четырех периодов (рис. 6а), а сдвиг фазы на этих периодах близок к нулю. Следовательно, между спутниковыми и наземными данными имеется соответствие не только в годовом ходе, но и в вариациях с периодами в окрестности 10, 30 и 45 сут.

Тропосферные спектры содержат общие максимумы с годовым периодом и с периодами в окрестности двух недель, месяца и двух месяцев, выделенные на рис. 5б вертикальными полосами. Фазовый спектр на рис. 6б показывает наличие синхронности между вариациями в спутниковых и наземных данных на двухнедельном, месячном и двухмесячном масштабах. Однако годовое ход тропосферного NO_2 по спутниковым данным запаздывает примерно на четверть периода относительно годового хода в данных наземных измерений. Приблизительная ортогональность годовых вариаций в значительной степени обуславливает

плохую корреляцию тропосферных значений содержания NO_2 по всему периоду наблюдений (рис. 3г).

Отдельные события

Наземная сеть измерений содержания NO_2 включает лишь несколько десятков станций (<http://www.ndacc.org/>). Поэтому важно знать, можно ли информацию, получаемую со спутника, использовать для изучения отдельных событий, например, для анализа аномалий.

По измерениям на ЗНС мы обнаружили сильную отрицательную аномалию ОС NO_2 в конце марта—начале апреля 2011 г., вызванную переносом стратосферного воздуха из области озонной “дыры”, наблюдавшейся в тот сезон над Арктикой (Груздев, Елохов, 2012). Аномалия сопровождалась значительным похолоданием стратосферы и уменьшением общего содержания озона. На рис. 7 приведены отклонения незагрязненной части ОС NO_2 в течение 2010–2011 гг. от многолетнего среднего годового хода по вечерним данным наземных измерений и по среднесуточным данным ОМІ. Годовой ход удален с помощью предложенного в (Груздев, 2011) метода. Сначала рассчитывались многолетние среднемесячные значения и по ним путем разложения в ряд Фурье определялись амплитуды и фазы гармоник — спектральных компонент годового хода. Годовой ход для произвольного времени года определялся как суперпозиция Фурье-компонент для этого момента времени. Из данных об NO_2 был также удален линейный тренд, рассчитанный по методу (Груздев, 2008). Мы привели результаты вечерних

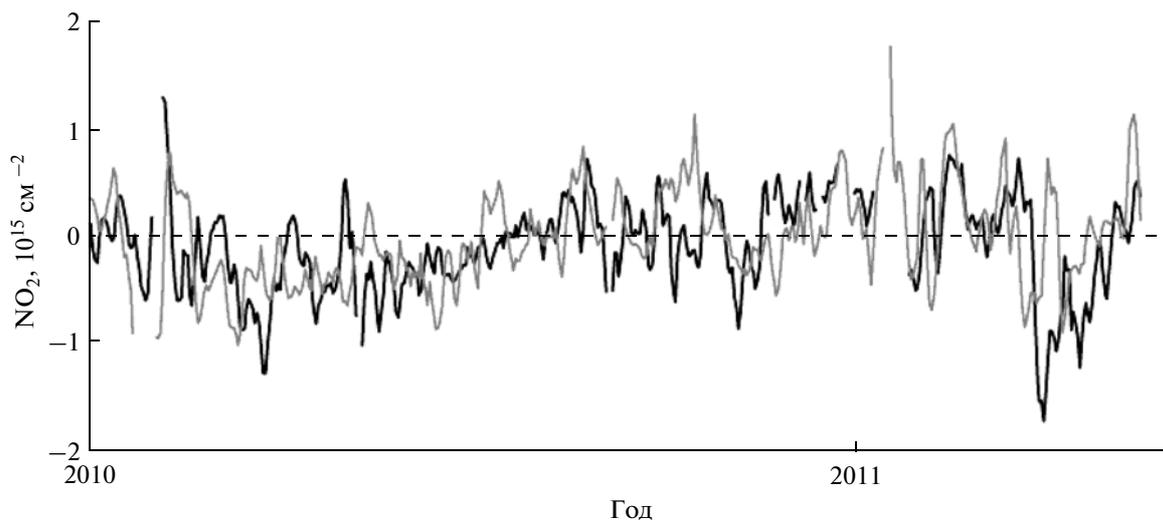


Рис. 7. Отклонение “незагрязненной” части общего содержания NO₂ в течение 2010–2011 гг. от многолетнего среднего годового хода по вечерним данным наземных измерений (черная кривая) и по среднесуточным данным измерений с помощью прибора OMI (серая кривая).

наблюдений на ЗНС по причине меньшего количества разрывов в этих данных.

На рис. 7 наибольший интерес представляют выявленные по наземным данным значительные отрицательные аномалии NO₂ в конце марта 2010 г. и в конце марта 2011 г. Обе они вызваны переносом из арктической области, но дополнительный вклад в рекордную аномалию 2011 г. внесла денитрификация нижней стратосферы Арктики (Груздев, Елохов, 2012). Из рис. 7 следует, что соответствие между отклонениями содержания NO₂ в целом плохое. Отмеченные выше аномалии не выявлены в данных OMI. Отрицательная аномалия в данных OMI в марте 2011 г., предшествующая аномалии в наземных данных, ничем не выделяется на фоне других отрицательных аномалий. Более того, стратосферный перенос в этот период в точку с координатами ЗНС происходил в зональном направлении.

Аномалии приземного и, в целом, тропосферного содержания NO₂ природного происхождения могут вызываться крупномасштабными пожарами. В период лесных и торфяных пожаров в Подмоскowie в июле–сентябре 2002 г. (т.е. еще до запуска спутника EOS-Aura) на ЗНС было несколько эпизодов с высокими значениями содержания NO₂ в пограничном слое атмосферы, сопровождавшихся аномалиями приземной концентрации субмикронного аэрозоля (Груздев и др., 2003). Не менее сильные, но преимущественно торфяные, пожары, охватившие значительную часть Центральной России, включая Московскую обл., были в июле–августе 2010 г. Однако повышение содержания NO₂ в пограничном слое атмосферы на ЗНС при заносе задымленного возду-

ха в 2010 г. не зарегистрировано (Исаков и др., 2011). Это подтверждается и анализом химического состава приземного микронного аэрозоля, в пробах которого в 2010 г., в отличие от 2002 г. (Груздев и др., 2003), отсутствовали химические компоненты, связанные с атмосферной NO₂.

Рис. 1б показывает, что тропосферное содержание NO₂ на ЗНС в июле–августе 2010 г. по наземным измерениям было типичным для этого времени года, когда в годовом ходе тропосферного содержания NO₂ наблюдается годовой минимум. Однако по данным OMI этому периоду соответствует продолжительный максимум тропосферного содержания NO₂.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение результатов наземных измерений содержания NO₂ на Звенигородской научной станции и результатов измерений с помощью прибора OMI при пролетах спутника над станцией выявило, что среднестатистическое расхождение значений незагрязненной (главным образом стратосферной) части общего содержания NO₂ за весь срок совместных наблюдений невелико и не выходит за пределы ошибок измерений. Однако значения содержания NO₂ по спутниковым данным летом меньше значений, получаемых из наземных наблюдений и больше их зимой.

Достаточно высокая корреляция (0.92) между значениями незагрязненной части ОС NO₂, определяемыми из наземных и спутниковых измерений, за полный период в значительной степени обусловлена годовым ходом NO₂. Корреляция су-

щественно ухудшается при сравнении данных по месяцам. В январе корреляция отсутствует совсем.

В целом отмечено значительное расхождение между значениями содержания NO_2 в вертикальном столбе тропосферы по данным ОМІ и данным наземных измерений. Соответствие по величине между данными наземных и спутниковых измерений наилучшее весной и летом и наиболее плохое зимой. В целом годовой ход разности тропосферных значений и годовой ход разности стратосферных значений содержания NO_2 противоположны друг другу.

Месячные значения коэффициентов корреляции для тропосферного содержания NO_2 достигают значений 0.6–0.7, превышающих максимальное значение коэффициента корреляции для незагрязненной части ОС NO_2 . Корреляция между спутниковыми и наземными данными о содержании NO_2 в тропосферной толще наиболее сильная в зимне-весенний период.

Коэффициент корреляции между наземными и спутниковыми данными о незагрязненной части ОС NO_2 увеличивается, а коэффициент корреляции между данными о тропосферном содержании NO_2 уменьшается с увеличением доли облаков.

Отмечено соответствие между отдельными квазирегулярными вариациями внутрисезонного масштаба, выявленными в данных ОМІ и в наземных данных. Однако годовой ход тропосферного содержания NO_2 в спутниковых данных не соответствует по фазе годовому ходу по результатам наземных измерений.

Сильная отрицательная аномалия незагрязненной части ОС NO_2 в конце марта–начале апреля 2011 г., вызванная затоком стратосферного воздуха из области арктической озонной дыры, отчетливо проявившаяся в результатах наземных измерений на Звенигородской станции, не проявилась в данных ОМІ.

В целом данные измерений содержания NO_2 с помощью прибора ОМІ должны использоваться с осторожностью при изучении временной изменчивости NO_2 .

Авторы благодарят коллектив международной научной группы по измерениям с помощью прибора ОМІ (OMI International Science Team) за подготовку данных о содержании NO_2 для станции Звенигород. Данные измерений с помощью прибора ОМІ получены из Центра валидации данных спутника Aura (AVDC). Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ и программ Президиума РАН и Отделения наук о Земле РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Груздев А.Н.* Широтная зависимость вариаций стратосферного содержания NO_2 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 3. С. 345–359.
- Груздев А.Н.* О недельной цикличности в атмосфере // Докл. РАН. 2011. Т. 439. № 3. С. 407–412.
- Груздев А.Н., Елохов А.С.* Валидация результатов измерений содержания NO_2 в вертикальном столбе атмосферы с помощью прибора ОМІ 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.* Отрицательная аномалия стратосферного содержания NO_2 над Звенигородом в конце марта–начале апреля 2011 г. // Докл. РАН. 2012. Т. 446. № 5.
- Груздев А.Н., Исаков А.А., Шукурова Л.М., Елохов А.С., Шукуров К.А.* Совместные исследования субмикронного аэрозоля и двуокси азота в приземном слое атмосферы в период лесных и торфяных пожаров в Подмосковье в июле–сентябре 2002 г. // Докл. РАН. 2003. Т. 391. № 4. С. 540–544.
- Елохов А.С., Груздев А.Н.* Измерения общего содержания и вертикального распределения NO_2 на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 6. С. 831–846.
- Исаков А.А., Аникин П.П., Елохов А.С., Курбатов Г.А.* О характеристиках дымов лесных и торфяных пожаров в Центральной России летом 2010 г. // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 6. С. 478–482.
- Кей С.М., Марпл С.Л.* Современные методы спектрального анализа: обзор // ТИИЭР. 1981. Т. 69. № 11. С. 5–51.
- Boersma K.F., Buscela E.J., Brinksma E.J., Gleason J.F.* OMI algorithm theoretical basis document. Volume IV: OMI trace gas algorithms // ATBD-OMI-02. NASA Goddard Space Flight Center / Ed. K. Chance. Greenbelt, Md., 2002. P. 15–36.
- Boersma K.F., Jakob D.J., Eskes H.J., Pinder R.W., Wang J., van der A R.J.* Intercomparison of SCIAMACHY and OMI tropospheric NO_2 columns: Observing the diurnal evolution of chemistry and emissions from space // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № D16S26. doi: 10.1029/2007JD008816.
- Brinksma E.J., Pinardi G., Volten H., Braak R., Richter A., Schönhardt A., van Roozendaal M., Fayt C., Hermans C., Dirksen R.J., Vlemmix T., Berkhout A.J.C., Swart D.P.J., Oetjen H., Wittrock F., Wagner T., Ibrahim O.W., de Leeuw G., Moerman M., Curier R.L., Celarier E.A. Cede A., Knap W.H., Veefkind J.P., Eskes H.J., Allaart M., Rothe R., Pijters A.J.M., Levelt P.F.* The 2005 and 2006 DANDELIONS NO_2 and aerosol intercomparison campaigns // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № D16S46. doi: 10.1029/2007JD008808.
- Buscela E.J., Perring A.E., Cohen R.C., Boersma K.F., Celarier E.A., Gleason J.F., Wenig M.O., Bertram T.H., Wooldridge P.J., Dirksen R., Veefkind J.P.* Comparison of tropospheric NO_2 from in situ aircraft measurements with near-real-time and standard product data from OMI // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № D16S31ю doi: 10.1029/2007JD008838.
- 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 Roozendaal M., Pinardi G., Wittrock F., Schönhardt A., Richter A., Ibrahim O.W., Wagner T., Bojkov B.,*

- Mount G., Spinei E., Chen C.M., Pongetti T.J., Sander S.P., Bucselo 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.
- Gruzdev A.N., Elokhov A.S. Validation of Ozone Monitoring Instrument NO₂ measurements using ground based NO₂ measurements at Zvenigorod, Russia // *Int. J. Rem. Sens.* 2001. V. 31. № 2. P. 497–511.
- Gruzdev A.N., Elokhov A.S. Variability of stratospheric and tropospheric nitrogen dioxide observed by the visible spectrophotometer at Zvenigorod, Russia // *Int. J. Rem. Sens.* 2011. V. 32. № 11. P. 3115–3127.
- Ionov D.V., Timofeyev Y.M., Sinyakov V.P., Semenov V.K., Goutail F., Pommereau J.-P., Bucselo E.J., Celarier E.A., Kroon M. Ground-based validation of EOS-Aura OMI NO₂ 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.
- Irie H., Kanaya Y., Akimoto H., Tanimoto H., Wang Z., Gleason J.F., Bucselo E.J. Validation of OMI tropospheric NO₂ column data using MAX-DOAS measurements deep inside the North China Plain in June 2006: Mount Tai Experiment 2006 // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 6577–6586.
- Jones R.H. Multivariate autoregression estimation using residuals // *Applied Time Series Analysis* / Ed. Findley D.F. N.Y.: Acad. Press, 1978. P. 139–162.
- 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. doi:10.1029/2007JD009168.
- Vandaele A.C., Hermans C., Simon M., Carleer M., Colin R., Fally S., Mérienne M.-F., Jenouvrier A., Coquart B. Measurements of the NO₂ absorption cross section from 42,000 cm⁻¹ to 10,000 cm⁻¹ (238–1000 nm) at 220 and 294 K // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 1998. V. 59. № 3–5. P. 171–184.
- Wenig M.O., Cede A.M., Bucselo E.J., Celarier E.A., Boersma K.F., Veeffkind J.P., Brinksma E.J., Gleason J.F., Herman J.R. Validation of OMI tropospheric NO₂ column densities using direct-Sun mode Brewer measurements at NASA Goddard Space Flight Center // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. № D16S45. doi:10.1029/2007JD008988.

New Results of Validation of OMI NO₂ Measurements Using Data of Measurements at Zvenigorod Scientific Station

A. N. Gruzdev, A. S. Elokhov

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences, Moscow

Comparison of results of ground-based NO₂ measurements at Zvenigorod Scientific Station and results of overpass OMI measurements onboard the EOS-Aura satellite shows that the mean difference between the unpolluted (mainly stratospheric) NO₂ columns for the whole period of correlative measurements is within measurement errors. The NO₂ contents derived from satellite measurements are less than those derived from ground-based observations in summer but larger in winter. High correlation between ground-based and satellite data are significantly due to the annual cycle in NO₂. The correlation falls if data are compared on monthly basis. On the whole, a significant discrepancy is noted between tropospheric NO₂ columns derived from OMI and ground-based measurements. The correlation between satellite and ground-based data is weak for an entire year but increases in winter and spring. The correlation coefficient between ground-based and satellite data of unpolluted NO₂ columns increases while the correlation coefficients between tropospheric NO₂ columns decreases with increase in a cloud fraction. There is a correspondence between some quasi-regular variations of intra-seasonal scale revealed in OMI and ground-based data. However the annual variation in tropospheric NO₂ deduced from satellite data does not correspond by phase to the annual variation deduced from ground-based measurements. The NO₂ anomaly in the end of March through the beginning of April 2011 caused by inflow of stratospheric air from the area of the Arctic ozone hole and seen distinctively in results of ground-based measurements at Zvenigorod station has not been revealed in OMI data.

Keywords: validation, NO₂, OMI measurements, remote sensing