

**Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»**

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д.7/9

У Т В Е Р Ж Д А Ю:

Проректор по НИР СПбГУ

_____ (Горлинский И.А.)

“ ___ ” _____ 2009 г.

М.П.

ОТЧЕТ

по научно-исследовательской работе за 2009 год

в рамках соглашения об информационном обмене и сотрудничестве между Комитетом по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности и физическом факультетом Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет» от 24.07.2007

«Комплексный мониторинг пространственно-временных вариаций содержания
двуоксида азота (NO_2) и озона (O_3) в атмосфере»

Исполнитель работ
к.ф.-м.н., с.н.с.

_____ (Ионов Д.В.)

**Санкт-Петербург
2009**

Отчет о выполненной работе в рамках соглашения об информационном обмене и сотрудничестве между Комитетом по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности и физическом факультетом ФГУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет» от 24.07.2007, с.24, рис.21, табл.5, источников 17, приложений нет.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: спутниковый мониторинг атмосферы, наземные спектроскопические измерения, двуокись азота, озон, антропогенное загрязнение атмосферы, тропосфера.

Объект исследования:

Данные долговременных дистанционных наземных и спутниковых спектроскопических измерений содержания двуокиси азота (NO_2) и озона (O_3) в атмосфере, данные регулярных прямых измерений приземных концентраций NO_2 в атмосфере Санкт-Петербурга, численные модели атмосферы.

Цель работы:

Валидация данных спутниковых измерений содержания NO_2 и O_3 в стратосфере, а также спутниковых измерений содержания NO_2 в тропосфере. Исследование суточных, недельных, сезонных и долговременных многолетних вариаций содержания двуокиси азота (NO_2) в атмосфере мегаполиса, с оценкой возможного тренда, обусловленного ростом антропогенного загрязнения. Численное моделирование процесса распространения газового антропогенного загрязнения в приземном слое. Разработка системы мобильных спектроскопических измерений содержания NO_2 в тропосфере.

Новизна:

Проинтерпретированы данные наземных наблюдений за содержанием NO_2 и O_3 в атмосфере Санкт-Петербурга в 2004-2009 гг.; проведено сопоставление данных сумеречных наземных измерений содержаний NO_2 и O_3 в стратосфере, а также данных дневных измерений содержания NO_2 в тропосфере, с данными одновременных спутниковых измерений различной аппаратурой (GOME, SCIAMACHY, OMI). Проанализированы характеристики точности наземных измерений новой спектроскопической аппаратурой (фирма OceanOptics, США); начаты регулярные измерения стратосферных содержаний NO_2 и O_3 , и тропосферного NO_2 (видимая область спектра), а также дневных стратосферных содержаний O_3 (УФ область спектра). Получены оценки вариаций содержания тропосферного NO_2 , как на основе данных наземных спектроскопических измерений НИИФ СПбГУ, так и данных дистанционного спутникового зондирования, а также прямых измерений приземных концентраций NO_2 автоматизированной системой мониторинга атмосферного воздуха. На основе данных многолетних спутниковых измерений GOME (1995-2009) получена уточненная оценка положительного линейного тренда тропосферного NO_2 в районе Санкт-Петербурга, составляющая 6% за 10 лет. Рассмотрены примеры численного моделирования (дисперсионная модель HYSPLIT) и мобильных спектроскопических измерений (спектрометр OceanOptics) поля приземного NO_2 в Санкт-Петербурге.

Эффективность:

Совместное использование результатов наземного и спутникового дистанционного зондирования газового состава атмосферы, данных автоматизированных локальных наземных измерений и результатов регионального численного моделирования.

Область применения:

Долговременный региональный мониторинг уровня антропогенного загрязнения атмосферы вблизи мегаполиса.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	01
1. ВАЛИДАЦИЯ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ NO ₂ И O ₃ В СТРАТОСФЕРЕ	01
2. ВАЛИДАЦИЯ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ NO ₂ В ТРОПОСФЕРЕ	09
3. ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКТРОМЕТРА OCEANOPTICS	17
3.1 Анализ температурной зависимости темного тока детектора OceanOptics	17
3.2 Оценка влияния величины поля зрения OceanOptics на точность измерений	18
3.3 Спектроскопические измерения содержания NO ₂ в центральной части Санкт-Петербурга	19
3.4 Мобильные спектроскопические измерения содержания NO ₂ в тропосфере	20
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	21
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	22

КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ СОДЕРЖАНИЯ ДВУОКИСИ АЗОТА (NO₂) И ОЗОНА (O₃) В АТМОСФЕРЕ

ВВЕДЕНИЕ

В 2009 году продолжались непрерывные измерения с помощью разработанного в НИИФ СПбГУ автоматизированного спектрального комплекса "КСВУ" (спектрометрия рассеянного излучения в интервале 428-515 нм с разрешением 1.3 нм, [1]). Всего в период с января по сентябрь 2009 г. было зарегистрировано около 160 тысяч спектров, обработка которых позволила определить содержания искомым газовых компонент в течение 262 дней. Кроме того, в 2009 году продолжались начатые в июне 2008 г. регулярные измерения рассеянного излучения автоматическим спектрометром высокого разрешения OceanOptics HR4000, аналогичные по принципу измерений и методике интерпретации аппаратуре "КСВУ", но обладающие более высоким спектральным и временным разрешением. Так, в видимой области спектра (398-607 нм) спектральное разрешение OceanOptics составило ~0.6 нм, а среднее время регистрации одного спектра (благодаря использованию ПЗС-матрицы) составляло ~100 мс (время сканирования одного спектра аппаратурой "КСВУ" составляет около минуты). С июня 2008 г. по август 2009 г. один из спектрометров OceanOptics был установлен в здании НИИФ и осуществлял непрерывные измерения в видимой области спектра, одновременно с аппаратурой "КСВУ". За этот период было зарегистрировано более 88 тысяч спектров (из них около 56 тысяч – в 2009 г.) и успешно проинтерпретированы данные 343 дней наблюдений (208 из них – в 2009 г.). В июне 2009 г. в здании НИИФ был установлен также другой спектрометр OceanOptics, осуществляющий непрерывные измерения в УФ области спектра (279-421 нм) со спектральным разрешением ~0.3 нм. За прошедшее время, с июня по сентябрь 2009 г. этой аппаратурой было зарегистрировано более 32 тысяч спектров, соответствующих 114 дням наблюдений. В настоящее время в НИИФ СПбГУ установлена полностью автоматизированная аппаратура "КСВУ" и OceanOptics (УФ область спектра), осуществляющая непрерывные измерения от восхода до захода солнца, интерпретация которых выполняется автоматически по наступлению темноты, а результаты измерений доступны к началу следующего светового дня.

Наряду со стационарными измерениями в НИИФ СПбГУ (Петродворец), в 2009 г. осуществлялись также эпизодические измерения в Василеостровском районе Санкт-Петербурга, с астрономической башни факультета географии и геоэкологии СПбГУ (10-я линия, д.33/35). Всего в августе-октябре 2009 г. с помощью спектрометра OceanOptics (видимая область спектра) было выполнено около 20 дней таких наблюдений. Кроме того, в этот период той же аппаратурой проводились мобильные измерения с борта легкового автомобиля на нескольких маршрутах в юго-западном районе Санкт-Петербурга и Ленинградской области, протяженностью до 100 км (всего 6 дней наблюдений).

1. ВАЛИДАЦИЯ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ NO₂ И O₃ В СТРАТОСФЕРЕ

Для анализа точности данных спутниковых измерений использовались результаты ежедневных наземных сумеречных измерений рассеянного излучения в видимой области, выполняющихся аппаратурой "КСВУ" на восходе и заходе солнца. Содержания озона и NO₂ в столбе атмосферы извлекаются из результатов зенитных измерений с помощью методики дифференциального поглощения DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) в области спектра 428-515 нм. Традиционно, для достижения максимальной точности наземного сумеречного зондирования результаты измерений усредняются в диапазоне зенитного угла солнца 86-91° [2]. При интерпретации измерений в НИИФ СПбГУ, для уменьшения влияния тропосферного загрязнения городскими источниками Санкт-Петербурга этот диапазон был сужен до 90-91° (это позволяет снизить чувствительность

сумеречных измерений к вариациям газового состава в нижних слоях атмосферы). Для согласования с данными дневных спутниковых измерений, выполняемых с околополярных солнечно-синхронных орбит, данные всех сопоставляемых измерений NO_2 – как спутниковых, так и наземных – пересчитывались с использованием фотохимической модели ко времени местного полдня. Данные дневных спутниковых измерений озона (O_3) сравнивались с полусуммой утреннего и вечернего наземного измерения. Были рассмотрены данные измерений таких спутниковых систем, как ERS-2 GOME [3], Envisat SCIAMACHY [4] и Aura OMI [5].

Пример сопоставления результатов наземных измерений содержания NO_2 в стратосфере с данными измерений аппаратуры SCIAMACHY в 2004-2009 гг., приведен на рис. 1. Данные спутниковых и наземных измерений демонстрируют относительно хорошее согласие – среднее и среднеквадратичное отклонения составляют 4% и 33%, соответственно; коэффициент корреляции – 0.79. Аналогичным образом были проведены сравнения с данными спутниковых измерений приборами GOME и OMI. Полученные для всех спутниковых данных оценки расхождений с результатами наземных измерений приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, наилучшее согласие с результатами наземных измерений достигается в данных SCIAMACHY (данные проинтерпретированы в университете Бремена, Германия). Согласие с данными GOME несколько хуже (среднее и среднеквадратичное расхождения выше, а коэффициент корреляции – ниже), что может быть объяснено более грубым пространственным разрешением: $40 \times 320 \text{ км}^2$, вместо $30 \times 60 \text{ км}^2$ и $12 \times 24 \text{ км}^2$ для SCIAMACHY и OMI, соответственно. Кроме того, в отличие от SCIAMACHY и OMI, используемые здесь данные GOME представляют собой общее содержание NO_2 во всем вертикальном столбе (а не только в стратосфере), что в условиях близости городских источников тропосферных загрязнений, может служить дополнительной причиной рассогласований (положительная величина среднего расхождения – 14% – косвенно подтверждает это предположение). Систематическое занижение стратосферного содержания NO_2 в измерениях OMI ранее уже отмечалось в работах по валидации этих данных, а его средняя величина – 12% – соответствует полученным в этих работах оценкам [6]. В целом, с учетом значительной сезонной изменчивости содержания NO_2 в стратосфере ($\pm 70\%$ на широте Санкт-Петербурга), полученные оценки точности спутниковых данных можно считать удовлетворительными.

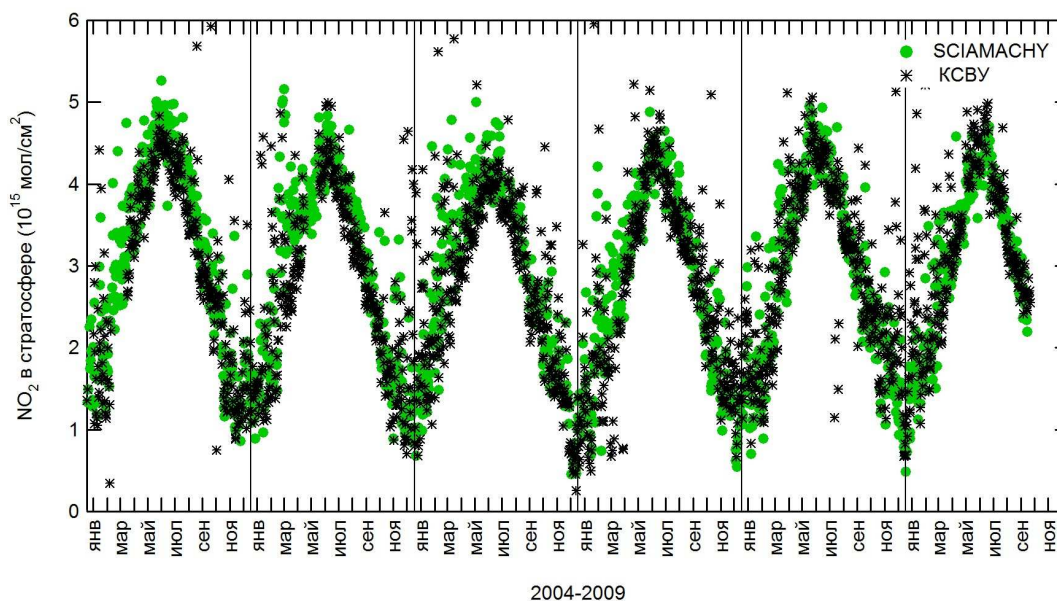


Рисунок 1

Сопоставление данных сумеречных наземных (“КСВУ”) и дневных спутниковых (“SCIAMACHY”) измерений содержания NO_2 в стратосфере, выполненных в районе Санкт-Петербурга в 2004-2009 гг.

Пример сопоставления результатов наземных измерений содержания озона (O_3) в стратосфере с данными измерений аппаратуры OMI (алгоритм TOMS) в 2004-2009 гг., приведен на рис. 2. Данные спутниковых и наземных измерений заметно отличаются – среднее и среднеквадратичное отклонения составляют 8% и 19%, соответственно; коэффициент корреляции – 0.87. Аналогичным образом были проведены сравнения с данными спутниковых измерений прибором GOME, а также данными OMI (алгоритм DOAS). Полученные для всех спутниковых данных оценки расхождений с результатами наземных измерений приведены в табл. 2. Как видно из таблицы, результаты сумеречных наземных измерений оказываются систематически ниже спутниковых данных, причем величина этого расхождения для разных спутниковых приборов (алгоритмов) очень близка и составляет в среднем ~10%. Для данных об общем содержании (OC) озона это довольно большая ошибка, которая может свидетельствовать о недостатках в используемой методике наземных сумеречных измерений.

Таблица 1 Оценки расхождений между данными спутниковых и наземных измерений содержания NO_2 в стратосфере, выполненных в районе Санкт-Петербурга в 2004-2009 гг. Приведены значения среднего (Δ) и среднеквадратичного (σ) отклонений для разницы “спутник – наземный прибор” в относительных единицах (%), а также коэффициент корреляции R .

	Δ	σ	R
ERS-2 GOME	+14	48	0.68
Envisat SCIAMACHY	+4	33	0.79
Aura OMI	-12	39	0.75

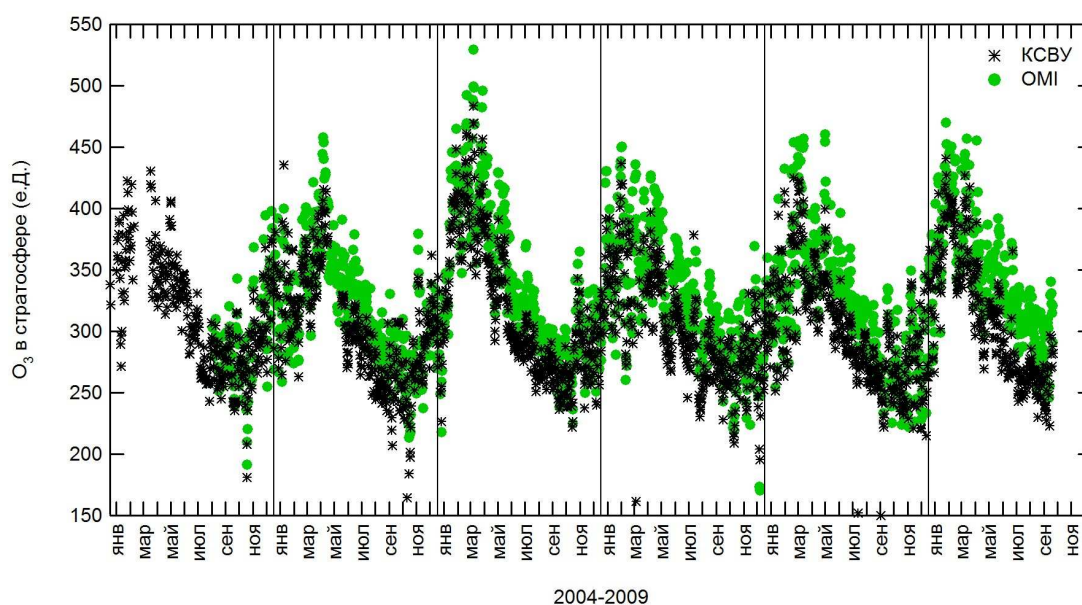


Рисунок 2 Сопоставление данных сумеречных наземных (“КСВУ”) и дневных спутниковых (“ОМІ”) измерений содержания озона в стратосфере, выполненных в районе Санкт-Петербурга в 2004-2009 гг.

Таблица 2

Оценки расхождений между данными спутниковых и наземных измерений содержания озона в стратосфере, выполненных в районе Санкт-Петербурга в 2004-2009 гг. Приведены значения среднего (Δ) и среднеквадратичного (σ) отклонений для разницы “спутник – наземный прибор” в относительных единицах (%), а также коэффициент корреляции R .

	Δ	σ	R
ERS-2 GOME	+9	20	0.92
Aura OMI (TOMS)	+8	19	0.87
Aura OMI (DOAS)	+10	20	0.87

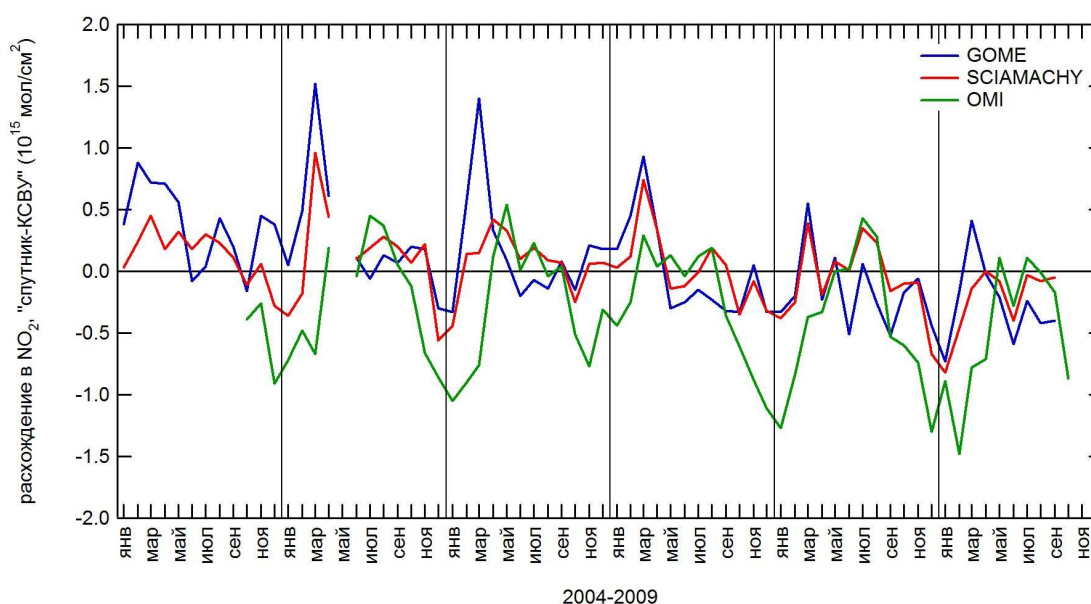


Рисунок 3

Среднемесячные значения расхождений между данными спутниковых и наземных измерений содержания NO_2 в стратосфере, выполненных в районе Санкт-Петербурга в 2004-2009 гг.

Нами были также рассмотрены среднемесячные значения расхождений, рассчитанные для различных спутниковых приборов. Так на рис. 3 представлены расхождения в данных измерений NO_2 , рассчитанные для GOME, SCIAMACHY и OMI. Любопытно, что данные GOME и SCIAMACHY демонстрируют похожие сезонные вариации расхождений, тогда как расхождения наземных измерений с данными OMI значительно отличаются как по величине, так и по форме и амплитуде сезонного хода. Кроме того, во всех трех рядах, на фоне сезонной изменчивости, проявляется тенденция уменьшения абсолютной величины расхождения (с линейной скоростью 0.14, 0.04 и $0.07 \cdot 10^{15}$ мол/см² в год – для сопоставления с GOME, SCIAMACHY и OMI, соответственно). Поскольку этот тренд наблюдается в сопоставлении с разными спутниковыми приборами, причиной его не могут быть ошибки спутниковых измерений. Аналогичные расчеты среднемесячных расхождений для данных измерений озона аппаратурой GOME, а также двух версий интерпретации данных OMI (алгоритмы TOMS и DOAS), представлены на рис. 4. В сопоставлении с результатами наземных сумеречных измерений, данные GOME и OMI демонстрируют похожие сезонные зависимости расхождений, а также заметную тенденцию роста среднего расхождения со временем (с линейной скоростью 1.17, 1.32 и 1.13% в год – для сопоставления с GOME, OMI

TOMS и OMI DOAS, соответственно). Как и в сопоставлении результатов измерений NO_2 , этот долговременный тренд расхождений в данных об ОС озона не может быть связан с ошибками спутниковых измерений. Возможно, такие систематические расхождения обусловлены принципиальными различиями в вертикальной чувствительности наземного и спутникового методов зондирования, а наблюдаемый тренд может указывать на долговременные изменения вертикального распределения характеристик атмосферы (газовый и аэрозольный состав, температура). Нельзя исключить также и возможных изменений характеристик наземной измерительной аппаратуры, неучтенных в методике интерпретации измерений.

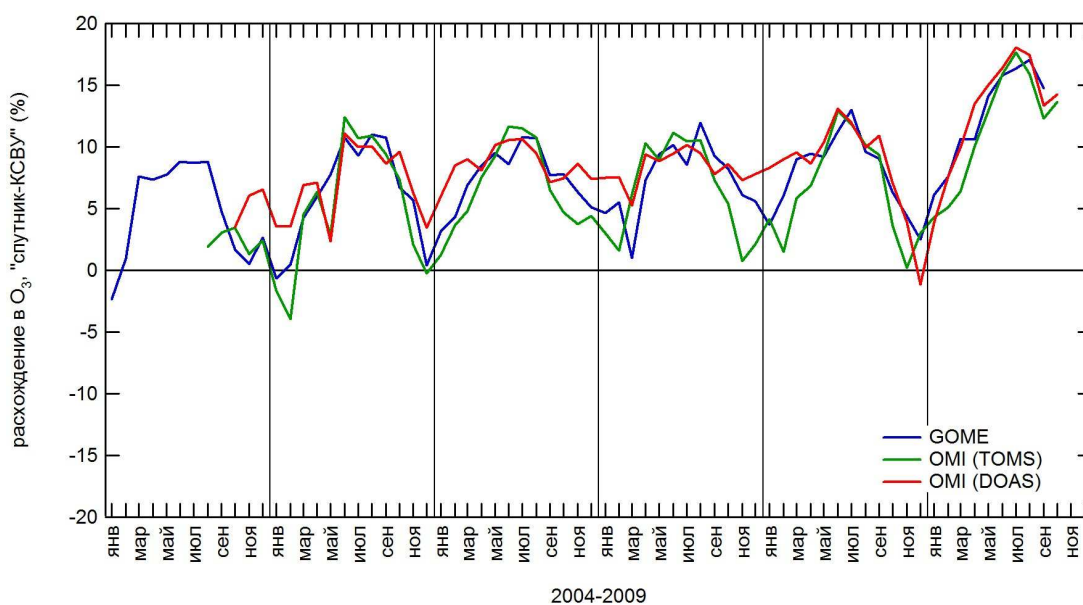


Рисунок 4 Среднемесячные значения расхождений между данными спутниковых и наземных измерений содержания O_3 в стратосфере, выполненных в районе Санкт-Петербурга в 2004-2009 гг.

Помимо измерений наземной аппаратуры “КСВУ”, в период с июня 2008 г. по август 2009 г. аналогичные DOAS-измерения содержаний озона и NO_2 осуществлялись одним из спектрометров OceanOptics, также работающим в видимой области. Как и при обработке данных “КСВУ”, для интерпретации измерений OceanOptics использовался спектральный интервал 428-515 нм. В связи с рядом конструктивных отличий спектрометра OceanOptics от “КСВУ” – более узкая входная щель, наличие шума в элементах ПЗС-матрицы приемника, а также отсутствие блока фотоэлектронного умножения – при низком солнце отношение сигнал/шум заметно уменьшается. Поэтому, при осуществлении сумеречных измерений прибором OceanOptics зенитный угол солнца был ограничен интервалом $89-90^\circ$ (вместо интервала $90-91^\circ$, используемого в измерениях “КСВУ”). Результаты сумеречных измерений OceanOptics в 2008-2009 гг. представлены на рисунках 5 и 6 (общие содержания озона и NO_2 в стратосфере); здесь же для сравнения приведены данные одновременных измерений тех же газовых компонент, выполненных аппаратурой “КСВУ”. Следует отметить, что до февраля 2009 г. регистрация спектральных измерений OceanOptics осуществлялась с помощью штатного программного обеспечения (программа SpectraSuite), одним из недостатков которого является отсутствие автоматического выбора времени интегрирования в зависимости от условий освещенности. Возможно, этим объясняются существенные расхождения между данными одновременных измерений содержания озона приборами OceanOptics и “КСВУ” (менее заметные в анализе данных измерений содержания NO_2). С февраля 2009 г. управление измерениями OceanOptics осуществляется программой DOASIS, разработанной в университете Гейдельберга (Германия), позволяющей полностью

автоматизировать процесс измерений с учетом изменения освещенности в течение суток и в зависимости от времени года. Результаты по-парного сопоставления данных одновременных измерений OceanOptics и “КСВУ” между собой представлены на рис. 7, а также – в виде статистических оценок расхождений – в табл. 3. Как видно из таблицы, согласие между результатами измерений двух приборов довольно хорошее – коэффициент корреляции очень близок к единице, а средние и среднеквадратические расхождения невелики. Так, для измерений содержания озона среднее расхождение составило всего 0.2%, а среднеквадратичное – 2.6% (рассматривался период измерений с февраля по август 2009 г.). Данные измерений содержания NO₂ спектрометром OceanOptics систематически выше результатов одновременных измерений аппаратурой “КСВУ” (в среднем на 9%), что может быть связано с неточностями в алгоритме интерпретации OceanOptics (например, неверно определено остаточное содержание NO₂ в опорном спектре).

По сравнению с наземными DOAS-измерениями в видимой области, аналогичные измерения в УФ части спектра обладают потенциально более высокой точностью определения содержания озона, обусловленной более сильными полосами поглощения Хартлея-Хеггинса по сравнению с полосами Шапюи. Такие измерения выполняются с июня 2009 г. в НИИФ СПбГУ с помощью УФ-спектрометра OceanOptics, одновременно с аппаратурой “КСВУ”. Для определения общего содержания озона анализируется спектр рассеянного излучения в спектральном интервале 330-350 нм; результаты измерений усредняются по двум периодам наблюдений – до и после полудня, в интервале зенитного угла солнца 70-80°, а полусумма полученных значений представляет оценку среднедневного содержания. Измеренные таким образом содержания озона, вместе с результатами дневных спутниковых измерений аппаратурой OMI, выполненных за те же дни в районе Санкт-Петербурга, представлены на рис. 8. Кроме того, результат по-парного сопоставления представленных измерений показан на рис. 9; оценки расхождений составили при этом -1.6% и 4.0% для среднего и среднеквадратичного расхождений, соответственно (коэффициент корреляции 0.93). Для сравнения, на тех же графиках приведены данные измерений общего содержания фильтровым озонометром M-124, выполненных на одной из станций российской озонометрической сети (пос. Воейково, ~50 км к востоку от Петродворца). При этом, сопоставление результатов измерений M-124 со спутниковыми данными OMI демонстрирует оценки расхождений, совпадающие с полученными в сравнении между OMI и OceanOptics (см. табл. 4).

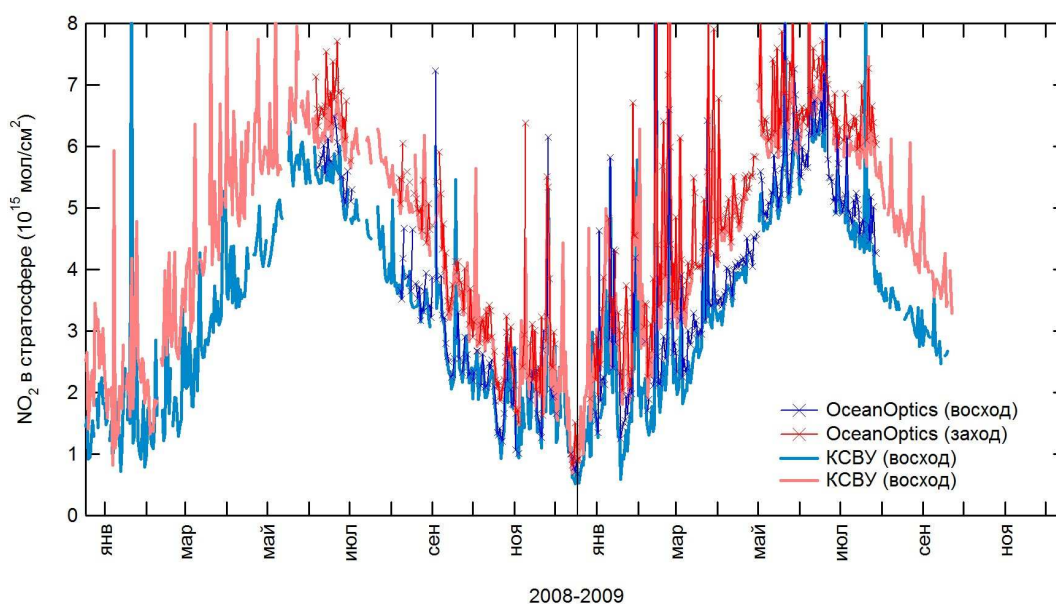


Рисунок 5 Данные наземных сумеречных измерений содержания NO_2 в стратосфере, выполненных аппаратурой “КСВУ” и OceanOptics в районе Санкт-Петербурга в 2008-2009 гг.

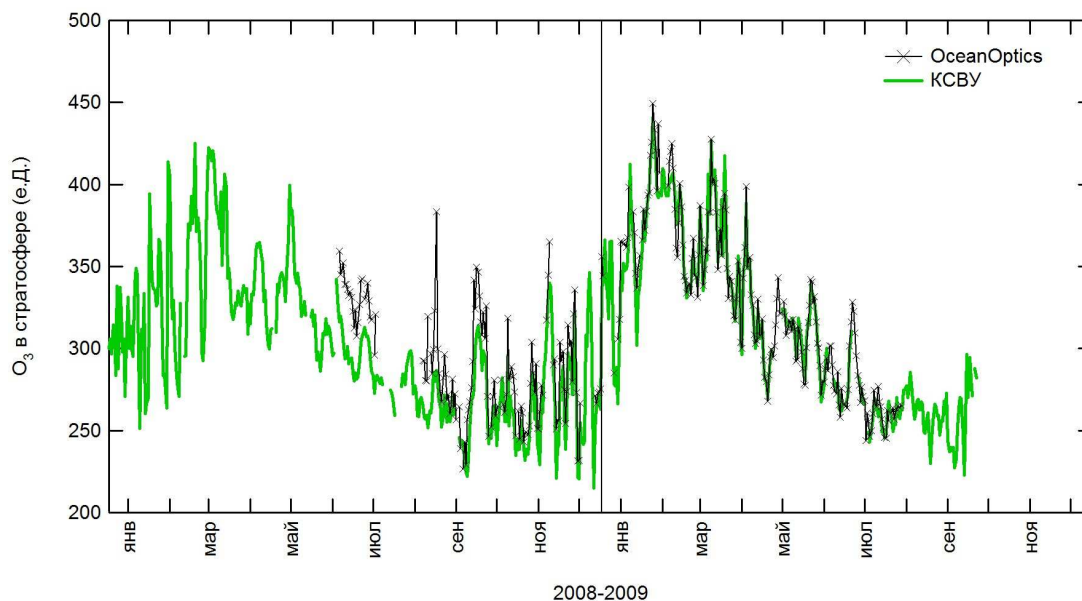


Рисунок 6 Данные наземных сумеречных измерений содержания озона в стратосфере, выполненных аппаратурой “КСВУ” и OceanOptics в районе Санкт-Петербурга в 2008-2009 гг.

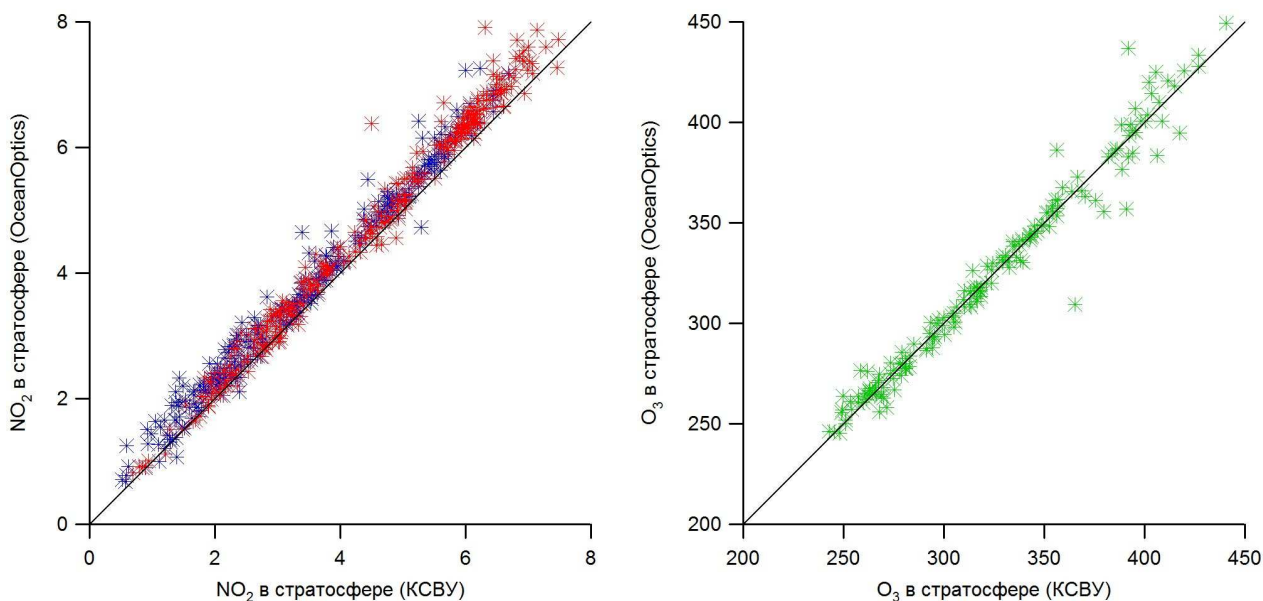


Рисунок 7 Сопоставление данных одновременных наземных сумеречных измерений содержания озона и NO_2 в стратосфере, выполненных аппаратурой “КСВУ” и OceanOptics в районе Санкт-Петербурга в 2008-2009 гг.

Таблица 3

Оценки расхождений между данными одновременных наземных измерений содержания озона и NO₂ в стратосфере, выполненных аппаратурой OceanOptics и “КСВУ” в районе Санкт-Петербурга в 2008-2009 гг. Приведены значения среднего (Δ) и среднеквадратичного (σ) отклонений для разницы “OceanOptics – КСВУ” в относительных единицах (%), а также коэффициент корреляции R .

	Δ	σ	R
NO ₂ (утро)	+11.5	17.4	0.99
NO ₂ (вечер)	+6.8	9.1	0.99
озон (среднедневное)	+0.2	2.6	0.98

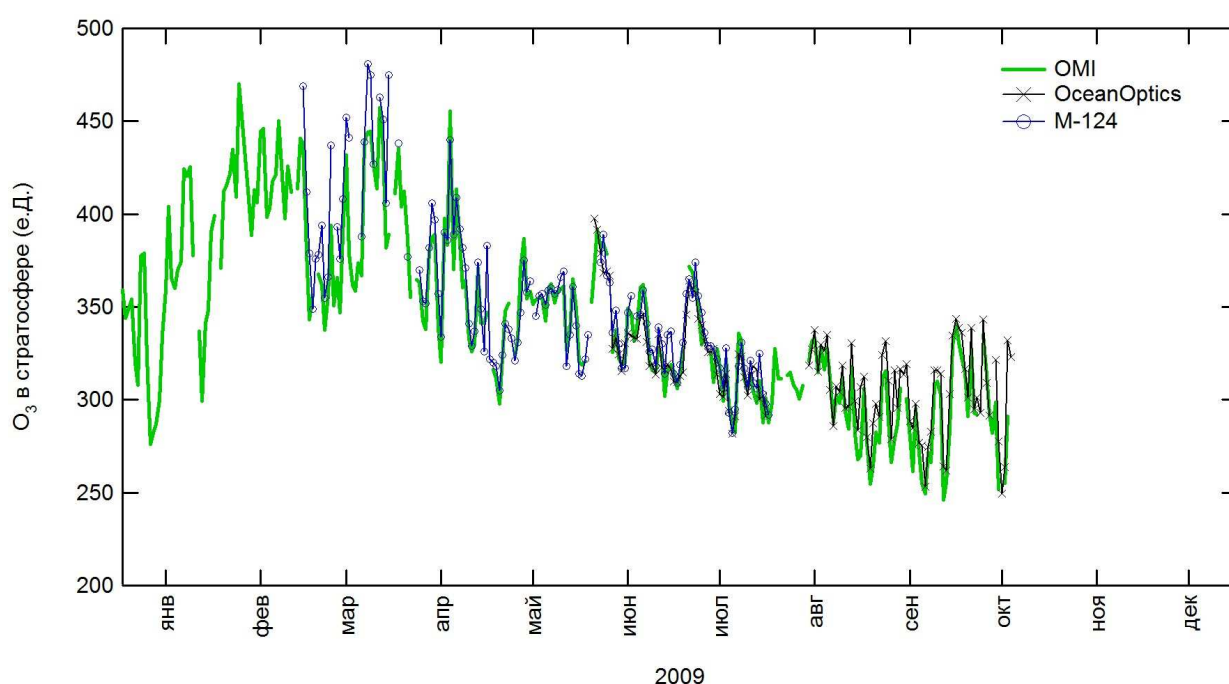


Рисунок 8

Данные наземных дневных измерений содержания озона в стратосфере, выполненных УФ-спектрометром OceanOptics и фильтровым озонOMETром М-124, а также спутниковой аппаратурой OMI в районе Санкт-Петербурга в 2009 г.

Таблица 4

Оценки расхождений между данными наземных измерений содержания озона, выполненных в районе Санкт-Петербурга в 2009 г. УФ-спектрометром OceanOptics (НИИФ СПбГУ) и фильтровым озонOMETром М-124 (ГГО им. А.И. Воейкова), и спутниковых измерений аппаратурой OMI. Приведены значения среднего (Δ) и среднеквадратичного (σ) отклонений для разницы “спутник – наземный прибор” в относительных единицах (%), а также коэффициент корреляции R .

	Δ	σ	R
OceanOptics	-1.6	4.0	0.93
М-124	-1.7	4.0	0.94

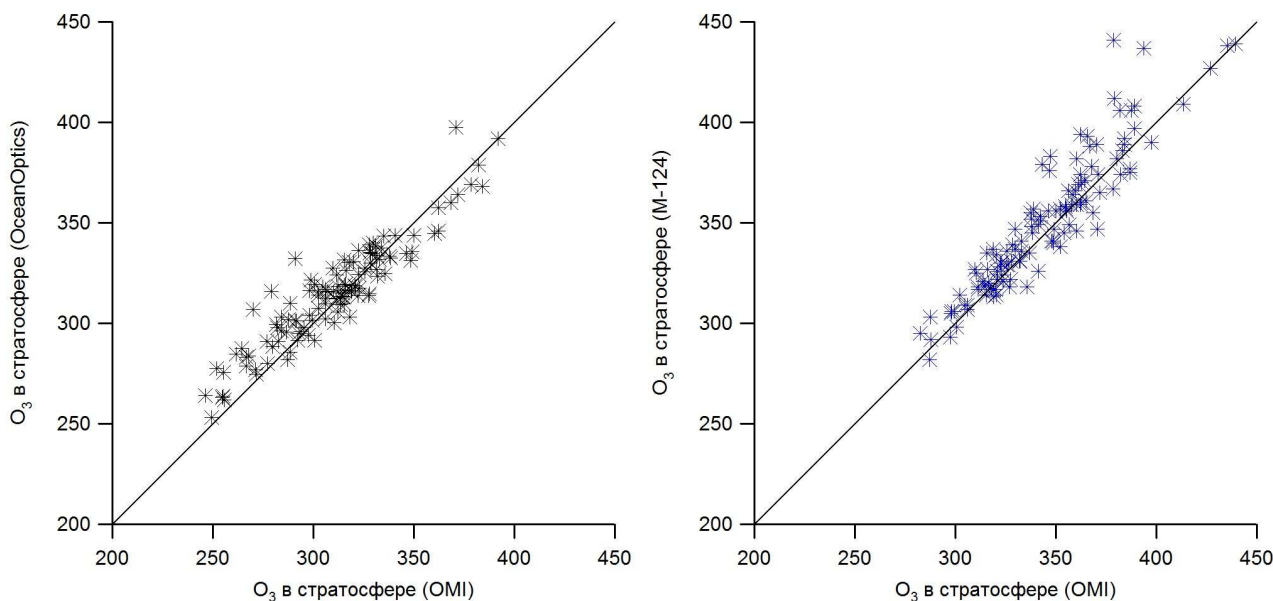


Рисунок 9 Сопоставление данных одновременных наземных сумеречных измерений содержания озона в стратосфере, выполненных УФ-спектрометром OceanOptics и спутниковой аппаратурой OMI в районе Санкт-Петербурга в 2009 г.

2. ВАЛИДАЦИЯ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ NO₂ В ТРОПОСФЕРЕ

Для оценки содержания NO₂ в тропосфере использовалась следующая схема интерпретации наземных спектроскопических измерений: 1) преобразование эффективных наклонных содержаний NO₂ в вертикальные с помощью фактора воздушной массы, рассчитанного для длины волны 474 нм с использованием радиационной модели SCIATRAN [7] и вертикального профиля содержания NO₂, соответствующего стандартной среднегодовой модели атмосферы US Standard [8] на всех уровнях, кроме поверхностного, где содержание NO₂ задано исходя из среднегодового значения 2-мерной транспортно-химической модели MPI [9] на широте Санкт-Петербурга ($2.35 \cdot 10^{10}$ мол/см³); 2) данные всех сумеречных измерений стратосферного содержания NO₂, выполненных аппаратурой “КСВУ” в районе Санкт-Петербурга в 2004-2009 гг. усредняются, сглаживаются и приводятся ко времени местного полдня, на основе суточного хода общего содержания NO₂, рассчитанного для каждого дня в году с помощью 0-мерной фотохимической модели [10]; 3) разница между результатом дневных измерений вертикального содержания NO₂ (т.е. полного содержания во всем столбе атмосферы) и среднего для этого дня в году стратосферного содержания, является оценкой содержания NO₂ в тропосфере.

Результаты всех наземных измерений тропосферного NO₂, выполненных аппаратурой “КСВУ” в дневное время и осредненных в период с 10:00 до 14:00 местного времени, представлены на рис. 10. Полученные данные характеризуется значительно более высокими, по сравнению с сумеречными стратосферными измерениями, величинами содержания NO₂ (до $5 \cdot 10^{16}$ мол/см²). Отдельной кривой на том же рисунке нанесены данные спутниковых измерений тропосферного содержания NO₂ в районе Санкт-Петербурга, выполненные аппаратурой OMI (спутник AURA). Несмотря на то, что средние амплитуды вариаций содержания NO₂ в тропосфере по данным спутниковых и наземных измерений совпадают, взаимная временная корреляция этих вариаций, за исключением отдельных периодов, невысока. Прямое сопоставление результатов всех дневных наземных и спутниковых

измерений тропосферного NO_2 в районе Санкт-Петербурга демонстрирует плохое согласие – среднее расхождение и коэффициент корреляции составляют 78% и 0.18, соответственно; в отдельные дни результаты спутниковых и наземных измерений отличаются на порядки. Следует однако учитывать, что станция наземных измерений находится на удалении ~ 30 км от центра Санкт-Петербурга, а пространственное разрешение используемых спутниковых данных достаточно грубое ($\sim 20 \text{ км}^2$). В этих условиях, большие пространственно-временные вариации поля содержания NO_2 вблизи города могут существенно влиять на результаты сравнений. Известно также, что присутствие облачности в поле зрения спектроскопической аппаратуры серьезно искажает результаты измерений, как наземных так и спутниковых. Следует также отметить тенденцию роста тропосферного содержания NO_2 в данных наземных измерений, не выявленную, однако, в данных одновременных спутниковых измерений. Возможно, это указывает на неучтенные в алгоритме интерпретации изменения спектральных характеристик аппаратуры “КСВУ”, и требует дальнейшей проверки и коррекции.

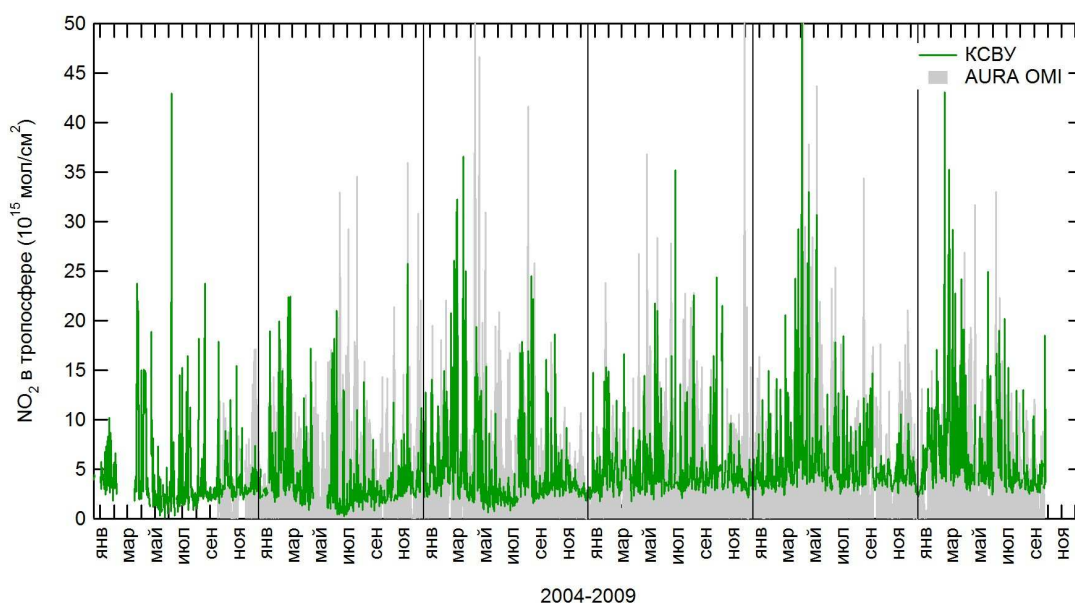


Рисунок 10 Данные о тропосферном содержании NO_2 в Санкт-Петербурге по результатам дневных спектроскопических измерений НИИФ СПбГУ в 2004-2009 гг. (данные измерений ОС NO_2 усреднены с 10:00 до 14:00 местного времени). Отдельной кривой (сплошная заливка) представлены данные спутниковой аппаратуры OMI.

Вместе с тем, хотя результаты индивидуальных спутниковых и наземных измерений тропосферного NO_2 плохо согласуются между собой, анализ этих многолетних данных выявляет ряд характерных особенностей – таких, например, как недельный цикл. Так, результаты расчета средних содержаний NO_2 в тропосфере для каждого дня недели, полученные по данным измерений спутниковой аппаратуры OMI в период с октября 2004 по октябрь 2009 года, представлены на рис. 11. Видно, что минимальное содержание NO_2 наблюдается в воскресенье – на 22% ниже, чем в будни. Этот минимум хорошо согласуется с результатами аналогичных исследований для крупных мегаполисов западной Европы [11], выявляя наличие недельного цикла содержания NO_2 в тропосфере Санкт-Петербурга, обусловленного интенсивностью работы промышленности и транспорта. Для сравнения, на том же рисунке представлен результат анализа данных измерений наземной аппаратуры НИИФ СПбГУ в 2004-2009 гг.. Как и в результатах анализа спутниковых данных, воскресное содержание NO_2 оказывается существенно ниже максимального значения в будние дни – на 17% (при этом, в отличие от спутниковых данных, результаты наземных измерений в

Петродворце достигают минимума в понедельник – на 26% ниже среднего содержания в будни). Следует также отметить, что данные спутниковых измерений тропосферного NO₂ существенно превышают результаты наземных измерений НИИФ СПбГУ – в среднем, более чем вдвое. Такое различие может быть связано с более низкой чувствительностью наземных измерений к вариациям содержания NO₂ в нижних слоях атмосферы, а также более слабым загрязнением тропосферы в районе Петродворца, по сравнению с центральной частью Санкт-Петербурга, попадающей в поле зрения спутниковой аппаратуры.

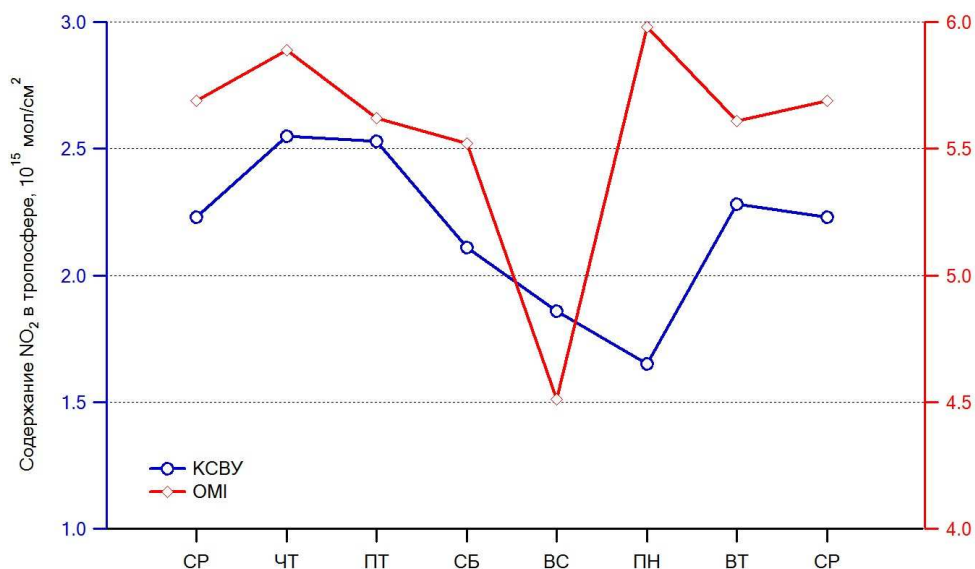


Рисунок 11 Недельный цикл тропосферного содержания NO₂ в районе Санкт-Петербурга по данным спутниковых (AURA OMI, ~14:00) и наземных дистанционных измерений (“КСВУ”, 10:00-14:00) в 2004-2009 гг..

Данные ежечасных измерений концентраций NO₂ в приземном воздухе позволяют также оценить суточный цикл вариаций этой газовой компоненты. Такая цикличность обусловлена в первую очередь вариациями интенсивности использования автотранспорта, а также работой энергетических установок некоторых предприятий, осуществляющих сжигание топлива. Чтобы оценить вклад транспортной составляющей в вариации наблюдаемых концентраций NO₂, следует рассмотреть периодичность изменений интенсивности городского транспортного потока. В отсутствие объективных данных об автотранспорте, для косвенной оценки его воздействия на городской воздух использовались данные о количестве автомобильных пробок, доступные пользователям навигационной системы City Guide (компания ООО “МИТ”, www.probki.net). Общее количество городских пробок оценивалось по физическому размеру (в килобайтах) служебного файла системы, содержащего осредненную информацию о скорости движения пользователей. Пример такого анализа представлен на рис. 12, где приведены данные о средней интенсивности автотранспорта в Санкт-Петербурге в период 08/12-22/12/2008 (информация о пробках записывалась каждые полчаса, а затем усреднялась за весь период для каждого часа). Для удобства анализа, полученные суточные циклы рассчитаны для будних дней и выходных, отдельно. Для сравнения, на этом же графике приведены данные о приземных концентрациях NO₂, осредненные по измерениям двух станций “Автоматической системы мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга” – №5 (Василеостровский район) и №6 (Кировский район), в декабре 2004-2007 гг. (эти данные также представлены двумя кривыми – в будние и выходные дни). Как видно из рисунка, наблюдаемые вариации концентрации NO₂ качественно воспроизводят рассчитанный суточный цикл интенсивности

автотранспорта. При этом, и в тех и других данных проявляется характерные отличия выходных дней от будней – более поздний по времени и плавный утренний рост концентрации NO_2 (интенсивности транспорта), достижение максимума к ~16:00, и такое же плавное снижение (см. рис. 12). Два максимума в данных об интенсивности транспорта в будние дни соответствуют утреннему и вечернему “часу пик” – около 9:00 и 19:00.

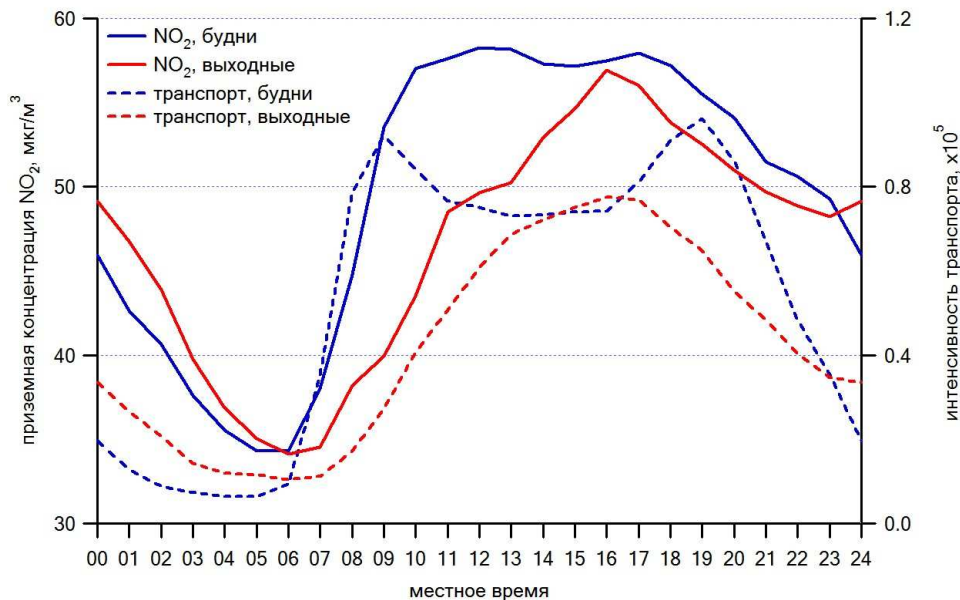


Рисунок 12

Суточный цикл приземных концентраций NO_2 в Санкт-Петербурге по данным измерений “Автоматической системы мониторинга атмосферного воздуха” на двух станциях (№5 и 6) в декабре 2004-2007 гг.. Пунктиром представлена оценка интенсивности автотранспорта, полученная на основе анализа информации об автомобильных пробках в декабре 2008 г. (www.probki.net).

Для анализа влияния ветрового режима на результаты наземных измерений НИИФ СПбГУ, использовались данные метеонаблюдений, выполнявшихся на метеостанции Информационного центра погоды “Санкт-Петербург” (РОСГИДРОМЕТ), расположенной в центральной части города (ул. Профессора Попова д.48, <http://meteo.infospace.ru>). Полученные данные позволили, например, построить распределение тропосферного содержания NO_2 , измеренного в НИИФ СПбГУ, по направлениям ветра (0-360°). Характерной особенностью полученного распределения, представленного на рис. 13, является его значительная вытянутость в северо-восточном направлении (~60°), что указывает на преобладающее влияние городского загрязнения, поскольку центральная часть Санкт-Петербурга находится именно в этом направлении, откуда и приходят загрязненные массы воздуха (для наглядности, представленное распределение совмещено с картой Финского залива, где показано взаимное расположение центральной части Санкт-Петербурга и Петродворца).

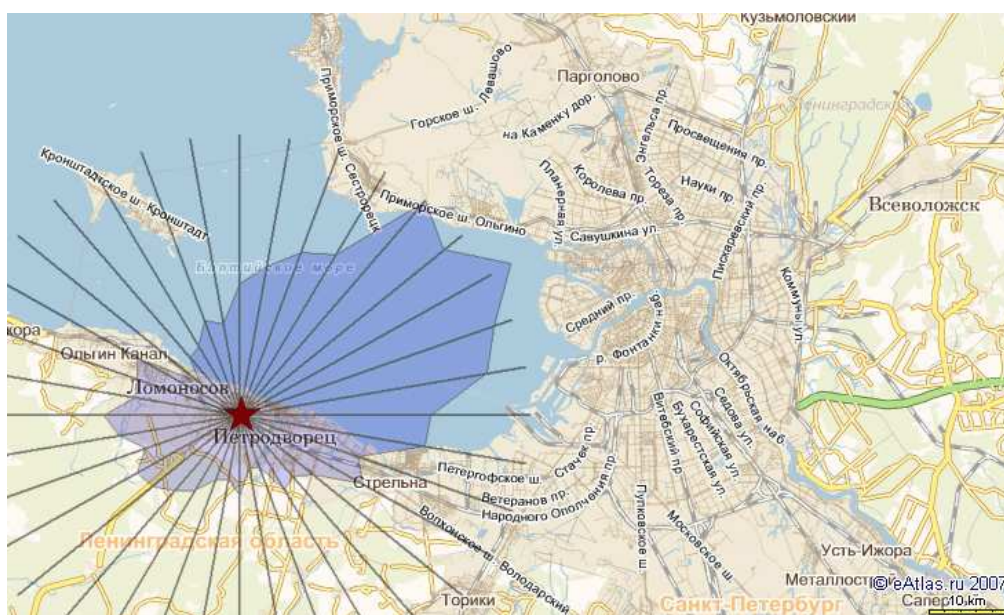


Рисунок 13 Распределение тропосферного содержания NO_2 ($0-6 \cdot 10^{15}$ молекул/см²) в Петродворце по направлениям ветра ($0-360^\circ$), на основе измерений НИИФ СПбГУ и метеоданных Информационного центра погоды “Санкт-Петербург” (РОСГИДРОМЕТ, ул. Профессора Попова д.48) в 2004-2009 гг.

Таким образом, очевидно для корректного сопоставления данных различных систем измерений содержания атмосферного NO_2 (наземных прямых и дистанционных, спутниковых) требуется учет многих факторов, включающих в себя пространственно-временное согласование результатов измерений, а также анализ метеорологической обстановки. Решению этой задачи способствовало бы использование численных моделей атмосферы, описывающих объективные процессы переноса загрязненных воздушных масс. В настоящей работе для этой цели использовалась известная модель HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), позволяющая проводить расчеты траекторий движения элемента воздушной массы и осуществлять моделирование процессов распространения и осаждения примеси в атмосфере [12]. Тестовые расчеты полей концентрации NO_2 в районе Санкт-Петербурга на основе модели HYSPLIT были выполнены для января-февраля 2006 г. – период повышенного загрязнения приземного воздуха, обусловленного безветрием и температурными инверсиями в условиях мощного зимнего антициклона. В качестве входной информации модели использовались глобальные ассимилированные данные GDAS NCEP (<http://wwwt.emc.ncep.noaa.gov>), содержащие ежедневную информацию о температуре, давлении, влажности, вертикальной и горизонтальной компонентах ветра и других параметрах, каждые 3 часа на пространственной сетке с шагом 1° широты/долготы. Для учета площадного характера эмиссии NO_2 в центральной части города, использовалась упрощенная модель из 16 точечных источников, расположенных на равномерной сетке с шагом в 0.05° широты / 0.10° долготы (~6 км). Таким образом были заданы два одинаковых набора источников, позволяющих отдельно учесть транспортные и промышленные атмосферные выбросы – на высоте 0 метров (поверхность земли) и 100 метров (дымовые трубы), соответственно. Интенсивности эмиссии поверхностных и высотных источников масштабировались для достижения максимального согласия рассчитанных приземных концентраций с данными прямых измерений на станциях “Автоматической системы мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга”. Результаты расчета модели HYSPLIT, в виде полей концентрации NO_2 на высотных уровнях 0, 25, 50, 100, 150, 250 и 350 метров, были построены на пространственной сетке с шагом 0.05° широты/долготы, ежечасно, в период с 01/01-06/02/2006. Пример поля приземной концентрации NO_2 (уровень 0 м), рассчитанного для 20/01/2006 на срок 13:00 местного

времени (местный полдень), представлен на рис. 14. Согласно данным РОСГИДРОМЕТа (<http://meteo.infospace.ru>), в этот день была совершенно безветренная, безоблачная погода, средняя температура воздуха -20°C , высокое атмосферное давление (780 мм.рт.ст.). По результатам радиозондирования на станции ГГО им. А.И. Воейкова (пос. Воейково, Ленинградская область), профиль вертикального распределения температуры воздуха характеризуется инверсией – температура растет с высотой на $\sim 3^{\circ}$ до уровня ~ 1 км (соответствующие профили на срок 12:00 всемирного времени представлены на рис. 15; данные взяты с интернет-сайта <http://weather.uwyo.edu>). Рассчитанное с помощью HYSPLIT поле концентрации характеризуется повышенным содержанием NO_2 (50-80 $\mu\text{кг}/\text{м}^3$) в шлейфе, протянувшемся на десятки километров к юго-западу от центральной части Санкт-Петербурга. Чтобы сопоставить результаты расчетов с данными спутниковых и наземных измерений содержания NO_2 в тропосфере, рассчитанные на различных уровнях поля концентраций были проинтегрированы по высоте. Полученные данные, в виде средних содержаний NO_2 в слое 0-350 метров, осредненные за период 11:00-15:00 (± 2 часа от местного полдня), представлены на рис. 16. Для сравнения, здесь же приведены данные наземных измерений НИИФ СПбГУ (Петродворец) и данные измерений спутниковой аппаратуры OMI, выполненных за те же сроки. Как видно из рисунка, результаты модели качественно воспроизводят основные особенности вариаций содержания NO_2 , наблюдавшихся в данных спутниковых и наземных измерений – периоды относительно высоких значений 4-6 января, 16-22 января и 2-3 февраля 2006 г.

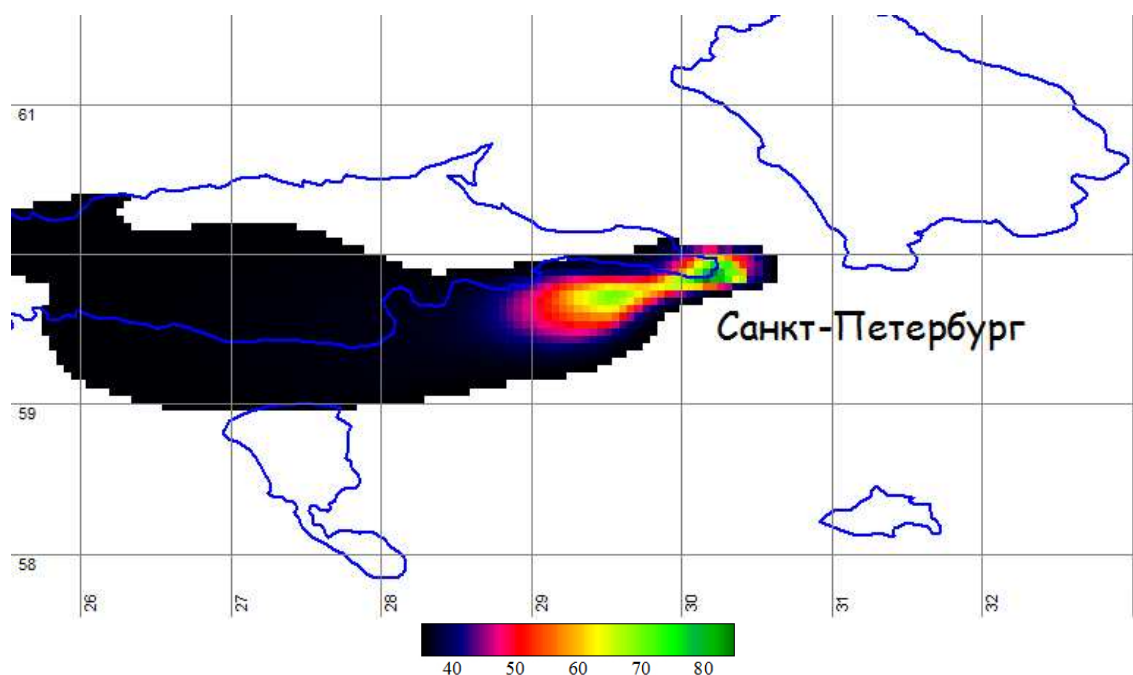


Рисунок 14 Поле приземной концентрации NO_2 ($\mu\text{кг}/\text{м}^3$) в районе Санкт-Петербурга 20.01.06, рассчитанное по модели HYSPLIT на срок 13:00 местного времени.

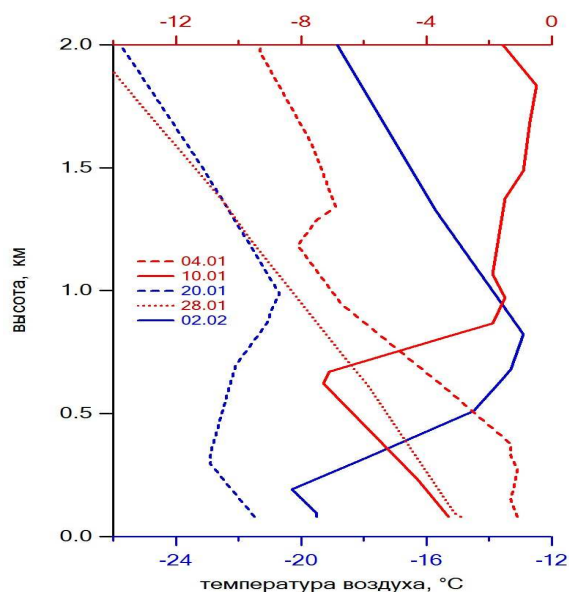


Рисунок 15 Профили вертикального распределения температуры воздуха по данным радиозондирования в пос. Воейково на срок 12:00 всемирного времени (ГГО им. А.И. Воейкова, <http://weather.uwyo.edu>)

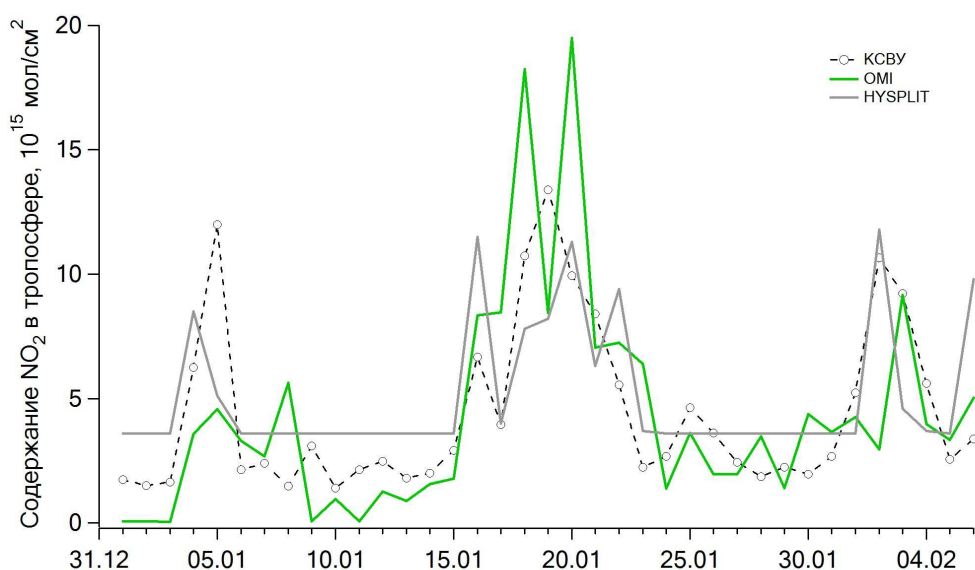


Рисунок 16 Среднедневные содержания NO_2 в приземном слое атмосферы Санкт-Петербурга в январе-феврале 2006 г., по данным наземных (“КСВУ”) и спутниковых (ОМІ) измерений, и расчетов модели HYSPLIT

Карта среднегодового распределения тропосферного NO_2 над северной частью Евразии, построенная по данным среднемесячного картирования в период с октября 2004 по сентябрь 2009 года, представлена на рис. 17 (данные получены по результатам интерпретации измерений ОМІ в Королевском Национальном Институте Нидерландов, www.temis.nl). Как видно из рисунка, основной особенностью поля тропосферного NO_2 на представленной территории является повышенное содержание в западной Европе (Бельгия, Голландия, Германия) и на дальнем Востоке (Китай), а также локальные максимумы в районе городских мегаполисов и промышленных центров России - города Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Челябинск, Кемерово, Новокузнецк, Красноярск, Томск. Как и

следовало ожидать, в распределении тропосферного NO_2 европейской части России из основных источников выделяются мегаполисы Москвы и Санкт-Петербурга.

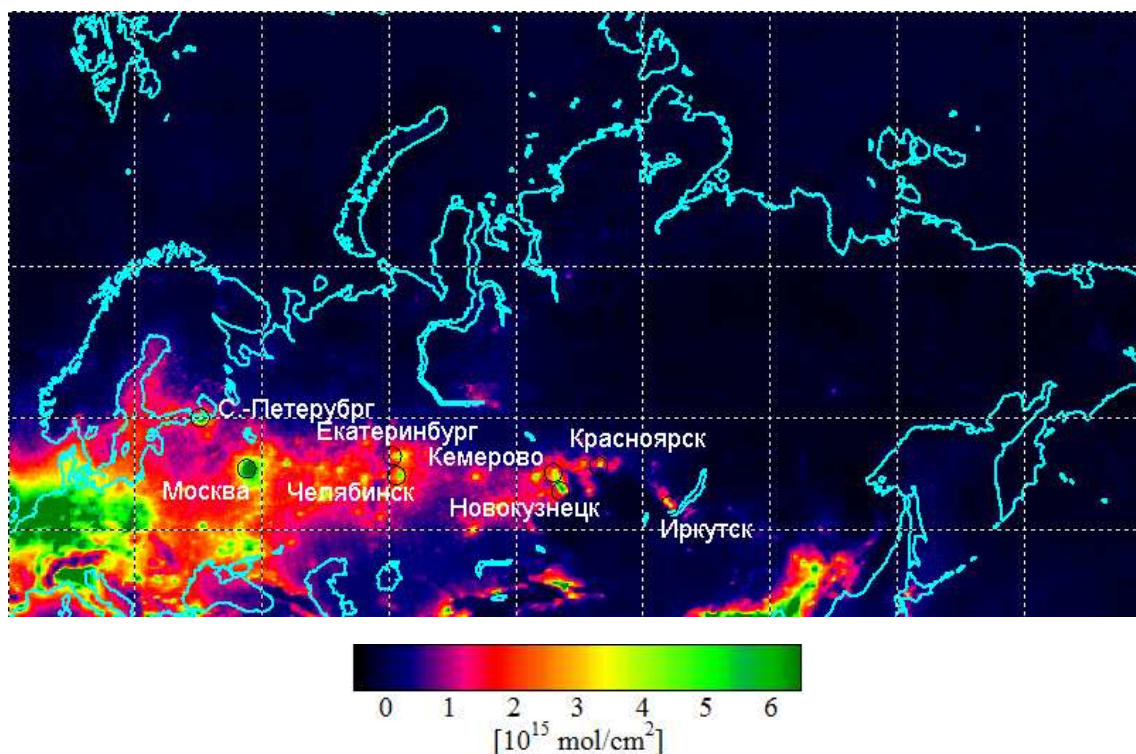


Рисунок 17

Среднегодовое распределение тропосферного содержания NO_2 над северной Евразией, по данным спутниковых измерений AURA OMI в 2004-2009 гг. (www.temis.nl)

Оценки линейного тренда содержания тропосферного NO_2 в районе Санкт-Петербурга, обусловленного ростом загрязнений, были получены ранее в работах [1, 13, 14]. В настоящей работе этот анализ был расширен на весь массив измерений GOME в 1995-2009 гг.. Временной ряд среднемесячных значений спутниковых измерений GOME в районе Санкт-Петербурга, с аппроксимирующей его функцией и компонентой линейного тренда, представлен на рис. 18. Оценка величины тренда в пересчете на средний рост за 10 лет составляет $(+6 \pm 6)\%$. Следует отметить, что согласно общепринятому критерию, величина тренда считается статистически значимой при выполнении условия $|B/\sigma_B| > 2$ (см. например [15]). Полученная здесь оценка не удовлетворяет этому условию, хотя и указывает на тенденцию в долговременном изменении содержания тропосферного NO_2 .

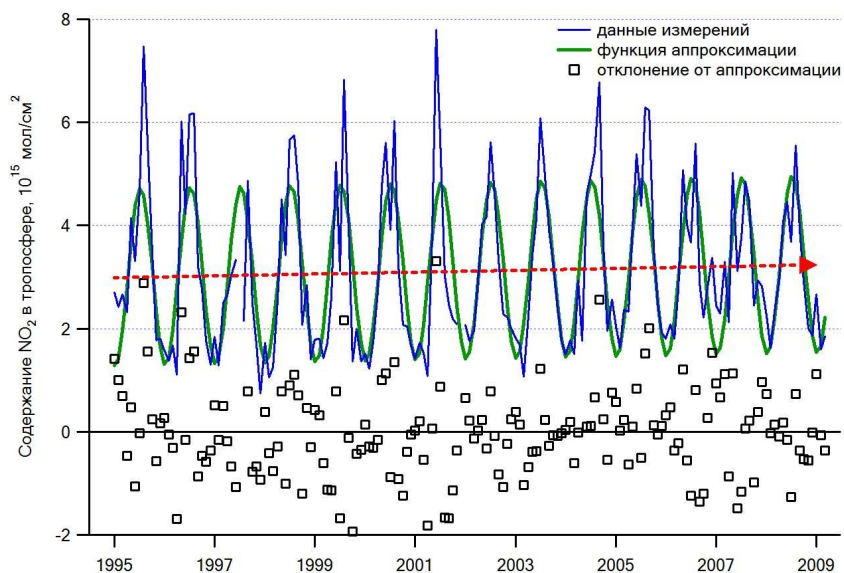


Рисунок 18 Оценка линейного тренда тропосферного содержания NO_2 для Санкт-Петербурга по данным спутниковых измерений GOME (GDP4.0) в 1995-2009 гг.

3. ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКТРОМЕТРА OCEANOPTICS

3.1 Анализ температурной зависимости темнового тока детектора OceanOptics

Одной из особенностей оптических детекторов на основе матрицы ПЗС является наличие т.н. темнового тока, обусловленного генерацией термоэлектронов самими элементами ПЗС, в отсутствие светового сигнала. Величина возникающего темнового тока определяется временем экспозиции и температурой матрицы. Поскольку уменьшение времени экспозиции не всегда оправдано в пассивных дистанционных измерениях (например, в условиях низкой интенсивности сигнала при сумеречных измерениях рассеянного солнечного излучения), увеличению отношения сигнал/шум способствовало бы охлаждение детектора спектрометра. Чтобы оценить перспективы такого подхода, была проанализирована температурная зависимость сигнала, регистрируемого спектрометром OceanOptics HR4000 (видимый диапазон) при закрытой входной щели. По аналогии с типичными условиями дневных зенитных измерений рассеянного солнечного излучения, время экспозиции составляло 100 мс, а количество суммируемых спектров – 600 (полное время регистрации одного спектра – 1 минута). Первоначально, весь спектрометр был охлажден в морозильной камере до температуры -3°C , после чего постепенно нагревался до комнатной температуры. Спектр темнового тока записывался каждую минуту, а температура детектора регистрировалась по показаниям встроенного датчика OceanOptics. Результаты измерений, в виде спектров темнового сигнала, измеренных при температуре 0, 5, 10, 15 и 20°C , представлены на рис. 19. На отдельном графике приведена зависимость среднего (по спектру) темнового сигнала, а также его дисперсии относительно среднего (СКО, характеризующего случайный шум). Как видно из рисунка, постоянной составляющая темнового тока почти линейно меняется с температурой, уменьшаясь при охлаждении от 20°C до 0°C примерно в 1.5 раза. Что касается собственно темнового шума, то его средняя по спектру характеристика (СКО) уменьшается уже вдвое при охлаждении от 20°C до 13°C , а при охлаждении до 0°C темновой шум уменьшается примерно в 7 раз по сравнению с измерениями при комнатной температуре. Пиковые значения темнового сигнала, наблюдаемые на всех спектрах в области ~ 545 нм относятся к неактивному (“битому”)

пикселу матрицы ПЗС, который следует исключать из спектрального анализа во избежании ошибок интерпретации измерений.

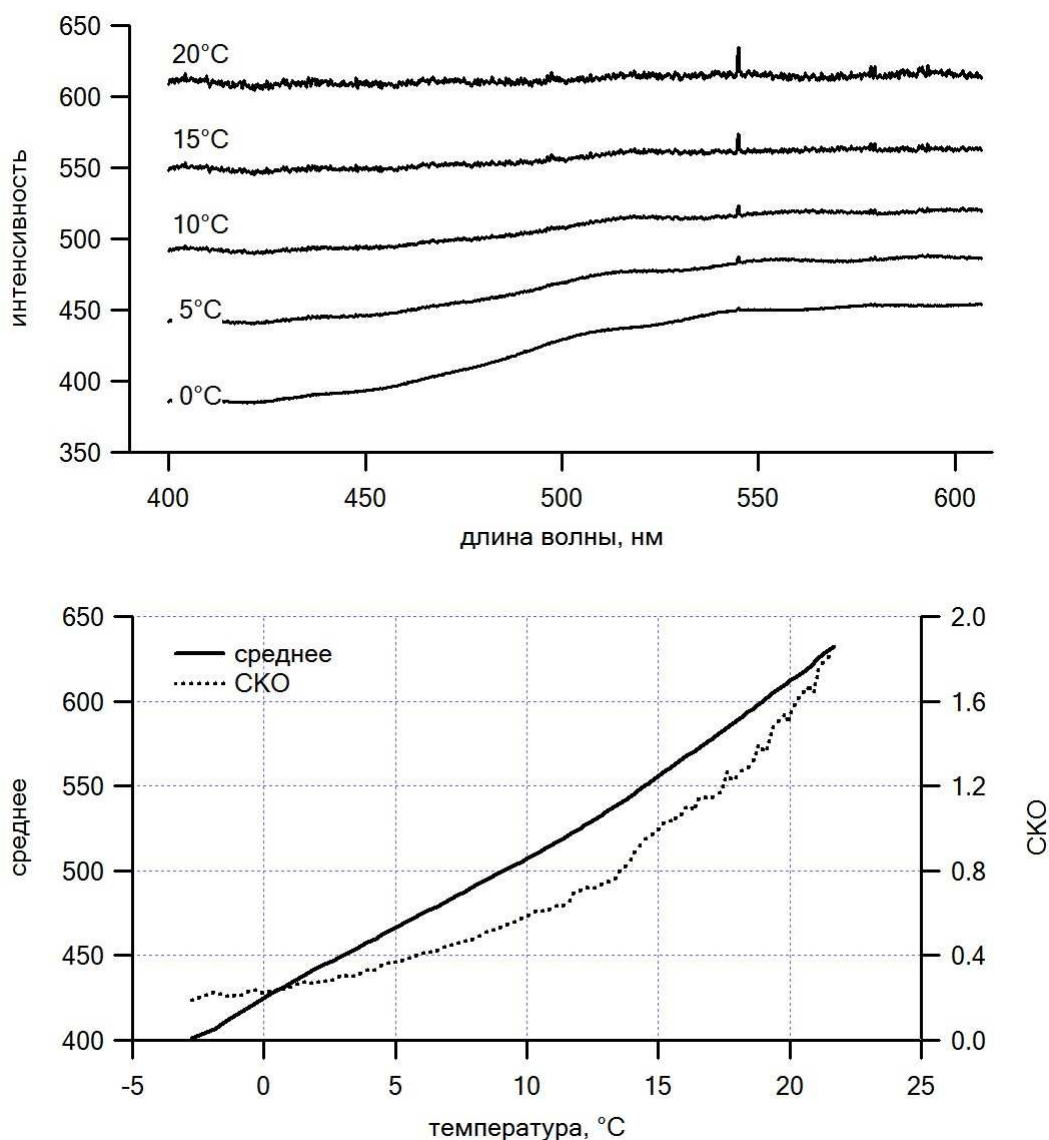


Рисунок 19

Спектр интенсивности темного сигнала, зарегистрированного спектрометром OceanOptics HR4000, в зависимости от температуры детектора (вверху). Средняя по спектру величина темного сигнала и его вариация (СКО), в зависимости от температуры детектора (внизу).

3.2 Оценка влияния величины поля зрения OceanOptics на точность измерений

Спектроскопическая аппаратура, используемая на существующих станциях наземных зенитных измерений рассеянного излучения, характеризуется различной величиной поля зрения – так, например, подобные приборы, действующие на станциях международной сети NDACC имеют угловое поле зрения от $\sim 1^\circ$ до $\sim 25^\circ$ [16]. Более узкое поле зрения позволяет точнее оценить реальную трассу распространения солнечного излучения, избежать искажающего влияния облаков в случае быстро меняющейся разрывной (не сплошной) облачности. Вместе с тем, ограничение поля зрения прибора (в том числе и с использованием короткофокусных линз) существенно ослабляет входное излучение, соответственно уменьшая отношение сигнал/шум. Влияние величины поля зрения на

точность спектроскопических измерений, обусловленное возможными вариациями угла визирования, оценивалось путем расчета т.н. фактора воздушной массы для небольших отклонений угла визирования от зенита, соответствующих полю зрения 10° и 25° . Факторы воздушной массы, рассчитанные с помощью радиационной модели SCIATRAN [7], сравнивались с аналогичным расчетом, выполненным для строго зенитной геометрии измерений (угол визирования равен 0°). При этом были рассмотрены различные условия освещенности – зенитный угол солнца = 35° (максимальная высота солнца в летнее время), зенитный угол солнца = 70° (средняя высота солнца в течение года) и зенитный угол солнца = 90° (условия сумерек при восходе/заходе солнца). Результаты проведенных модельных расчетов представлены в табл. 5. Как видно из таблицы, изменение фактора воздушной массы при рассматриваемых вариациях угла визирования (половина поля зрения 10° и 25°) – от 0 до 5° и от 0 до 12.5° – незначительно. Максимальное изменение получено при наиболее высоком солнце и составило при этом около 2% при угле визирования 12.5° . При более типичных для широты Санкт-Петербурга условиях освещенности – зенитный угол солнца равен 70° – вариация фактора воздушной массы составляет менее 1%. Наименьшее влияние вариации угла визирования получено для сумеречных условий (зенитный угол солнца равен 90°), когда основная часть трассы распространения излучения лежит в стратосфере и существенно превышает относительно небольшой отрезок трассы в тропосфере (изменение фактора воздушной массы составило при этом менее 0.1%).

Таблица 5 Фактор воздушной массы NO_2 (AMF), рассчитанный для различных углов визирования и зенитного угла солнца, и оценка изменения AMF при отклонении направления визирования от зенита на 5 и 12.5 градусов (в %).

зенитный угол солнца	AMF при угле визирования, θ :			AMF $_{\theta}$ -AMF $_{\theta=0}$ / AMF $_{\theta=0}$, %	
	0	5	12.5	$\theta=5$	$\theta=12.5$
35	1.240	1.230	1.217	-0.81	-1.87
70	2.688	2.677	2.667	-0.41	-0.81
90	15.073	15.076	15.083	0.02	0.07

3.3 Спектроскопические измерения содержания NO_2 в центральной части Санкт-Петербурга

Компактность и простота организации спектроскопических измерений с помощью аппаратуры OceanOptics позволила осуществить серию тестовых измерений тропосферного содержания NO_2 в центральной части Санкт-Петербурга. С этой целью, в августе 2009 г. спектрометр OceanOptics HR4000 (видимая область) был установлен в помещении астрономической башни здания факультета географии и геоэкологии СПбГУ, расположенного в Василеостровском районе (10-я линия, д.33/35). Для проведения зенитных измерений рассеянного солнечного излучения входная часть оптического световода спектрометра была выведена на крышу башни и ориентирована вертикально в зенит. Регистрация спектров измерений и их последующая интерпретация осуществлялись на основе алгоритмов, разработанных ранее для измерений в НИИФ СПбГУ (Петродворец). Измерения выполнялись полностью автоматически, в течение нескольких дней в период с 21 августа по 28 сентября 2009 г. (всего 17 полных дней). Результаты измерений, представленные в виде дневных тропосферных содержаний NO_2 (± 2 часа от местного

полдня), приведены на рис. 20. Для сравнения, на том же рисунке представлены данные аналогичных измерений, выполнявшихся в эти же дни в НИИФ СПбГУ. Как видно из рисунка, содержания NO_2 в центральной части Санкт-Петербурга существенно превышают данные аналогичных измерений в Петродворце. Так в период с 28 августа по 1 сентября тропосферное содержание NO_2 в Санкт-Петербурге превышало результаты измерений в Петродворце в среднем в 7 раз. Исключением является 22 августа, когда в данных измерений НИИФ СПбГУ в Петродворце наблюдалось высокое содержание NO_2 (до $10 \cdot 10^{15}$ молекул/см²), близкое по значению к результатам измерений в Санкт-Петербурге. Такое согласие одновременных измерений в центральной части и за пределами города объясняется, по-видимому, ветром северо-восточного направления, приведшему к смещению загрязненных воздушных масс городского воздуха в сторону Петродворца.

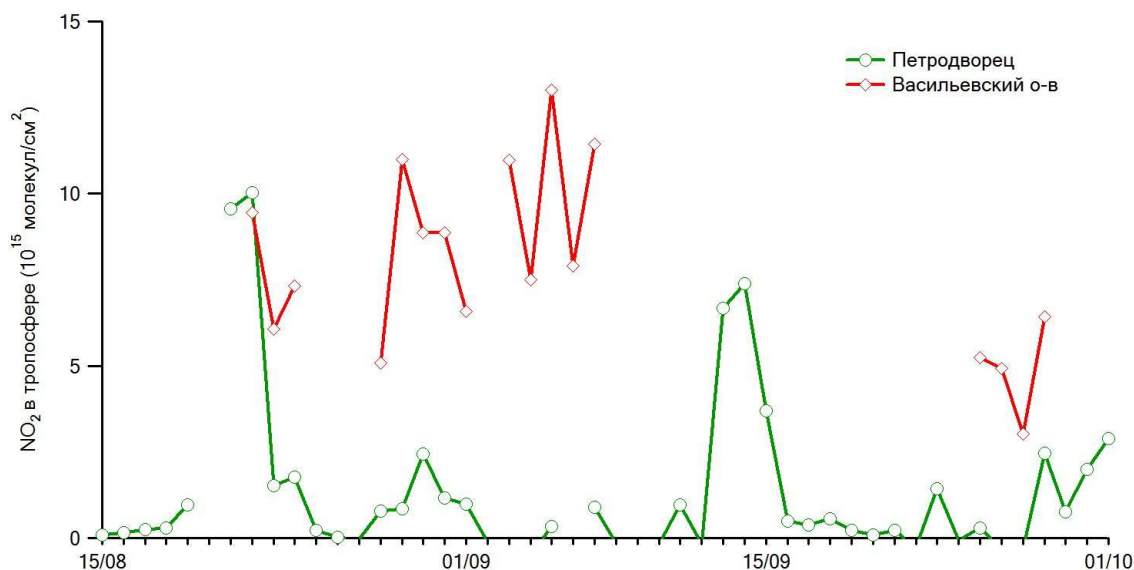


Рисунок 20

Результаты спектроскопических измерений содержания NO_2 в тропосфере, выполненных одновременно в Петродворце и Василеостровском районе Санкт-Петербурга, в августе-сентябре 2009 г.

3.4 Мобильные спектроскопические измерения содержания NO_2 в тропосфере

Мобильные спектроскопические измерения рассеянного видимого излучения осуществлялись спектрометром OceanOptics HR4000 в течение нескольких дней в сентябре-октябре 2009 г. Для осуществления измерений входная часть оптического световода спектрометра была вертикально зафиксирована на крыше легкового автомобиля, обеспечивая непрерывную регистрацию рассеянного в зенит солнечного излучения. Измерения выполнялись полностью автоматически, по ходу движения транспорта. Местоположение автомобиля определялось с помощью GPS-навигатора и автоматически записывалось в компьютер для последующей привязки результатов измерений к маршруту движения на карте. Время экспозиции для регистрации единичного спектра устанавливалось программой измерений спектрометра в зависимости от условий освещенности, и составляло в среднем ~60 мс (почти все наблюдения выполнялись в дневное время, около полудня – при высоком солнце). Запись спектров осуществлялась с интервалом 1 минута, единичные спектры, зарегистрированные за это время, суммировались. Таким образом, каждое окончательное измерение представляет собой среднее от ~1000 индивидуальных “мгновенных” спектров. Продолжительность маршрутов движения составляла 1-2 часа,

район мобильных измерений – юго-западные окраины Санкт-Петербурга. Предварительные результаты интерпретации измерений, выполненных 10 сентября, 29 сентября, 3 и 6 октября, представлены на рис. 21. Как видно из приведенных на рисунке карт, все мобильные измерения выявляют повышенное содержание NO_2 в западной части района наблюдений, расположенной ближе к центральной части города и, очевидно, более загрязненной (Краснопутиловская улица от площади Победы к площади Конституции, Ленинский проспект от площади Конституции к проспекту Народного ополчения, Кубинская улица, Пулковское шоссе). Измерения, выполненные по маршруту движения вдоль южного берега Финского залива (Санкт-Петербургское и Петергофское шоссе) как правило не выявляют повышенных значений содержания NO_2 . Следует отметить, регистрация спектров существенно осложняется в присутствии разрывной (не сплошной) облачности, особенно при измерениях во время движения, что требует дополнительных исследований по усовершенствованию методики интерпретации мобильных измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках представленной научно-исследовательской работы проинтерпретированы данные наземных наблюдений за содержанием NO_2 и O_3 в атмосфере на основе измерений рассеянного в зенит видимого солнечного излучения в Санкт-Петербурге в 2004-2009 гг. Все измерения обработаны по единой стандартной методике WinDOAS, разработанной для международной сети станций NDACC (<http://www.ndacc.org>). Результаты интерпретации – данные ежедневных сумеречных измерений стратосферных содержаний NO_2 и O_3 , а также дневных измерений тропосферного содержания NO_2 доступны в сети Интернет в реальном времени (http://troll.phys.spbu.ru/Personal_pages/Ionov/welcome.html). Кроме того, с июня 2008 года осуществляются также одновременные DOAS-измерения содержания NO_2 и O_3 с помощью компактного автоматического спектрометра высокого разрешения OceanOptics HR4000 в видимой области спектра, а также аналогичные измерения содержания O_3 спектрометром OceanOptics HR4000 в УФ области спектра (с мая 2009 г.). Результаты измерений OceanOptics сравнивались с данными основной аппаратуры (“КСВУ”), а также с измерениями на станции ГГО в пос. Воейково (озонметр М-124), и продемонстрировали хорошее согласие – средние расхождения составили ~10% и ~1% для стратосферных содержаний NO_2 и O_3 , соответственно.

Проведены сопоставления данных сумеречного зондирования стратосферных содержаний NO_2 и O_3 в районе Санкт-Петербурга с данными дневных измерений различной спутниковой аппаратурой – ERS-2 GOME, ENVISAT SCIAMACHY, AURA OMI. В среднем, отмечено хорошее согласие между данными согласованных спутниковых и наземных измерений – так, средние расхождения составили ~5-15% и ~10% для NO_2 и O_3 , соответственно (результаты наземных измерений O_3 оказываются систематически ниже спутниковых данных). Прямое сопоставление данных всех дневных наземных и спутниковых измерений содержания тропосферного NO_2 в районе Санкт-Петербурга демонстрирует неудовлетворительное согласие – коэффициент корреляции 0.2, среднее расхождение около 80%.

Изучены вариации содержания тропосферного NO_2 в Санкт-Петербурге, как на основе данных наземных спектроскопических измерений НИИФ СПбГУ, так и данных дистанционного спутникового зондирования (аппаратура GOME, SCIAMACHY, OMI), а также прямых измерений приземных концентраций NO_2 Автоматизированной системой мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга. Получены согласованные оценки недельного цикла вариаций NO_2 вблизи мегаполиса Санкт-Петербурга по имеющимся данным дистанционных и прямых измерений, с характерным минимумом содержания NO_2 в выходные дни, ~20-30% от максимума в будни (в данных спектроскопических измерений НИИФ СПбГУ в Петродворце минимальное значение смещено от воскресенья к

понедельнику). Продемонстрирована временная корреляция суточного цикла вариаций приземной концентрации NO₂ с данными об интенсивности движения городского автотранспорта.

Выполнено картирование пространственных распределений содержания тропосферного NO₂ на территории Российской Федерации на основе результатов измерений спутниковой аппаратуры OMI в 2004-2009 гг. Проанализирован многолетний ряд спутниковых наблюдений содержания NO₂ в тропосфере Северо-западного региона в 1995-2009 гг. по данным измерений аппаратуры GOME. Получена уточненная оценка положительного линейного тренда тропосферного NO₂ в районе Санкт-Петербурга, составляющая 6% за 10 лет.

Проведены тестовые расчеты поля распространения NO₂ в районе Санкт-Петербурга с помощью дисперсионной модели HYSPLIT, на примере периода интенсивного воздушного загрязнения, наблюдавшегося зимой 2006 года. Результаты расчета демонстрируют хорошее согласие с данными дистанционных спутниковых и наземных измерений, а также автоматических измерений приземных концентраций.

С помощью спектрометра OceanOptics осуществлены эпизодические измерения тропосферных содержаний NO₂ в центральной части города (Васильевский остров), а также мобильные измерения с борта автомобиля на нескольких маршрутах в юго-западной части города. Данные измерений выявили существенно более высокие тропосферные содержания NO₂, по сравнению с аналогичными измерениями в Петродворце. В дальнейшем, разрабатываемая система мобильных измерений будет использована для более детального сопоставления данных наземных и спутниковых наблюдений с результатами численного моделирования распространения воздушных загрязнений в районе Санкт-Петербурга.

По результатам проведенных исследований подготовлен настоящий научно-технический отчет, опубликована одна статья [14], сделано 1 сообщение на всероссийской конференции [17].

ЛИТЕРАТУРА

1. *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.
2. *M. Van Roozendael, M. De Maziere, P.C. Simon* Ground-based visible measurements at the Jungfraujoch station since 1990 // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 52 (3/4), 231-240, 1994.
3. *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.
4. *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.
5. *Levelt P.F., Hilsenrath E., Leppelmeier G.W., van den Oord G.H.J., Bhartia P.K., Tamminen J., Haan J.F., and Veefkind J.P.* Science objectives of the Ozone Monitoring Instrument // IEEE Trans. on Geosc. And Remote Sensing, 44(5), IGRSD2, 1199-1208, 2006
6. *Celarier E.A., Brinksma E., Gleason J.F., Veefkind J.P., Cede A., Herman J.R., Ionov D., Goutail F., Pommereau J., Lambert J., Van Roozendael M., Pinardi G., Wittrock F., Schonhardt A., Richter A., Ibrahim O.W., Wagner T., Bojkov B.R., Mount G.H., Spinei E., Chen C., Pongetti T., Sander S.P., Bucsela E., Wenig M., Swart D., Volten H., Kroon M., and*

- Levelt P.* Validation of Ozone Monitoring Instrument Nitrogen Dioxide Columns // *J. Geophys. Res.*, 113, D15S08, doi:10.1029/2007JD008908, 2008.
7. *Roazanov, V.V., M. Buchwitz, K.-U. Eichmann, de Beek R., and J.P. Burrows* (2002), SCIATRAN – a new radiative transfer model for geophysical applications in the 240-2400 nm spectral region: The pseudo-spherical version, *Adv. Space. Res.* 29, 11, 1831–1835.
 8. U.S. Standard Atmosphere, 1976, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1976
 9. *Bruhl C., and P.J. Crutzen* MPIC two-dimensional model // *The atmospheric effects of stratospheric aircraft*, vol. 1292 of NASA Ref. Publ. 1993, pp. 103–104.
 10. *Denis, L., H. K. Roscoe, M. P. Chipperfield, M. Van Roozendal, and F. Goutail* A new software suite for NO₂ vertical profile retrieval from ground-based zenith-sky spectrometers, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 92 (3), 321-333, 2005.
 11. *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.
 12. *Draxler R.R. and Rolph G.D.* HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 2003.
 13. *Ионов Д.В.* Проблема валидации данных спутниковых измерений газового состава атмосферы на примере задачи глобального мониторинга общего вертикального содержания озона и двуокиси азота // Юбилейный сборник: "Физика атмосферы: наука и образование", 11-13 сентября 2007, Санкт-Петербург, с.66-80
 14. *Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М.* Региональный космический мониторинг содержания двуокиси азота в тропосфере // *Известия РАН, Физика атмосферы и океана.* 2009. Т.45. N.4. С.467-476.
 15. *van der A R.J., Peters D.H.M.U., Eskes H., Boersma K.F., Van Roozendaal M., De Smedt I., and H.M. Kelder* Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric NO₂ over China // *J. Geophys Res.*, 111, D12317, doi:10.1029/2005JD006594, 2006.
 16. *Vandaele, A.C., et al.* An intercomparison campaign of ground-based UV-visible measurements of NO₂, BrO, and OClO slant columns: Methods of analysis and results for NO₂ // *J. Geophys. Res.*, 110 (D8), D08305, 2005.
 17. *Ионов Д.В., Поберовский А.В.* Наземные спектроскопические измерения вертикальных содержаний озона и NO₂ в районе Санкт-Петербурга // *Материалы конференции: Международный Симпозиум стран СНГ "Атмосферная Радиация и Динамика"*, 22-26 июня 2009, Санкт-Петербург, с.51-52

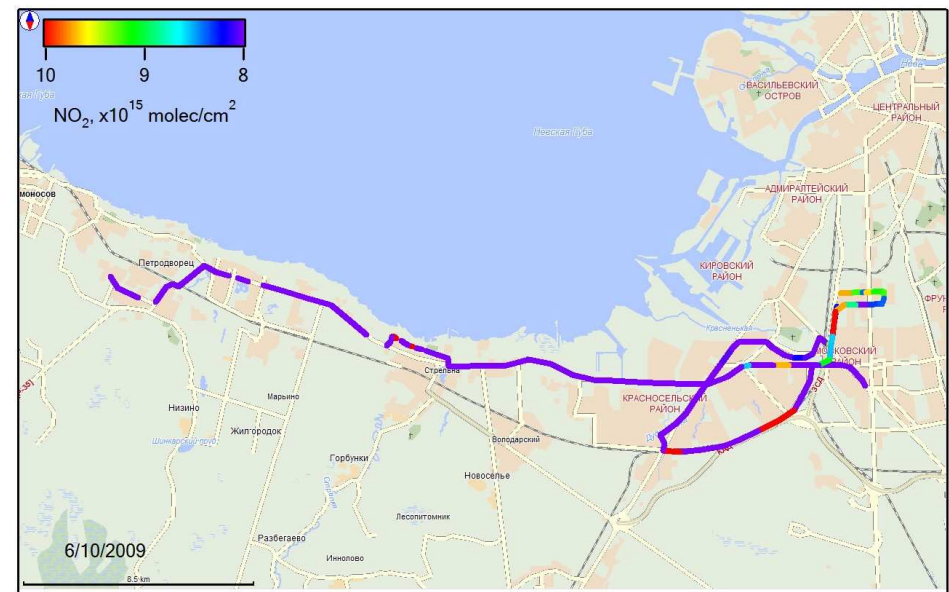
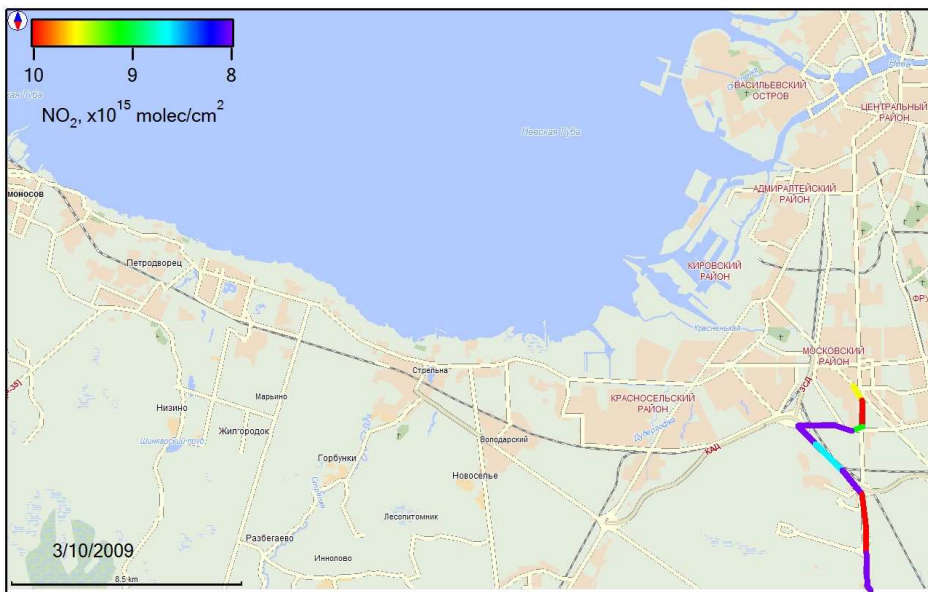
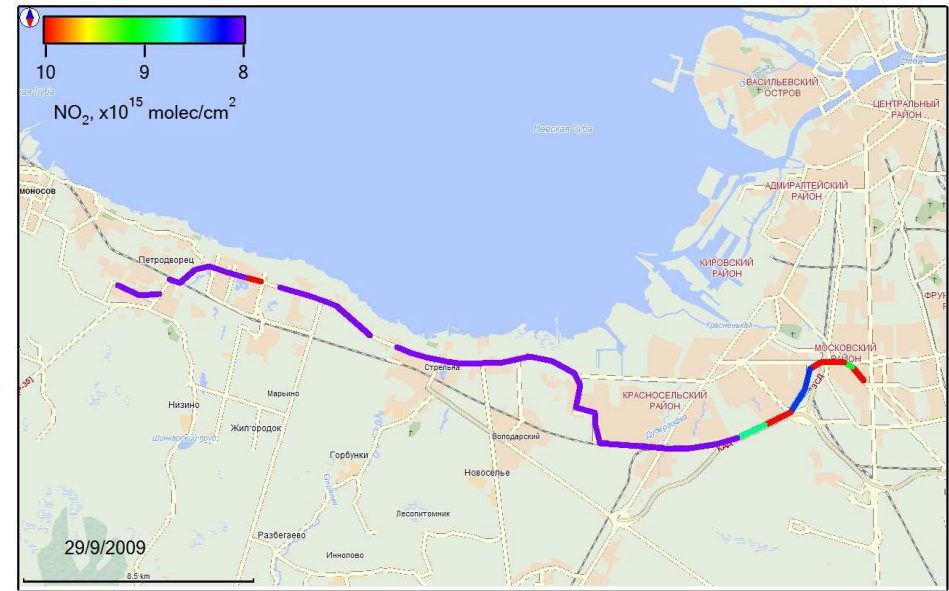
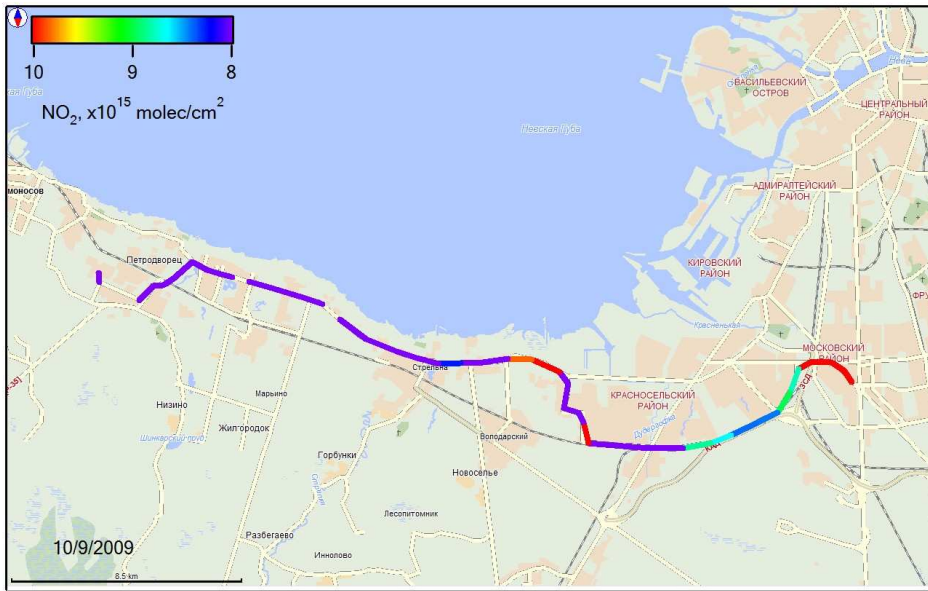


Рисунок 21

Мобильные спектроскопические измерения содержания NO_2 в тропосфере в Санкт-Петербурга