

Проблема валидации данных спутниковых измерений газового состава атмосферы на примере задачи глобального мониторинга общего вертикального содержания озона и двуокиси азота

Д.В. Ионов (ionov@troll.phys.spbu.ru)

НИИ Физики им. В.А. Фока Санкт-Петербургского государственного университета, Ульяновская ул. 1, 198504 Санкт-Петербург

Рассмотрен опыт участия кафедры физики атмосферы СПбГУ в международных программах валидации спутниковых экспериментов по глобальному мониторингу атмосферного озона и двуокиси азота в 1996-2006 гг. Представлены основные результаты сопоставлений данных GOME (спутник ERS-2), SCIAMACHY (спутник ENVISAT) и OMI (спутник AURA) с наблюдениями наземной сети озонметров M-124, а также некоторые результаты сопоставлений спутниковых измерений общего содержания двуокиси азота с наземными измерениями в районе Санкт-Петербурга (Петродворец) в 2004-2006 гг. Исследован ряд факторов, приводящих к расхождению между данными спутниковых и наземных измерений – пространственно-временная несогласованность (в том числе, пространственное смещение эффективно зондируемой воздушной массы), а также суточные вариации естественного и антропогенного происхождения.

Введение

Как всякие дистанционные измерения, определение газового состава атмосферы по данным радиационных наблюдений из космоса представляет собой сложную обратную задачу. Точность ее решения и, соответственно, точность определения содержания искомых газовых компонент обусловлена совокупностью разнообразных факторов: погрешностью измерений регистрирующего прибора, его абсолютной и спектральной калибровкой, погрешностями телеметрии, особенностями алгоритма интерпретации, исходной спектроскопической и априорной информацией. Практическое применение данных спутниковых измерений требует тщательного анализа их соответствия предъявляемым требованиям точности, пространственного и временного разрешения, на основе интенсивных согласованных исследований по валидации спутниковых данных. Так называемые кампании по валидации носят характер координированных сопоставлений спутниковых данных с результатами разнообразных независимых измерений, с участием многочисленных научно-исследовательских групп, обладающих опытом, как в дистанционных измерениях, так и в их интерпретации. Как правило, качество спутниковых данных контролируется сопоставлениями с результатами одновременных независимых наземных измерений, так как последние осуществляются в хорошо контролируемых и стабильных условиях наблюдений. Однако, в подавляющем большинстве случаев осуществление одновременных со спутниковыми наземных измерений в одной и той же точке оказывается невозможным. Кроме того, в силу различий в методиках и геометрии измерений, сопоставляемые между собой данные характеризуются разным пространственным и временным разрешением. Наконец, наземные измерения газового состава, используемые в качестве независимых для валидации спутниковых данных, сами зачастую являются дистанционными, и анализ результатов их сопоставлений требует рассмотрения особенностей соответствующих алгоритмов интерпретации косвенных измерений.

В данной работе рассмотрен опыт участия кафедры физики атмосферы СПбГУ в международных программах валидации спутниковых экспериментов по глобальному мониторингу атмосферного озона и двуокиси азота. Представленные результаты получены в сотрудничестве с целым рядом российских и зарубежных научно-исследовательских групп – Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова, Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова, Киргизский национальный университет, Бельгийский институт космической аэронавтики, Служба аэронавтики Национального центра научных исследований Франции. Все эти исследования проводились в рамках международных программ Европейского космического агентства (ESA) “Announcement of

Opportunity” – это проекты по валидации данных таких спутниковых экспериментов, как ERS-2 GOME, ENVISAT SCIAMACHY и AURA OMI.

Современные спутниковые системы глобального картирования газового состава атмосферы

Основная информация о характеристиках газового состава атмосферы поступает от различных систем наблюдений - наземной, самолетной, аэростатной и спутниковой. Спутниковый мониторинг характеристик атмосферы является важнейшей составляющей глобальной системы наблюдений, поскольку позволяет наиболее быстро получать информацию о состоянии всей атмосферы. Особое место в этой системе заняли сканирующие по пространству спутниковые спектрометры, осуществляющие регистрацию уходящего излучения в спектральной области от УФ до ИК. Высокое спектральное разрешение подобной аппаратуры, появившейся в последние десятилетия, позволяет одновременно определять содержания целого ряда газовых составляющих. При этом, используемая в надирной геометрии наблюдений система пространственного сканирования характеризуется все более высоким пространственным разрешением – от нескольких сотен до десятков километров. В настоящее время, таким образом осуществляется оперативное глобальное картирование общего вертикального содержания (ОС) таких компонент, как озон и двуокись азота (NO_2).

Информация о глобальном распределении ОС озона и NO_2 поступает со спутниковых систем измерений, установленных на околополярных солнечно-синхронных орбитах. Наиболее длинный ряд ОС озона (начиная с 1978 года) практически непрерывных ежедневных измерений накоплен аппаратурой TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer [1]), с 1996 года действующей на спутнике EarthProbe. Кроме того, в 1995 году начал работать прибор GOME (Global Ozone Monitoring Experiment [2]), запущенный на борту европейского спутника ERS-2. Позднее, в 2002 году был запущен аналогичный по геометрии и принципу измерений ОСО аппарат SCIAMACHY [3], установленный на европейском спутнике ENVISAT. Наконец, в 2004 году состоялся запуск американского спутника AURA, на борту которого в числе прочих, установлен прибор OMI (Ozone Monitoring Experiment [4]). В ближайшие годы планируются также запуски аналогов аппаратуры GOME на спутниках EPS-MetOp – GOME-2 [5], первый из которых был запущен в 2006 году.

Все эти приборы имеют в своей основе сканирующие по пространству спектрометры, осуществляющие надирные измерения уходящего (отраженного и рассеянного) излучения в УФ и видимом диапазонах спектра. TOMS измеряет уходящее излучение в шести спектральных каналах УФ области (308.6, 313.5, 317.5, 322.3, 331.2 и 360.4) с разрешением ~1 нм. Спектрометр GOME регистрирует спектр в УФ и видимой области спектра (240-790 нм) с разрешением 0.2-0.4 нм. Аппаратура SCIAMACHY имеет аналогичные с GOME спектральные характеристики для измерений ОСО (область спектрометрирования 240-2380 нм, с разрешением 0.2-1.4 нм). Прибор OMI осуществляет измерения спектра уходящего излучения в области 270-500 нм с разрешением ~0.4 нм. Различия в спектральных характеристиках приборов проявляются и в используемых ими оперативных алгоритмах обработки данных. Так, алгоритм TOMS основан на регрессионном принципе: с помощью радиационной модели поле уходящего излучения рассчитывается заранее для различных содержаний озона, а также условий спутниковых наблюдений и параметров атмосферы и подстилающей поверхности; затем, по измерениям TOMS определяется соответствующая этому излучению величина ОСО [6]. Для обработки данных GOME используется методика дифференциального поглощения DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy), заключающаяся в минимизации рассогласований между результатами измерений и линейной комбинацией известных спектров молекулярного поглощения (O_3 , NO_2 , H_2O , O_4) [7]. Оперативный алгоритм обработки результатов измерений ОСО аппаратурой SCIAMACHY в целом аналогичен

используемому в GOME [8]. Для интерпретации данных измерений прибора OMI используются обе схемы – алгоритм TOMS и методика DOAS; соответственно, существуют два типа данных OMI об ОСО [9].

Пространственное разрешение действующих спутниковых систем мониторинга ОСО также различается, и составляет ~50×50 км для TOMS, ~40×320 км для GOME, ~30×60 км для SCIAMACHY, и ~13×24 км для OMI. При этом, глобальное картирование поля ОСО достигается TOMS и OMI в течение суток, а прибором GOME – в течение трех суток. Аппаратура SCIAMACHY позволяет картировать глобальное поле ОСО лишь по прошествии 9 суток - в отличие от GOME, осуществляющего непрерывное сканирование по всей орбите, полоса сканирования SCIAMACHY имеет регулярные пропуски, связанные со специальным режимом комбинированных надирных и лимбовых измерений (отдельный скан состоит из 13 строк, охватывающих область 960×390 км, за которой следует пропуск такой же площади).

В отличие от озона, непрерывный спутниковый мониторинг содержания NO₂ в атмосфере стал возможен относительно недавно, с появлением сканирующих по пространству спектрометров высокого разрешения, осуществляющих надирные измерения уходящего излучения в видимом диапазоне спектра (~400-500 нм). Такие приборы как GOME в 1996 году и SCIAMACHY в 2002, а позднее, в 2004 - OMI, впервые позволили осуществлять, наряду с ОС озона, практически ежедневное глобальное картирование ОС NO₂.

Наземные измерения ос озона и NO₂

Традиционно, для валидации спутниковых измерений ОС озона (ОСО) используются, данные наблюдений наземных озонметрических сетей, оборудованных высокоточными, калиброванными измерительными системами – спектрофотометры Добсона, Брюера, а также фильтровые озонметры М-124. Станции, осуществляющие подобные долговременные измерения, объединены в единую международную сеть Всемирной Метеорологической Организации (WMO) и регулярно поставляют свои данные в Мировой Центр Данных Наблюдений за Озоном и УФ Радиацией (WOUDC, <http://www.woudc.org>) [10]. Кроме того, важной частью глобальной системы наземных наблюдений газового состава атмосферы является NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change), ранее NDSC. Сеть NDACC представляет собой международную программу, объединяющую станции, оснащенные стандартизированным набором приборов для дистанционного зондирования атмосферы с поверхности Земли, прошедших взаимные сравнения и калибровки [11-14].

В целом, для измерений ОСО данными наземными системами используется дифференциальный метод, заключающийся в регистрации УФ радиации в диапазоне длин волн 290-350 нм в двух или более спектральных интервалах, с дальнейшим определением содержания озона по отношению измеренных потоков (логарифму отношения). Спектрофотометр Добсона представляет собой двойной кварцевый монохроматор, который из спектра приходящей к прибору радиации выделяет попарно участки спектра: пару 305.5 нм / 325,4 нм, пару 311.45 / 332,4, и пару 317.6 / 339.8 [15]. Спектрофотометр Брюера является автоматизированным аналогом аппаратуры Добсона на основе монохроматора на дифракционной решетке, позволяющего регистрировать спектр УФ радиации в диапазоне 295-325 нм, выделяя с помощью маски пять спектральных интервалов с центрами на 306.3, 310.1, 313.5, 316.8 и 320.0 нм (шириной 0.6 нм) [16]. Основным типом наблюдений обеих систем являются измерения по прямому Солнцу, погрешность единичного измерения ОСО при этом не превышает 2%. Специальная методика наблюдений позволяет также вести измерения и по рассеянному излучению из зенита ясного и облачного неба.

Фильтровые озонметры М-124 используют при регистрации УФ излучения светофильтры, позволяющие выделять два спектральных интервала с максимумами 302 и 326 нм, и шириной около 20 нм [17]. Многолетние измерения М-124 показали, что погрешность единичного измерения ОСО по прямому Солнцу (при зенитных углах 20-70°) не превышает 5%, а погрешность определения среднего за день значения ОСО составляет 3%. Специальная методика, разработанная для измерений ОСО по зениту ясного и облачного неба, позволяет существенно увеличить объем и расширить период наблюдений в условиях облачности и низкого Солнца (начиная с 5°). Погрешность зенитных измерений ОСО при углах Солнца 14-70° составляет не более 3%; дополнительная погрешность при низком Солнце (5-14°) и очень плотной облачности не превышает 2-3%. Следует также отметить, что поскольку 15 из 27 ныне действующих станций М-124 расположены в высоких широтах (60° и выше), возможность вести измерения, начиная с высоты Солнца 5° позволяет свести к минимуму возможные пропуски в рядах наблюдений ОСО.

Для измерений ОС озона и NO₂ на станциях NDACC используются также наземные спектрометры, осуществляющие регистрацию спектров рассеянного в зенит видимого солнечного излучения. В частности, это приборы SAOZ (Système d'Analyse par Observation Zénithale), разработанные во Франции в 1988 году [18]. SAOZ позволяет осуществлять регулярные измерения ОС озона и NO₂ на основе автоматических сумеречных наблюдений. К настоящему времени, около 20 таких спектрометров установлено в различных районах земного шара – в тропиках и средних широтах, в Арктике и Антарктике. Прибор представляет собой плоский спектрометр с вогнутой голографической решеткой и матрицей фотодиодов из 1024 элементов, и регистрирует рассеянное солнечное излучение в широкой области спектра (300-600 нм) с разрешением ~1 нм. Обработка данных измерений SAOZ осуществляется бортовым компьютером в реальном времени, на основе методики DOAS [7]. На первом этапе методом наименьших квадратов определяется содержание озона и NO₂ для трассы формирования уходящего излучения (т.н. наклонное содержание), а затем, используя рассчитанные заранее для различных условий измерений значения воздушных масс (моделированное отношение измеряемого наклонного содержания к истинному вертикальному), определяется общее содержание искомым компонент в вертикальном столбе атмосферы. Для определения ОС озона и NO₂ в алгоритме обработки измерений SAOZ используются участки спектра 410-618 и 410-530 нм, соответственно. Результаты ежедневных измерений, в виде утреннего и вечернего значений ОС озона и NO₂, рассчитываются как среднее на восходе и заходе Солнца, в диапазоне зенитного угла 86-91°. Все действующие станции SAOZ аттестованы в качестве дополнительных пунктов сети NDACC, а погрешности их измерений составляют 3% и 5% для ОС озона и NO₂, соответственно. В России и странах СНГ аналогичные наблюдения ОС NO₂ ведутся на ряде станций, некоторые из которых также аттестованы NDACC (Звенигород [19], Салехард, Жиганск [20], Иссык-Куль [21, 22]). Начиная с середины 2002 года, кафедра физики атмосферы СПбГУ осуществляет в районе Санкт-Петербурга (Петродворец, ~30 км к юго-западу от центра города) также регулярные измерения ОС двуокиси азота (NO₂) методом спектрометрии рассеянного из зенита солнечного излучения [23].

Сопоставления данных спутниковых и наземных измерений ос озона и NO₂

ОС озона

В целом, как спутниковая, так и наземная системы долговременных наблюдений за атмосферным озоном ставят перед собой задачу определения ОСО с погрешностью менее 1%, необходимой для дальнейшего анализа временных трендов этой величины. Соответственно, при сопоставлениях между данными согласованных в пространстве и времени спутниковых и наземных измерений ОСО стремятся получить оценку среднего расхождения на уровне 1%. Однако, хотя подобное согласие достижимо в среднем по

большому объему сопоставлений, в отдельных условиях и географических областях наблюдений проявляются сезонные вариации этой величины, обусловленные отличием реальных параметров атмосферы и подстилающей поверхности от заданных в соответствующих алгоритмах обработки измерений ОСО. Так, хорошо известен сезонный ход средних отклонений ранних версий данных GOME от результатов наземных измерений, связанный с использованием четырех типов коэффициентов воздушной массы озона в алгоритме DOAS, соответствующих январю, апрелю, июлю и октябрю [24]. Аналогично, как TOMS, так и GOME демонстрируют рост расхождений с данными наземных измерений при низком Солнце, когда отличия истинной формы вертикального профиля озона от модельной приобретают все большее значение [25]. Регулярные сопоставления спутниковых данных с наземными, проводимые в рамках специальных кампаний валидации, стимулируют постоянное совершенствование алгоритмов оперативной обработки спутниковых измерений. Например, в 2004 году для обработки данных TOMS был внедрен алгоритм версии 8 [26], для данных GOME – версии 4.0 [27], а для SCIAMACHY – версии 5.04 [28]. Свой вклад в этот процесс внесли также работы по сопоставлениям спутниковых данных с результатами наземных измерений, выполнявшиеся на кафедре физики атмосферы СПбГУ [29-34]. Пример сопоставления многолетних данных TOMS и GOME с результатами измерений озонометрической сети России и СНГ (M-124, см. рис. 1) представлен на рис. 2 [35]. Видно, что среднее согласие данных TOMS 7-й версии с данными наземных измерений M-124 близко к 0. Кроме того, можно отметить существенное уменьшение среднего расхождения данных GOME с результатами наземных измерений при переходе от версии 2.7 ($\Delta = -3.0\%$) к версии 3.0 ($\Delta = -2.5\%$), а затем к версии 4.0 ($\Delta = -1.3\%$). При этом для данных GOME характерна сильная сезонная зависимость расхождений (особенно в версии 2.7), которая практически отсутствует в сопоставлении с данными TOMS. Вместе с тем, стоит отметить существенное увеличение расхождений при переходе к новой версии данных TOMS – до 2.3%, что уже выше, чем аналогичные оценки для GOME.

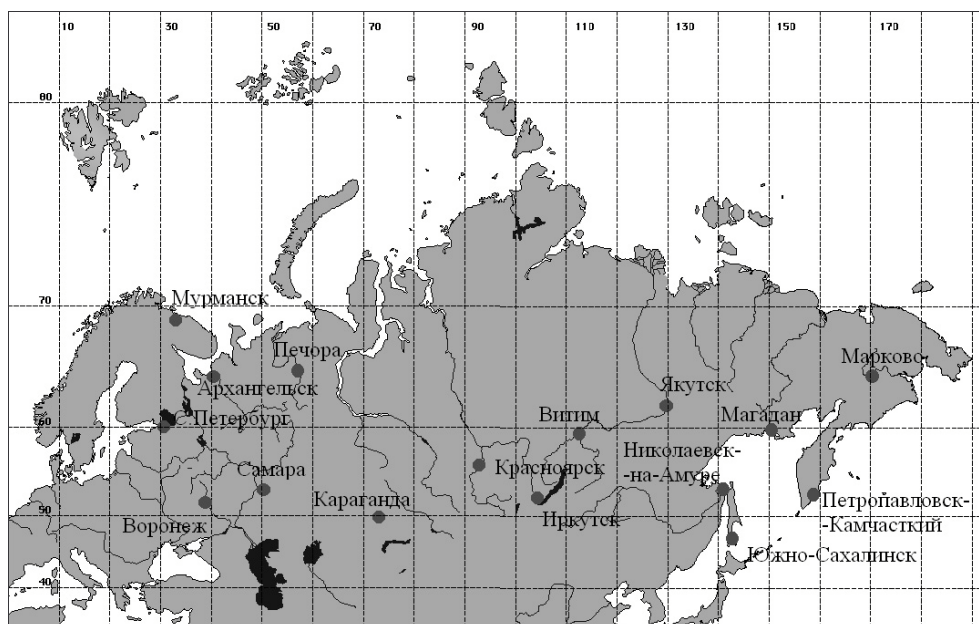


Рис. 1. Карта расположения российских станций озонометрической сети M-124, участвующих в регулярных сопоставлениях с данными спутниковых измерений ОСО.

Аналогичные сопоставления с данными измерений ОСО на сети станций M-124 проводились и для оценки точности измерений спутниковой аппаратуры SCIAMACHY. В частности, в конце 2006 года результаты этих сопоставлений использовались для сравнения между собой двух версий обработки данных SCIAMACHY – оперативного, на

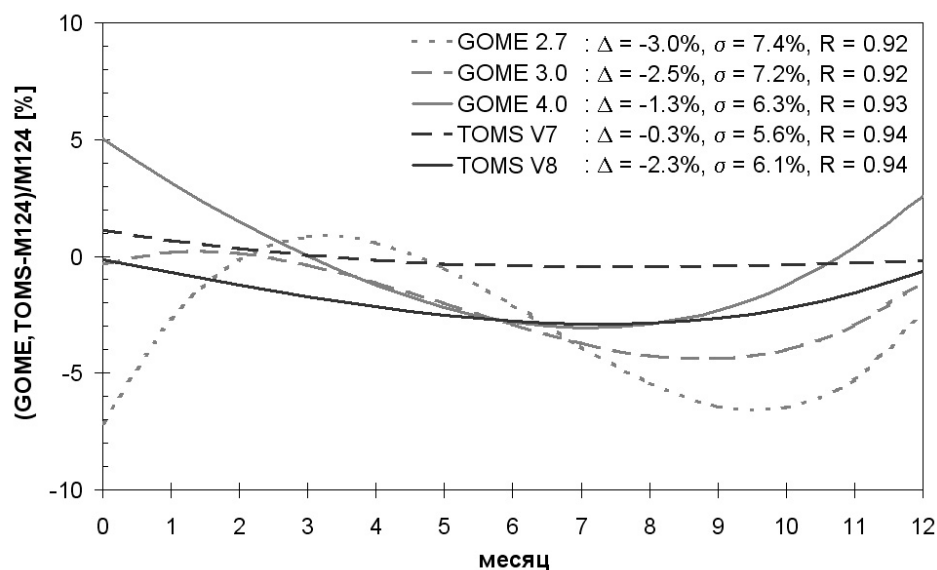


Рис. 2. Относительные расхождения (%) между данными спутниковых (TOMS, GOMS) и наземных измерений O_3 (озонметрическая сеть России и СНГ) в 1996-2001 гг., в зависимости от месяца года; Δ , σ и R соответствуют среднему и среднеквадратичному расхождению, и коэффициенту корреляции.

тот момент, алгоритма RT 5.04 и нового OL 3.00 [36]. Приведенные на рис. 3 оценки расхождений между результатами наземных измерений M-124 и данными одновременных измерений SCIAMACHY разных версий обработки, наглядно демонстрируют повышение качества спутниковых данных новой версии. Так, среднее расхождение Δ данных SCIAMACHY с результатами измерений M-124 при переходе к новой версии обработки уменьшилось от +1.4% до +0.7%, а среднеквадратичное σ – от 8.6% до 6.3% (в сопоставлении использовались данные одних и тех же измерений в 2004 г.).

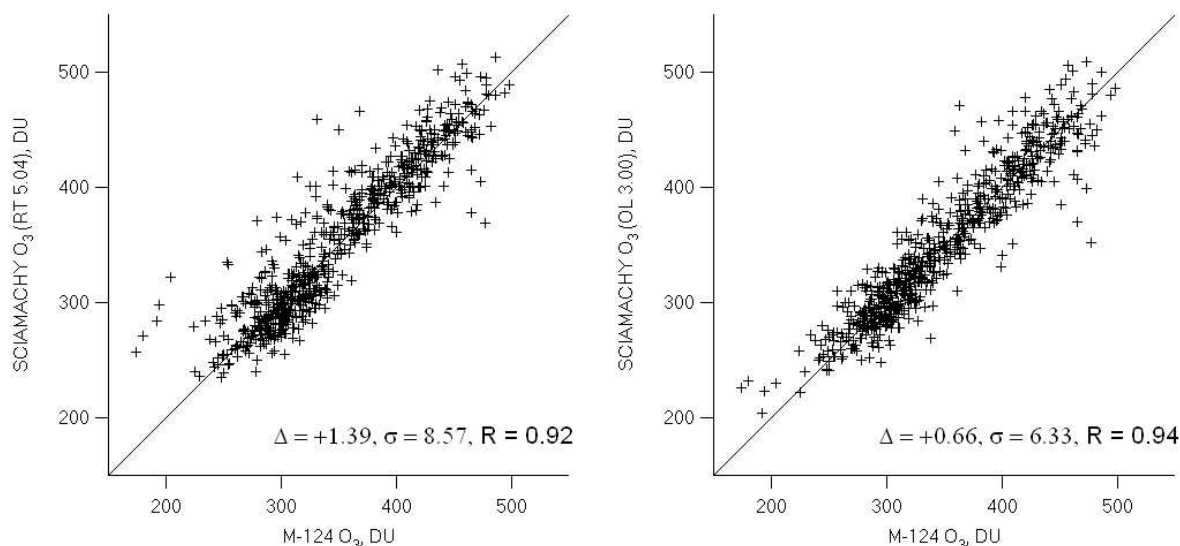


Рис. 3. Сопоставление данных российской озонметрической сети с результатами спутниковых измерений аппаратурой SCIAMACHY в 2004 г., обработанных двумя версиями оперативной обработки – RT 5.04 (слева) и OL 3.00 (справа); Δ , σ и R соответствуют среднему и среднеквадратичному расхождению, и коэффициенту корреляции.

Данные новой аппаратуры OMI, запущенной середине 2004 года и окончательно сменившей с 2005 года TOMS, также сравнивались с результатами одновременных наземных измерений M-124 в 2004-2006 гг. [36]. Оценки расхождений между результатами измерений M-124 и данными OMI версий обработки TOMS (“OMTO3”) и DOAS (“OMDOAO3”), в зависимости от времени года, представлены на рис. 4. В среднем,

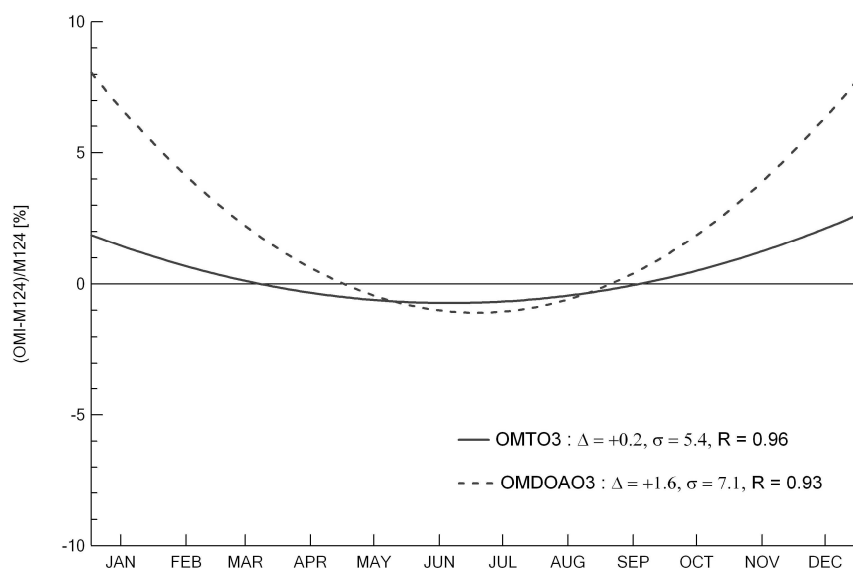


Рис. 4. Сопоставление данных российской озонметрической сети с результатами спутниковых измерений аппаратурой OMI в 2004-2006 гг., обработанных двумя версиями оперативной обработки – TOMS, “OMTO3” и DOAS, “OMDOAO3”; Δ , σ и R соответствуют среднему и среднеквадратичному расхождению, и коэффициенту корреляции.

данные OMI алгоритма TOMS лучше согласуются с M-124 – среднее расхождение Δ составляет всего +0.2%, а среднеквадратичное σ – 5.4%. Данные OMI алгоритма DOAS существенно превышают результаты измерений M-124 в зимнее время (до 8%), а средние оценки расхождений составляют +1.6% и 7.1% для Δ и σ , соответственно. Поскольку станции наблюдений M-124 расположены в разных климатических зонах, характеризующихся различными условиями освещенности и динамики изменений поля ОСО, целесообразно сгруппировать эти станции по нескольким зонам, как это было предложено, например, в [37]. Участвовавшие в валидации данных OMI станции M-124, представляют, согласно классификации [37], три основных региона Евразии – Северо-Запад, Восточная Сибирь и Дальний Восток. Полученные для этих трех регионов оценки расхождений “OMTO3-M124” Δ (σ) составили: -0.2% (5.8%), +0.7% (5.6%) и +0.4% (4.8%), соответственно.

Следует помнить, что одним из ключевых вопросов в валидации спутниковых данных является выбор наиболее близких между собой независимых измерений - как в пространстве, так и во времени. Как правило, для оценки качества спутниковых данных об ОСО отбираются результаты мгновенных спутниковых измерений, выполненных в пределах некоторого удаления от станции наземных наблюдений (обычно несколько сотен километров). Далее, результат этого спутникового измерения сравнивается со среднедневным значением ОСО, полученным по результатам наземных измерений на данной станции. Таким образом, предполагается, что ОСО в течение дня в районе сопоставлений меняется незначительно, а измерения обоих сравниваемых между собой приборов – наземного и спутникового – несут в себе информацию о содержании озона в одной и той же воздушной массе. В действительности же, оба эти условия не выполняются. Во-первых, динамические процессы в атмосфере нередко приводят к резким изменениям поля ОСО даже в течение нескольких часов, особенно в высоких широтах на границе полярного вихря. Во-вторых, благодаря различиям в геометрии спутниковых и наземных измерений, эффективные воздушные массы, зондируемые с поверхности Земли и из космоса, могут оказаться существенно разными. Так, истинная область наземных измерений ОСО по прямому солнечному излучению смещается от точки расположения прибора на несколько десятков километров в сторону Солнца (в зависимости от его высоты над горизонтом). Что касается спутниковых измерений ОСО

по рассеянному в надир солнечному излучению, то хотя они и выполняются с солнечно-синхронных орбит при наиболее высоком Солнце, в зимнее время и на высоких широтах область их измерений также смещается на десятки километров от подспутниковой точки в сторону Солнца. Наиболее же сильно этому эффекту подвержены, очевидно, результаты наземного сумеречного зондирования, ведь при восходе/заходе Солнца у линии горизонта это смещение может достигать нескольких сотен километров, а его направление медленно меняется в течение года.

К сожалению, учет всех этих факторов при массовых сопоставлениях данных достаточно сложен и, как правило, не выполняется. Вместе с тем, некоторые оценки, полученные с привлечением модели трассировки лучей (ray tracing), указывают на существенное сокращение расхождений между данными спутниковых и наземных измерений, при точном расчете положения зондируемых воздушных масс, с последующим выбором согласованных в пространстве независимых измерений [25]. Роль этих эффектов легче проследить в ходе небольших валидационных кампаний, как например SAUNA (Sodankyla totAl colUmn ozoNe intercompArison campaign), проводившаяся в Финляндии весной 2006 года, на базе полярной обсерватории Соданкюла (67.4° с.ш., 26.6° в.д.). Эта международная кампания была организована для взаимокалибровки наземной аппаратуры и валидации спутниковых данных об ОСО в условиях низкого Солнца и высокого содержания озона. До сих пор, большинство таких сопоставлений проводилось в средних широтах, при средних значениях ОСО (~ 300 е.Д.) – именно для них наблюдается относительно высокое согласие данных спутниковых и наземных измерений. Условия же последней кампании отличались высокими значениями ОСО (выше 500 е.Д.), резкими пространственно-временными вариациями поля ОСО в районе сопоставлений (в отдельные дни величина ОСО над станцией в течение суток менялась почти на 90 е.Д., или ~25%), а также относительно низкой максимальной высотой Солнца над горизонтом (от 18° в начале кампании, до 37° в конце). Особенно сложными эти условия оказываются для сопоставлений околополуденных спутниковых данных с результатами сумеречного зондирования наземными спектрометрами, поскольку эти измерения проводятся в совершенно другое время (утром и вечером) и эффективные воздушные массы этих измерений смещаются на значительные от станции расстояния в сторону восхода или захода Солнца. Вместе с тем, именно такая аппаратура и обеспечивает основной объем независимой наземной информации о величине ОСО для валидации спутниковых данных в полярных широтах, при низком Солнце и частой облачности. Пример прямого сопоставления полуденных спутниковых данных OMI с результатами утренних и вечерних измерений наземного спектрометра SAOZ, выполненных на станции Соданкюла в период 15/03-30/04/2006, представлен на рис. 5 (использованы данные OMI алгоритма DOAS, OMDOAO3). Как можно видеть, в отдельные дни разница между утренним и вечерним результатами измерений SAOZ достигает ~80 е.Д. - например, 26 марта и 1 апреля. Характер поля ОСО в районе наблюдений показан на рис. 6, где изображены карты ОСО, построенные на основе измерений OMI (<http://avdc.gsfc.nasa.gov>). Хорошо заметен резкий градиент содержания озона, проходящий, на момент спутниковых измерений, прямо в районе Соданкюлы. Двумя секторами на рисунках выделены также зоны зондируемых спектрометром SAOZ воздушных масс, построенные в простейшем геометрическом представлении проекции высоты стратосферного максимума содержания озона (~ 18 км) на поверхность Земли, с учетом изменения зенитного угла (86-91°) и азимута Солнца в период измерений SAOZ. Хотя данное представление весьма приближенно (поскольку SAOZ в действительности регистрирует не прямое, а рассеянное в зените солнечное излучение), оно отражает общую картину пространственного распределения данных сумеречных измерений и позволяет объяснить наблюдаемые отличия между результатами утренних и вечерних измерений SAOZ. Кроме того, для учета временной изменчивости поля ОСО в течение суток, использовались ассимилированные с помощью трехмерной транспортно-

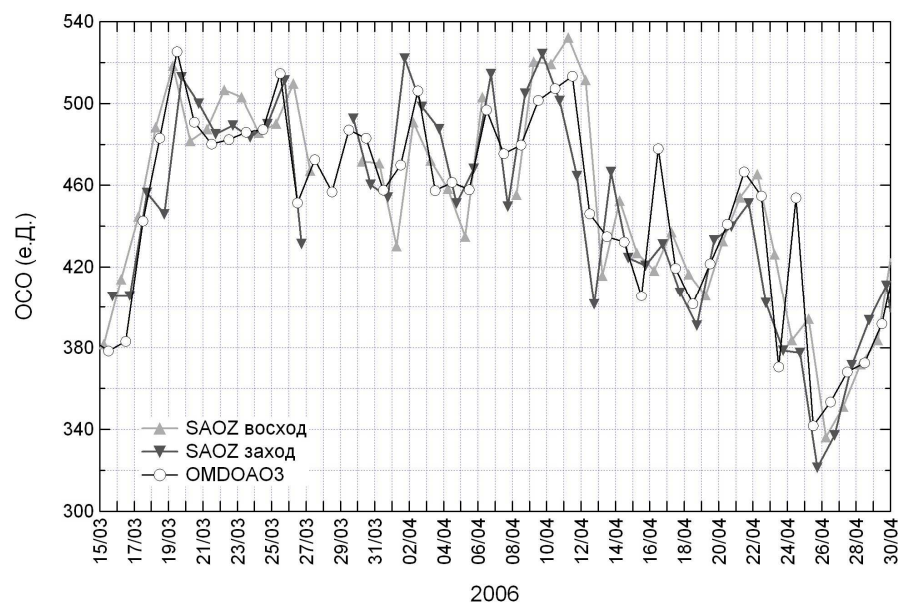


Рис. 5. Результаты сумеречных измерений ОСО в Соданкюле (Финляндия) спектрометром SAOZ, в сопоставлении с данными измерений спутниковой аппаратурой OMI (версия DOAS, “OMDOAO3”) весной 2006 г.

фотохимической модели ежечасные поля ОСО на основе данных OMI (алгоритм DOAS, <http://www.knmi.nl>). Это позволило сравнить результаты утренних и вечерних измерений SAOZ с данными OMI, приведенными к ближайшему часу захода или восхода Солнца. Сопоставление отдельно утренних и вечерних измерений SAOZ с различного типа данными OMI – полуденными в районе Соданкюлы, приведенными ко времени сумерек в районе Соданкюлы, а также приведенными ко времени сумерек и смещенными по направлению к Солнцу – представлено на рис. 7. Приведенные оценки расхождений между данными измерений SAOZ и OMI демонстрируют сокращение, по мере улучшения пространственно-временной согласованности сравниваемых между собой измерений – так, среднеквадратичное расхождение σ , составлявшее для прямого сопоставления 34-38% удалось сократить до 12-14%.

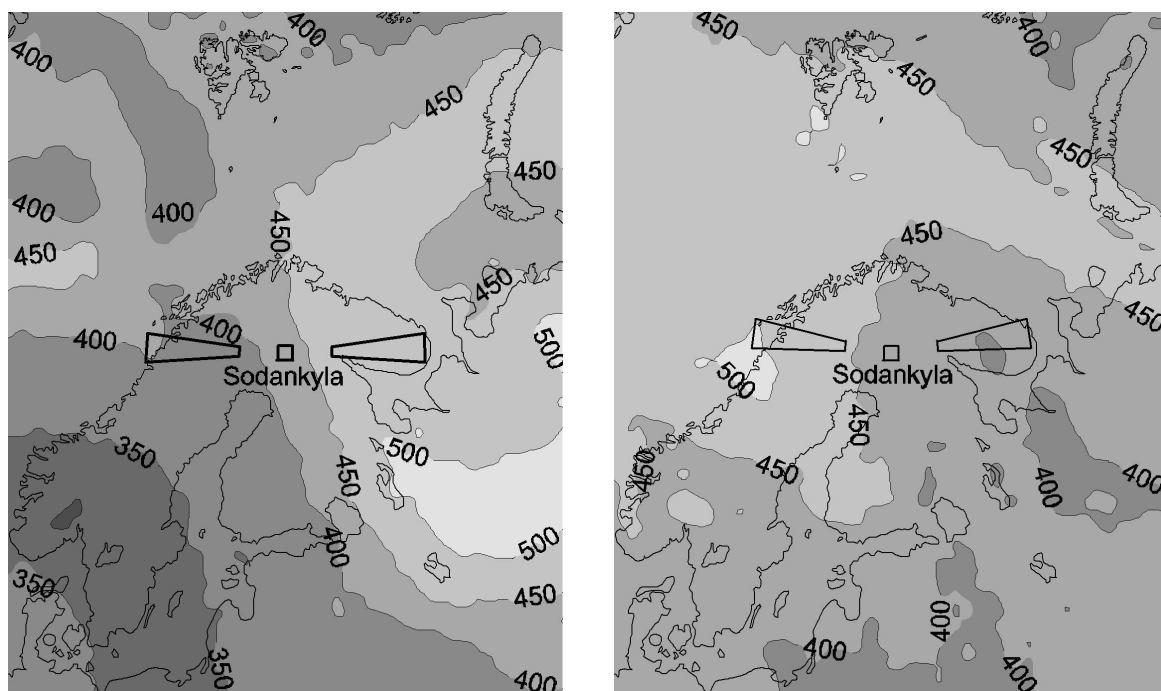


Рис. 6. Карты распределения ОСО в районе Соданкюлы (Финляндия), построенные по результатам измерений спутниковой аппаратуры OMI (версия TOMS, “OMT03”, <http://avdc.gsfc.nasa.gov>) для двух дней – 26/03/06 (слева) и 01/04/06 (справа).

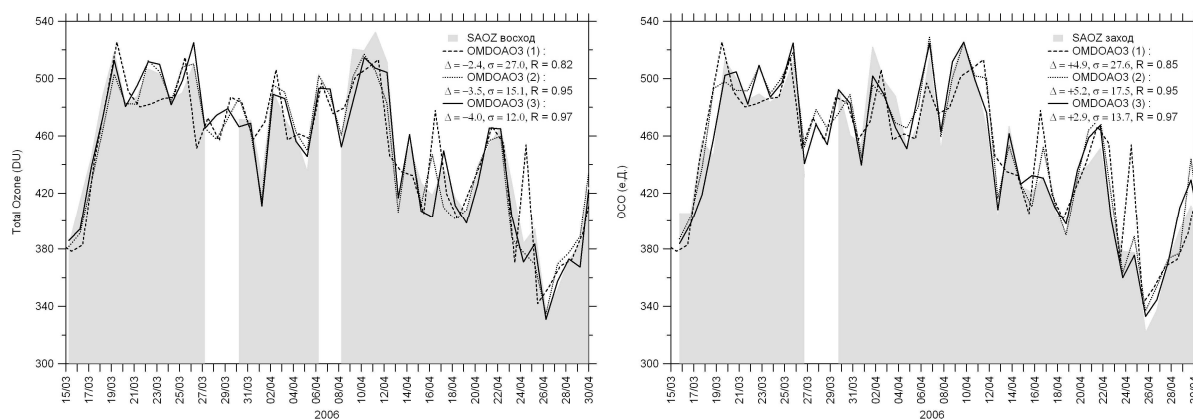


Рис. 7. Результаты сумеречных измерений ОСО в Соданкюле (Финляндия) спектрометром SAOZ, утром (слева) и вечером (справа), в сопоставлении с ассимилированными данными измерений спутниковой аппаратурой OMI (версия DOAS, “OMDOAO3”, <http://www.temis.nl>) – полуденные данные в районе Соданкюлы (1), утренние/вечерние в районе Соданкюлы (2), утренние/вечерние в районе Соданкюлы, смещенные по направлению к Солнцу (3); Δ , σ и R соответствуют среднему и спелнеквалратичному расхождению, и коэффициенту корреляции.

ОС двуокиси азота

По сравнению с ОСО, валидация спутниковых данных об ОС NO_2 представляет собой еще более сложную задачу. Во-первых, количество станций наземных измерений ОС NO_2 существенно меньше. Во-вторых, большинство этих измерений осуществляются сумеречным методом и, следовательно, при сопоставлении их со спутниковыми данными приходится сталкиваться с трудностями, описанными выше для ОСО – пространственно-временное рассогласование спутниковых и наземных измерений. Кроме того, в отличие от озона, содержание NO_2 в атмосфере испытывает значительные вариации в течение суток, обусловленные изменением освещенности при переходе от дня к ночи (с различными фотохимическими процессами), особенно при восходе и заходе Солнца. Наконец, еще одним важным фактором, затрудняющим сопоставление данных спутниковых и наземных измерений ОС NO_2 , является часто наблюдаемые антропогенные загрязнения, приводящие к повышенному содержанию NO_2 в тропосфере. Нередко, обычно незначительное тропосферное содержание NO_2 превышает ОС во всем столбе вышележащей атмосферы. Поскольку сумеречные наземные и дневные спутниковые измерения имеют разную чувствительность к содержанию NO_2 в тропосфере и разное пространственное разрешение (а пространственно-временные вариации тропосферного NO_2 значительно выше, чем в стратосфере), подобные загрязнения могут вносить дополнительное рассогласование в результаты сравнений.

В связи с тем, что специфические особенности вариаций NO_2 – суточный ход и тропосферное загрязнение – существенно превосходят влияние остальных факторов, описанных выше для ОСО, следует остановиться на них подробнее. Суточный ход NO_2 главным образом обусловлен реакциями взаимного перехода $\text{NO}_2 \leftrightarrow \text{NO}$, с преобладанием фотолиза NO_2 в NO на рассвете и преобразования NO в NO_2 (в реакции с O_3) на закате. Типичный цикл ОС NO_2 , рассчитанный для летнего и зимнего сезонов в районе Санкт-Петербурга с помощью фотохимической модели, представлен на рис. 8. Использовалась “0”-мерная модель (box model), являющаяся частью трехмерной транспортно-фотохимической модели SLIMCAT [38]. На графиках приведены кривые временного хода ОС NO_2 в январе и июле, отмечены время восхода и захода Солнца (зенитный угол 90°), а также среднее время момента спутниковых измерений в районе Санкт-Петербурга. Видно, что используемые в сравнениях спутниковые измерения осуществляются незадолго до или вскоре после полудня. При этом, в отличие от зимнего, летний период характеризуется более плавным изменением содержания NO_2 в период сумерек, что отражается в соотношении соответствующих сумеркам и середине светового дня

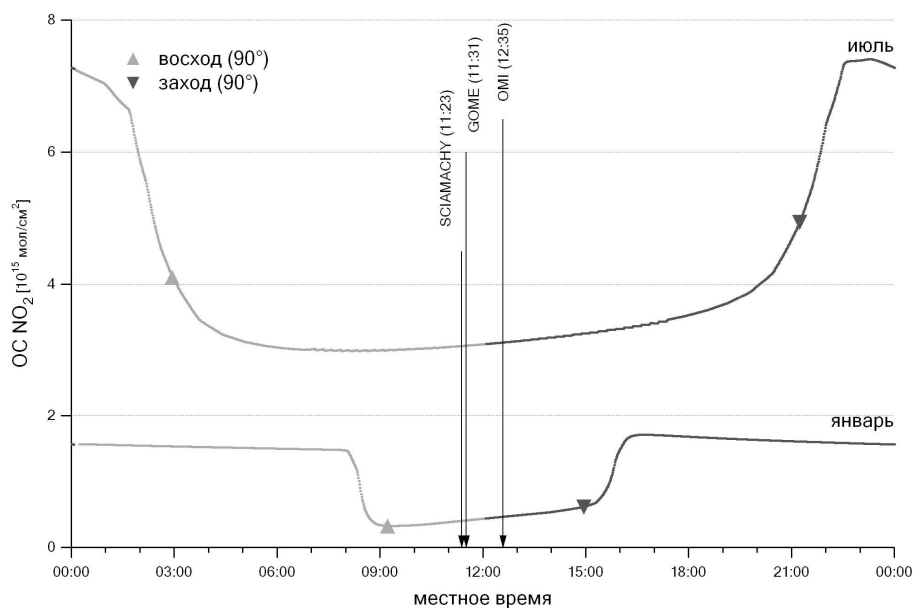


Рис. 8. Результаты численного моделирования суточного хода ОС NO₂ [38] в районе Санкт-Петербурга, в январе и июле; отмечены время восхода и захода Солнца (зенитный угол 90°), а также среднее время момента спутниковых измерений в районе Санкт-Петербурга.

значений – зимой величина ОС NO₂ в полдень может лежать между утренним и вечерним значением, а в летнее время полуденное содержание NO₂ оказывается даже ниже результатов обоих сумеречных наблюдений. В целом, данные спутниковых измерений ОС NO₂ оказываются ближе к утренним результатам наземных измерений. Однако, для корректного их сопоставления между собой, требуется вносить поправки на суточный ход ОС NO₂, с учетом его сезонной изменчивости. Подобная коррекция была реализована, в частности, в работе [22], посвященной валидации данных измерений ОС NO₂ спутниковой аппаратурой GOME на основе сопоставлений с результатами наземных сумеречных измерений на станции Иссик-Куль (42.6° с.ш., 77.0° в.д.) в Киргизии. Используя рассчитанный для каждого месяца года суточный ход ОС NO₂, утренние значения наземных измерений были приведены ко времени полудня, что позволило сократить наблюдаемое среднее расхождение с данными GOME (версия GDP3, 1996-2002 гг.) до $0.61 \cdot 10^{15}$ мол/см² (~ 24%). В дальнейшем этот метод был видоизменен – поскольку количество доступных для сопоставлений спутниковых данных растет, а время их измерений несколько отличается от полуденного, целесообразнее стало приводить спутниковые данные ко времени наземных утренних наблюдений. Например, скорректированные таким образом данные измерений GOME (версия GDP4, 2001-2003 гг.) отличаются от результатов утренних наземных измерений на Иссик-Куле в среднем на $0.31 \cdot 10^{15}$ мол/см² (~ 12%).

К сожалению, даже такое невысокое, в среднем, согласие (оценки среднеквадратичных расхождений составляют 20-30%), наблюдаемое в сопоставлениях данных GOME с наземными измерениями в удаленных от источников тропосферного загрязнения районах, недостижимо для наблюдений вблизи крупных населенных и промышленных центров. Например, результаты измерений ОС NO₂ в Звенигороде (~ 50 км к западу от Москвы) согласуются с данными GOME (версия GDP2.3, 1996-1998 гг.) значительно хуже – среднеквадратичные расхождения составляют ~ 60% [39]. В аналогичном сопоставлении данных GOME (версия GDP4, 2004-2006 гг.) с наземными измерениями в районе Санкт-Петербурга (Петродворец, ~ 40 км к юго-западу от центра города) среднеквадратичное составило уже 70% (см. рис. 9). При этом, данные GOME систематически превышают результаты наземных измерений – в среднем на 30%, что может быть связано со значительной величиной тропосферного NO₂, в большей степени регистрируемого GOME, чем наземной аппаратурой. Известно, что до 70% выбросов NO₂

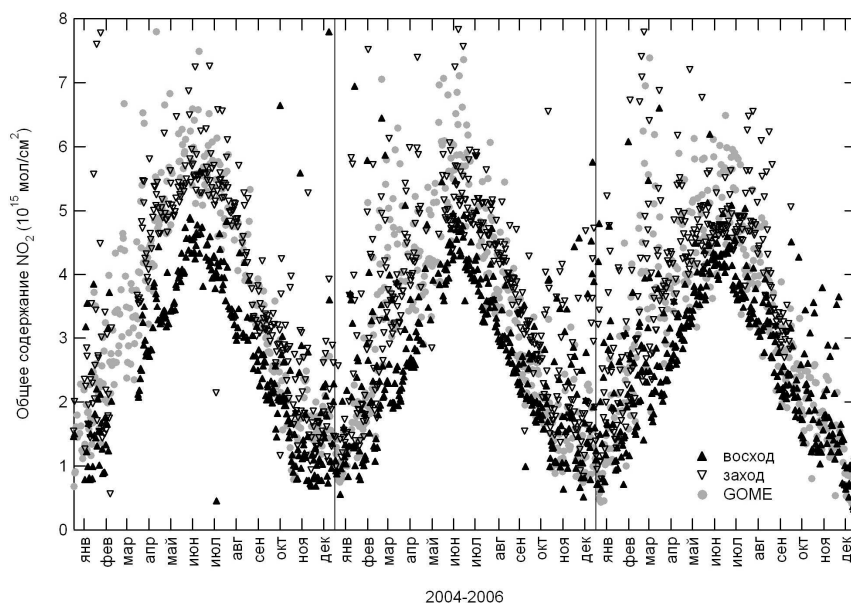


Рис. 9. Результаты сумеречных наземных измерений ОС NO_2 в районе Санкт-Петербурга (Петродворец), в сопоставлении с данными измерений спутниковой аппаратурой OMI в 2004-2006 гг.

в тропосферу обусловлено сжиганием топлива автомобилями и промышленными установками. Антропогенный вклад в содержание NO_2 во всей толще атмосферы настолько велик, что зачастую превышает естественный уровень и становится заметен в данных наблюдений спутниковых систем глобального мониторинга. Это обстоятельство позволяет, в свою очередь, использовать результаты спутниковых измерений содержания NO_2 в качестве индикатора антропогенного загрязнения [40]. Анализ данных спутниковых измерений ОС NO_2 в атмосфере удаленных районов мирового океана, вне антропогенного загрязнения, позволяет оценить стратосферную составляющую в величине общего вертикального содержания NO_2 . В предположении зональной структуры глобального распределения NO_2 в стратосфере, эта величина используется в дальнейшем для выделения стратосферной компоненты из ОС NO_2 на данной широте и, соответственно, определения содержания NO_2 в тропосфере [41]. Например, таким образом было получено среднегодовое распределение содержания NO_2 в тропосфере Балтийского региона (центральная и северная Европа, северо-запад России) в 2003-2006 гг., представленное на рис. 10. Карта построена на основе данных совместной интерпретации измерений SCIAMACHY в Бельгийском Институте Космической Аэронавтики и Королевском Национальном Институте Нидерландов (<http://www.temis.nl/>). Как видно из рисунка, основной особенностью поля тропосферного NO_2 на представленной территории является повышенное содержание в юго-западной части региона – Бельгия, Голландия, Германия (до $1.7 \cdot 10^{16}$ мол/см²), а также локальные максимумы в районе крупнейших мегаполисов европейской части России - городов Москва ($2.5 \cdot 10^{16}$ мол/см²) и Санкт-Петербург ($1.1 \cdot 10^{16}$ мол/см²). Анализ аналогичных карт, построенных по данным многолетних измерений GOME, также выявляет относительно высокие содержания тропосферного NO_2 в районе мегаполисов Москвы и Санкт-Петербурга.

Существуют также исследования, посвященные оценкам недельного цикла тропосферного содержания NO_2 вблизи крупных мировых мегаполисов, использующие данные многолетних наземных и спутниковых измерений. Поскольку основная часть антропогенных выбросов NO_2 связана со сжиганием топлива в двигателях транспорта и энергетических установках, наблюдаемый цикл характеризуется минимум содержания NO_2 в выходные дни. Подобный анализ был проведен, в частности, в работе [42], где использовалась информация о тропосферном содержании NO_2 , извлеченная из данных GOME. Очевидно, однако, что осредненные по дням недели данные об ОС NO_2 имеют одинаковую доли стратосферного содержания, и любые вариации этих средних значений

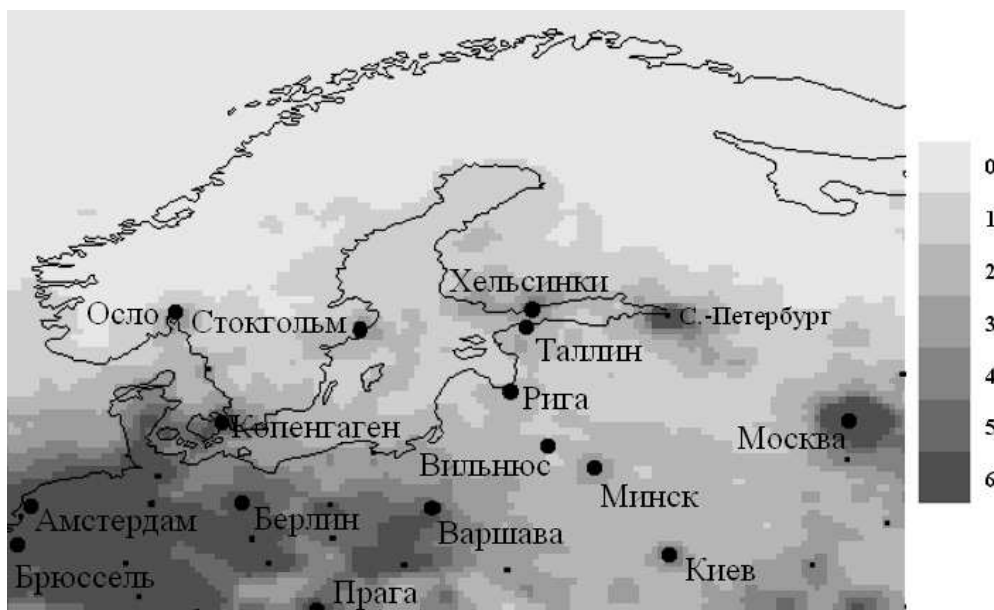


Рис. 10. Среднегодовое распределение содержания NO_2 (10^{15} мол/см²) в тропосфере Балтийского региона (центральная и северная Европа, северо-запад России), построенное на основе интерпретации данных спутниковых измерений SCIAMACHY в 2003-2006 гг. (<http://www.temis.nl/>).

могут быть обусловлены лишь вариациями тропосферной части. Полученный таким образом недельный цикл, рассчитанный на основе многолетних данных GOME (версия GDP4, 1995-2006 гг.) в районе Санкт-Петербурга, представлен на рис. 11. Видно, что минимальное содержание NO_2 наблюдается в воскресенье ($3.14 \cdot 10^{15}$ мол/см²) – на 6% ниже, чем, например, в среду и четверг ($3.34 \cdot 10^{15}$ мол/см²). И хотя этот минимум незначителен, он согласуется с результатами аналогичного исследования для крупных мегаполисов западной Европы. Тем самым, эти результаты выявляют наличие недельного цикла содержания NO_2 в тропосфере Санкт-Петербурга, обусловленного интенсивностью работы промышленности и транспорта. Аналогичные оценки были проведены также на основе данных спутниковой аппаратуры OMI (тропосферная часть ОС NO_2 , <http://avdc.gsfc.nasa.gov>), а также измерений приземных концентраций NO_2 в Санкт-Петербурге (городская сеть мониторинга загрязнения атмосферного воздуха [43]) в 2004-2006 гг. Кроме того, подобный анализ был выполнен по результатам дневных спектроскопических измерений ОС NO_2 (10:00-14:00 местного времени) в районе Санкт-Петербурга (Петродворец) в 2004-2006 гг., и несущим, в отличие от данных сумеречного зондирования, информацию о вариациях содержания NO_2 в тропосфере. Во всех рассмотренных таким образом результатах измерений был выявлен недельный цикл содержания NO_2 с минимумом в воскресенье. Тем самым, несмотря на относительную удаленность станции наземных измерений ОС NO_2 НИИФ СПбГУ от Санкт-Петербурга, подтверждается заметное влияние антропогенного загрязнения в данных спутниковых и наземных измерений, что необходимо учитывать при их взаимном сопоставлении. Очевидно, это справедливо также и для ряда других европейских станций – таких как Звенигород (Россия), Бремен (Германия), Jungfraujoch (Швейцария), ОНР (Франция) и др.

Заключение

Задача валидации данных спутниковых измерений ОС озона и NO_2 остается актуальной для всех действующих систем наблюдений, выходя за рамки простых взаимных сопоставлений результатов независимых измерений. Для достоверных оценок точности спутниковых данных требуется тщательный анализ условий сопоставлений и особенностей алгоритмов интерпретации сравниваемых между собой измерений. Кафедрой физики атмосферы СПбГУ, в сотрудничестве с российскими и зарубежными

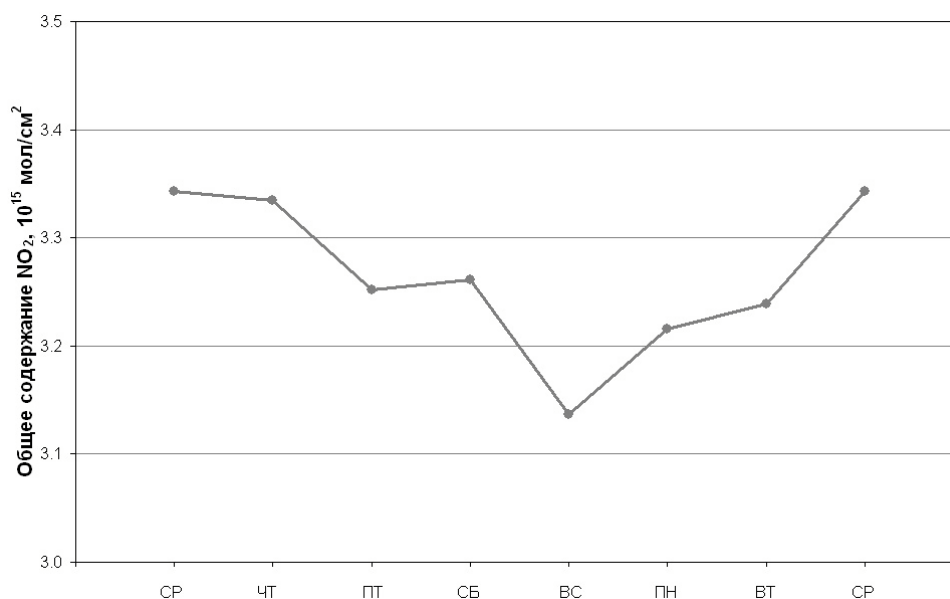


Рис. 11. Недельный цикл ОС NO₂ в районе Санкт-Петербурга по данным многолетних спутниковых измерений GOME в 1995-2006 гг..

научно-исследовательскими организациями, накоплен большой опыт подобных исследований. Результаты этих работ опубликованы в реферируемой научной печати и материалах международных конференций [22, 23, 29-36, 39], использовались в международных программах валидации экспериментов GOME (спутник ERS-2), SCIAMACHY (спутник ENVISAT) и OMI (спутник AURA). В частности, результаты сопоставлений данных спутниковых экспериментов с наблюдениями наземной сети озонметров M-124 подтвердили повышение точности обновленных алгоритмов оперативной обработки GOME и SCIAMACHY до уровня точности TOMS, и продемонстрировали несколько более высокую, по сравнению с TOMS, точность данных новой спутниковой аппаратуры OMI. Вместе с тем, ряд факторов, обуславливающих величину расхождений между данными спутниковых и наземных измерений, еще недостаточно полно рассмотрен в работах по валидации. Так, проведенные нами исследования указывают на важность пространственно-временной согласованности сравниваемых данных, с учетом геометрии измерений и возможного пространственного смещения эффективно зондируемой воздушной массы, особенно для высоких широт на границе полярного вихря. Кроме того, валидация данных измерений газовых компонент, испытывающих значительные суточные вариации естественного и антропогенного происхождения – таких как двуокись азота – требует использования фотохимических моделей, описывающих их естественные вариации, а также анализа источников антропогенного загрязнения и чувствительности к нему сравниваемых систем измерений.

Автор выражает благодарность Howard K. Roscoe (British Antarctic Survey) за предоставленную модель фотохимического цикла NO₂, разработанную Martin P. Chipperfield (University of Leeds). В работе использованы данные спутниковой аппаратуры GOME, предоставленные Европейским Космическим Агентством (ESA); программное обеспечение для работы с данными предоставил K. Bramstedt (Университет Бремена, Германия). Данные измерений спутниковой аппаратуры OMI в районе Санкт-Петербурга предоставлены Aura Validation Data Center, NASA (AVDC, <http://avdc.gsfc.nasa.gov>). Данные спутниковой аппаратуры SCIAMACHY о пространственном распределении содержания NO₂ в тропосфере получены с интернет-сайта Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI, <http://www.temis.nl>). Ассимилированные поля ОС озона предоставил Ronald van der A (KNMI). Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ (гранты МК-5390.2006.5, РНП.2.1.1.4166 и РНП.2.2.1.1.3836) и ESA (контракт 18028/04/NL/AR).

Литература

1. Heath, D.F., A.J. Krueger, H.R. Roeder, and B.D. Henderson. The Solar Backscatter Ultraviolet and Total Ozone Mapping Spectrometer (SBUV/TOMS) for Nimbus 7 // Opt. Eng., 14(4), 323-331, 1975.

2. *Burrows J.P., Weber M., Buchwitz M., Rozanov V., Ladstatter-Weibenmayer A., Richter A., DeBeek R., Hoogen R., Bramstedt K., Eichmann K.-U., Eisinger M.* The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission Concept and First Scientific Results // *J. Atmos. Sci.* V.56. p.151-175. 1999.
3. *Bovensmann H., Burrows J.P., Buchwitz M., Frerick J., Noël S., Rozanov V.V., Chance K.V., Goede A.H.P.* SCIAMACHY - Mission objectives and measurement modes // *J. Atmos. Sci.* V.56. p.127-150. 1999.
4. *Ahmad S.P., Levelt P.F., Bhartia P.K., Hilsenrath E., Leppelmeier G.W., Johnson J.E.* Atmospheric Products from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) // SPIE conference on Earth Observing Systems VIII, San Diego, California, Aug 3-8, 2003.
5. *Callies J., Corraccioli E., Eisinger M., Lefebvre A., Hahne A., Munro R., Perez-Albinana A.* Ozone monitoring by GOME-2 on the MetOp satellites // XVIII Quadriennial Ozone Symposium, l'Aquila, 12-21 September 1996, 1998.
6. *McPeters, D.F., P. K. Bhartia, A.J. Krueger, J.R. Herman, C.G. Wellemeyer, C.J. Seftor, G. Jaross, O. Torres, L. Moy, G. Labow, W. Byerly, S.L. Taylor, T. Swissler, R.P. Cebula.* Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) data products user's guide // NASA Reference Publication 1998-206895, 60, 1998.
7. *Platt U.* Differential optical absorption spectroscopy (DOAS), Air monitoring by Spectroscopic Techniques (M. Sigrist, ed.) // John Wiley & Sons, Inc., 127, 1994, 27-84.
8. *ESA (European Space Agency).* SCIAMACHY Level 1b to 2 Off-line Processing, Algorithm Theoretical Basis Document // Technical Note ENV-ATB-SAO-SCI-2200-0003, Spurr R. (Ed.), 95, 1998.
9. *NASA (National AeroSpace Agency).* OMI Ozone Products, OMI Algorithm Theoretical Basis Document // Technical Note ATBD-OMI-02, Bhartia P.K. (Ed.), 91, 2002.
10. *Hare E.W., E.J. Carty and V.E. Fioletov.* Recent advancements and developments at the WOUDC // Proc. of Quadrennial Ozone Symposium 2004, Kos, Greece, 1-8 June 2004, 2004.
11. *Hoffman D.J., et al.* Intercomparison of UV/visible spectrometers for measurements of stratospheric NO₂ for the Network for the Detection of Stratospheric Changes, *J. Geophys. Res.*, 100, D8, 16765-16791, 1995.
12. *Vaughan G., et al.* An intercomparison of ground-based UV-visible sensors of ozone and NO₂, *J. Geophys Res.*, 102, D1, 1411-1422, 1997.
13. *Roscoe H.K., et al.* Slant column measurements of O₃ and NO₂ during the NDSC intercomparison of zenith-sky UV-visible spectrometers in June 1996, *J. Atmos. Chem.*, 32 (2), 281-314, 1999.
14. *Vandaele A.C., et al.* An intercomparison campaign of ground-based UV-visible measurements of NO₂, BrO, and OCIO slant columns. Methods of analysis and results for NO₂, *J. Geophys Res.*, 110, D8, 1-24, 2005.
15. *Dobson G.M.B.* Observers' handbook for the ozone spectrophotometer // *Ann. IGY*, 1, 46-89, 1957.
16. *Brewer A.W.* A replacement for the Dobson spectrophotometer // *Pure and Applied Geophysics*, 106-108, 197, 919-927.
17. *Шаламянский А.М.* Озонометрическая сеть СНГ // *Метеорология и гидрология*, 9, 1993, 100-104.
18. *Pommereau J-P., and F. Goutail.* Ground-based measurements by visible spectrometry during Arctic winter and spring 1988 // *Geophys. Res. Lett.*, 15, 891-894, 1998.
19. *Елохов А.С., Груздев А.Н.* Измерения общего содержания и вертикального распределения NO₂ на Звенигородской научной станции // *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*. 2000. Т.36. N.6. С.831-846.
20. *Хайкин С.М., Игнатъев Д.В., Дорохов В.М., Поммеро Ж.-П., Мевиль О., Гутайл Ф., Ламберт Ж.-К.* Исследования влияния геофизических факторов на измерения O₃ и NO₂ спутниковым прибором GOME; Сравнения с наземными измерениями прибором SAOZ в полярных широтах // *Исследования Земли из космоса*. 2003. N.3. С.1-11.
21. *Синяков В.П., Спекторов Л.А.* Содержание озона и двуокиси азота в атмосфере северного Тянь-Шаня // *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*. 1987. Т.23. N.1. С.20-25.
22. *Ionov D.V., Sinyakov V.P., Semenov V.K.* Validation of GOME (ERS-2) NO₂ vertical column data with ground-based measurements at Issyk-Kul (Kyrgyzstan) // *Adv. Space Res.*, 37 (12), 2254-2260, 2006.
23. *Поберовский А.В., Шашкин А.В., Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М.* Вариации содержания NO₂ в районе Санкт-Петербурга по наземным и спутниковым измерениям рассеянного солнечного излучения // *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*. 2007. Т.43. N.4. С.547-556.
24. *ESA (European Space Agency).* ERS-2 GOME GDP 3.0 implementation and delta validation // Technical Note ERSE-DTEX-EOAD-TN-02-0006, Lambert, J.-C. (Ed.), 138, 2002.
25. *Lambert, J.-C., M. Van Roozendaal, M. De Mazière, et al.* Investigations of pole-to-pole performances of spaceborne atmospheric chemistry sensors with the NDSC // *J. Atmos. Sci.*, 56, 176-193, 1999.
26. *Wellemeyer, C. G., P. K. Bhartia, S. L. Taylor, W. Qin, L. Flynn, C. Seftor, Ch. Ahn,* The Version 8 Total Ozone Mapping Spectrometer Algorithm // Proc. of Quadrennial Ozone Symposium 2004, Kos, Greece, 1-8 June 2004, 2004.
27. *ESA (European Space Agency).* Delta validation report for ERS-2 GOME Data Processor upgrade to version 4.0 // Technical Note ERSE-CLVL-EOPG-TN-04-0001, Lambert, J.-C. and D.S. Balis (Ed.), 82, 2004.
28. *ESA (European Space Agency).* SCIAMACHY Bi-MONTHLY report November-December 2004 // Technical Note ENVI-SPPA-EOPG-RP-05-0010, Dehn, A. (Ed.), 47, 2005.

29. Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М., Ионов В.В., Шаламянский А.М., Йоханнессен О.М., Борроуз Дж.П. Сопоставление измерений общего содержания озона спектрометром GOME (ERS-2) по данным российской озонметрической сети // Исследования Земли из космоса. 1998. N 4. С.14-22.
30. D.V. Ionov, Yu.M. Timofeyev, V.V. Ionov, A.M. Shalamiansky, O.M. Johannessen, J.P. Burrows. Comparison of total ozone measurements by GOME spectrometer (ERS-2) with data of Russian ozonometric network. - Proc. of the Conf. on Information for Sustainability, 27th International Symposium of Remote Sensing of Environment, Tromso, Norway, 8-12 June, 1998, pp.274-277
31. Ionov D.V., Timofeyev Yu.M., Ionov V.V., Shalamiansky A.M., Bobylev L.P., Johannessen O.M., Burrows J.P. Validation of the GOME total ozone measurements (ERS-2) by data of Russian ozonometric network // European Symposium on Atmospheric Measurements from Space (ESAMS), 18-22 January 1999, ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, WPP-161, Vol.2, pp.731-733
32. Timofeyev Y.M., D.V. Ionov, V.V. Ionov, A.M. Shalamiansky, N.F. Elansky, A.S. Elokhov, A.N. Gruzdev, O.V. Postylyakov Delta characterisation of GOME data products with the Russian monitoring network // ERS-2 GOME Data Products Delta Characterisation Report 1999, J.-C. Lambert and P. Skarlas (Ed.), ESA/ESRIN, 1999, pp.61-76.
33. Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М., Шаламянский А.М. Сравнения спутниковых (аппаратура GOME, TOMS) и наземных измерений общего содержания озона // Исследования Земли из космоса. 2002. N 3. С.10-19.
34. Yu.M. Timofeyev, D.V. Ionov, M.V. Makarova, A.V. Poberovsky, A.M. Shalamiansky, N.F. Elansky, A.S. Elokhov, O.V. Postylyakov, A.V. Dzhola, E.I. Grechko, V.K. Semenov, V.P. Sinyakov. Validation of ENVISAT SCIAMACHY atmospheric trace gases measurements with the russian ground-based monitoring network // First ENVISAT Validation Workshop, ESA/ESRIN, Frascati, Italy, 9-13 December 2002, ESA SP-531, 2003.
35. Ionov D.V., Timofeyev Yu.M., Shalamiansky A.M., Lambert J.-C. Comparison of satellite (GOME, TOMS) total ozone data with the measurements of Russian ground-based network // Proc. IRS 2004: Current problems in atmospheric radiation, Busan, Korea, A. DEEPAK Publishing, Hampton, Virginia USA, 179-182, 2006.
36. Ionov D., Timofeyev Y., Goutail F., Pommereau J.-P., Shalamyansky A. Delta-validation of ENVISAT SCIAMACHY total ozone and NO₂ with the data of ground-based UV-VIS measurements (M-124 and SAOZ) // Proc. of 3rd Workshop on the Atmospheric Chemistry Validation of Envisat (ACVE-3), ESRIN, Italy, 4-7 December 2006, ESA SP-642, 2006.
37. Shalamyansky A.M., Karol I.L., Klyagina L.P., Romashkina C.I., Zubov V.A. Total ozone over the Russian and CIS territories as revealed by thirty years (1973-2003) ground based measurements // Proc. of Quadrennial Ozone Symposium 2004, Kos, Greece, 1-8 June 2004, 432-433, 2004.
38. Chipperfield M.P. Multiannual simulations with a three-dimensional chemical transport model // J. Geophys. Res., 104, D1, 1781-1805, 1999.
39. Тимофеев Ю.М., Ионов Д.В., Поляков А.В., Еланский Н.Ф., Елохов А.С., Груздев А.Н., Постыляков О.В., Розанов Е.В. Сопоставление результатов спутниковых и наземных измерений общего содержания NO₂ // Известия РАН, Физика атмосферы и океана, 2000, 36 (6), 802-808.
40. Richter A., Burrows J.P., Hendrik N., Granier C. and Niemeier U. Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space // Nature, 437 (7055), 129-132, 2005.
41. Richter, A., and J. P. Burrows, Tropospheric NO₂ from GOME measurements // Adv. Space Res., 29 (11) , 1673-1683, 2002.
42. Beirle S., Platt U., Wenig M., Wagner T. Weekly cycle of NO₂ by GOME measurements: a signature of anthropogenic sources // Atmos. Chem. Phys., 3, 2225-2232, 2003.
43. Голубев Д.А., Сорокин Н.Д. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 2004 году // СПб.: ООО «Сезам-Принт», 2005. 512 с.