

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

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

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по НИР СПбГУ

_____ (Горлинский И.А.)

"__" _____ 2008 г.

М.П.

отчет

по научно-исследовательской работе за 2008 год

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

«Анализ антропогенно обусловленных вариаций содержания двуокиси
азота (NO₂) в атмосфере Северо-западного региона России»

Исполнитель работ
к.ф.-м.н., с.н.с.

_____ (Ионов Д.В.)

**Санкт-Петербург
2008**

РЕФЕРАТ

Отчет о выполненной работе в рамках соглашения об информационном обмене и сотрудничестве между Комитетом по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности и физическим факультетом ФГУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный университет" от 24.07.2007, с.56, рис.24, табл. нет, источников 22, приложений нет.

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

Объект исследования:

Данные долговременных дистанционных наземных и спутниковых спектроскопических измерений содержания двуокси азота (NO_2) в атмосфере, данные регулярных прямых измерений приземных концентраций NO_2 в атмосфере Санкт-Петербурга.

Цель работы:

Исследование суточных, недельных, сезонных и долговременных многолетних вариаций содержания двуокси азота (NO_2) в атмосфере Ленинградской области, с оценкой возможного тренда, обусловленного ростом антропогенного загрязнения мегаполиса Санкт-Петербурга.

Новизна:

Проинтерпретированы данные наземных наблюдений за содержанием NO_2 в атмосфере Санкт-Петербурга в 2004-2008 гг. Получены оценки вариаций 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. На основе данных многолетних спутниковых измерений GOME (1995-2008) получена уточненная оценка положительного линейного тренда тропосферного NO_2 в районе Санкт-Петербурга, составляющая 7% за 10 лет.

Эффективность:

Совместное использование результатов наземного дистанционного зондирования с оперативными данными современных спутниковых экспериментов по глобальному мониторингу газового состава атмосферы, и автоматизированных локальных наземных измерений.

Область применения:

Долговременный региональный мониторинг уровня антропогенного загрязнения атмосферы.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ	04
ВВЕДЕНИЕ	05
1. НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА СОДЕРЖАНИЕМ NO ₂ В АТМОСФЕРЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В 2004-2008 ГГ.	07
2. ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ NO ₂ В РАЙОНЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ NO ₂ В ПРИЗЕМНОМ ВОЗДУХЕ	15
2.1 Недельный цикл содержания NO ₂ в атмосфере Санкт-Петербурга	15
2.2 Сопоставление данных одновременных спутниковых и наземных измерений содержания NO ₂ в атмосфере Санкт-Петербурга	29
3. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ТРОПОСФЕРНОГО NO ₂ В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ – АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И ОЦЕНКА ВРЕМЕННОГО ТРЕНДА ДЛЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	50
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	53

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

ОС - общее содержание

УФ - ультрафиолет

ИК - инфракрасный

БИК - ближний ИК

ERS-2 - 2nd European Research Satellite

GOME - Global Ozone Monitoring Experiment

EOS - Earth Observing System

СНГ - Содружество Независимых Государств

ГГО - Главная Геофизическая Обсерватория

WMO - World Meteorological Organization

NASA- National AeroSpace Agency

ESA - European Space Agency

SCIAMACHY - SCanning ImAging spectroMeter for Atmospheric

CHartographY

ENVISAT - Environmental Satellite

NDACC - Network for the Detection of Atmospheric Composition Change

NDSC - Network for the Detection of Stratospheric Change

SAOZ – Systeme d'Analyse par Observations Zenithales

DOAS - Differential Optical Absorption Spectroscopy

BIAS - Basic Infrared Absorption Spectroscopy

HYSPLIT - HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory

OMI - Ozone Monitoring Instrument

EPS - EUMETSAT Polar System

EUMETSAT - European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites

METOP - METerological OPerational

ВВЕДЕНИЕ

Двуокись азота (NO_2) – одна из ключевых газовых компонент в атмосферной химии. В стратосфере NO_2 участвует в цикле реакций по разрушению атмосферного озона, тогда как в тропосфере фотолиз NO_2 является одним из источников образования O_3 . Важно отметить, что повышенное содержание NO_2 в приземном слое представляет прямую угрозу человеку и окружающей среде, вызывая образование фотохимического смога и кислотных дождей. При этом до 60% выбросов NO_2 в тропосферу обусловлено сжиганием топлива автомобилями и промышленными установками [1]. 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.

Информация о глобальном распределении NO_2 поступает со спутниковых систем измерений, установленных на околополярных солнечно-синхронных орбитах – ERS-2 GOME [2], Envisat SCIAMACHY [3], Aura OMI [4], EPS-MetOp GOME-2 [5].

В настоящее время, основные “очаги” антропогенного загрязнения атмосферы окислами азота сосредоточены, по данным спутниковых наблюдений, в промышленных и густонаселенных районах США, Китая, Западной Европы и Южной Африки. В России наиболее заметным антропогенным вкладом в тропосферное содержание NO_2 характеризуются мегаполисы городов Москва и Санкт-Петербург. Данное исследование посвящено долговременному мониторингу

содержания тропосферного NO₂ в Ленинградской области на основе оперативных данных современных глобальных спутниковых систем и локальных наблюдений наземной спектроскопической аппаратуры. В работе представлены результаты долговременных наземных и спутниковых измерений содержания NO₂ в районе Санкт-Петербурга (1995-2008), приведены оценки недельного цикла вариаций NO₂ вблизи мегаполиса Санкт-Петербурга по имеющимся данным наблюдений, рассмотрены примеры регистрации сильных антропогенных загрязнений спутниковой и наземной аппаратурой, выполнено долговременное картирование поля содержания тропосферного NO₂ в Ленинградской области, получены оценки соответствующего временного тренда содержания NO₂ в тропосфере. В проведенном анализе были также использованы данные прямых измерений концентраций NO₂ на станциях Автоматизированной системы мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга.

1. НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА СОДЕРЖАНИЕМ NO₂ В АТМОСФЕРЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В 2004-2008 ГГ.

Для проведения измерений использовался разработанный в НИИФ СПбГУ автоматизированный спектральный комплекс на основе спектрометра с дифракционной решеткой, позволяющий регистрировать спектр рассеянного излучения в интервале 428-515 нм с разрешением 1.3 нм [6]. Содержание NO₂ на трассе формирования излучения (наклонное содержание) извлекается из результатов сумеречных спектроскопических измерений с помощью методики дифференциального поглощения [7]. Начиная с 2004 года, интерпретация наземных измерений осуществляется на основе стандартных методик, разработанных для международной сети станций NDACC (NDSC) [8] и SAOZ [9] (WinDOAS, [10]).

Измерительная аппаратура установлена в здании НИИФ СПбГУ в Петергофе (29° 49.6' в.д., 59° 52.9' с.ш.), регулярные наблюдения ведутся с апреля 2002 года. Измерения производятся непрерывно в автоматическом режиме при зенитных углах солнца меньше 96°, т.е. как в дневное время, так и в сумеречных условиях. В настоящей работе использовались данные сумеречных и дневных измерений в период с января 2004 по сентябрь 2008 года, обработанные по единому алгоритму.

Кроме того, с июня 2008 года НИИФ СПбГУ осуществляет также одновременные DOAS-измерения содержания NO₂ (и озона) с помощью компактного автоматического спектрометра высокого разрешения OceanOptics HR4000. В основе спектрометра – детектор на ПЗС-матрице размерностью 3636, обеспечивающий спектральное разрешение в видимой области (398-607 нм) порядка 0.6 нм. Прибор установлен в помещении лаборатории и осуществляет измерения рассеянного солнечного излучения, проходящего на входную линзу

оптоволоконного световода, установленную в зенит. Время регистрации одного спектра – 15-30 мсек; каждый спектр сглаживается скользящим прямоугольным фильтром (boxcar) по 3-м элементам матрицы (пикселям). Для повышения отношения сигнал/шум спектры осредняются по сумме из 2000-4000; запись результатов осуществляется каждые 5 минут.

Примеры результатов обработки спектров рассеянного видимого солнечного излучения, зарегистрированного приборами "КСВУ" и "OceanOptics", представлены на рисунках 1.1 и 1.2, соответственно. Разница в наклонных содержаниях молекулярных компонент, полученных по данным разных приборов, обусловлена различиями в используемых референтных (опорных спектров). На рисунке 1.3 приведены результаты определения содержания NO₂ в тропосфере, полученные по данным одновременных измерений аппаратурой "КСВУ" и "OceanOptics", выполненных в течение светового дня 01.07.2008. Следует отметить, что этот день отличается необычно высоким содержанием тропосферного NO₂ – в среднем около $2 \cdot 10^{16}$ мол/см², что на порядок превышает типичные фоновые значения. Данные измерений "OceanOptics" полностью воспроизводят дневной ход тропосферного NO₂, зарегистрированный прибором "КСВУ", в том числе и резкое увеличение содержания NO₂, наблюдавшееся после 16:00 местного времени. Подобные вариации тропосферного NO₂ характерны для эпизодов сильного загрязнения атмосферы, обусловленного антропогенным воздействием.

На рисунке 1.4 представлен весь ряд наземных сумеречных измерений стратосферного NO₂ в 2004-2008 гг. – осредненные для каждого дня наблюдений значения ОС NO₂ на восходе и заходе солнца (аппаратура "КСВУ"). Для сравнения на том же рисунке приведены среднемесячные значения общего (вертикального) NO₂, полученные

на основе аналогичных измерений за тот же период на станции Harestua, Норвегия (60.22° с.ш., 10.75° в.д.).

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 рисунке 1.5. 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). Не смотря 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.

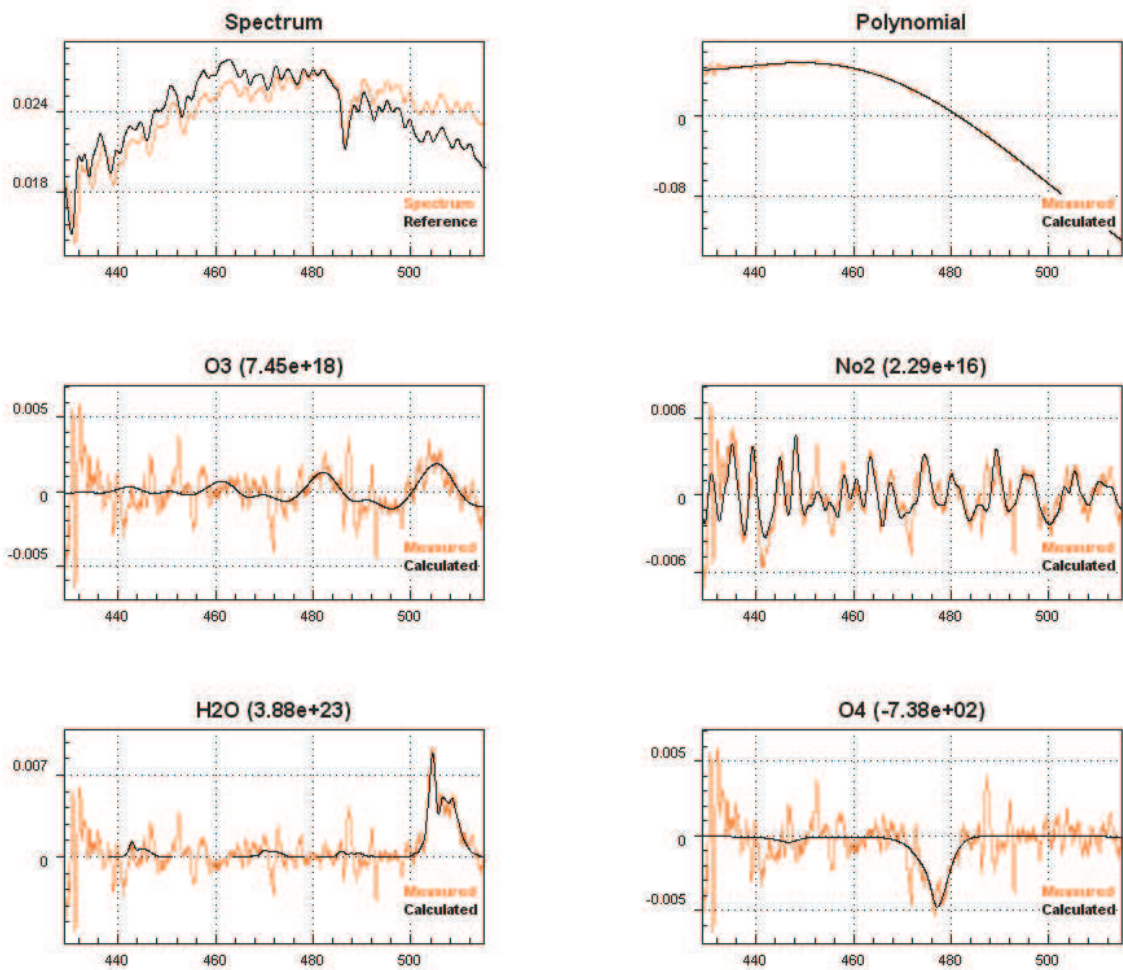


Рисунок 1.1

Пример обработки спектра наземных измерений рассеянного в зенит солнечного излучения в НИИФ СПбГУ 01.07.2008 (аппаратура "КСВУ"): полдень (13:02, $SZA=36.82^\circ$)

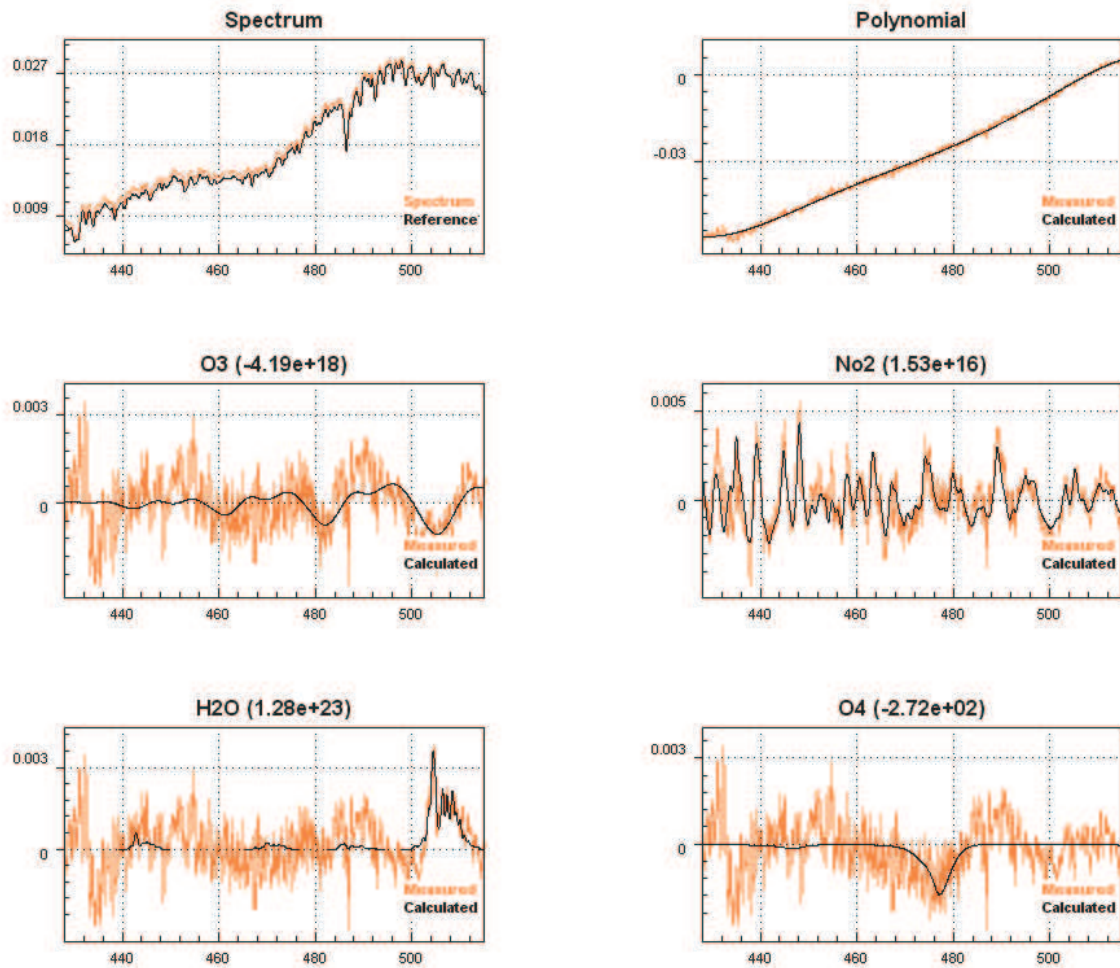


Рисунок 1.2

Пример обработки спектра наземных измерений рассеянного в зенит солнечного излучения в НИИФ СПбГУ 01.07.2008 (аппаратура "OceanOptics"): полдень (13:06, SZA=36.82°)

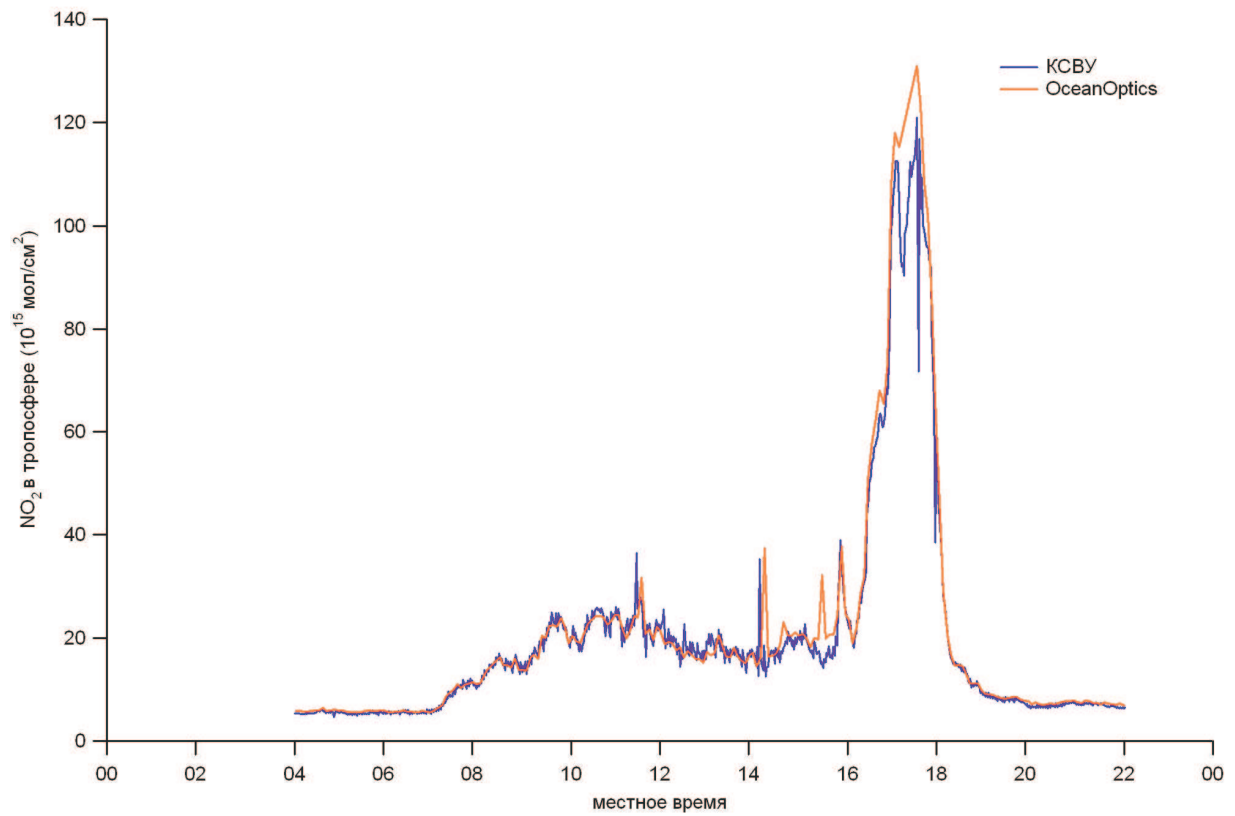


Рисунок 1.3

Содержание NO₂ в тропосфере по данным одновременных наземных измерений рассеянного в зенит солнечного излучения аппаратурой "КСВУ" и "OceanOptics" (НИИФ СПбГУ, 01.07.2008)

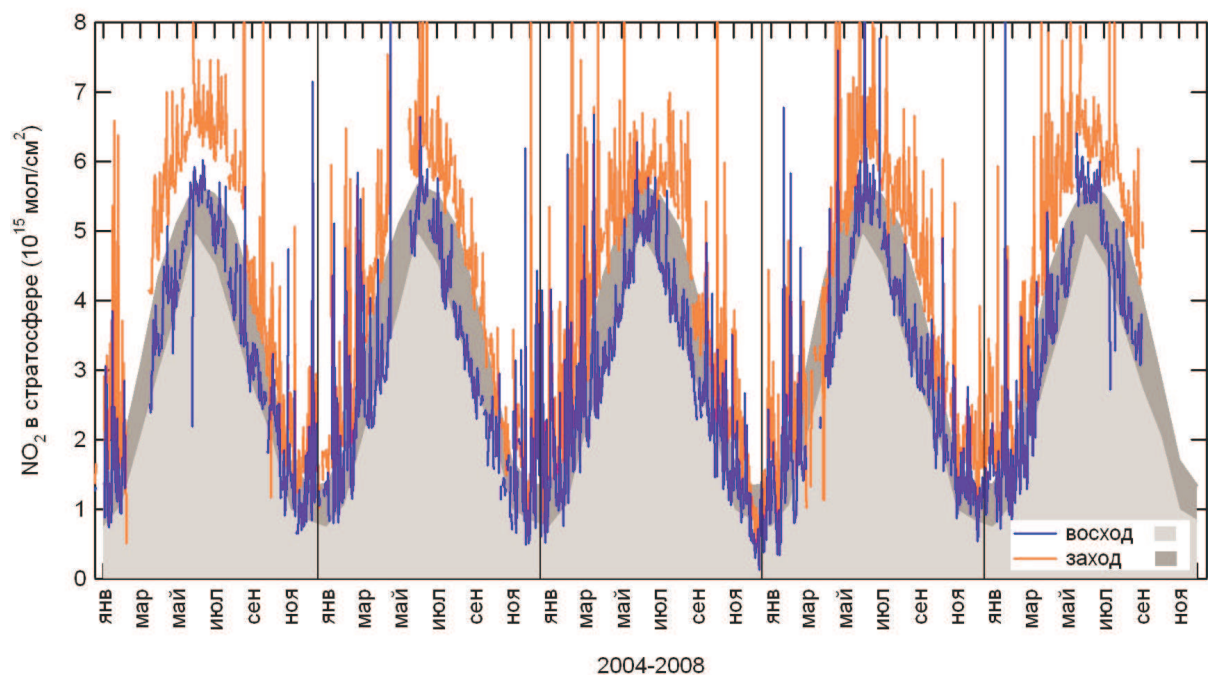
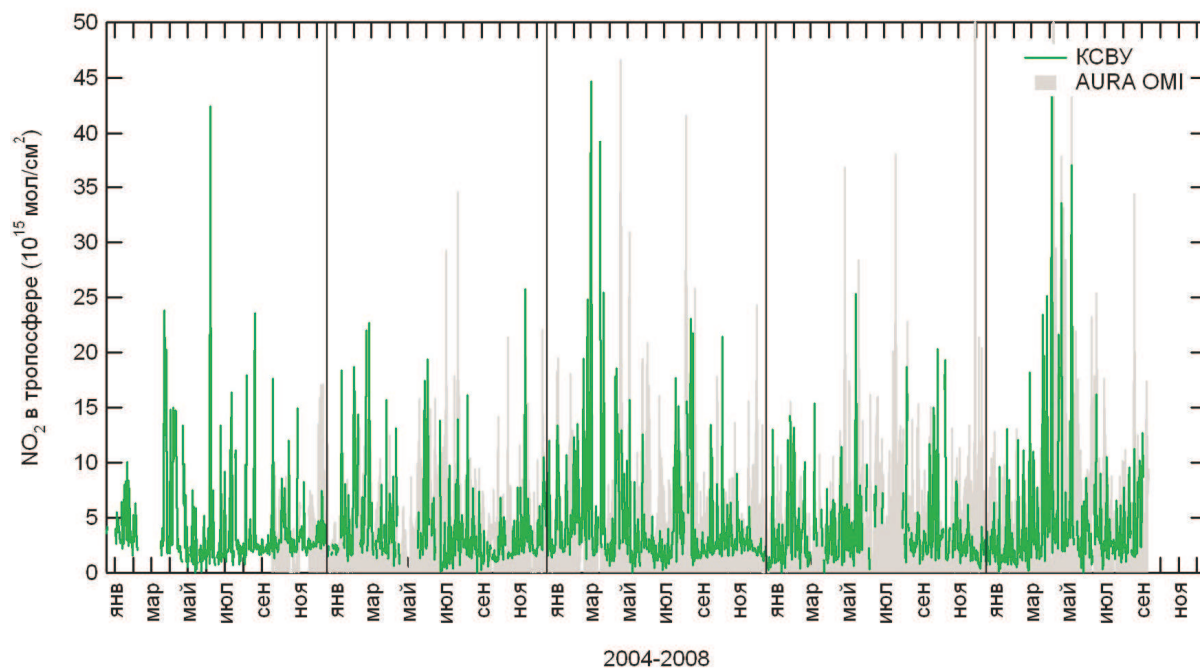


Рисунок 1.4

Данные об стратосферном NO_2 в районе Санкт-Петербурга по результатам сумеречных спектроскопических измерений НИИФ СПбГУ в 2004-2008 гг. Отдельными кривыми (сплошная заливка) представлены также среднемесячные значения ОС NO_2 , полученные на основе аналогичных измерений за тот же период на станции Harestua (Норвегия).



2004-2008

Рисунок 1.5

Данные о тропосферном содержании NO_2 в Санкт-Петербурге по результатам дневных спектроскопических измерений НИИФ СПбГУ в 2004-2008 гг. (данные измерений ОС NO_2 осреднены с 10:00 до 14:00 местного времени). Отдельной кривой (сплошная заливка) представлены данные спутниковой аппаратуры OMI.

2. ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ NO₂ В РАЙОНЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ NO₂ В ПРИЗЕМНОМ ВОЗДУХЕ

Измерения приземных концентраций NO₂ осуществляются "Автоматической системой мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга". Информация о состоянии атмосферного воздуха Санкт-Петербурга, относится к государственным информационным ресурсам Санкт-Петербурга и находится в ведении "Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности". Автоматические станции мониторинга загрязнения атмосферного воздуха функционируют непрерывно и обеспечивают регулярное получение оперативной информации об уровне загрязнения атмосферного воздуха Санкт-Петербурга основными примесями (CO, NO, NO₂, SO₂, O₃, NH₃, каждые 20 минут). Система включает 17 станций, оснащенных газоанализаторами оксидов азота (фирмы "Thermo Electron").

2.1 Недельный цикл содержания NO₂ в атмосфере Санкт-Петербурга

Анализ многолетних данных ежедневных спутниковых измерений в районе Санкт-Петербурга выявляет заметный недельный цикл тропосферного NO₂. Так, результаты расчета средних содержаний NO₂ в тропосфере для каждого дня недели, полученные по данным измерений спутниковой аппаратуры OMI в период с октября 2004 по октябрь 2008 года, представлены на рисунке 2.1.1. Видно, что минимальное содержание NO₂ наблюдается в воскресенье ($4.75 \cdot 10^{15}$ мол/см²) – на 19% ниже, чем в будни (в среднем: $5.88 \cdot 10^{15}$ мол/см²). 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 2004-2008 гг. (использовались средние значения тропосферного NO_2 по измерениям в период с 10:00 до 14:00 местного времени). Как и в результатах анализа спутниковых данных, воскресное содержание NO_2 ($3.86 \cdot 10^{15}$ мол/см²) оказывается существенно ниже максимального значения в будние дни (четверг, $4.76 \cdot 10^{15}$ мол/см²) – на 23%. Однако, в отличие от данных спутниковых измерений вблизи центра Санкт-Петербурга, минимальное содержание NO_2 по результатам наземных измерений в районе Петродворца наблюдается в понедельник – $3.69 \cdot 10^{15}$ мол/см².

Предполагая недельную цикличность в данных дистанционных измерений содержания NO_2 в тропосфере, следует ожидать наличие подобного эффекта и в данных прямых измерений в приземном воздухе Санкт-Петербурга, где и находятся основные антропогенные источники NO_2 . По договоренности с Комитетом, нам были предоставлены данные ежечасных измерений приземных концентраций NO_2 , полученные на трех автоматических станциях - №5 и №6 за 2004-2007 гг., и №15 в 2006-2007 гг. (см. рисунок 2.1.2). Выбор станций обусловлен непрерывностью ряда наблюдений в указанные периоды, с одной стороны, и близостью данных станций как к центру города (станция №6, расположенная в Василеостровском районе по адресу: Весельная ул., д.6), так и к месту наземного дистанционного зондирования НИИФ СПбГУ в Петродворце (станция №5, расположенная в Кировском районе по адресу: пр. Маршала Жукова, д. 30). Станция №15, расположенная в Кронштадском районе (ул. Ильмянинова, д. 4), находится ближе всех к Петродворцу и

одновременно существенно удалена от центральной части Санкт-Петербурга с ее мощными источниками загрязнения. Результат анализа недельного цикла среднесуточных приземных концентраций NO_2 для станции №5 представлен на рисунке 2.1.1 (измеренные концентрации приведены к общему содержанию в приземном слое высотой 600 метров, в предположении полного перемешивания примеси). Как и в данных спутникового зондирования, вариации содержания NO_2 в приземном воздухе Санкт-Петербурга характеризуются недельным циклом с выраженным воскресным минимумом $\sim 20\%$ (результаты измерений на других станциях – №6 и №15 – дают аналогичные результаты).

Данные ежечасных измерений концентраций NO_2 в приземном воздухе позволяют также оценить суточный цикл вариаций этой газовой компоненты. Среднегодовой суточный цикл, рассчитанный на основе всех имеющихся данных, представлен на рисунке 2.1.3. Как видно из рисунка, из трех рассмотренных нами станций Санкт-Петербурга, наиболее выраженный суточный цикл наблюдается в данных измерений на станциях №5 и 6. Эти станции характеризуются также более высоким уровнем загрязнений ($\sim 50\text{-}60 \text{ мкг/м}^3$), по сравнению со станцией №15, расположенной в Кронштадте ($\sim 20 \text{ мкг/м}^3$). Минимальное содержание NO_2 в воздухе центральной части города (станции №5 и 6) наблюдается ранним утром (4:00-7:00), после чего, с появлением на улицах транспорта, начинает быстро расти вплоть до 9:00-11:00. В дальнейшем, приземная концентрация NO_2 меняется незначительно и начинает спадать лишь после полуночи. Выделить аналогичный суточный цикл в данных измерений на станции №15 в Кронштадте не удастся. Рисунок так же содержит установленный в России уровень среднесуточной ПДК двуокиси азота в воздухе населенных мест (40 мкг/м^3). Таким образом, среднегодовые

концентрации NO_2 на двух из рассмотренных станциях значительно превышают ПДК.

Одновременно с измерениями приземных концентраций загрязняющих веществ, на станциях "Автоматической системы мониторинга атмосферного воздуха" ведутся также измерения направления и скорости ветра. Результаты анализа ветрового режима на станциях №5, 6 и 15 в 2004-2007 гг. (2004-2006 гг. для станции №6, 2006-2007 гг. для станции №15) в виде распределений повторяемости направлений ветра, представлены на рисунке 2.1.4. Как видно из рисунков, выделить преобладающее направление ветра в этих данных довольно трудно. Так, на станции №5 практически не регистрировался ветер северо-западного направления (сектор 270-360°), что по-видимому обусловлено ее расположением в зоне ветровой тени близлежащих зданий. На станции №6 распределение ветра сильно вытянуто с юго-юго-запада (195°) на северо-восток (60°), что может указывать на резкие порывы ветра вдоль окружающих станцию зданий. Аналогично, ветровое распределение, построенное для станции №15, существенно вытянуто в западном направлении (255°). Таким образом, рассмотренные нами данные носят слишком локальный характер и, по всей вероятности, не могут быть использованы для анализа возможного движения загрязненных воздушных масс. Средняя скорость ветра, по всем данным, составила 0.9, 1.6 и 1.4 м/с для станций №5, №6 и №15, соответственно. Более высокие значения, наблюдаемые на станциях №6 и №15 обусловлены, по-видимому их близостью к берегу Финского залива. Распределение регистрируемых концентраций NO_2 по направлению ветра не выявило каких-либо характерных особенностей, что говорит об отсутствии влияния ветрового режима на результаты измерений.

С осени 2007 года измерения направления и скорости ветра

осуществляются и в СПбГУ (Петродворец), с помощью автоматической метеостанции, установленной на крыше здания НИИФ. Запись всех метеопараметров выполняется непрерывно с шагом 5 минут. Для проведения анализа ветрового режима в районе измерений НИИФ СПбГУ и его влияния на величину регистрируемых тропосферных содержаний NO_2 , нами был подробно рассмотрен отдельный период совместных спектроскопических измерений и метеонаблюдений с августа 2007 по март 2008 года. Для согласования с данными метеонаблюдений, результаты наземных спектроскопических измерений NO_2 были осреднены по 5-минутным интервалам. На рисунках 2.1.5а-в представлено распределение повторяемости (а, 0-18%) и скорости ветра (б, 0-5 м/с), а также тропосферного содержания NO_2 (в, 0-10 10^{15} мол/см²) по направлениям (0-360°). Как видно из рисунка 2.1.5а, преобладающее направление ветра в районе НИИФ СПбГУ – южное и юго-восточное, что несколько отличается от среднеклиматических данных для Санкт-Петербурга, согласно которым преобладающий ветер – западный, юго-западный или южный. Распределение скорости ветра характеризуется несколько более высокими значениями при западном ветре (рисунок 2.1.5б). Средняя скорость ветра за рассматриваемый период составила 3.6 м/с. Характерной особенностью распределения дневного содержания NO_2 по направлению ветра является его значительная вытянутость в северо-восточном направлении (67.5°), что указывает на влияние городского загрязнения, поскольку центральная часть Санкт-Петербурга находится именно в этом направлении и оттуда могут приходиться загрязненные массы воздуха. Для наглядности, на рисунке 2.1.6 распределение содержания NO_2 по измерениям НИИФ СПбГУ совмещено также с картой Финского залива, где показано взаимное расположение центральной части Санкт-Петербурга и Петродворца.

Кроме того, были рассмотрены данные независимых метеонаблюдений, выполнявшихся на метеостанции Информационного центра погоды "Санкт-Петербург" (РОСГИДРОМЕТ), расположенной в центральной части города (ул. Профессора Попова д.48). Данные были взяты из архива фактичекой погоды, доступного в сети Интернет (<http://meteo.infospace.ru>). Поскольку данные РОСГИДРОМЕТа представлены по 3-часовым срокам, для анализа распределений из результатов наземных измерений в Петродворце были выбраны соответствующие 5-минутные интервалы. Полученное распределение измеренных значений тропосферного NO₂ по направлению ветра представлено на рисунке 2.1.7. По сравнению с рисунком 2.1.6, данное распределение характеризуется большей подробностью, поскольку регистрация направлений ветра на станции РОСГИДРОМЕТа осуществляется с шагом 10°, а не по румбам, как на станции НИИФ СПбГУ (шаг 22.5°). Тем не менее, форма распределения 2.1.7 аналогична 2.1.6 – наибольшее загрязнение тропосферы регистрируется при северо-восточном ветре (60°).

Поскольку станция дистанционного зондирования НИИФ СПбГУ находится на значительном удалении от основных источников загрязнений в центре Санкт-Петербурга, метеорологическая обстановка в период наблюдений может существенно влиять на результаты измерений. Чтобы оценить этот эффект, мы проанализировали архив данных РОСГИДРОМЕТа о направлении и скорости ветра в Санкт-Петербурге за весь период наземных измерений НИИФ СПбГУ (2004-2008 гг.). На основе этой информации, данные наземных измерений содержания NO₂ в тропосфере были разбиты на два ансамбля: выполненные в условиях восточного ветра (20-160°, на 3-часовой срок в 12:00 местного времени), т.е. при выносе загрязненных воздушных масс от центра Санкт-Петербурга к

Петродворцу, и все прочие, с преобладающим западным ветром. Результат анализа недельного цикла, проведенный с использованием всех измерений, а также двух отдельных ансамблей данных, представлен на рисунке 2.1.8. Как видно из рисунка, данные измерений НИИФ СПбГУ, выполненные в условиях восточного ветра, характеризуются повышенным содержанием NO_2 (более чем в 2 раза), с ярко выраженным воскресным минимумом – 33% от среднего содержания в будние дни.

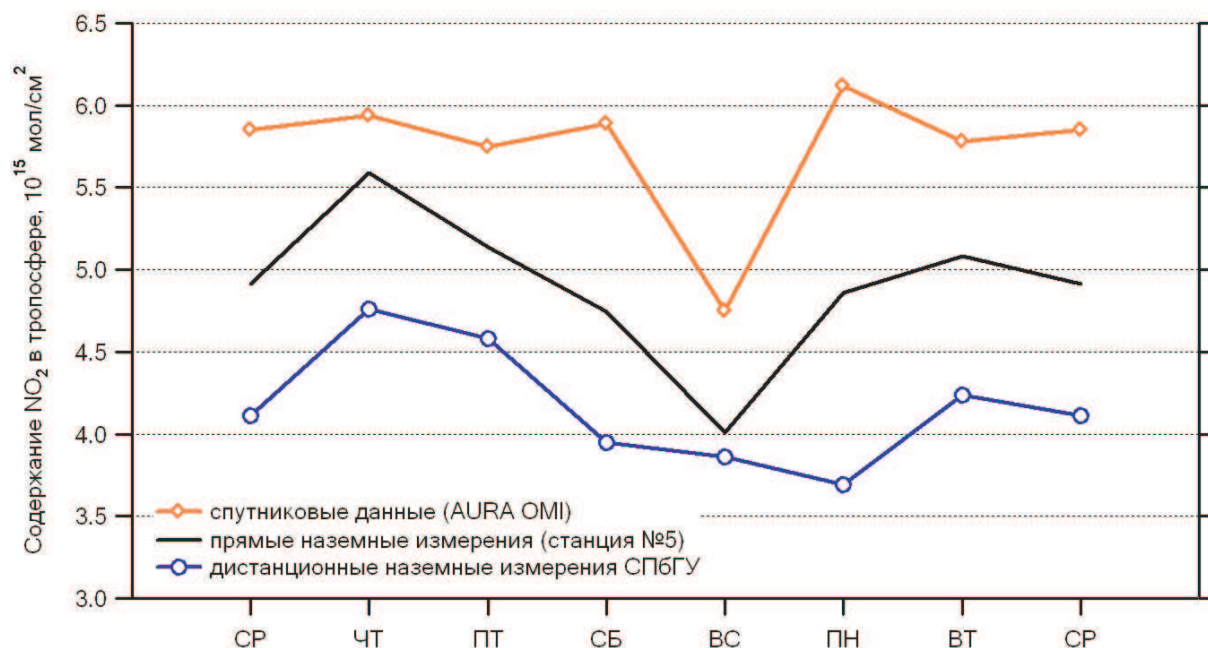


Рисунок 2.1.1

Недельный цикл тропосферного содержания NO_2 в районе Санкт-Петербурга по данным спутникового зондирования (AURA OMI, ~14:00) и прямых измерений приземных концентраций (в пересчете на общее содержание в слое 600 метров, станция №5, 10:00-14:00) в 2004-2008 гг.. Отдельной кривой представлены аналогичные оценки по данным дистанционных наземных измерений (НИИФ СПбГУ, 10:00-14:00) в 2004-2008 гг..

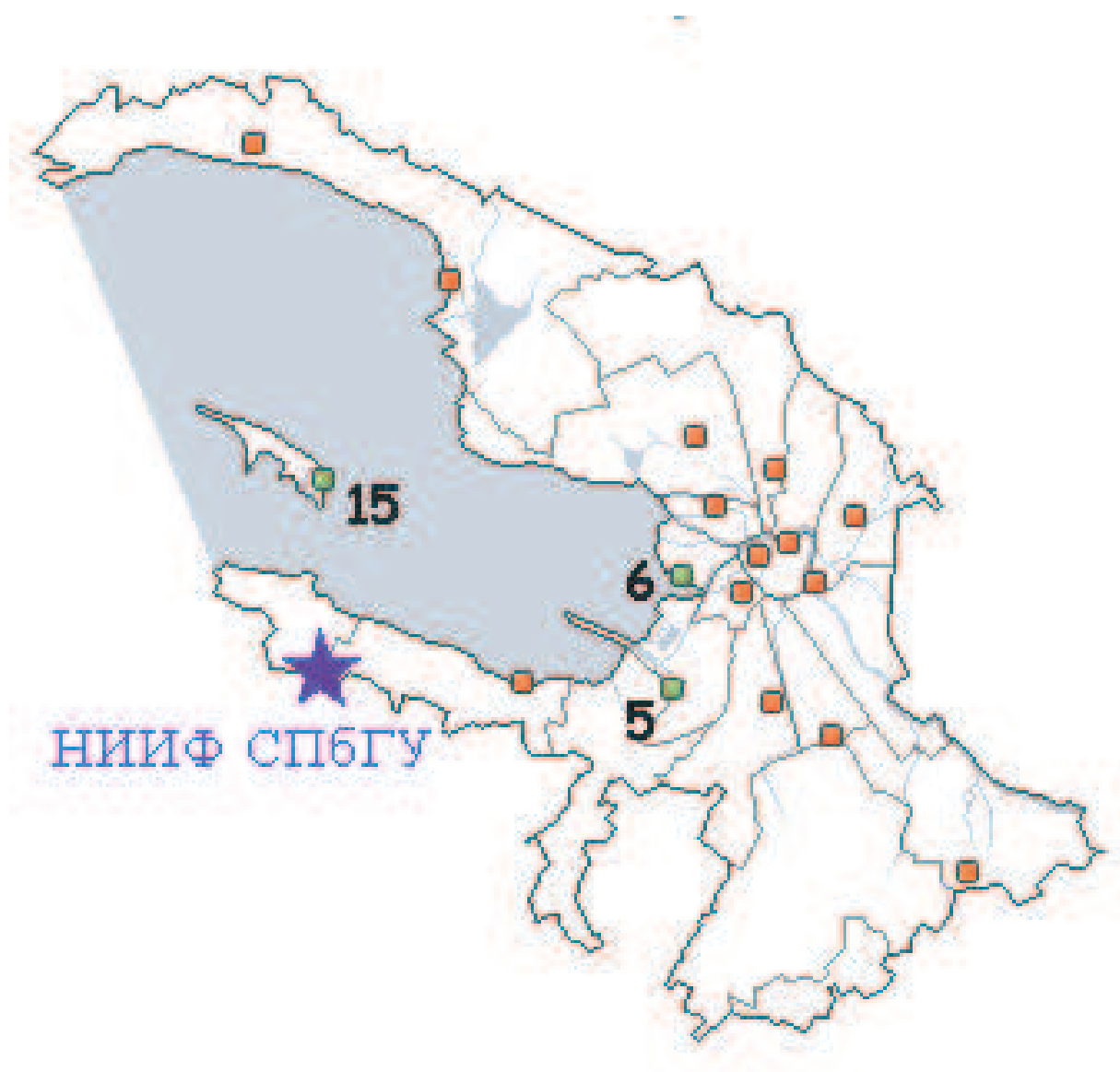


Рисунок 2.1.2 Расположение наземной спектроскопической аппаратуры НИИФ СПбГУ (Петродворец) и станций автоматической системы мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга. Номерами на карте отмечены станции №5, 6 и 15 (использован материал интернет-сайта Правительства Санкт-Петербурга, www.gov.spb.ru)

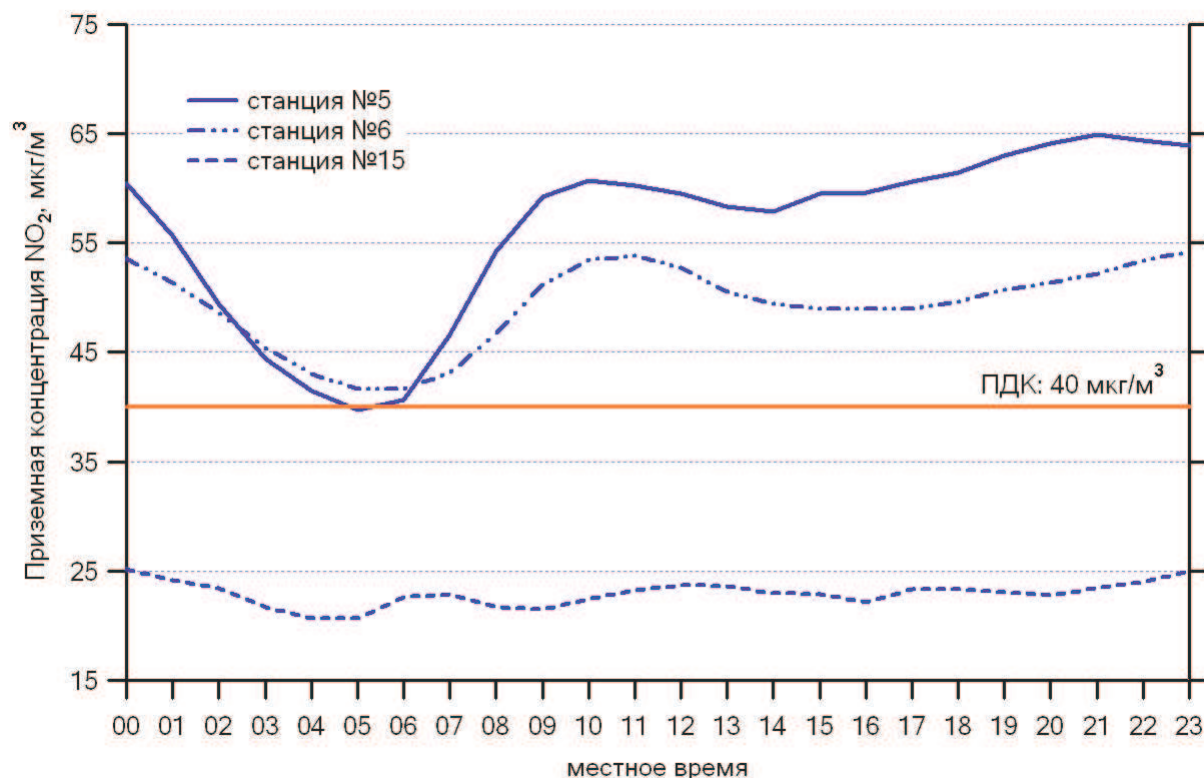
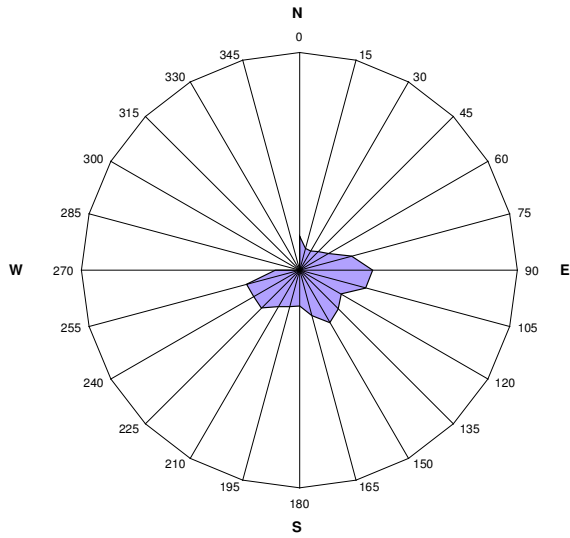
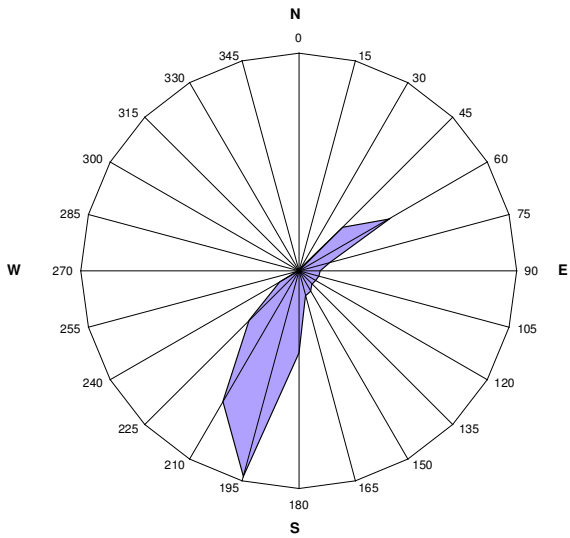


Рисунок 2.1.3

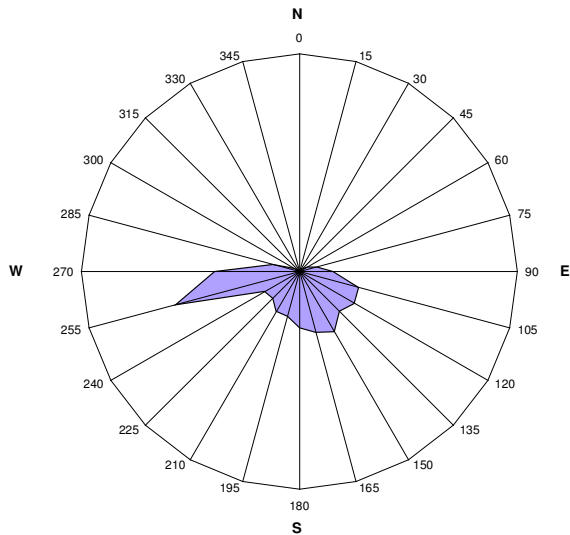
Суточный цикл приземных концентраций NO_2 в Санкт-Петербурге по данным измерений "Автоматической системы мониторинга атмосферного воздуха" на трех станциях (№5, 6 и 15) в 2004-2007 гг.. Красная линия обозначает уровень среднесуточной ПДК двуокиси азота в воздухе населенных мест (40 мкг/м^3).



а)



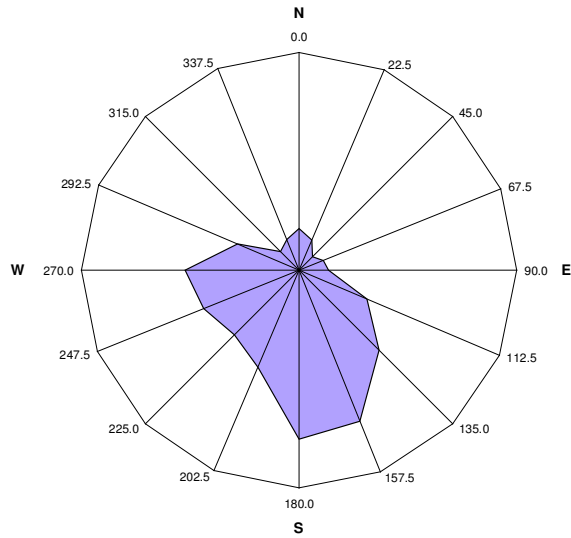
б)



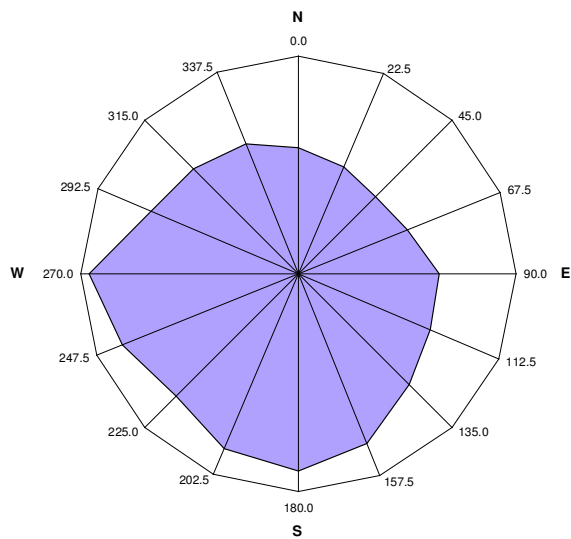
в)

Рисунок 2.1.4

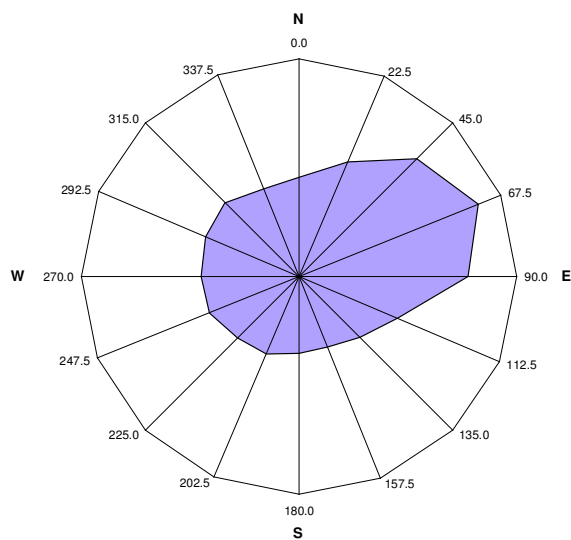
Распределение повторяемости ветра (0-20%) по направлениям (0-360°), на основе данных данных ежечасных измерений "Автоматической системы мониторинга атмосферного воздуха" на станциях №5 (а), №6 (б) и №15 (в) в 2005-2007 гг.



а)



б)



в)

Рисунок 2.1.5

Распределение повторяемости (а, 0-18%) и скорости ветра (б, 0-5 м/с), а также тропосферного содержания NO_2 (в, 0-10 10^{15} мол/см²) по направлениям (0-360°), на основе данных наблюдений в районе Петродворца (Санкт-Петербург) в 2007-2008 гг.

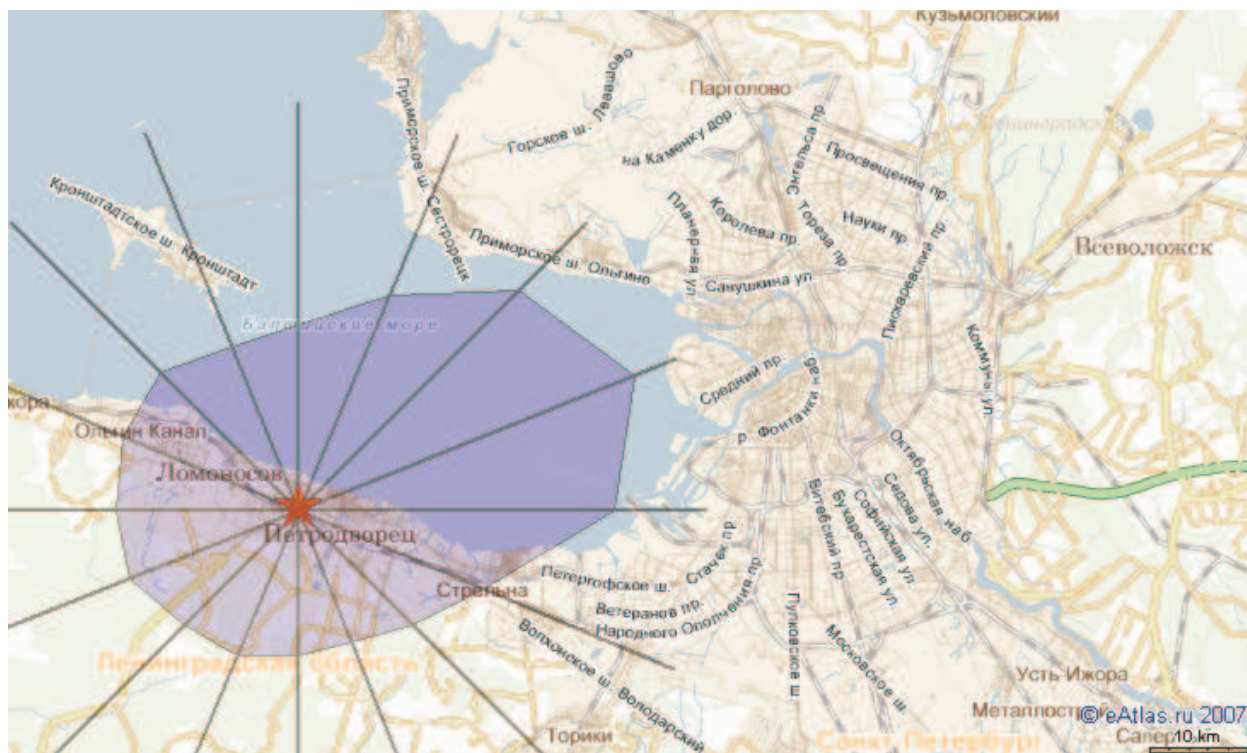


Рисунок 2.1.6 Распределение тропосферного содержания NO_2 по направлениям ветра ($0\text{-}360^\circ$), на основе данных наблюдений в районе Петродворца (Санкт-Петербург) в 2007-2008 гг.

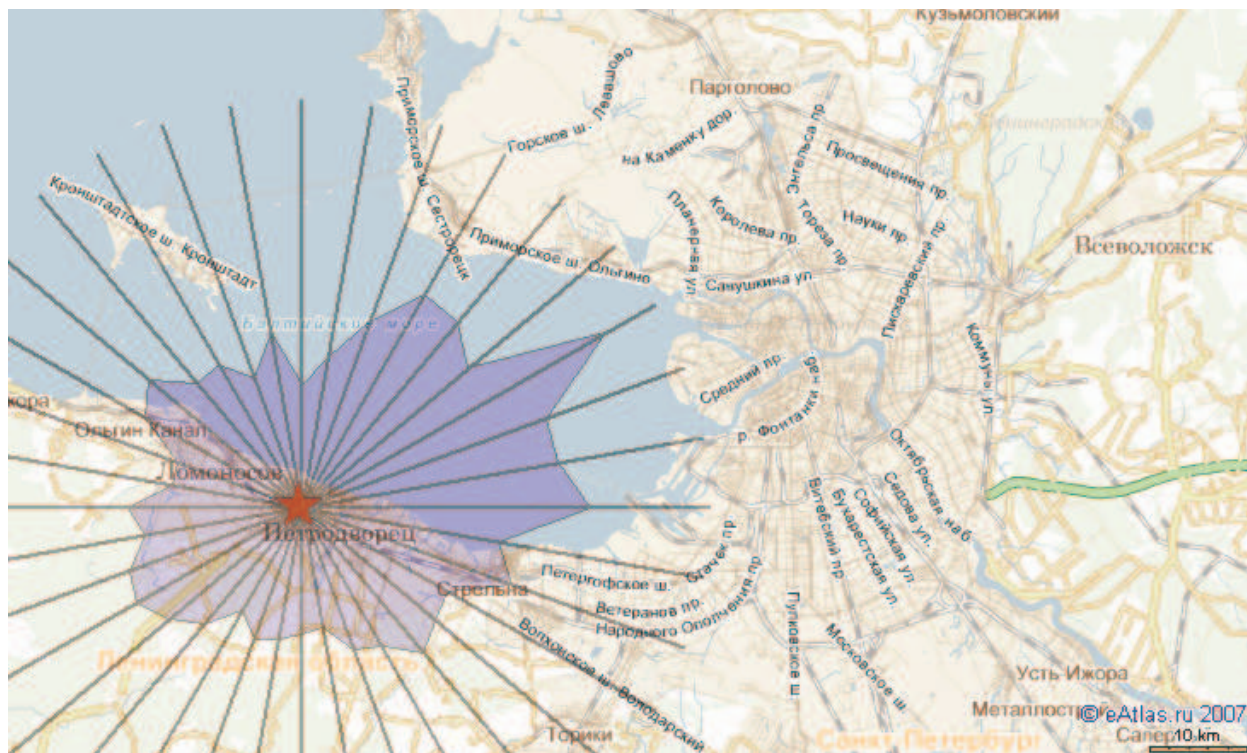


Рисунок 2.1.7 То же, что и на рис. 2.1.6, но с использованием метеоданных Информационного центра погоды "Санкт-Петербург" (РОСГИДРОМЕТ, ул. Профессора Попова д.48) в 2007-2008 гг.

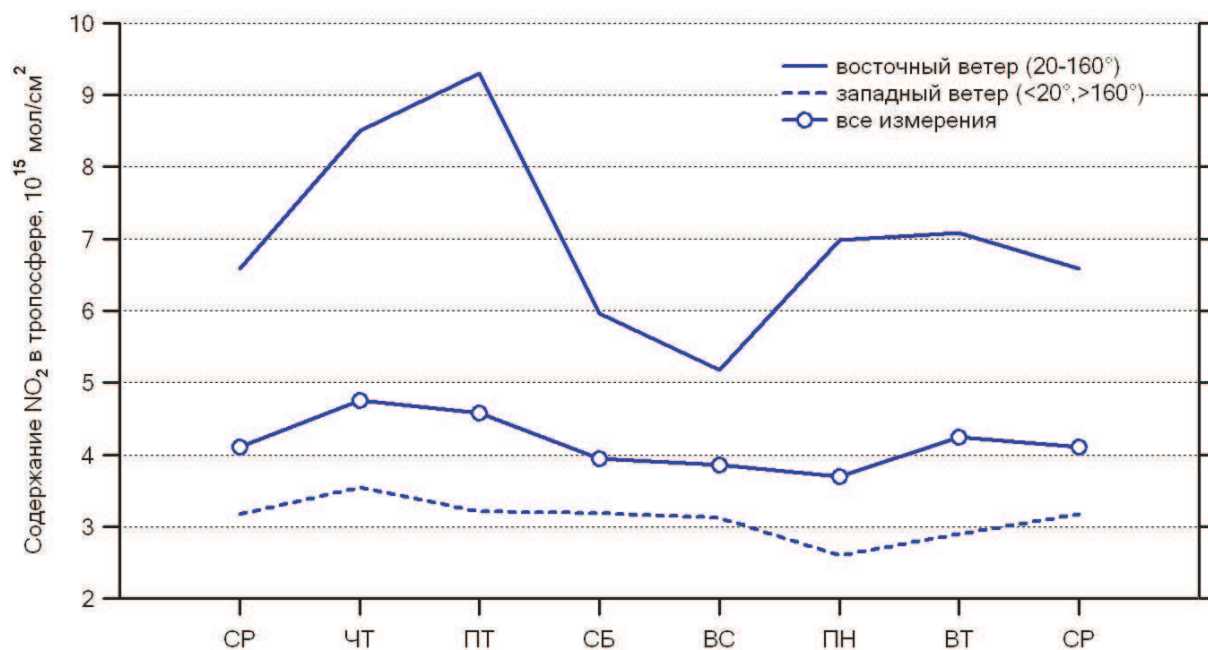


Рисунок 2.1.8 Недельный цикл тропосферного содержания NO_2 в районе Санкт-Петербурга по данным дистанционных наземных измерений (НИИФ СПбГУ, 10:00-14:00) в 2004-2008 гг., с учетом направления ветра (данные РОСГИДРОМЕТ на 12:00 местного времени)

2.2 Сопоставление данных одновременных спутниковых и наземных измерений содержания NO_2 в атмосфере Санкт-Петербурга

Результаты измерений содержания NO_2 в стратосфере, полученные НИИФ СПбГУ (Петродворец), неоднократно сравнивались с данными различных спутниковых наблюдений – GOME, SCIAMACHY, OMI [6, 12-14]. Пример такого сравнения с данными измерений аппаратуры SCIAMACHY в 2004-2008 гг., приведен на рисунке 2.2.1. Результаты спутниковых и наземных измерений демонстрируют относительно хорошее согласие – среднее и среднеквадратичное отклонения составляют 6% и 35%, соответственно; коэффициент корреляции – 0.80. Однако, для оценки загрязненности атмосферного воздуха необходимы данные дистанционных измерений в тропосфере, качество которых существенно хуже.

Прямое сопоставление результатов всех дневных наземных измерений НИИФ СПбГУ (Петродворец) с данными спутниковых измерений тропосферного NO_2 в районе Санкт-Петербурга (аппаратура OMI) представлено на рисунке 2.2.2. В целом, согласие между данными спутниковых и наземных измерений плохое – среднее расхождение и коэффициент корреляции составляют 108% и 0.22, 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. Чтобы проверить влияние отмеченных факторов, нами были отобраны данные измерений в периоды ясной погоды и относительного безветрия – бальность облачности равна 0, скорость ветра меньше 1 м/с (по данным РОСГИДРОМЕТ на 12:00 местного времени). Результат сопоставления для отобранных таким образом данных также представлен на рисунке 2.2.2. К сожалению, количество сравниваемых пар измерений при этом существенно сокращается. Однако согласие между данными спутниковых и наземных измерений для этой выборки оказывается несколько лучше, чем для всего ансамбля – коэффициент корреляции составляет теперь 0.44. Вместе с тем, данные спутниковых измерений над Санкт-Петербургом систематически превышают результаты наземных измерений в Петродворце – в среднем на 246%.

В целом, во всем массиве сравниваемых спутниковых и наземных измерений можно выделить периоды как хорошей корреляции данных, так и ситуации их взаимной несогласованности. Далеко не всегда регистрируемые вариации приземного содержания NO_2 согласуются с данными дистанционного наземного и спутникового зондирования. Более того, зачастую вариации приземных концентраций NO_2 , одновременно регистрируемые рассматриваемыми станциями (№5, 6 и 15), существенно некоррелированы, что указывает на большую пространственную неоднородность поля приземного NO_2 . Так коэффициент корреляции между данными приземных измерений разных станций не превышает 0.50. Максимальное значение достигается при сопоставлении результатов одновременных измерений на станциях №6 и 15. Следует отметить при этом, что в отличие от приземных измерений системы автоматического мониторинга, носящих локальный характер, данные спутниковых и наземных дистанционных измерений несут в себе интегральную

характеристику загрязнения нижнего слоя атмосферы значительной пространственной протяженности (как вертикальной, так и горизонтальной) – несколько километров.

Несколько примеров сопоставления данных дистанционных (наземных, спутниковых) и прямых приземных измерений содержания NO_2 в атмосфере Санкт-Петербурга, демонстрирующих относительную согласованность сравниваемых между собой данных, представлены на рисунках 2.2.3-6. Каждый рисунок содержит ряд среднесуточных концентраций (станции №5, 6 и 15) и общего содержания в тропосфере по данным наземных (КСВУ) и спутниковых измерений (ОМІ), для коротких периодов (несколько дней) относительно высоких содержаний. Кроме того, на рисунке приведены: суточный ход приземной концентрации NO_2 и дневной ход тропосферного NO_2 (КСВУ), а также рассчитанное поле распространения городского загрязнения (модель HYSPLIT) в день локального максимума содержания NO_2 . Для расчета полей распространения антропогенных примесей 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 [15]. Все расчеты выполнялись с помощью интернет-версии HYSPLIT, доступной по адресу <http://www.ready.noaa.gov/ready/hysplit4.html>. Эмиссия примеси была задана постоянно действующим точечным источником, расположенным в центральной части города (т.н. "стрелка Васильевского острова", $30^\circ 19.8'$ в.д., $59^\circ 55.8'$ с.ш.). Расчетное время – 10:00 UT (+3/4 часа = московское), моделирование выполнялось в течение предшествующих 24 часов с шагом осреднения 3 часа. Источник загрязнения был локализован в вертикальном слое 0-30

метров от поверхности, при вертикальном перемешивании примеси в слое 0-500 метров. Как видно из рисунков, для всех представленных дат (16.03.06, 26.04.06, 06.05.06 и 04.07.07) характерны резкие вариации приземных концентраций NO_2 , значительно превышающих уровень среднесуточной ПДК=40 мкг/м^3 (до 300 мкг/м^3), отличающиеся от типичных суточных вариаций (25-65 мкг/м^3 , см. рисунок 2.1.3). Данные наземных спектроскопических измерений НИИФ СПбГУ также демонстрируют резкий рост тропосферного содержания NO_2 , в дневное время (до $50 \cdot 10^{15}$ мол/см^2). Поскольку все три рассматриваемые станции приземных измерений, а также станция дистанционного зондирования НИИФ СПбГУ находятся к западу от центра Санкт-Петербурга (см. рисунок 2.1.2), согласие между данными этих измерений может быть достигнуто только в условиях интенсивного восточного переноса загрязненных воздушных масс. Карты пространственного распределения примеси, построенные по результатам моделирования HYSPLIT, подтверждают это предположение – в каждый из рассмотренных дней станции наблюдений находились в шлейфе городского загрязнения (см. рисунки 2.2.3-6д).

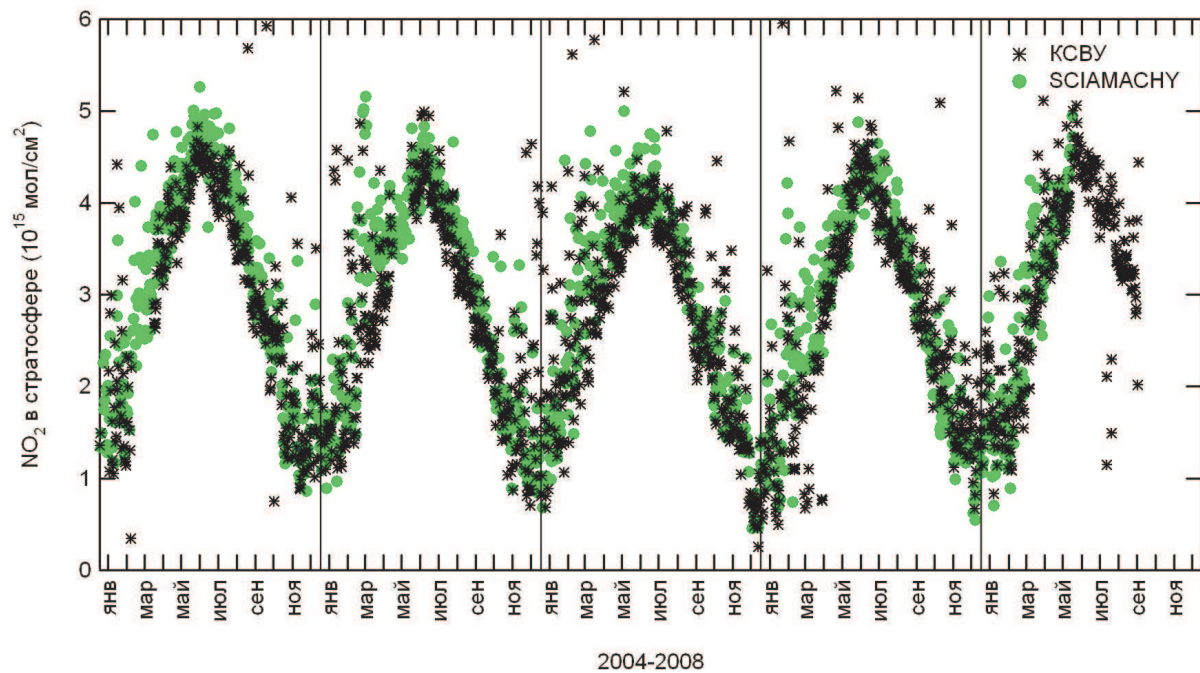


Рисунок 2.2.1 Сопоставление данных сумеречных наземных (“КСВУ”) и дневных спутниковых (“SCIAMACHY”) измерений содержания NO_2 в стратосфере, выполненных в районе Санкт-Петербурга в 2004-2008 гг.

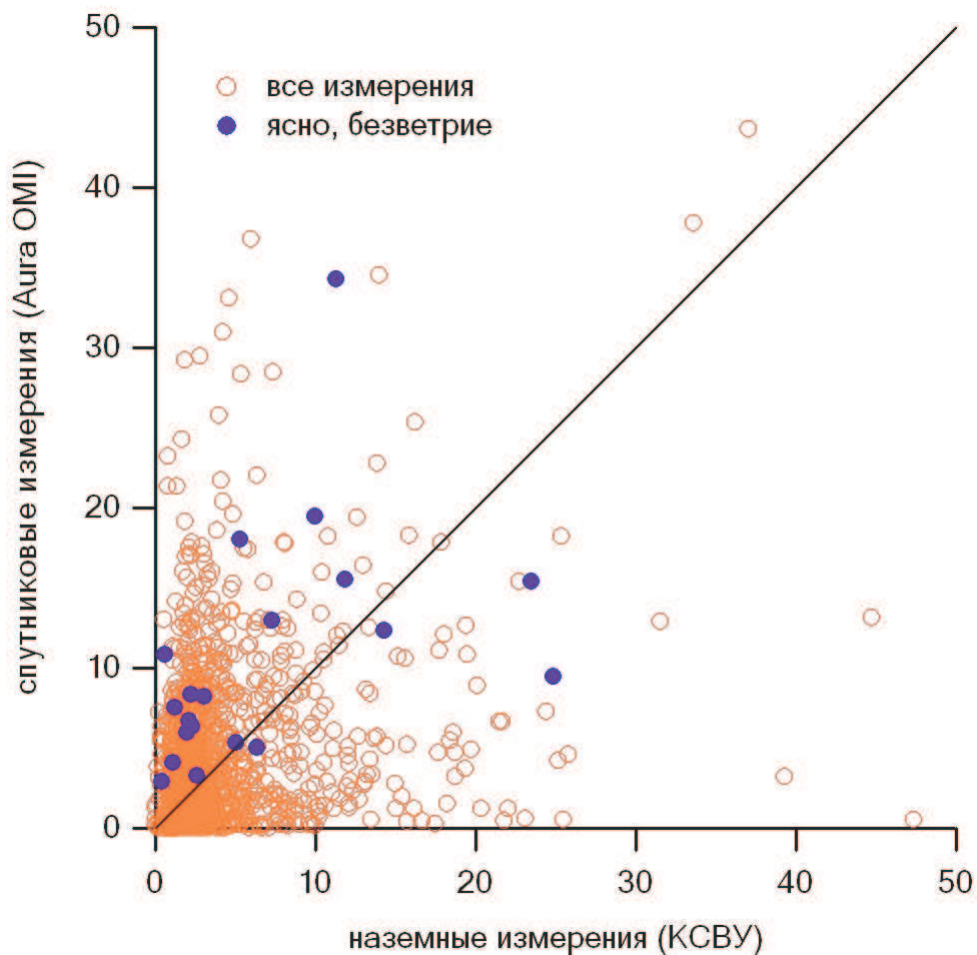
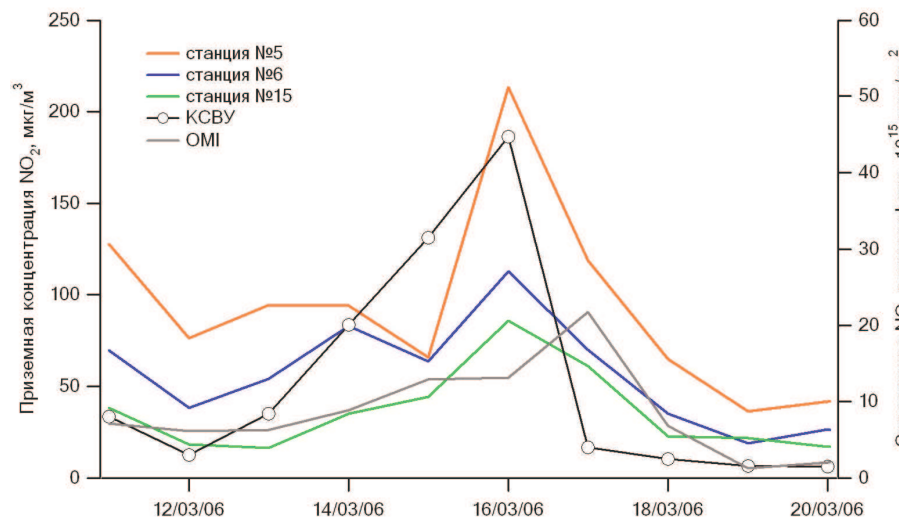
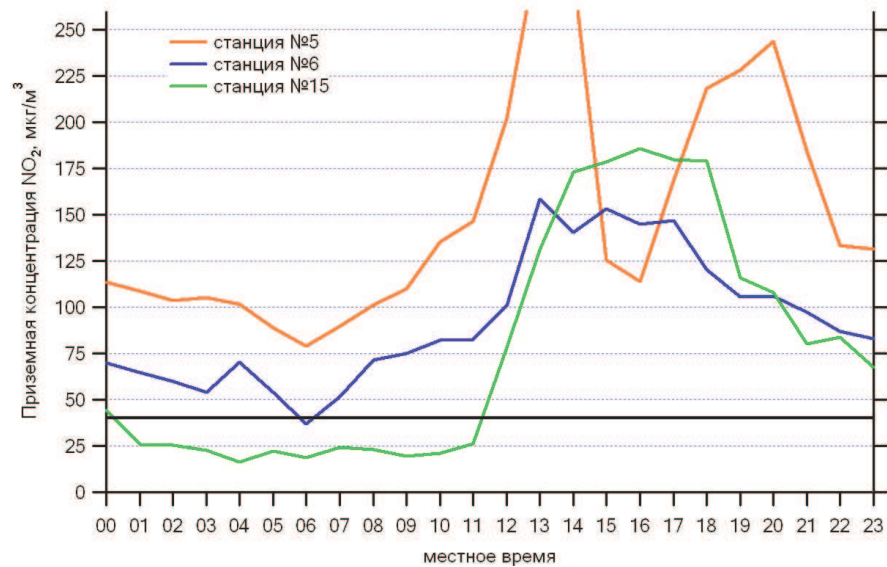


Рисунок 2.2.2

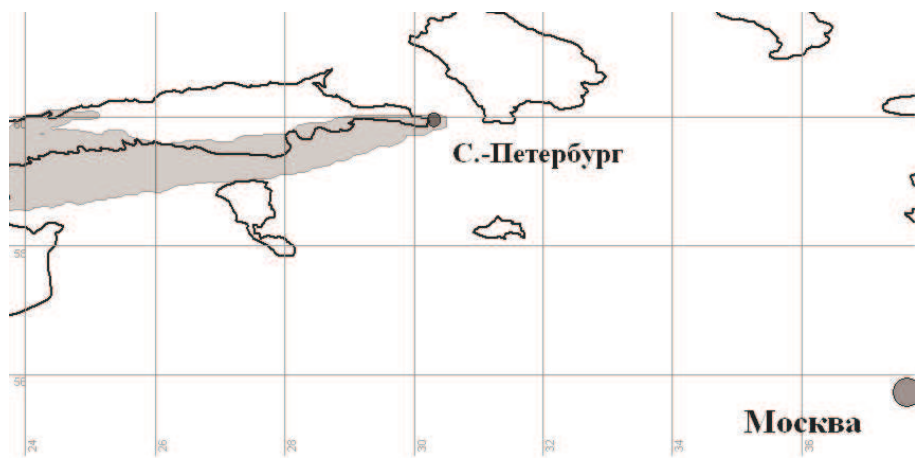
Сопоставление данных дневных (10:00-14:00) наземных ("КСВУ") и спутниковых ("ОМІ") измерений содержания NO_2 в тропосфере, выполненных в районе Санкт-Петербурга в 2004-2008 гг.



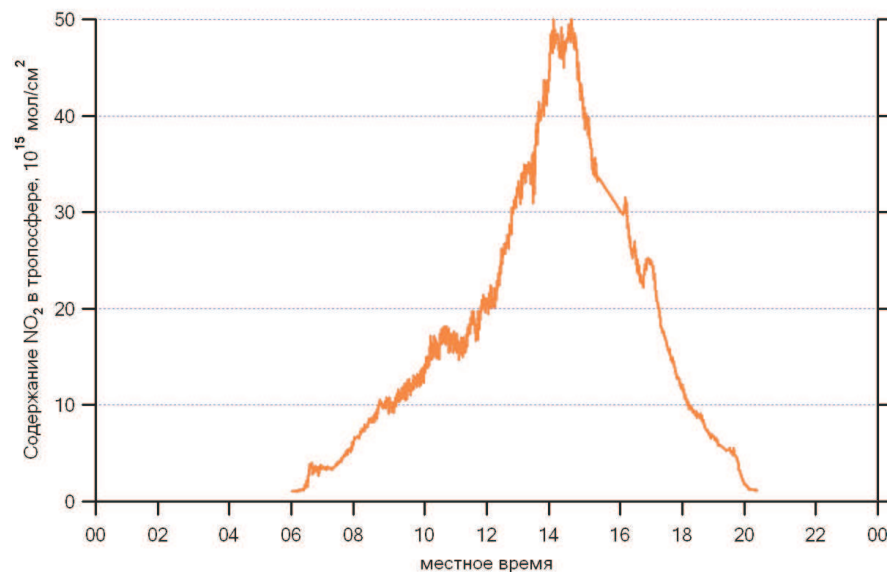
а)



б)



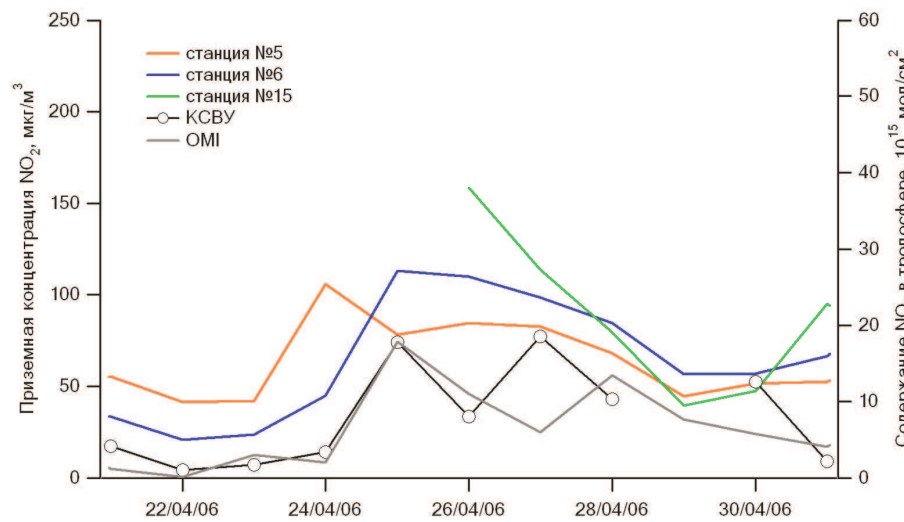
д)



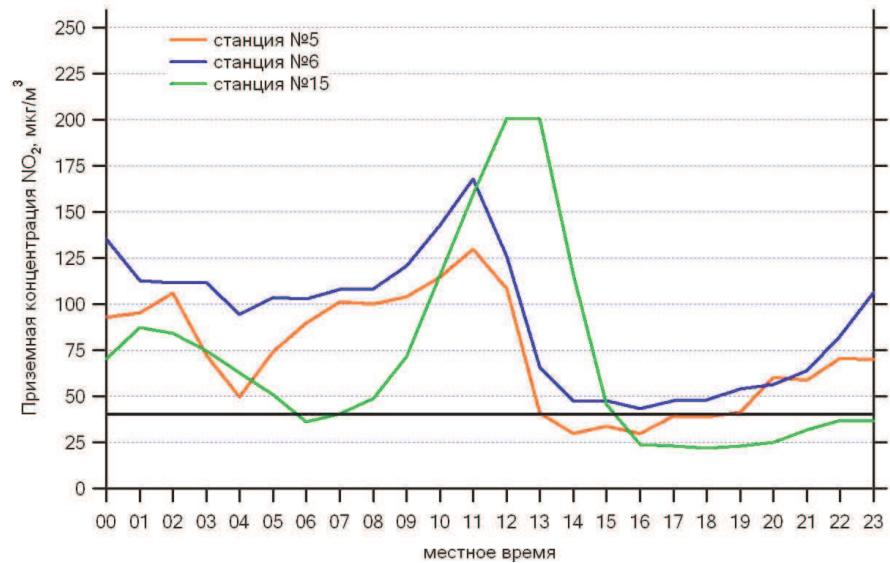
г)

Рисунок 2.2.3

Пример сопоставления данных дистанционных (наземных, спутниковых) и прямых приземных измерений содержания NO_2 в атмосфере Санкт-Петербурга 16.03.06: а) средние концентрации (станции №5, 6 и 15) и общее содержание в тропосфере по данным наземных (КСВУ) и спутниковых измерений (ОМІ); б) суточный ход приземной концентрации; г) дневной ход тропосферного NO_2 (КСВУ); д) поле распространения загрязнения (модель HYSPLIT)



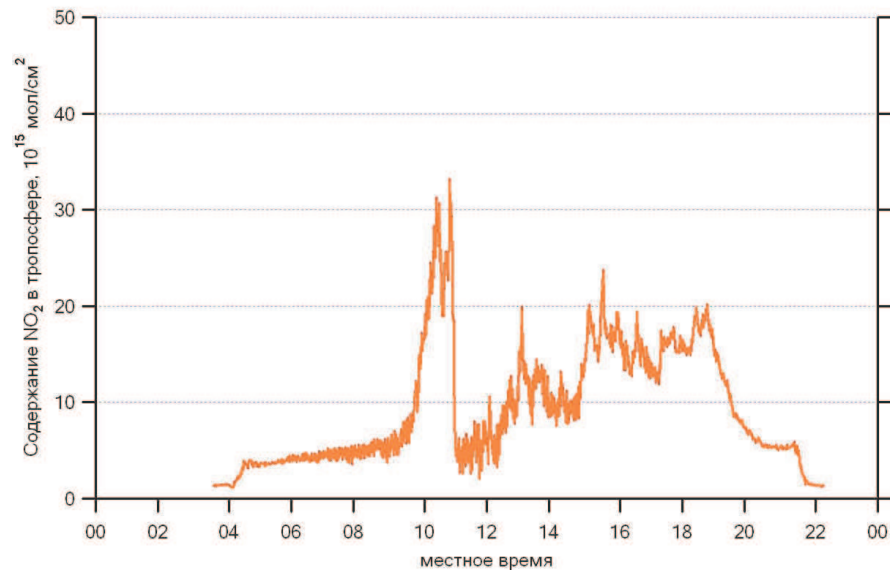
а)



б)



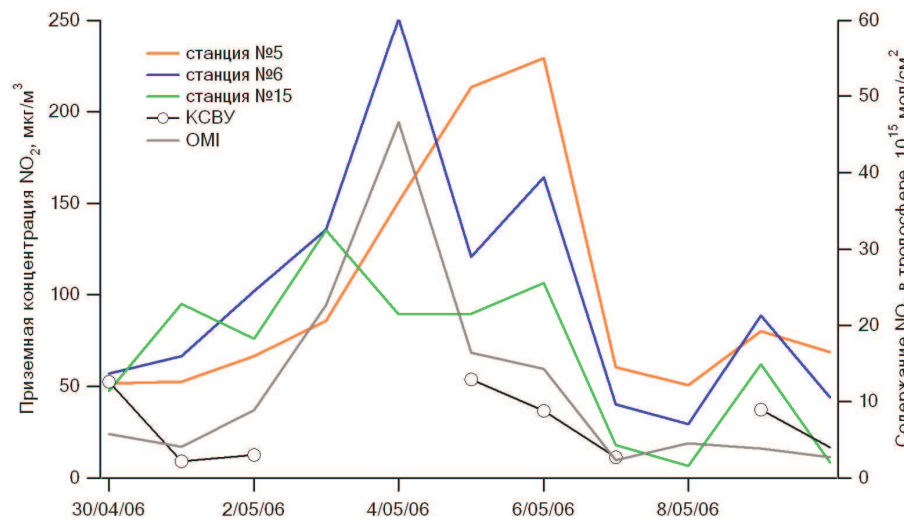
д)



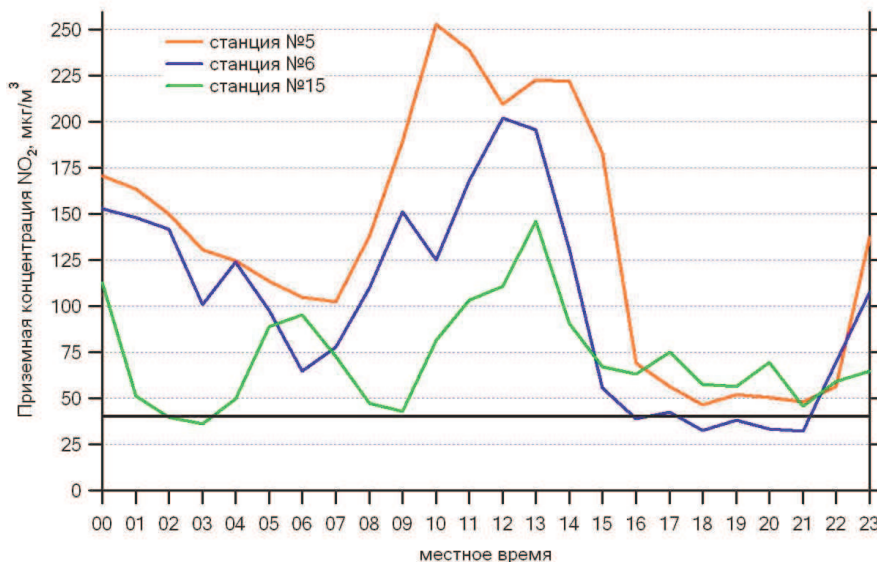
г)

Рисунок 2.2.4

Пример сопоставления данных дистанционных (наземных, спутниковых) и прямых приземных измерений содержания NO_2 в атмосфере Санкт-Петербурга 26.04.06: а) средние концентрации (станции №5, 6 и 15) и общее содержание в тропосфере по данным наземных (КСВУ) и спутниковых измерений (ОМІ); б) суточный ход приземной концентрации; г) дневной ход тропосферного NO_2 (КСВУ); д) поле распространения загрязнения (модель HYSPLIT)



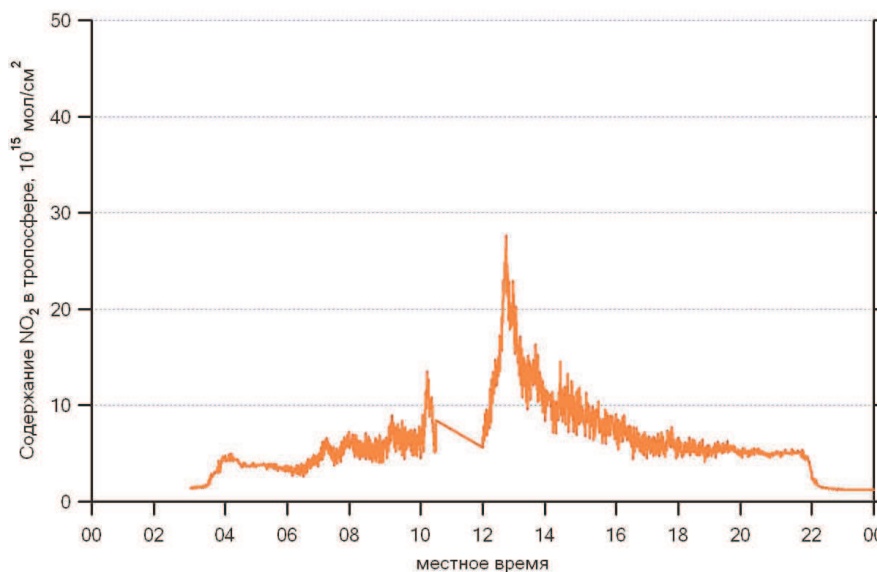
а)



б)



д)



г)

Рисунок 2.2.5

Пример сопоставления данных дистанционных (наземных, спутниковых) и прямых приземных измерений содержания NO_2 в атмосфере Санкт-Петербурга 06.05.06: а) средние концентрации (станции №5, 6 и 15) и общее содержание в тропосфере по данным наземных (КСВУ) и спутниковых измерений (ОМІ); б) суточный ход приземной концентрации; г) дневной ход тропосферного NO_2 (КСВУ); д) поле распространения загрязнения (модель HYSPLIT)

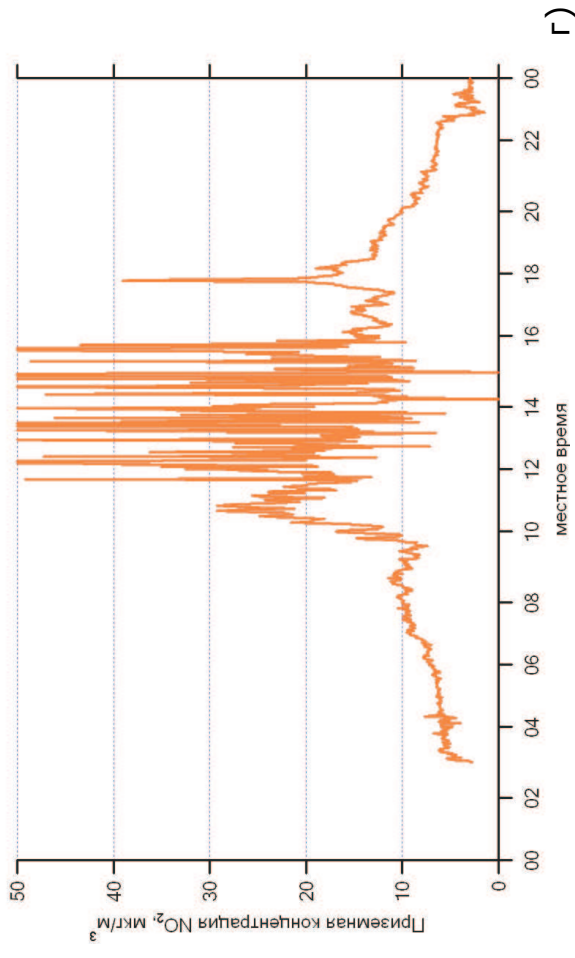
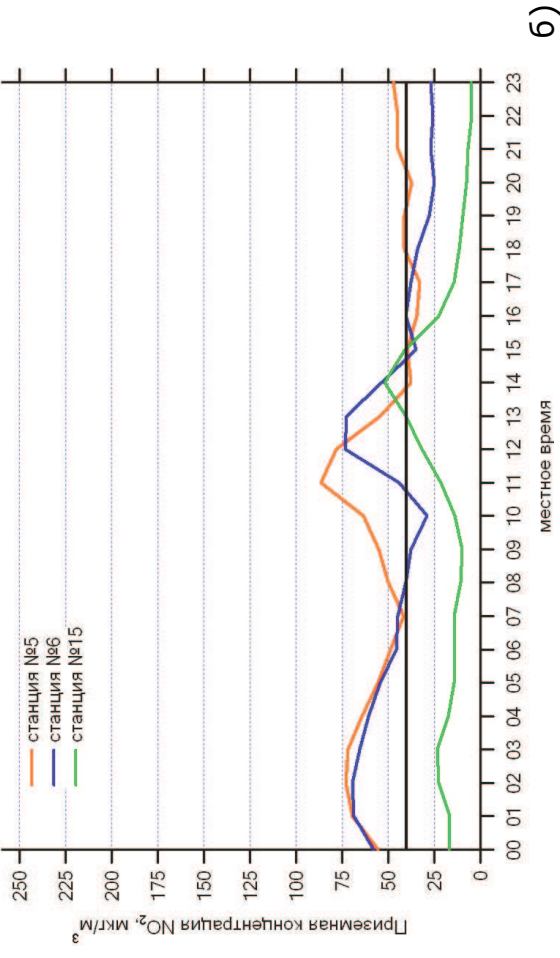
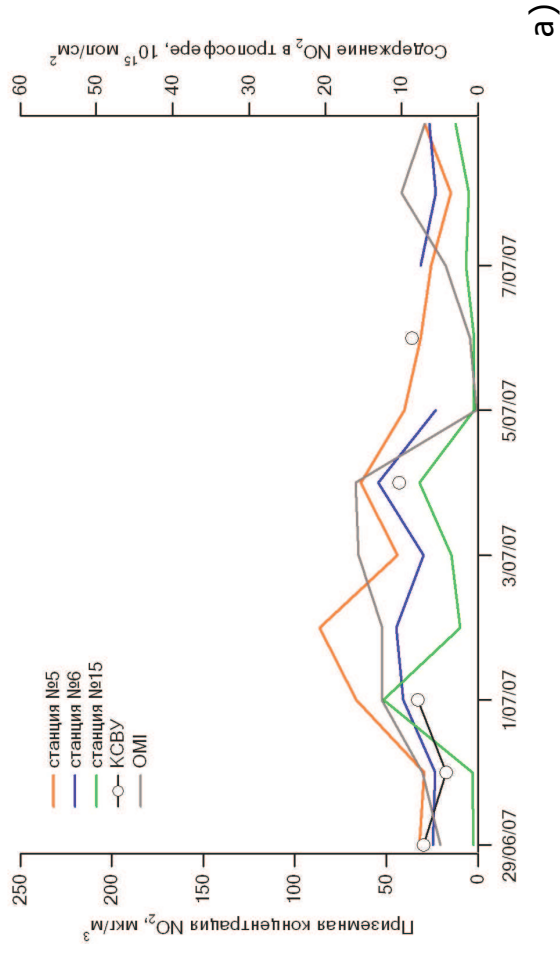


Рисунок 2.2.6

Пример сопоставления данных дистанционных (наземных, спутниковых) и прямых приземных измерений содержания NO_2 в атмосфере Санкт-Петербурга 04.07.07: а) средненедельные концентрации (станции №5, 6 и 15) и общее содержание в тропосфере по данным наземных (КСВУ) и спутниковых измерений (ОМІ); б) суточный ход приземной концентрации; г) дневной ход тропосферного NO_2 (КСВУ); д) поле распространения загрязнения (модель HYSPLIT)

3. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ТРОПОСФЕРНОГО NO₂ В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ – АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И ОЦЕНКА ВРЕМЕННОГО ТРЕНДА ДЛЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Оценки регионального пространственного распределения тропосферного содержания NO₂ были ранее получены нами на основе анализа многолетних данных GOME об ОС NO₂ [6, 12, 16-17]. Помимо многолетнего ансамбля данных спутниковых измерений аппаратурой GOME, накоплен уже достаточный объем измерений аналогичным прибором SCIAMACHY, позволяющим картировать поле ОС NO₂ с более высоким, по сравнению с GOME, пространственным разрешением. Кроме того, специальные алгоритмы интерпретации оперативных данных SCIAMACHY, разработанные в ряде европейских научных групп, позволяют также извлекать информацию о содержании NO₂ отдельно в тропосфере. Еще более высоким пространственным разрешением и периодичностью характеризуются данные измерений спутниковой аппаратуры OMI, доступные начиная с осени 2004 года. Карта среднегодового распределения тропосферного NO₂, построенная по данным среднемесячного картирования в период с октября 2004 по сентябрь 2008 года, представлена на рисунке 3.1 (данные получены по результатам интерпретации измерений OMI в Королевском Национальном Институте Нидерландов, www.temis.nl). Как и следовало ожидать, в распределении тропосферного NO₂ европейской части России из основных источников выделяются мегаполисы Москвы и Санкт-Петербурга. Более подробно, для Ленинградской области, эта карта представлена на рисунке 3.2. Кроме того, на рисунке 3.3 представлены результаты аналогичного картирования, выполненного по 4-м годовым периодам осреднения, с октября по сентябрь 2004-2005, 2005-2006, 2006-2007 и 2007-2008 гг., соответственно. Полученные карты не выявляют межгодовой изменчивости поля

пространственного распределения тропосферного NO_2 – зоны повышенного содержания в районе городов Москва и Санкт-Петербург от года к году достаточно стабильны, как по пространственной протяженности, так и по интенсивности загрязнения. Для выявления годовых вариаций тропосферного NO_2 были также построены сезонные карты, осредненные по периодам декабрь-февраль, март-май, июнь-август и сентябрь-ноябрь, за весь период измерений аппаратуры OMI (с октября 2004 по сентябрь 2008 г.). Результаты сезонного картирования приведены на рисунке 3.4. Согласно этим картам, наиболее низкий уровень загрязнения тропосферы в районе Санкт-Петербурга наблюдается летом, а наиболее высокий – зимой. При этом зимний период, по сравнению с другими сезонами, характеризуется большей пространственной изменчивостью поля тропосферного NO_2 в районе картирования. Следует отметить, что последнее может быть также связано с большей погрешностью спутниковых измерений в условиях низкого солнца в зимнее время.

Данные многолетних спутниковых измерений позволяют выявить сезонный ход в вариациях тропосферного содержания NO_2 в районах интенсивного антропогенного загрязнения. Очевидно, что в зимнее время выброс оксидов азота в атмосферу может существенно увеличиваться при интенсивном сжигании топлива в энергетических установках систем отопления. Кроме того, низкие температуры воздуха увеличивают время жизни NO_x в атмосфере, и в сочетании с более вероятными для этого времени года стабильными погодными условиями (температурные инверсии в приземном слое), способствуют накоплению загрязняющих веществ. На рисунке 3.5 представлен сезонный ход тропосферного содержания NO_2 в районе Санкт-Петербурга, построенный на основе соответствующих среднемесячных значений, рассчитанных за весь период измерений GOME в 1995-2008

гг. Оценка содержания NO_2 в тропосфере получена по упрощенной методике – для исключения стратосферного вклада использовалось минимальное для каждой широты среднемесячное значение ОС. Для сравнения на том же рисунке представлены результаты аналогичных расчетов для регионов Москвы и Парижа (Франция). Можно отметить относительно высокие содержания тропосферного NO_2 для всех трех мегаполисов в зимнее время. Самые низкие среднемесячные содержания наблюдаются в Санкт-Петербурге. Содержания NO_2 в районе российской и французской столиц находятся примерно на одном уровне в течение большей части года, за исключением конца зимы и начала весны, когда московские значения существенно превышают парижские, достигая максимума в феврале. Аналогичная сезонность наблюдается и в данных прямых измерений приземных концентраций NO_2 в Санкт-Петербурге, приведенных на том же рисунке.

Оценки линейного тренда содержания тропосферного NO_2 в районе Санкт-Петербурга, обусловленного ростом загрязнений, были получены ранее в работах [6, 12]. В настоящем исследовании мы расширили этот анализ на весь массив измерений GOME в 1995-2008 гг., используя данные последней версии обработки, 4.0. Методика определения тренда была модифицирована в соответствии с исследованием [18], посвященным анализу тренда тропосферного содержания NO_2 на территории Китая. Для аппроксимации временного ряда среднемесячных значений использовалась модельная функция, состоящая из линейного тренда и компоненты сезонной изменчивости:

$$Y_t = A + \frac{B}{12} X_t + C \sin(DX_t + E) + N_t \quad (1)$$

где Y_t – значение содержания NO_2 для месяца t , X_t – порядковый номер месяца с января 1995 г., N_t – остаток ряда (отклонение от аппроксимации), A – начальное значение ряда, B – годовой тренд, а коэффициенты C , D и E – амплитуда, частота и фазовый сдвиг компоненты сезонного хода. Погрешность определения годового тренда, в соответствии с [19], определяется по формуле:

$$\sigma_B \approx \left[\frac{\sigma_N}{n^{3/2}} \sqrt{\frac{1+|\phi|}{1-|\phi|}} \right] \quad (2)$$

где n – длина ряда в годах, σ_N – вариация остатка ряда N_t , а ϕ – автокорреляция N_t , рассчитанная для модели стационарного процесса:

$$N_t = \phi N_{t-1} + \varepsilon_t \quad (3)$$

где ε_t – белый шум остатка ряда N_t . По результатам анализа N_t значение автокорреляции ϕ было принято равным 0.1.

Временной ряд среднемесячных значений спутниковых измерений GOME в районе Санкт-Петербурга, с аппроксимирующей его функцией и компонентой линейного тренда, представлен на рисунке 3.6. Оценка величины тренда ($B \pm \sigma_B$) в пересчете на средний рост за 10 лет составляет $(+7 \pm 7)\%$. Следует отметить, что согласно общепринятому критерию, величина тренда считается статистически значимой при выполнении условия $|B/\sigma_B| > 2$ (см. например [19]). Полученная здесь оценка не удовлетворяет этому условию, хотя и указывает на

тенденцию в долговременном изменении содержания тропосферного
NO₂.

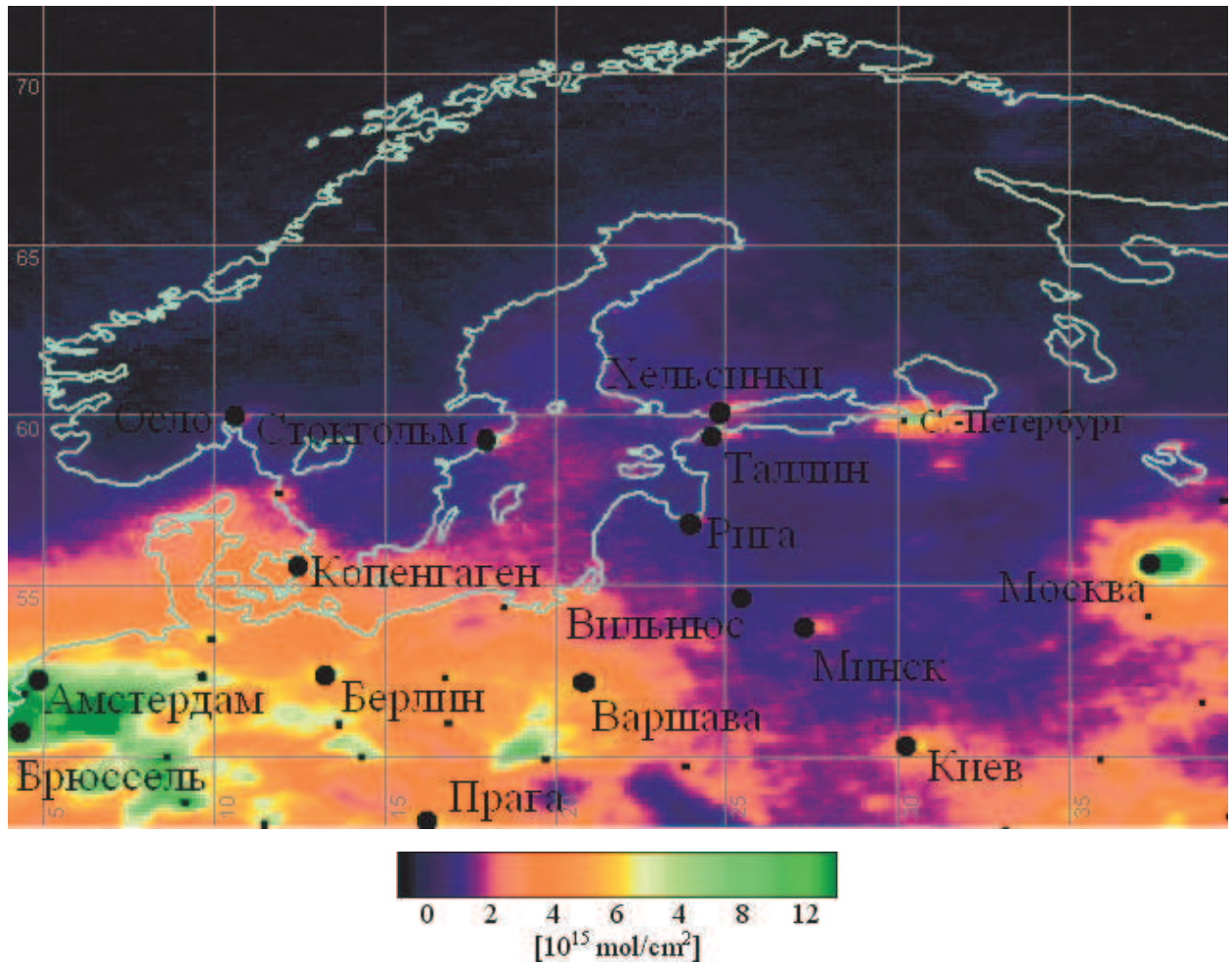


Рисунок 3.1

Среднегодовое распределение тропосферного содержания NO₂ Балтийском регионе по данным спутниковых измерений AURA OMI в 2004-2008 гг. (www.temis.nl)

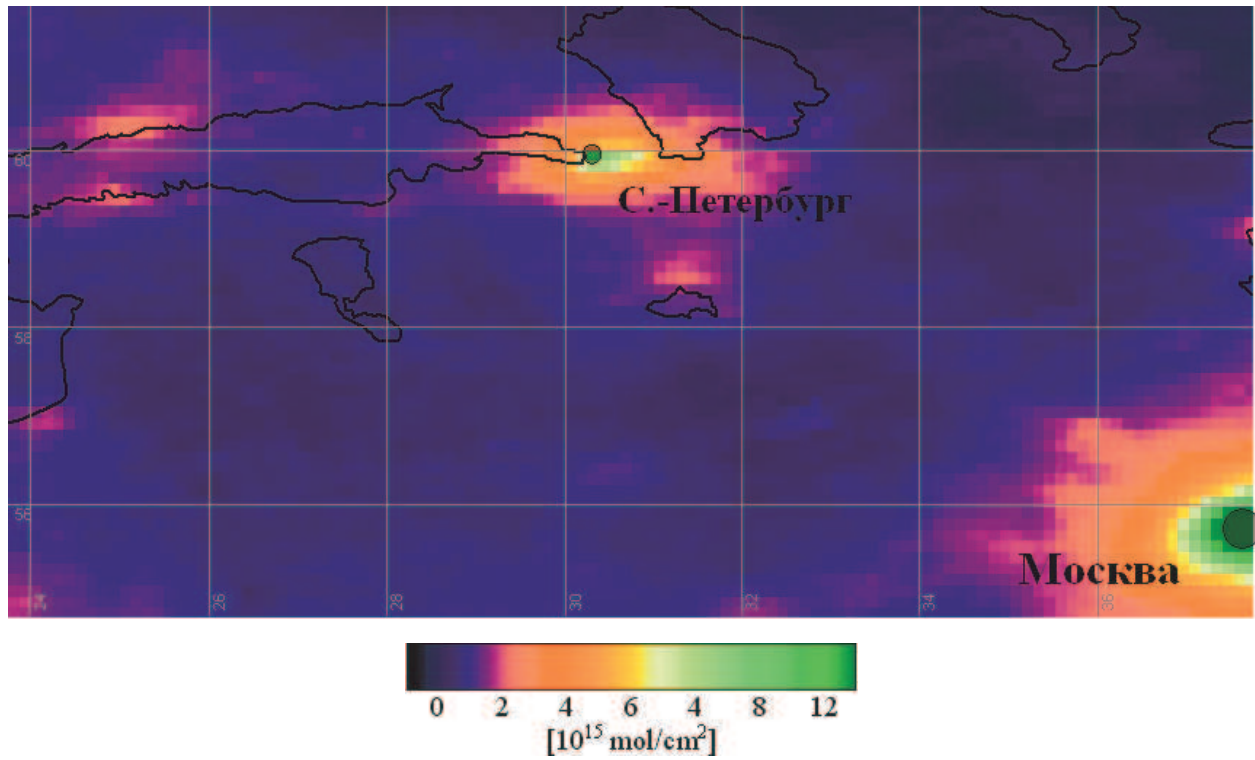


Рисунок 3.2

Среднегодовое распределение тропосферного содержания NO₂ в центральной части России и Ленинградской области, по данным спутниковых измерений AURA OMI в 2004-2008 гг. (www.temis.nl)

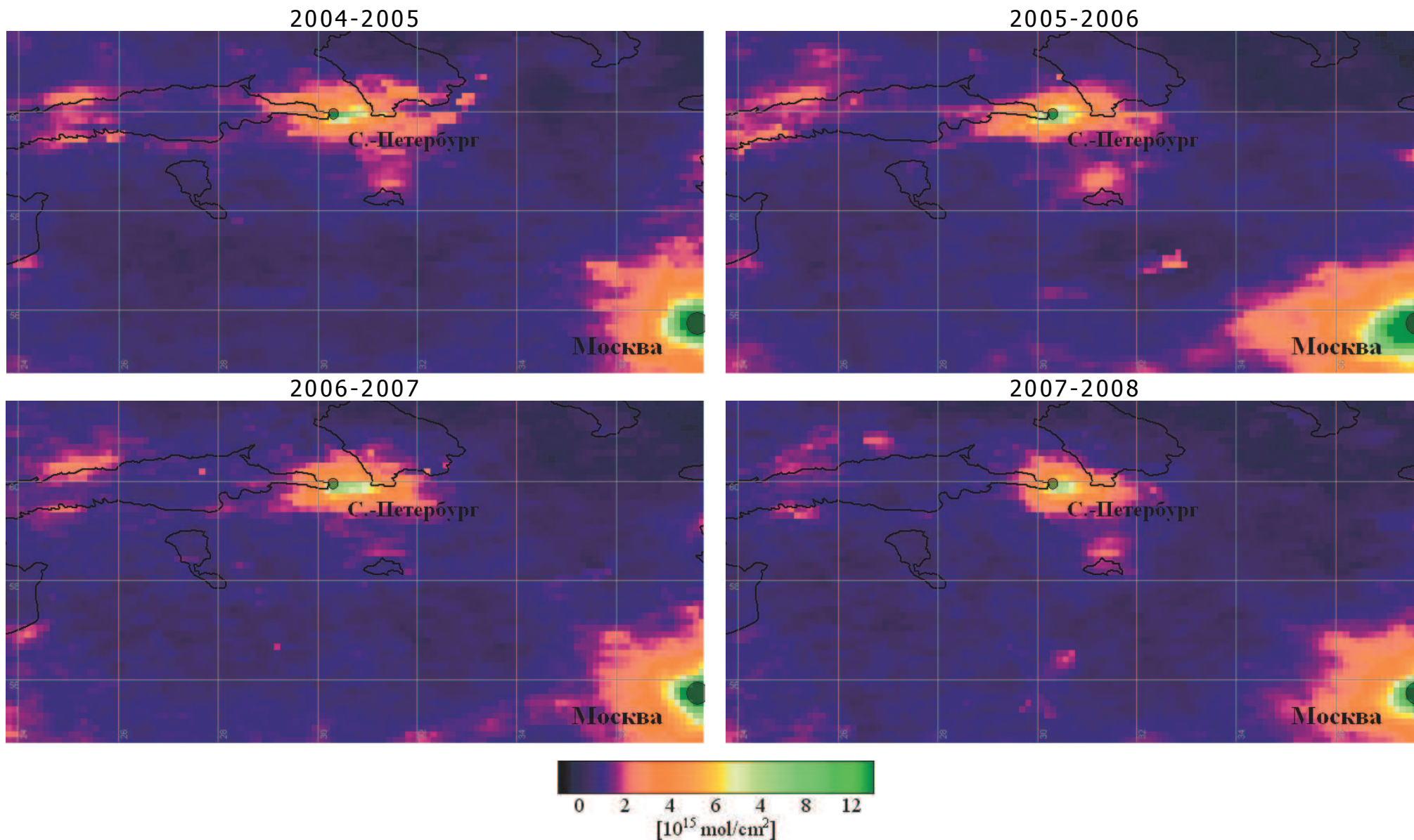


Рисунок 3.3

Среднегодовые распределения тропосферного содержания NO₂ в центральной части России и Ленинградской области, по данным спутниковых измерений AURA OMI в 2004-2008 гг. (www.temis.nl)

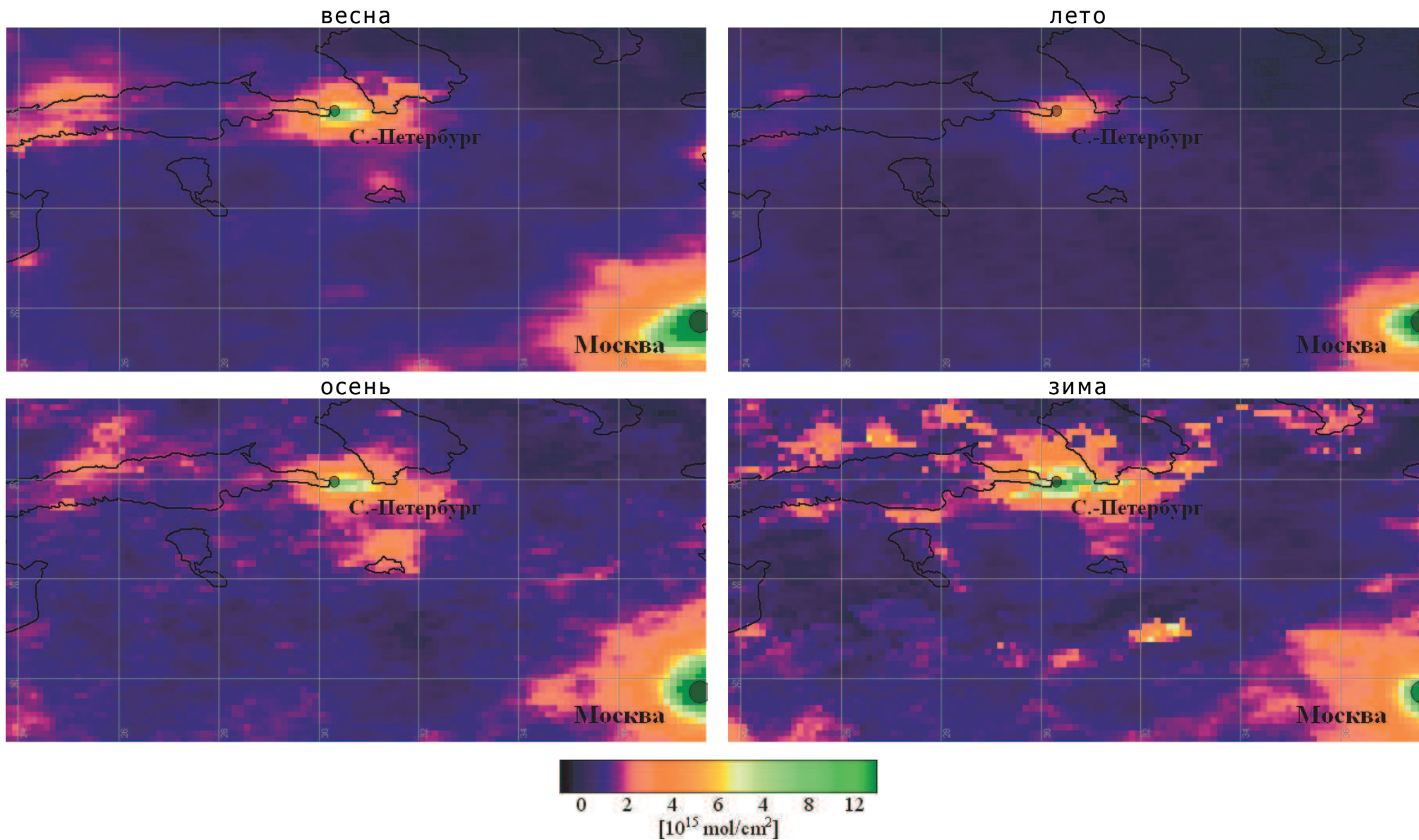


Рисунок 3.4

Сезонные распределения тропосферного содержания NO₂ в центральной части России и Ленинградской области, по данным спутниковых измерений AURA OMI в 2004-2008 гг. (www.temis.nl)

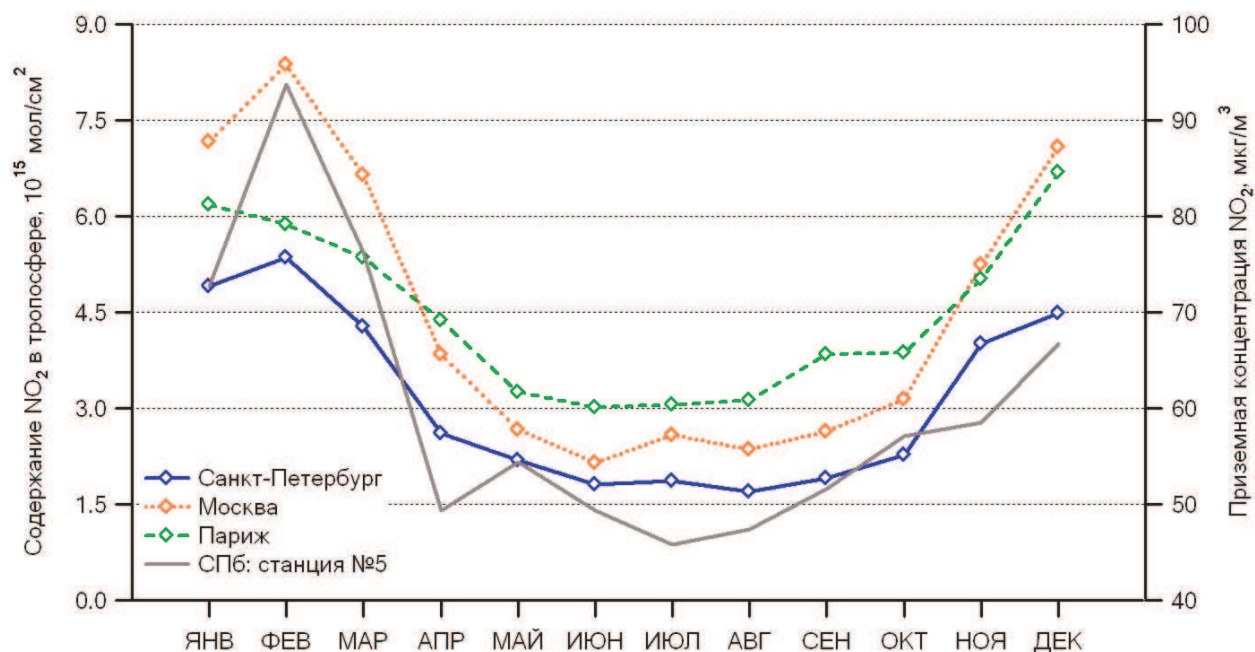


Рисунок 3.5

Сезонный ход тропосферного содержания NO_2 для регионов Санкт-Петербурга, Москвы и Парижа по данным спутниковых измерений GOME (GDP4.0) в 1995-2008 гг., и прямых измерений приземных концентраций NO_2 в Санкт-Петербурге в 2005-2007 гг. (станция №5)

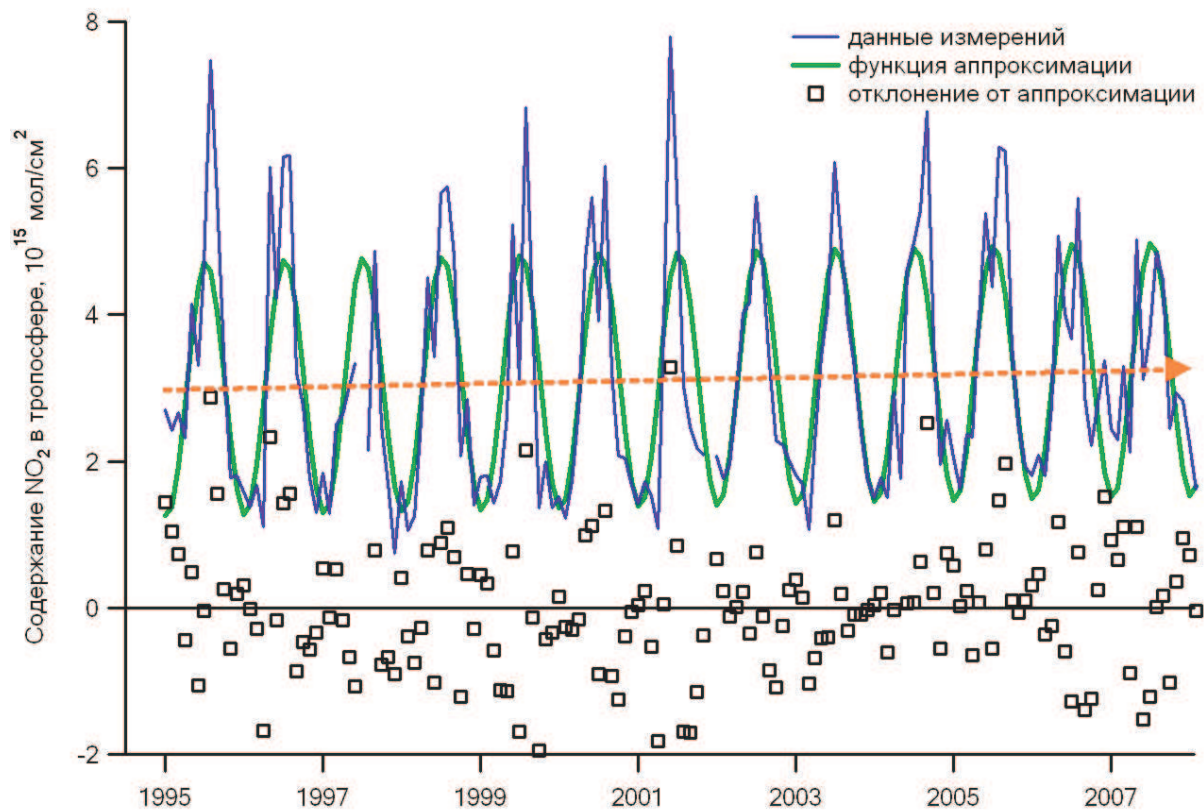


Рисунок 3.6 Оценка линейного тренда тропосферного содержания NO₂ для Санкт-Петербурга по данным спутниковых измерений GOME (GDP4.0) в 1995-2008 гг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках представленной научно-исследовательской работы проинтерпретированы данные наземных наблюдений за содержанием NO_2 в атмосфере на основе измерений рассеянного в зенит видимого солнечного излучения в Санкт-Петербурге в 2004-2008 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 общего содержания (преимущественно стратосферное) NO_2 в вертикальном столбе атмосферы – переданы в международную базу данных валидации спутниковой аппаратуры ENVISAT (<http://nadir.nilu.no/calval>). С октября 2007 года система оперативной обработки измерений полностью автоматизирована, а результаты ежедневных измерений содержаний NO_2 – стратосферного и тропосферного – доступны в сети Интернет в реальном времени (http://troll.phys.spbu.ru/Personal_pages/Ionov/ksvu.html). Кроме того, с июня 2008 года осуществляется также одновременные DOAS-измерения содержания NO_2 (и озона) с помощью компактного автоматического спектрометра высокого разрешения OceanOptics HR4000. Данные измерений OceanOptics продемонстрировали отличное согласие с данными основной аппаратуры (“КСВУ”) и могут быть в дальнейшем использованы для мобильных дистанционных измерений содержания NO_2 в тропосфере.

Проведены сопоставления данных сумеречного зондирования вертикального содержания NO_2 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, среднее расхождение с данными SCIAMACHY за 2004-2008 гг. составило 6% (среднеквадратическое расхождение – 35%). Прямое сопоставление данных всех дневных наземных и спутниковых измерений содержания тропосферного NO₂ в районе Санкт-Петербурга демонстрирует неудовлетворительное согласие – коэффициент корреляции 0.2, среднее расхождение более 100%. Подробный анализ ветрового режима и рядов одновременных приземных измерений, а также численное моделирование распространения примеси показывает, что основной причиной значительных расхождений является большая пространственно-временная изменчивость поля содержания NO₂ в тропосфере (и приземном слое). Для корректного сопоставления данных прямых и дистанционных измерений требуется их тщательное совмещение в пространстве и времени.

Изучены вариации содержания тропосферного NO₂ 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 NO₂ Автоматизированной системой мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга. Получены согласованные оценки недельного цикла вариаций NO₂ вблизи мегаполиса Санкт-Петербурга по имеющимся данным дистанционных и прямых измерений, с характерным минимумом содержания NO₂ в выходные дни, ~20-30% от максимума в будни. Выявлен типичный суточный цикл вариаций приземной концентрации NO₂ на основе анализа прямых ежечасных измерений двух автоматических станций в центральной части Санкт-Петербурга в 2005-2007 гг., с минимальными средними концентрациями ранним утром (4:00-7:00) и максимальными – с 9:00-11:00. При этом, среднесуточные концентрации NO₂, наблюдаемые в центральной части

Санкт-Петербурга, в среднем в 1.5 раза превышают установленную в России ПДК.

Осуществляемые в НИИФ СПбГУ дневные дистанционные наземные измерения интегрального содержания NO_2 в нижнем слое атмосферы (тропосфере) позволяют регистрировать повышенные значения, обусловленные антропогенным загрязнением мегаполиса Санкт-Петербурга. Это подтверждается результатами сопоставлений с данными дистанционных спутниковых и прямых наземных измерений, а также данными численного моделирования распространения примеси из центральной части города.

Выполнено картирование пространственных распределений содержания тропосферного NO_2 в Ленинградской области на основе результатов измерений спутниковой аппаратуры OMI в 2004-2008 гг. Проанализирован многолетний ряд спутниковых наблюдений содержания NO_2 в тропосфере Северо-западного региона в 1995-2008 гг. по данным измерений аппаратуры GOME. Выявлен сезонный ход тропосферного содержания NO_2 в районе Санкт-Петербурга, характеризующийся повышенными значениями в зимнее время, что также наблюдается в данных прямых измерений приземных концентраций в 2005-2007 гг.. На основе данных многолетних спутниковых измерений GOME (1995-2008) получена уточненная оценка положительного линейного тренда тропосферного NO_2 в районе Санкт-Петербурга, составляющая 7% за 10 лет.

По результатам проведенных исследований подготовлен настоящий научно-технический отчет, принята к печати одна статья [20], сделано 2 сообщения на 2 всероссийских конференциях [21-22].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Ehhalt D., M. Prather, F. Dentener, R. Derwent, E. Dlugokencky, E. Holland, I. Isaksen, J. Katima, V. Kirchhoff, P. Matson, P. Midgley, M. Wang* Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases // Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution to the 3rd Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp., 2001.
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. *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
5. *Munro R., Eisinger M., Anderson C., Callies J., Corpaccioli E., Lang R., Lefebvre A., Livschitz Y., Albinana A.P.* GOME-2 on Metop: From in-orbit verification to routine operations // 2006 EUMETSAT

Meteorological Satellite Conference, Helsinki, Finland, 12-16 June, 2006.

6. *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.
7. *Platt U.* Differential optical absorption spectroscopy (DOAS), Air monitoring by Spectroscopic Techniques (M. Sigrist, ed.) // John Wiley & Sons, Inc., 1994, 27–84.
8. *Hofmann, D., Bonasoni, P., De Maziere, M., Evangelisti, F., Giovanelli, G., Goldman, A., Goutail, F., Harder, J., Jakoubek, R., Johnston, P., Kerr, J., Matthews, W., McElroy, T., McKenzie, R., Mount, G., Platt, U., Pommereau, J.P., Sarkissian, A., Simon, P., Solomon, S., Stutz, J., Thomas, A., Van Roozendael, M., and Wu, E.* // Intercomparison of UV/visible spectrometers for measurements of stratospheric NO₂ for the Network for the Detection of Startospheric Change. J. Geophys. Res. 100 (D8), 16765– 16792, 1995.
9. *Pommereau J-P., Goutail F.* Ground-based measurements by visible spectrometry during Arctic winter and spring 1988 // Geophys. Res. Lett., 15, 891-894, 1988.
10. *Fayt C., Van Roozendael M.* WINDOAS user manual // Belg. Inst. for Space Aeron., Brussels, 2001.
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. *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
13. *Ионов Д.В., Поберовский А.В.* Вариации содержания NO₂ в районе Санкт-Петербурга по наземным и спутниковым измерениям рассеянного солнечного излучения // Материалы конференции: Международный Симпозиум "Физика атмосферы: наука и образование", 11-13 сентября 2007, Санкт-Петербург, с. 159-163
 14. *Kroon M., Brinksma E.J., Balis D., Ionov D., Sneep M., Curier L., Tanskanen A., Zehner C., Carpay J., Levelt P.F.* Validation results from the joint ESA KNMI NIVR calibration and validation Announcement of Opportunity for the Ozone Monitoring Instrument // Proc. of ENVISAT Symposium, Montreux, Switzerland, 23-27 April 2007, ESA SP-636, 2007.
 15. *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.
 16. *Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М., Шаламянский А.М., Ламберт Ж.-К., Еланский Н.Ф., Елохов А.С., Груздев А.Н., Постыляков О.В.* Глобальный мониторинг атмосферных содержаний озона и NO₂ по данным спутникового эксперимента GOME: анализ точности // Физическая Мысль России. 2002. N 2. С.158-165.
 17. *Ионов Д.В., Егорова Т.А., Зубов В.А., Розанов Е.В.* Глобальные поля общих содержаний озона и двуокиси азота по данным спутниковых измерений и результатам трехмерного моделирования // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2003. Т.39. N.5. С.620-630.
 18. *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.
19. *van der A R.J., Eskes H., Boersma K.F., van Noije T.P.C., Van Roozendaal M., De Smedt I., Peters D.H.M.U., and E.W. Meijer* Trends, seasonal variability and dominant NO_x source derived from a ten year record of NO₂ measured from space // J. Geophys Res, 113, D04302, doi:10.1029/2007JD009021, 2008.
 20. *Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М.* Региональный космический мониторинг содержания двуокиси азота в тропосфере // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2008. принята к печати.
 21. *Ионов Д.В., Поберовский А.В.* Антропогенно обусловленные вариации содержания NO₂ в тропосфере по данным спутниковых и наземных измерений в районе Санкт-Петербурга // Материалы конференции: XV Международный Симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", 22-29 июня 2008, Красноярск.
 22. *Ионов Д.В., Поберовский А.В.* Долговременный мониторинг антропогенного загрязнения атмосферы по данным спутниковых и наземных измерений NO₂ в районе Санкт-Петербурга // Материалы конференции: 6-я всероссийская открытая ежегодная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 10-14 ноября 2008, Москва.