

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

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

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по НИР СПбГУ

_____ (Троян В.Н.)

"__" _____ 2006 г.

М.П.

Научно-технический отчет

о выполненной работе
по гранту для молодых кандидатов наук вузов и академических
институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга

по договору № 153/05 от "15" июня 2006

«Анализ долговременного тренда содержания двуокиси азота (NO_2)
в тропосфере Северо-западного региона России»

Шифр гранта: PD06-1.5-5

Исполнитель гранта
к.ф.-м.н.

_____ (Ионов Д.В.)

Научный руководитель гранта
д.ф.-м.н., профессор

_____ (Тимофеев Ю.М.)

**Санкт-Петербург
2006**

РЕФЕРАТ

Отчет о выполненной работе по гранту для молодых кандидатов наук вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, с.50, рис.28, табл. нет, источников 20, приложений нет.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: спутниковый мониторинг атмосферы, наземное сумеречное зондирование, валидация спутниковых измерений, антропогенное загрязнение тропосферы, двуокись азота.

Объект исследования:

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

Цель работы:

Исследование долговременных вариаций содержания двуокиси азота (NO_2) в тропосфере Северо-западного региона России, с оценкой возможного тренда, обусловленного ростом промышленного загрязнения мегаполиса Санкт-Петербурга.

Новизна:

Проинтерпретированы данные наземных спектроскопических наблюдений за содержанием NO_2 в атмосфере в Санкт-Петербурге в 2003-2006 гг. Получены оценки вариаций содержания NO_2 в тропосфере Санкт-Петербурга, как на основе данных наземных спектроскопических измерений, так данных дистанционного спутникового зондирования, и прямых измерений приземных концентраций NO_2 . Проанализирован многолетний ряд спутниковых наблюдений содержания NO_2 в тропосфере Северо-западного региона в 1995-2006 гг. Получена приближенная оценка положительного линейного тренда тропосферного NO_2 , составляющая 26% за 10 лет.

Эффективность:

Совместное использование оперативных данных современных спутниковых экспериментов по глобальному мониторингу газового состава атмосферы, и локальных наземных измерений.

Область применения:

Долговременный региональный мониторинг уровня антропогенного загрязнения атмосферы.

СОДЕРЖАНИЕ

| | стр. |
|--|------|
| ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ | 03 |
| ВВЕДЕНИЕ | 04 |
| 1. НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА СОДЕРЖАНИЕМ NO ₂ В АТМОСФЕРЕ РАЙОНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В 2004-2006 ГГ. | 07 |
| 2. ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ NO ₂ В ТРОПОСФЕРЕ РАЙОНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ПО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, И ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ NO ₂ В ПРИЗЕМНОМ ВОЗДУХЕ | 12 |
| 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 | 23 |
| 3. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ NO ₂ В ТРОПОСФЕРЕ БАЛТИЙСКОГО РЕГИОНА – АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И ОЦЕНКА ВРЕМЕННОГО ТРЕНДА ДЛЯ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНА РОССИИ | 34 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 44 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | 47 |

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

HALOE - HALogen Occultation Experiment

UARS - Upper Atmosphere Research Satellite

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

Дистанционный мониторинг пространственно-временных вариаций содержаний газовых примесей антропогенного происхождения может служить одним из инструментов наблюдения за состоянием окружающей среды в условиях негативного влияния деятельности человека. Основная информация о характеристиках газового состава атмосферы поступает от различных систем наблюдений - наземной, самолетной, аэростатной и спутниковой. Безусловно, спутниковая система мониторинга атмосферы является важнейшей составляющей глобальной системы наблюдений. Именно спутниковые измерения позволяют получить практически мгновенную картину распределения содержания тех или иных компонент атмосферы по пространству, в том числе глобально. В частности, с 1995 года на борту европейского спутника ERS-2 функционирует прибор GOME (Global Ozone Monitoring Experiment [1]), осуществляющий глобальный мониторинг общих содержаний озона и NO₂. Важно отметить, что получение оперативной информации о глобальном пространственном распределении двуокиси азота в атмосфере стало возможным лишь в рамках эксперимента GOME. Позднее, в 2002 году был запущен аналогичный по геометрии и принципу измерений ОС NO₂ аппарат SCIAMACHY [2], установленный на европейском спутнике ENVISAT. Затем, в 2004 году состоялся запуск американского спутника AURA, на борту которого в числе прочих, установлен прибор OMI (Ozone Monitoring Experiment [3]), измеряющий также и ОС NO₂. Наконец, в октябре 2006 года состоялся запуск европейского спутника EPS-MetOp, на котором будет функционировать аналог аппаратуры GOME – GOME-2 [4].

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 приводит к образованию 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 70% выбросов NO_2 в тропосферу обусловлено сжиганием топлива автомобилями и промышленными установками. Антропогенный вклад в содержание NO_2 во всей толще атмосферы настолько велик, что зачастую превышает естественный уровень и становится заметен в данных наблюдений спутниковых систем глобального мониторинга. Это обстоятельство позволяет, в свою очередь, использовать результаты спутниковых измерений содержания NO_2 в качестве индикатора антропогенного загрязнения.

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. При этом, накопленный ряд непрерывных спутниковых наблюдений за ОС NO_2 (начиная с 1995 года) позволяет уже оценивать его долговременные изменения. Так, в работе [5] отмечены существенные сокращения антропогенных выбросов NO_2 для индустриальных районов Западной Европы и США (10-20%), выявленные на основе данных измерений GOME и SCIAMACHY. Эти сокращения могут быть связаны с широким внедрением каталитических преобразователей в двигателях современных автомобилей и повышением качества используемого топлива. Вместе с тем, исследования выявили также заметный рост содержания NO_2 - до 50% - в тропосфере индустриальных районов

Китая, обусловленный стремительным экономическим развитием этого региона (общее число автомобилей в Китае с 1995 по 2002 год удвоилось). В России наиболее заметным антропогенным вкладом в тропосферное содержание NO_2 характеризуется мегаполис Москвы. Однако, начавшийся в последние годы рост отечественной промышленности и постоянно увеличивающееся количество автотранспорта может также повысить уровень загрязнения в других крупных мегаполисах и, прежде всего – в Санкт-Петербурге.

Данное исследование было посвящено долговременному мониторингу содержания NO_2 в тропосфере Северо-западного региона России на основе оперативных данных современных глобальных спутниковых систем и локальных наблюдений наземной спектроскопической аппаратуры. В работе представлены результаты долговременных наземных и спутниковых измерений общего содержания NO_2 в районе Санкт-Петербурга (1995-2006), приведены оценки недельного цикла вариаций NO_2 вблизи мегаполиса Санкт-Петербурга по имеющимся данным наблюдений, рассмотрены примеры регистрации сильных антропогенных загрязнений спутниковой и наземной аппаратурой, выполнено долговременное картирование поля содержания NO_2 в тропосфере всего Балтийского региона, получены оценки соответствующего временного тренда содержания NO_2 для Северо-западного региона. В проведенном анализе были также использованы данные прямых измерений концентраций NO_2 на станциях автоматизированной системы контроля и управления качеством атмосферного воздуха Санкт-Петербурга (УКВ).

1. НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ОБЩИМ СОДЕРЖАНИЕМ NO₂ В АТМОСФЕРЕ РАЙОНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В 2004-2006 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]. Методика DOAS – Differential Optical Absorption Spectroscopy – заключается в минимизации рассогласований между результатами измерений и линейной комбинацией известных спектров молекулярного поглощения (O₃, NO₂, H₂O, O₄), после вычета плавно меняющихся компонент ослабления – альbedo поверхности, молекулярного и аэрозольного рассеяния и др. – описываемых полиномом. На первом этапе методом наименьших квадратов определяется содержание NO₂ для трассы формирования уходящего излучения (т.н. наклонное содержание), а затем, используя рассчитанные заранее для различных условий измерений значения воздушных масс (моделированное отношение наклонного содержания к вертикальному), определяется общее содержание в вертикальном столбе атмосферы. Начиная с 2005 года, интерпретация наземных измерений осуществляется на основе стандартных методик, разработанных для международной сети станций 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 100°, т.е.

как в дневное время, так и в сумеречных условиях. В настоящей работе использовались данные сумеречных измерений в период с января 2004 по сентябрь 2006 года, обработанные по единому алгоритму.

На рисунке 1.1 представлен весь ряд наземных сумеречных измерений ОС NO₂ в 2004-2006 гг. – осредненные для каждого дня наблюдений значения ОС NO₂ на восходе и заходе солнца. Для сравнения здесь же приведены среднемесячные значения ОС NO₂ из климатической базы данных многолетних измерений спутниковой аппаратуры HALOE, UARS Climatology Dataset (стратосферное содержание NO₂ в широтном поясе 42-46° с.ш. по измерениям на заходе Солнца). Видно, что наблюдаемый в результатах наземных измерений сезонный ход NO₂ соответствует климатическим данным, характеризуясь максимальным содержанием в летнее время, что обусловлено продолжительностью светового дня (мы не можем рассчитывать здесь на согласие абсолютных значений, поскольку используемые нами климатические данные описывают содержание NO₂ в стратосфере другого широтного пояса). Вместе с тем, на фоне монотонного роста в первую половину года, с последующим убыванием, данный ряд характеризуется также многочисленными выбросами повышенного содержания NO₂ довольно высоких значений – до $1 \cdot 10^{16}$ мол/см², превышая зачастую в несколько раз содержание в стратосфере, которое не может меняться так быстро. Очевидно, эти выбросы соответствуют эпизодам сильного кратковременного загрязнения нижней атмосферы (тропосферы). Из рисунка также видно, что подобные скачки в измерениях ОС NO₂ преобладают в зимнее время, что косвенно подтверждает предположение об их антропогенной природе, поскольку накопление примесей в приземном слое особенно интенсивно зимой. Кроме того, на рисунке 1.2

представлены результаты измерений ОС NO₂, выполненных в дневное время и осредненных в период с 10:00 до 14:00 местного времени. В отличие от сумеречных наблюдений, предназначенных для зондирования стратосферы, дневные наблюдения в большей степени чувствительны к содержанию NO₂ в тропосфере. Полученные таким образом данные характеризуется значительно более высокими, по сравнению с сумеречными измерениями, величинами содержания NO₂ (до $5 \cdot 10^{16}$ мол/см²). При этом, результаты этих измерений демонстрируют большую временную изменчивость, в отсутствие сколько-нибудь заметного сезонного хода. В целом, эти данные могут быть использованы для приближенных оценок содержания NO₂ в тропосфере и его вариаций.

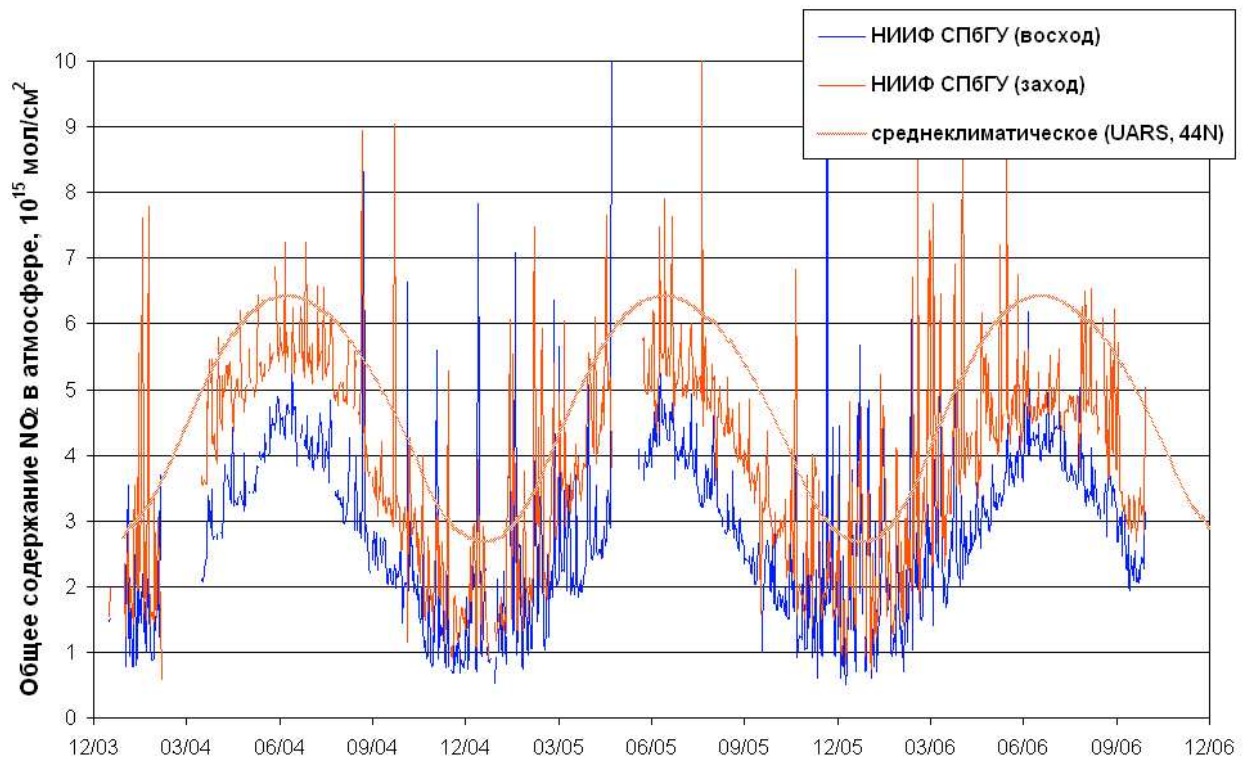


Рисунок 1.1

Данные об ОС NO_2 в районе Санкт-Петербурга по результатам наземных сумеречных измерений рассеянного в зенит солнечного излучения в НИИФ СПбГУ в 2004-2006 гг. Отдельной кривой нанесены также данные многолетних измерений спутниковой аппаратуры HALOE (UARS).

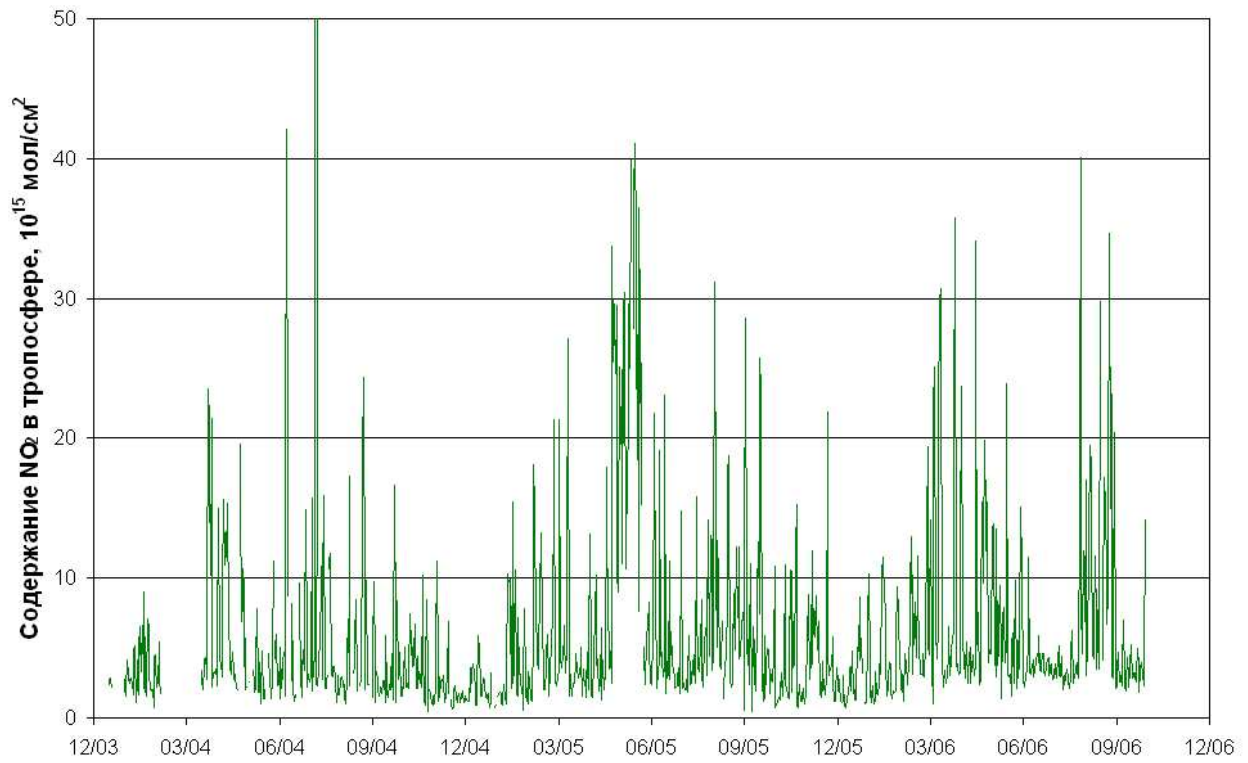


Рисунок 1.2

Данные о содержании NO_2 в тропосфере Санкт-Петербурга по результатам наземных дневных измерений рассеянного в зенит солнечного излучения в НИИФ СПбГУ в 2004-2006 гг (данные измерений ОС NO_2 осреднены с 10:00 до 14:00 местного времени).

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

Помимо систем наземного зондирования атмосферы по измерениям рассеянного в зенит видимого Солнечного излучения, аналогичный принцип измерений содержания NO₂ в атмосфере успешно используется спутниковой аппаратурой GOME, SCIAMACHY и OMI. Прибор GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) является одним из инструментов, размещенных на борту спутника ERS-2, запущенного в апреле 1995 года. GOME осуществляет надирные измерения уходящего отраженного и рассеянного солнечного излучения в УФ и видимой областях спектра (240-790 нм) с номинальным пространственным разрешением 40x320 км, что позволяет осуществлять практически глобальный мониторинг распределений общего содержания (ОС) озона и NO₂. Аппаратура SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorbtion spectroMeter for Atmospheric ChartographY) установлена на борту европейского спутника ENVISAT, запущенного ESA в марте 2002 года. Прибор может осуществлять надирное и лимбовое зондирование атмосферы по измерениям излучения Солнца и Луны, в УФ, видимой и БИК области спектра (240-2380 нм). Основная цель эксперимента состоит в определении глобальных распределений содержаний различных МГС в тропосфере и стратосфере, таких как O₃, NO₂, BrO, N₂O, CO, CO₂, H₂O и CH₄. Номинальное пространственное разрешение надирных измерений SCIAMACHY составляет 60x30 км, с полосой сканирования прибора в 960 км. Еще один прибор надирного зондирования атмосферы, OMI (Ozone Monitoring Experiment), был запущен на борту американского спутника AURA в июле 2004 года. OMI осуществляет измерения спектра уходящего излучения в области 270-500 нм с разрешением

~0.4 нм. Помимо данных о содержании озона, измерения OMI несут информацию о содержании таких МГС как NO₂, SO₂, BrO, OClO и HCHO. Пространственное разрешение данных OMI составляет ~13×24 км, при этом глобальное картирование поля содержания измеряемых МГС достигается в течение суток.

Определение содержания NO₂ в тропосфере из данных измерений видимого рассеянного излучения сопряжено с рядом трудностей. Прежде всего, надирные (для спутниковых систем) или зенитные (наземные) измерения ориентированы на определение общего содержания NO₂ во всей вертикальной толще атмосферы. При этом, тропосферная составляющая ОС NO₂, оставаясь пренебрежимо малой в фоновых условиях, достигает значительных величин вблизи источников антропогенного загрязнения и характеризуется большой пространственно-временной изменчивостью. Кроме того, содержание NO₂ в атмосфере сильно меняется в течение суток под действием вариаций освещенности атмосферы солнечным излучением и в процессе сложных фотохимических реакций.

Вместе с тем, регулярно наблюдаемые в результатах спутниковых и наземных измерениях эпизоды повышенного содержания NO₂ вблизи известных антропогенных источников, косвенно подтверждают возможность регистрации локальных загрязнений тропосферы этими системами наблюдений. И хотя количественный анализ таких ситуаций требует использовать специальный алгоритм выделения из данных об ОС NO₂ тропосферной его части, некоторую информацию о таких загрязнениях и об их изменчивости можно извлечь, не прибегая к дополнительной обработке оперативных данных. Так, существуют исследования, посвященные оценкам недельного цикла тропосферного содержания NO₂ вблизи крупных мировых мегаполисов, использующие данные многолетних наземных и

спутниковых измерений. Поскольку основная часть антропогенных выбросов NO_2 связана со сжиганием топлива в двигателях транспорта и энергетических установках, наблюдаемый цикл характеризуется минимум содержания NO_2 в выходные дни. Подобный анализ был проведен, в частности, в работе [11], где использовалась информация о тропосферном содержании NO_2 , извлеченная из данных GOME. Очевидно, однако, что осредненные по дням недели данные об ОС NO_2 имеют одинаковую доли стратосферного содержания, и любые вариации этих средних значений могут быть обусловлены лишь вариациями тропосферной части.

2.1 Недельный цикл содержания NO₂ в атмосфере Санкт-Петербурга

Мы рассмотрели имеющиеся у нас данные ежедневных измерений GOME (версия GDP4.0) в районе Санкт-Петербурга и рассчитали средние за весь период (1995-2006) значения ОС NO₂ для каждого дня недели. Эти данные были получены на основе выборки архива измерений GOME, относящихся ко времени пролета спутника в радиусе 500 км от Санкт-Петербурга (в действительности, средняя удаленность подспутниковой точки составила около 150 км). Чтобы исключить влияние резко отличающихся от среднего измерений, мы ограничились данными GOME с погрешностью восстановления ОС NO₂ менее 30% и размером пиксела 40x320 км. Полученные результаты недельного цикла ОС NO₂ представлены на рисунке 2.1. Видно, что минимальное содержание NO₂ наблюдается в воскресенье ($3.14 \cdot 10^{15}$ мол/см²) – на 6% ниже, чем, например, в среду и четверг ($3.34 \cdot 10^{15}$ мол/см²). И хотя этот минимум незначителен, он согласуется с результатами аналогичного исследования для крупных мегаполисов западной Европы. Таким образом, наши результаты выявляют наличие недельного цикла содержания NO₂ в тропосфере Санкт-Петербурга, обусловленного интенсивностью работы промышленности и транспорта.

Мы провели аналогичные оценки на основе данных измерений другой спутниковой аппаратуры – OMI. В отличие от GOME, оперативные данные OMI, помимо информации об ОС NO₂, содержат также оценку его тропосферного вклада. Как в анализе данных GOME, нами были рассмотрены измерения NO₂ в районе Санкт-Петербурга (вследствие более высокого пространственного разрешения OMI, средняя удаленность подспутниковой точки составила всего 15 км). Результаты оценки недельного цикла содержания NO₂ в тропосфере

по данным OMI представлены на рисунке 2.2. Аналогично данным GOME, минимальное значение отмечается в воскресенье ($4.05 \cdot 10^{15}$ мол/см²), что на 24% меньше содержания NO₂ в будние дни.

Мы исследовали также недельный цикл содержания NO₂ на основе данных наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга. На рисунке 2.3 представлен результат подобного анализа результатов измерений наземной аппаратуры НИИФ СПбГУ в 2004-2006 гг, при этом в качестве оценки тропосферного вклада в измеряемое ОС NO₂ использовалось его среднее в период с 10:00 до 14:00 местного времени. Как и в результатах анализа спутниковых данных GOME и OMI, минимальное значение содержания NO₂ отмечается в воскресенье ($1.95 \cdot 10^{15}$ мол/см²), на 44% меньше максимального значения в будние дни (пятница, $3.49 \cdot 10^{15}$ мол/см²). Вместе с тем, форма недельного цикла содержания NO₂, полученного из данных наземных измерений ОС NO₂, существенно отличается от ранее полученных нами для спутниковых измерений. Возможно, мы обладаем пока слишком коротким рядом для таких оценок, а может быть, содержание NO₂ за чертой города не испытывает столь заметной цикличности.

Разумеется, предполагая такую цикличность в данных дистанционных измерений содержания NO₂ в тропосфере (и даже во всем вертикальном столбе атмосферы), следует ожидать наличие подобного эффекта и в данных прямых измерений в приземном воздухе Санкт-Петербурга, где и находятся основные антропогенные источники NO₂. Такие измерения осуществляются "Автоматизированной системой контроля и управления качеством атмосферного воздуха Санкт-Петербурга (Системы УКВ)". Система УКВ предназначена для обеспечения информацией о качестве атмосферного воздуха органов исполнительной власти Санкт-

Петербурга. Данные Системы УКВ используются для оценки и прогноза состояния воздушной среды города, а также – для подготовки проектов управленческих решений, направленных на улучшение качества атмосферного воздуха. Информация о состоянии атмосферного воздуха Санкт-Петербурга, получаемая от Системы УКВ, 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 Системы УКВ 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 (14 станции павильонного типа и 3 беспавильонных станции). В конце 2004 года в составе Системы УКВ функционировали 12 автоматических станций мониторинга атмосферного воздуха, размещенных в Петроградском, Колпинском, Выборгском, Красногвардейском, Кировском, Василеостровском, Фрунзенском, Центральном, Адмиралтейском, Приморском и Курортном районах города. В течение 2005 года были установлены и введены в эксплуатацию 5 новых автоматических станций: в Красногвардейском, Курортном, Кронштадтском, Московском и Пушкинском районах. Все станции павильонного типа оснащены газоанализаторами оксидов азота (фирмы “Thermo Electron”). По договоренности с Комитетом, нам были предоставлены данные измерений приземных концентраций NO₂, полученные на двух автоматизированных станциях - №5 и №6, в период с января 2005 по февраль 2006 года. Выбор станций обусловлен непрерывностью ряда наблюдений в указанный период, 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). Как видно из результатов анализа недельного цикла концентраций NO_2 , минимальные значения наблюдаются в воскресенье (47 мкг/м^3 на станции №5 и 58 мкг/м^3 на станции №6), что существенно меньше максимальных средних значений в будние дни – на 13% и 10% для станций №5 и №6, соответственно. Таким образом, все рассмотренные нами данные измерений в районе Санкт-Петербурга – дистанционные спутниковые и наземные измерения, а также прямые наземные измерения, демонстрируют согласованные результаты анализа недельного цикла содержания NO_2 .

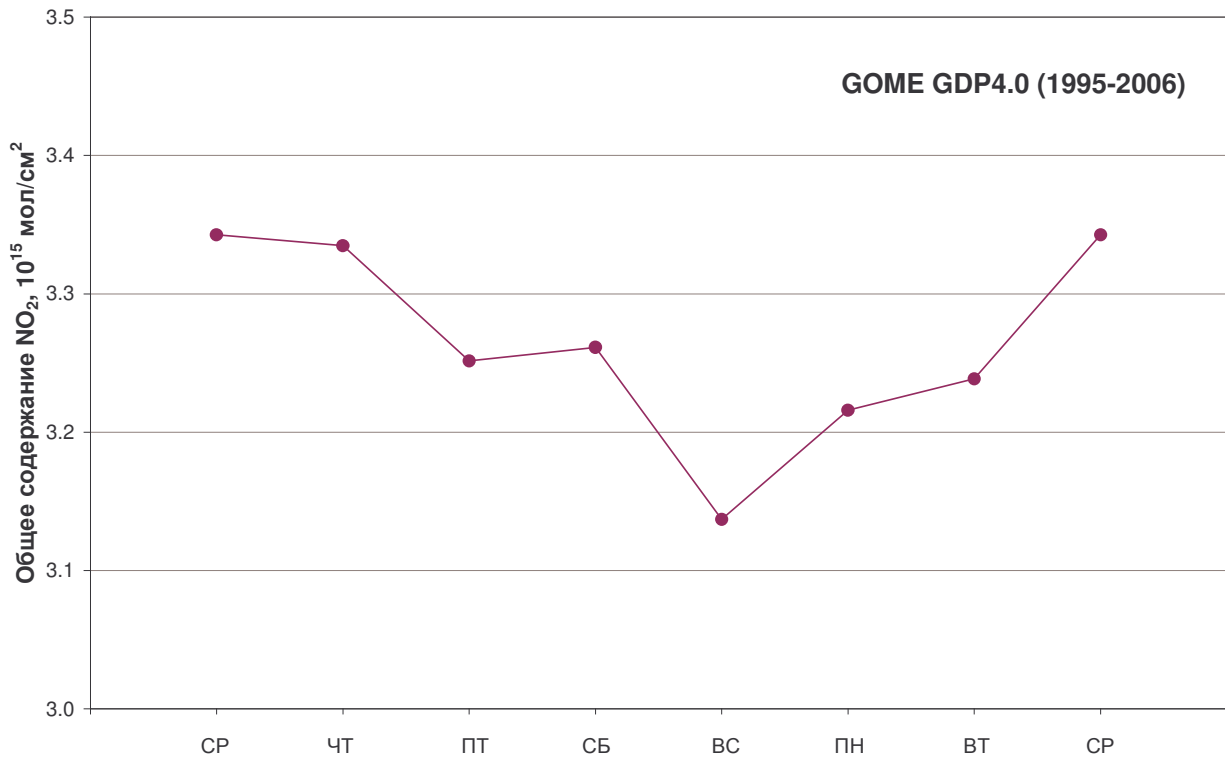


Рисунок 2.1

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

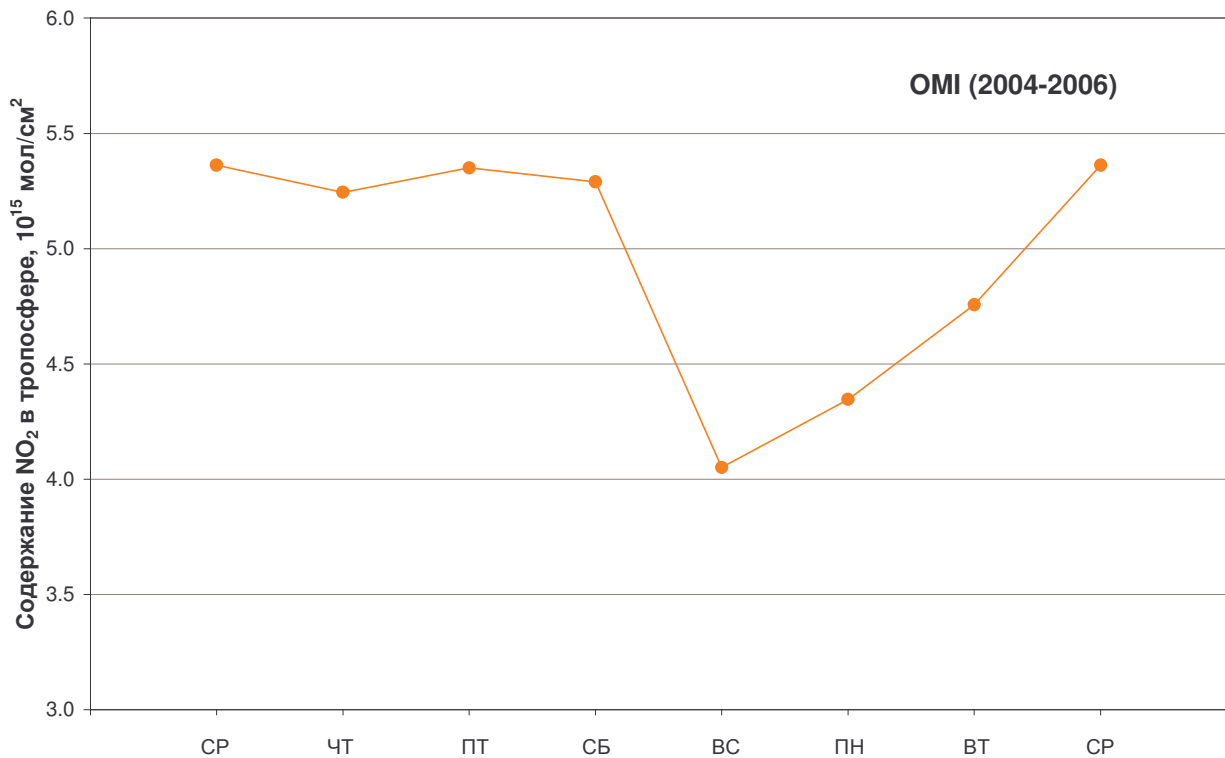


Рисунок 2.2

Недельный цикл тропосферного содержания NO₂ в районе Санкт-Петербурга по данным спутниковых измерений OMI в 2004-2006 гг.

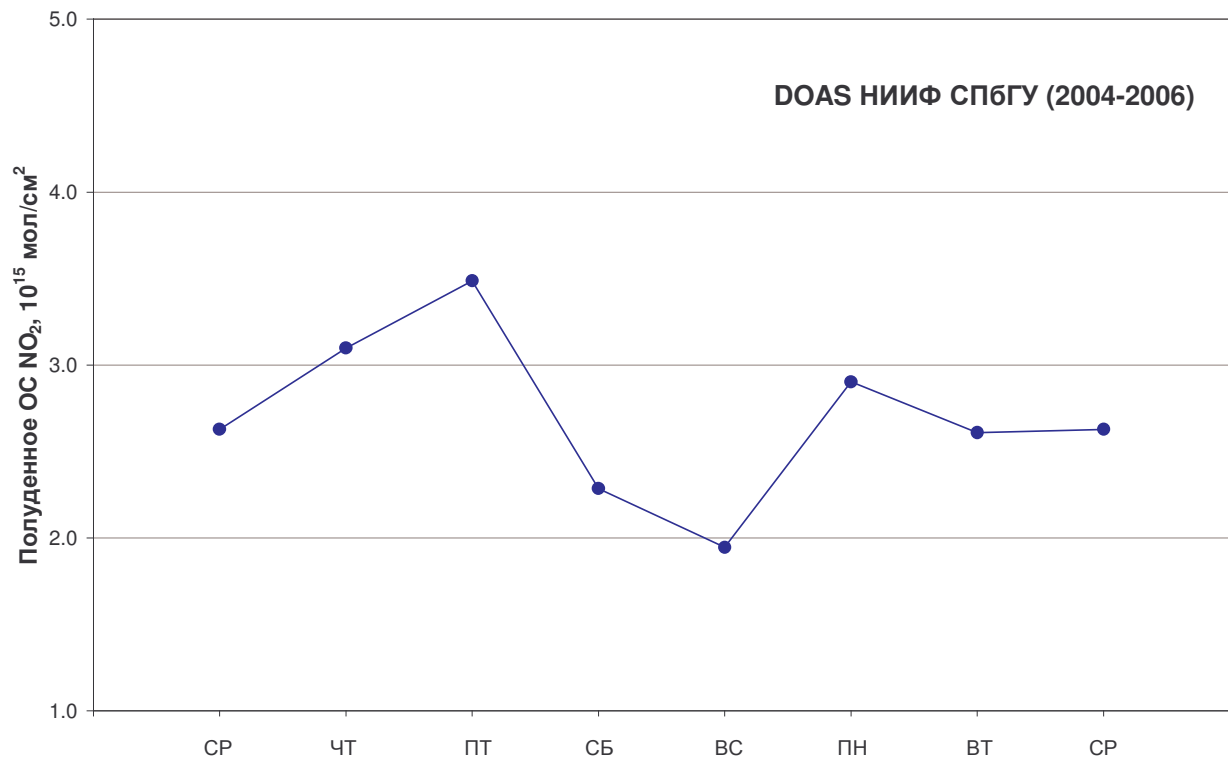


Рисунок 2.3

Недельный цикл полуденного (10:00-14:00) ОС NO₂ в районе Санкт-Петербурга (Петергоф) по данным наземных спектроскопических измерений в 2004-2006 гг.

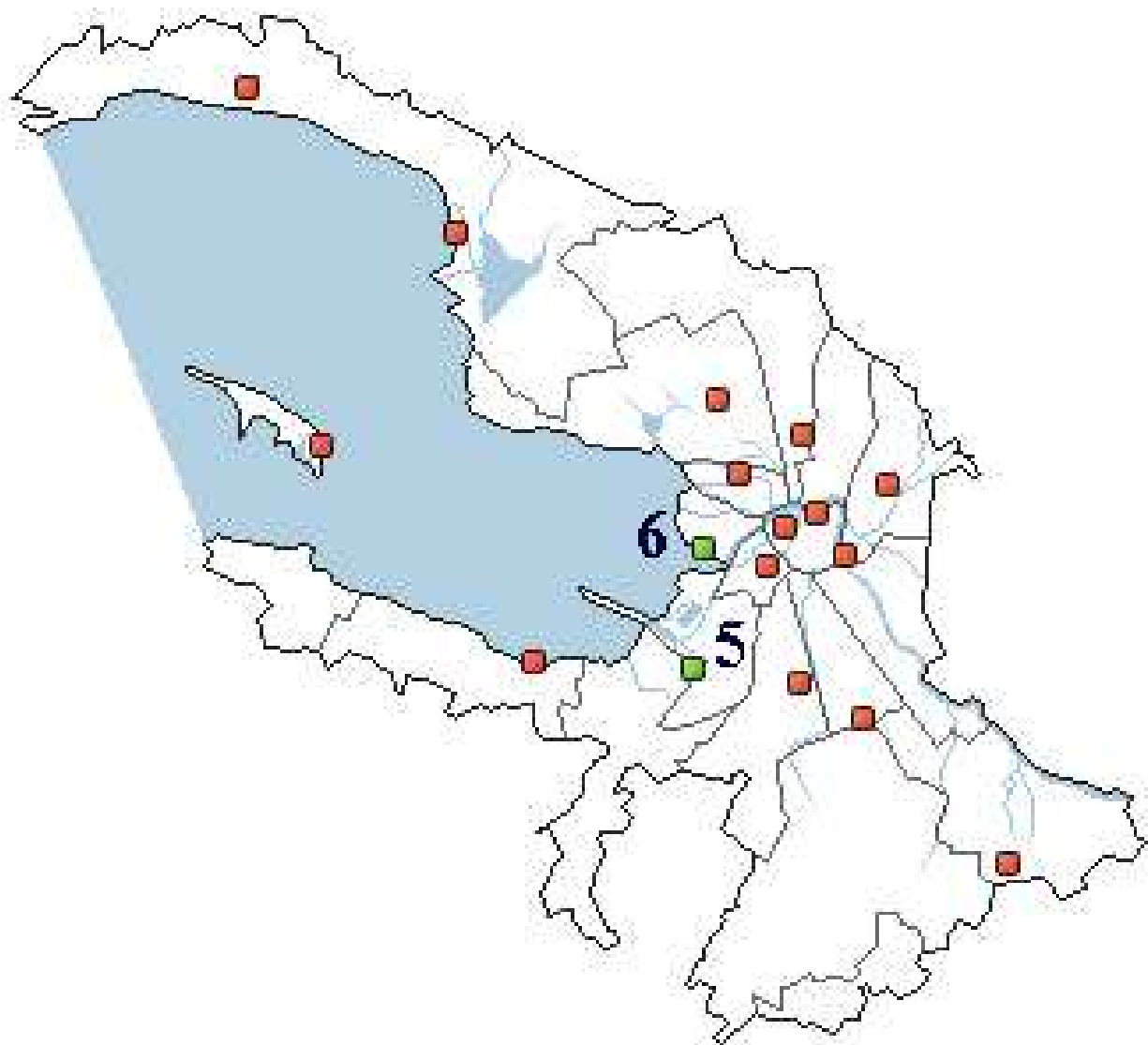


Рисунок 2.4

Действующие автоматические станции Системы УКВ
(станция №5: пр. Маршала Жукова д. 30, станция
№6: Весельная ул., д.6).
http://gov.spb.ru/gov/admin/otrasl/ecology/maps/karta_vozduh

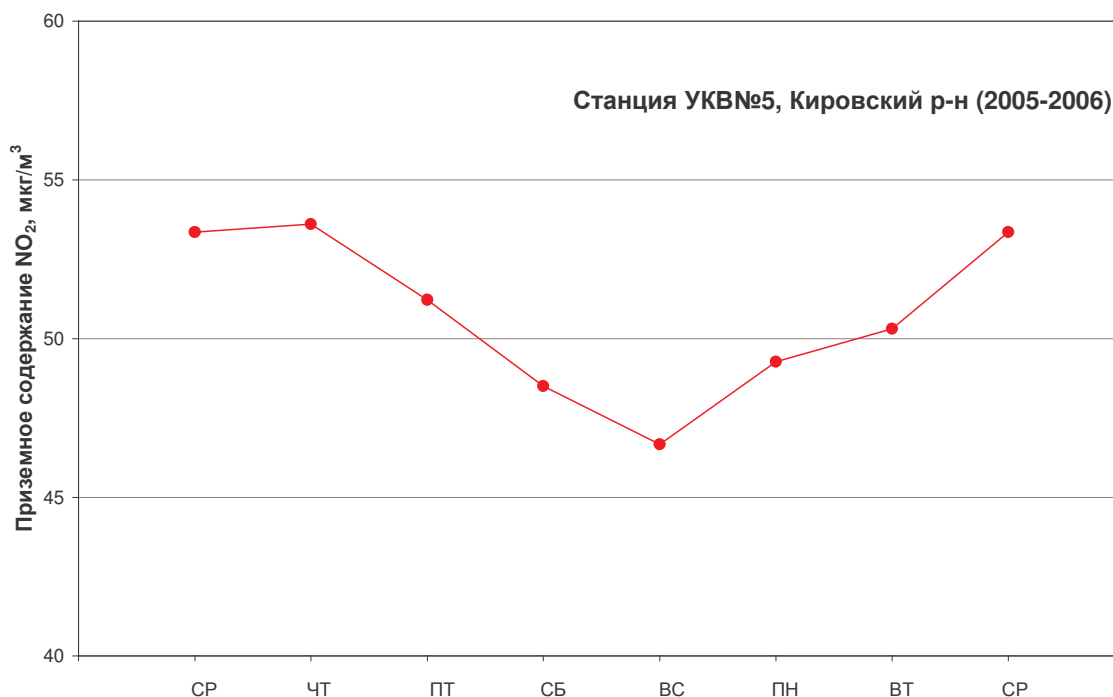


Рисунок 2.5 Недельный цикл приземных концентраций NO₂ по данным автоматизированной системы контроля и управления качеством атмосферного воздуха Санкт-Петербурга (УКВ, Кировский р-н) в 2005-2006 гг.



Рисунок 2.6 Недельный цикл приземных концентраций NO₂ по данным автоматизированной системы контроля и управления качеством атмосферного воздуха Санкт-Петербурга (УКВ, Валилеовстровский р-н) в 2005-2006 гг.

2.2 Сопоставление данных одновременных спутниковых и наземных измерений содержания NO₂ в атмосфере Санкт-Петербурга

Как было отмечено выше, резкие эпизодические повышения содержания NO₂ в атмосфере Санкт-Петербурга проявляются в результатах спутникового и наземного зондирования. Рассмотрим подробнее один из таких эпизодов, используя данные наземного зондирования НИИФ СПбГУ в Петродворце, спутниковых дистанционных измерений OMI и прямых измерений приземных концентраций NO₂ на станциях Системы УКВ. Так, по информации "Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности" от 02.02.06, в период похолодания с 17-го по 25-е января 2006 года, "в результате активной антициклонической деятельности в приземных слоях атмосферы наблюдались неблагоприятные метеоусловия, способствующие увеличению концентрации загрязняющих веществ. Ситуация, сложившаяся в Санкт-Петербурге в эти дни, зафиксирована на 17-и автоматических станциях контроля качества атмосферного воздуха. Низкая скорость ветра, а также наличие умеренных и сильных инверсий температуры привело, в частности 20-го и 23-го января, к значительному загрязнению атмосферного воздуха" (<http://gov.spb.ru/gov/admin/otrasl/ecology>). Сопоставление доступных на сайте Комитета данных с результатами наземных измерений содержания NO₂ в атмосфере за указанный период, осуществляемых в принимающей организации (НИИФ СПбГУ), и имеющихся спутниковых данных (аппаратура OMI), демонстрирует хорошее качественное согласие (см. рисунок 2.7). Данные Системы УКВ представлены здесь в виде среднедневных значений суммарной концентрации NO_x по всем действующим станциям, в условных единицах. Мы также располагали

данными измерений отдельно NO_2 , выполненных на двух станциях (№5 и №6) в период с 01.2005-02.2006, предоставленными Комитетом. Результаты сопоставления наземных и спутниковых дистанционных измерений с данными наблюдений двух станций Системы УКВ представлены на рисунке 2.8. Эти данные также относительно хорошо воспроизводят временной ход содержания NO_2 , отмеченный в данных дистанционных измерений.

Мы также подробно рассмотрели весь имеющийся массив данных измерений Системы УКВ. Так, на рисунках 2.9 и 2.10 представлен средний суточный ход концентрации NO_2 , рассчитанный на основе измерений УКВ каждые 20 минут, для станций №5 и №6, соответственно. Результаты анализа представлены как среднегодовым суточным ходом, так и отдельно по сезонам – весна, лето, осень и зима. В целом, результаты наблюдений на обеих станциях выявляют локальный минимум концентрации NO_2 в утренние часы, по сравнению с дневными значениями – на 44% для станции №5, и 23% для станции №6. При этом, средние значения концентрации NO_2 на станции №6 существенно выше, чем на станции №5, а ее суточный ход – напротив, менее выражен. По-видимому, это связано с близостью станции №6 к центру Санкт-Петербурга, в отличие от более удаленной станции №5. Если же рассмотреть зависимость средних концентраций NO_2 от времени года, то наиболее отличается от среднегодового суточный ход NO_2 в весеннее время.

На рисунках 2.11 и 2.12 представлено сопоставление наземных и спутниковых дистанционных измерений содержания NO_2 с данными наблюдений станций Системы УКВ №5 и №6, в период 12.2004-12.2005. Как и на рисунке 2.7, данные УКВ здесь представлены в виде среднедневных значений суммарной концентрации NO_x по всем действующим станциям, в условных единицах. Как видно из графиков,

во всем массиве одновременных спутниковых и наземных измерений можно выделить периоды как хорошей корреляции данных, так и ситуации их взаимной несогласованности. Аналогичные графики представлены на рисунках 2.13 и 2.14, где данные УКВ представлены результатами измерений отдельно NO_2 , выполненными на двух станциях (№5 и №6) в период с 01.2005-02.2006, и предоставленными Комитетом. К сожалению, далеко не всегда эти данные согласуются с данными дистанционного наземного и спутникового зондирования. Более того, зачастую вариации приземных концентраций NO_2 , регистрируемые двумя рассматриваемыми станциями УКВ, существенно некоррелированы, что указывает на большую пространственную неоднородность поля приземного NO_2 . Следует отметить при этом, что в отличие от приземных измерений системы УКВ, носящих локальный характер, анализ данных спутниковых и наземных дистанционных измерений позволяет получить интегральную характеристику загрязнения тропосферы для всего региона в целом.

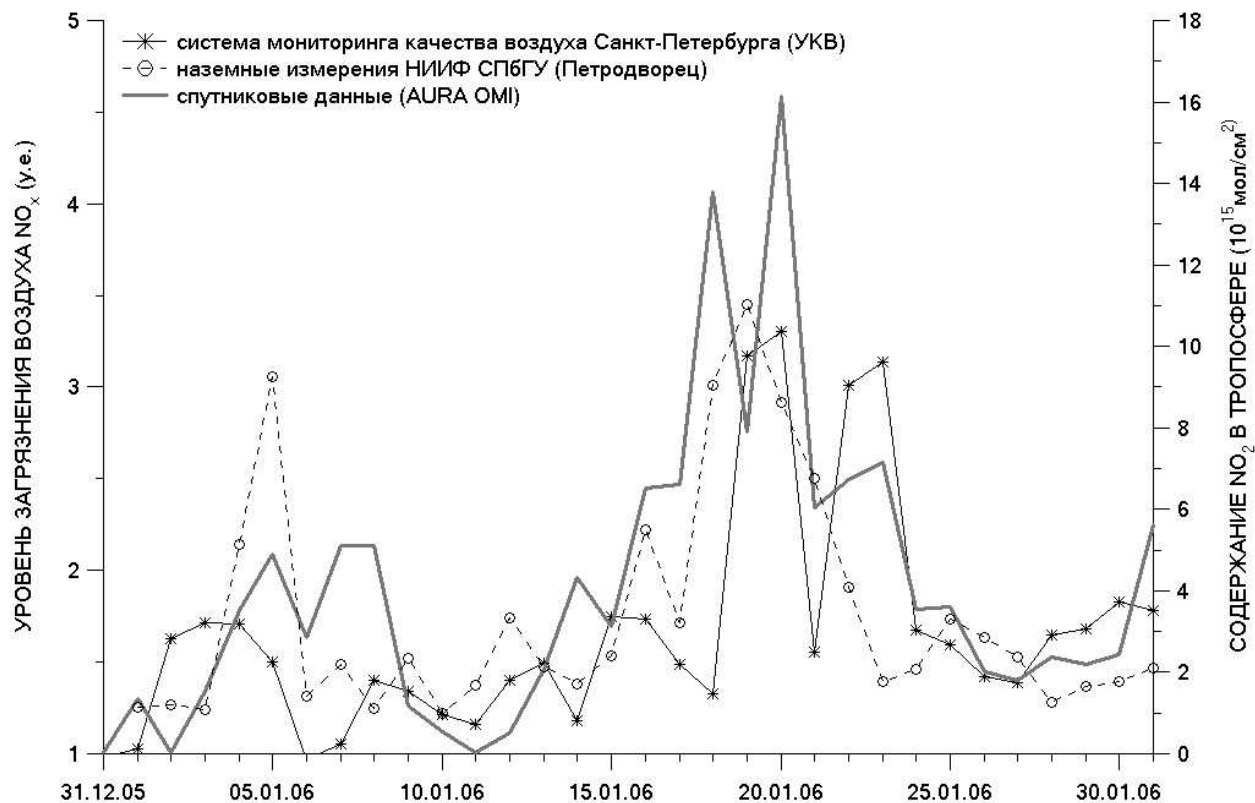


Рисунок 2.7

Сопоставление данных УКВ о приземных концентрациях NO_x (все станции) с результатами наземных (НИИФ СПбГУ) и спутниковых (AURA OMI) измерений содержания NO₂ в январе 2006 года.

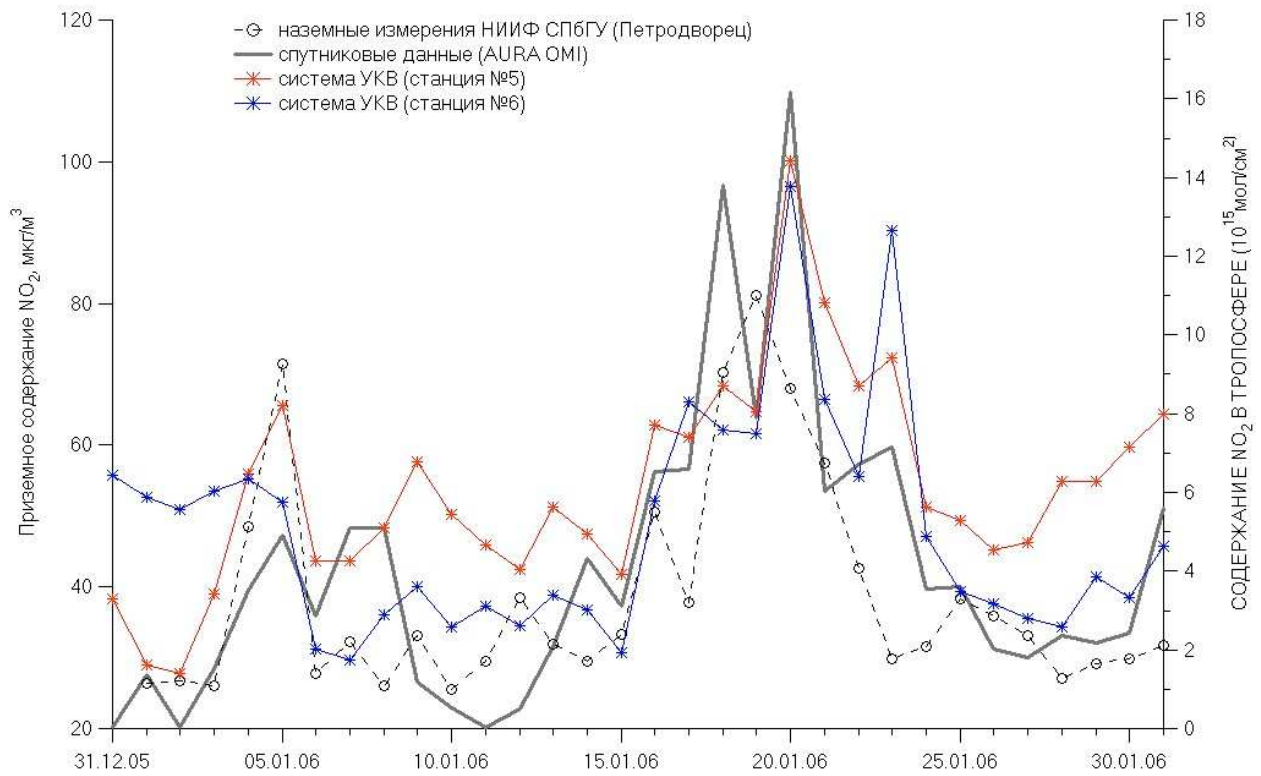


Рисунок 2.8

Сопоставление данных УКВ о приземных среднесуточных концентрациях NO_2 (станции №5 и №6) с результатами наземных (НИИФ СПбГУ) и спутниковых (AURA OMI) измерений содержания NO_2 в январе 2006 года.

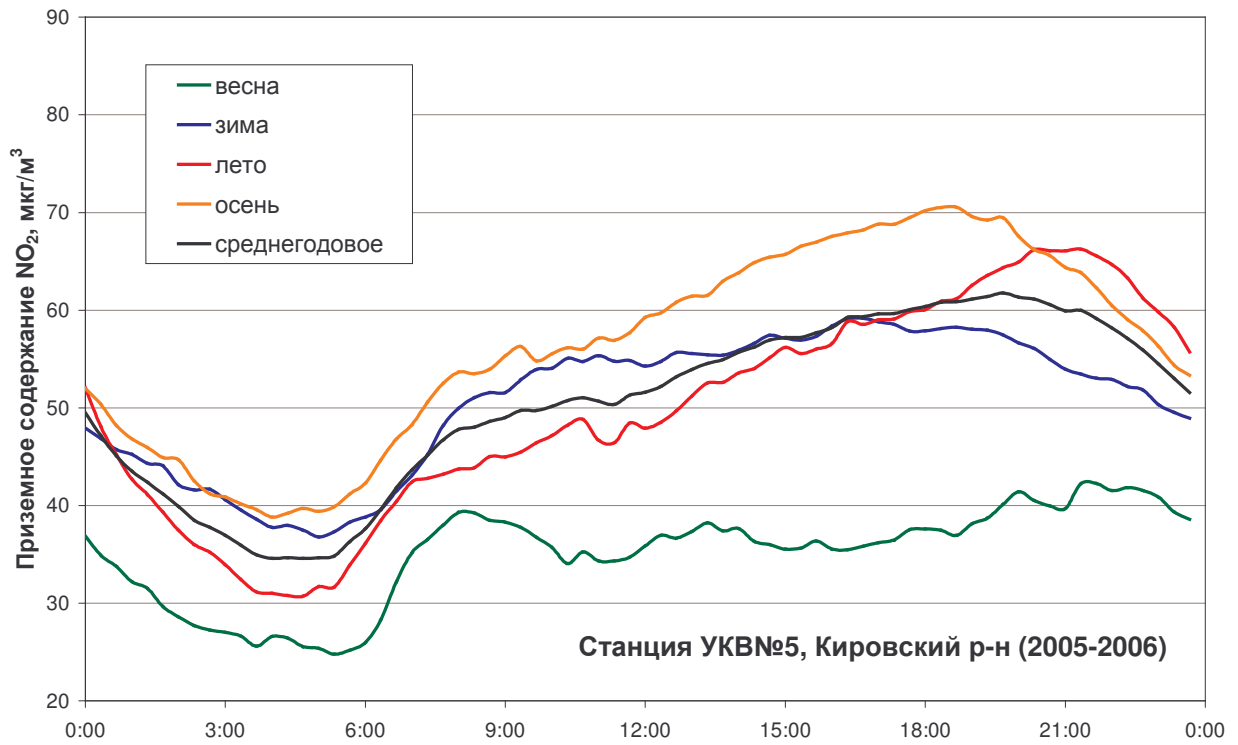


Рисунок 2.9

Суточный ход средней приземной концентрации NO_2 по данным измерений Системы УКВ на станции №5.

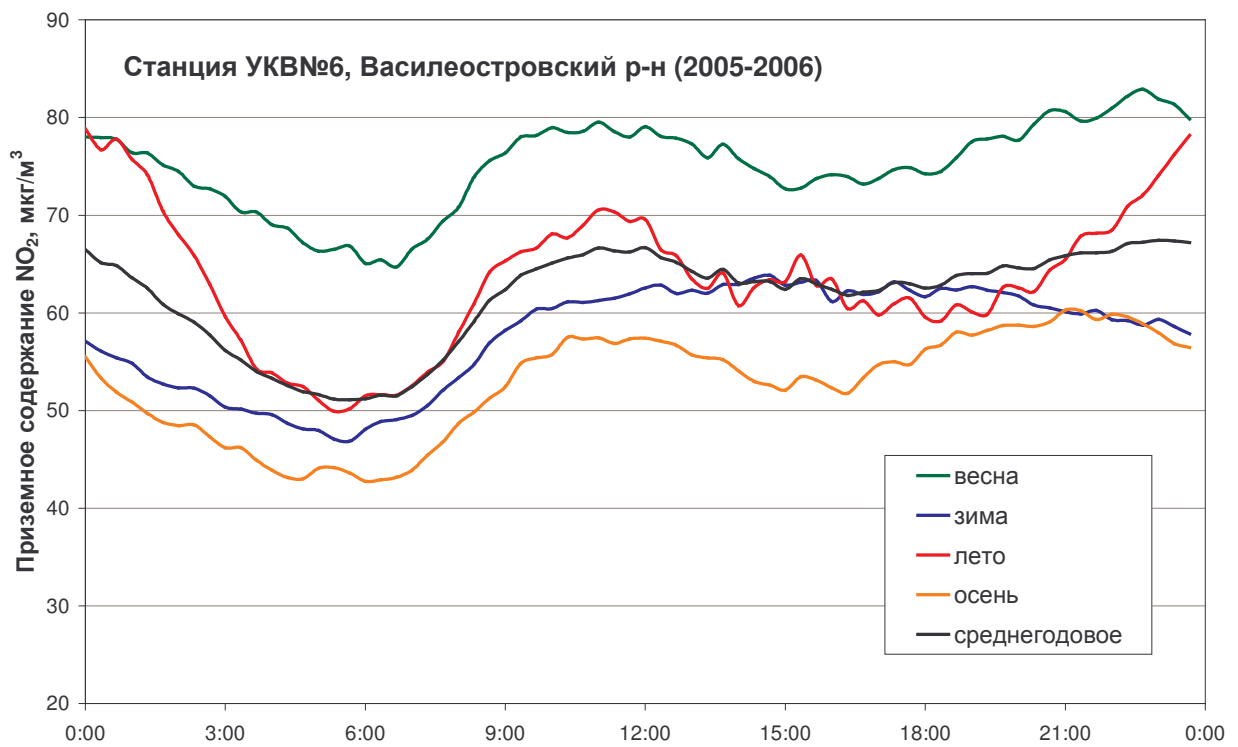
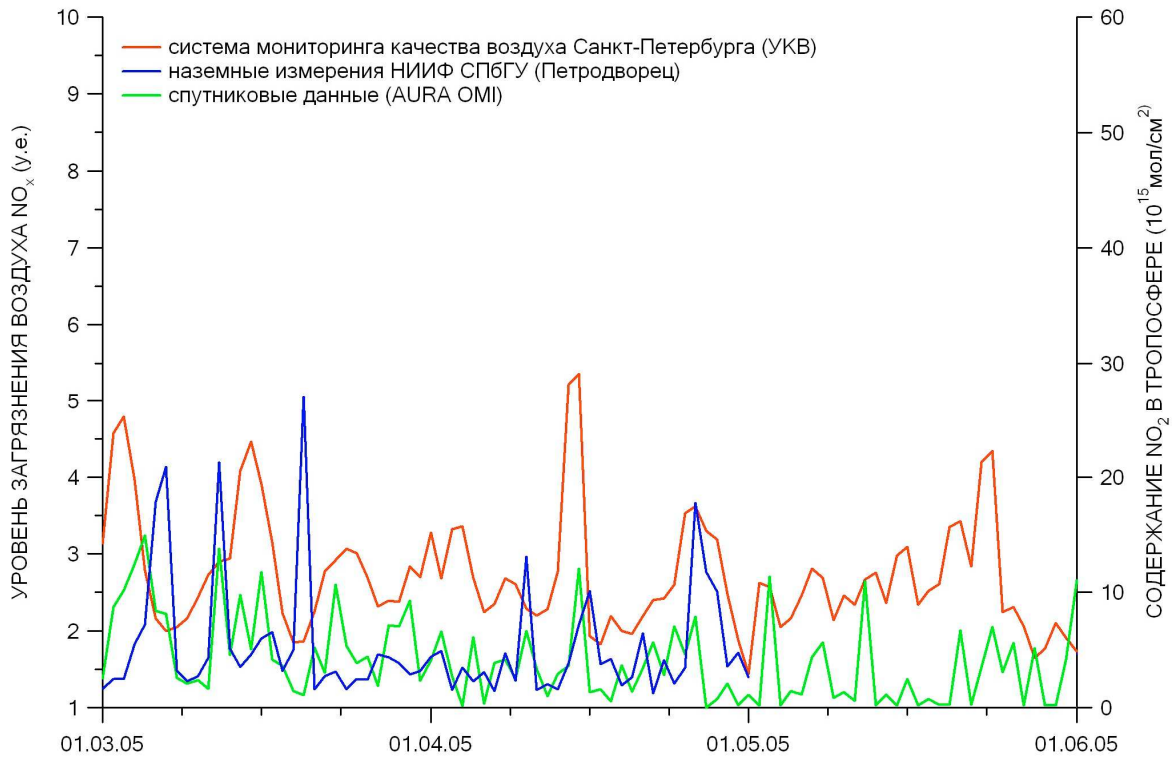
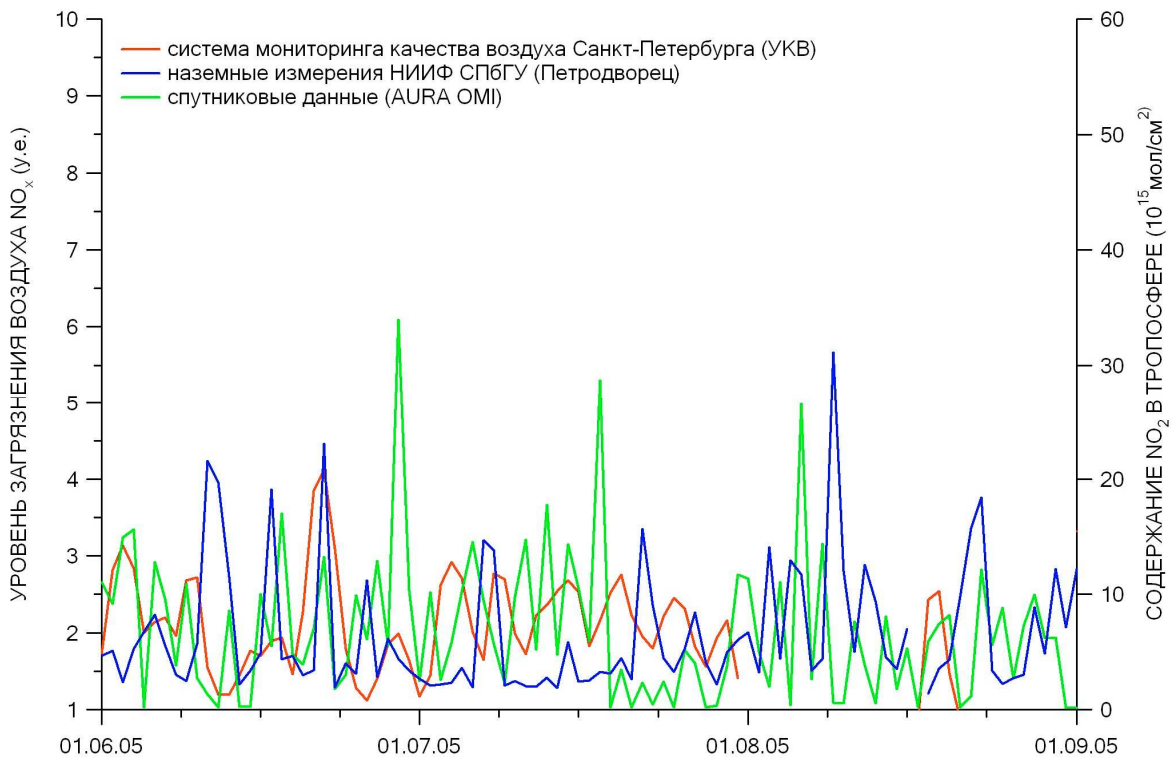


Рисунок 2.10

Суточный ход средней приземной концентрации NO_2 по данным измерений Системы УКВ на станции №6.



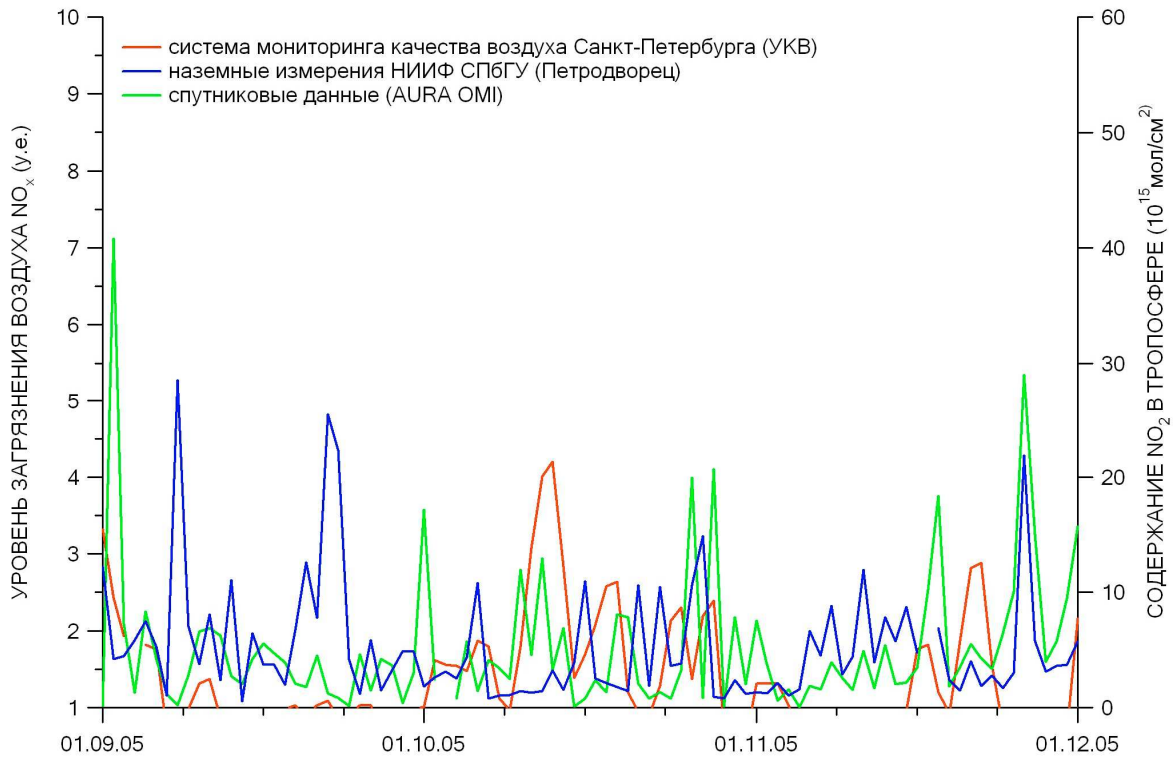
а)



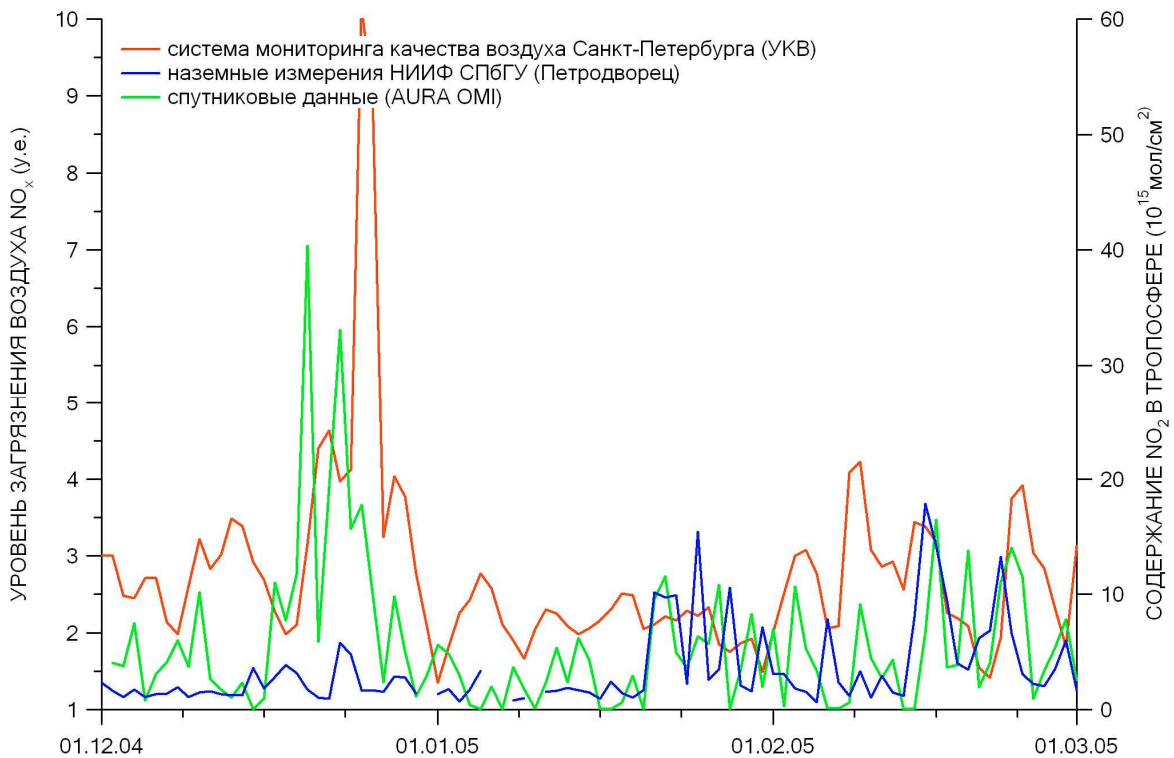
б)

Рисунок 2.11

Сопоставление данных УКВ о приземных концентрациях NO_x (все станции) с результатами наземных (НИИФ СПбГУ) и спутниковых (AURA OMI) измерений содержания NO₂ в 2005 году (а - весна, б - лето).



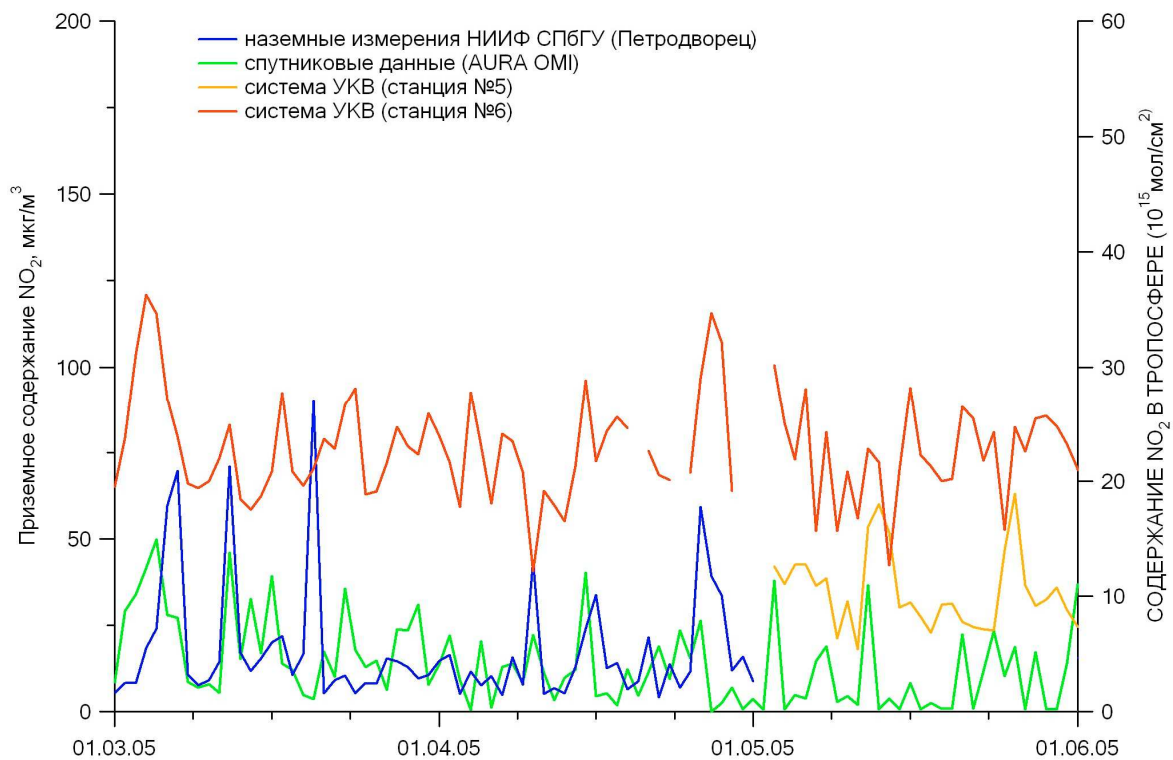
а)



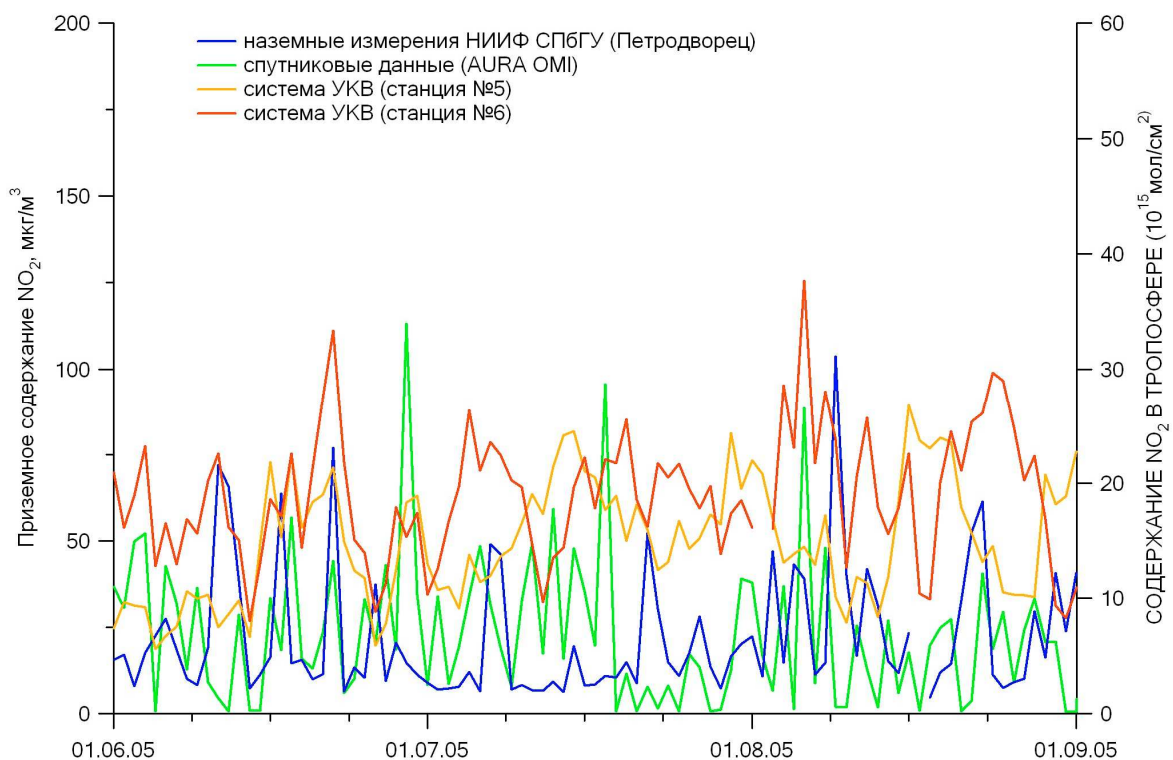
б)

Рисунок 2.12

Сопоставление данных УКВ о приземных концентрациях NO_x (все станции) с результатами наземных (НИИФ СПбГУ) и спутниковых (AURA OMI) измерений содержания NO₂ в 2005 году (а - осень, б - зима).



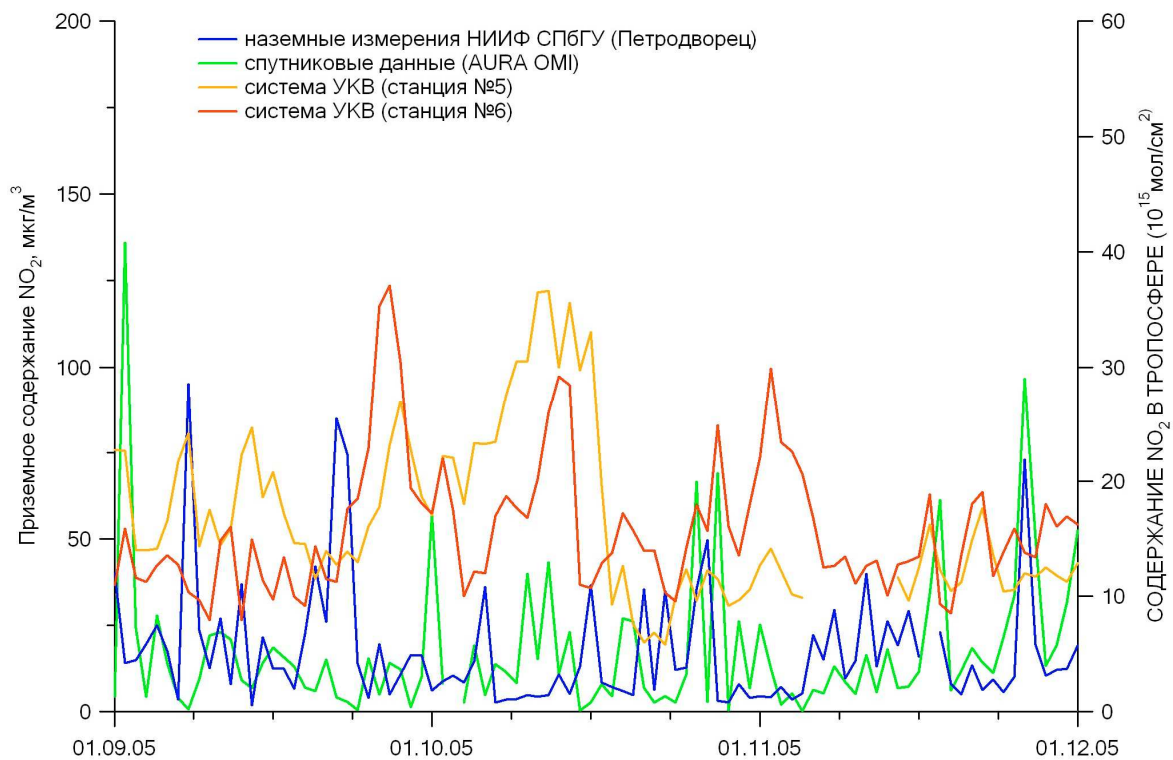
а)



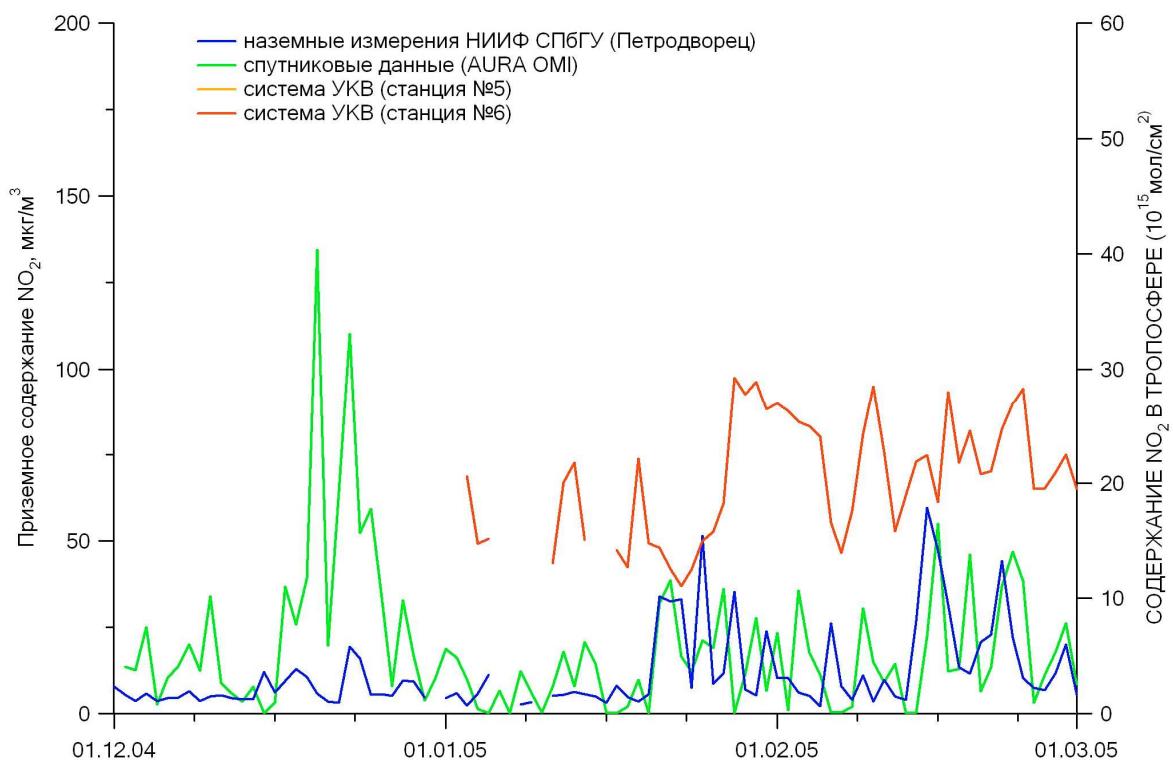
б)

Рисунок 2.13

Сопоставление данных УКВ о приземных среднесуточных концентрациях NO_2 (станции №5 и №6) с результатами наземных (НИИФ СПбГУ) и спутниковых (AURA OMI) измерений содержания NO_2 в 2005 году (а - весна, б - лето).



а)



б)

Рисунок 2.14

Сопоставление данных УКВ о приземных среднесуточных концентрациях NO₂ (станции №5 и №6) с результатами наземных (НИИФ СПбГУ) и спутниковых (AURA OMI) измерений содержания NO₂ в 2005 году (а - осень, б - зима).

3. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ NO₂ В ТРОПОСФЕРЕ БАЛТИЙСКОГО РЕГИОНА – АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И ОЦЕНКА ВРЕМЕННОГО ТРЕНДА ДЛЯ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНА РОССИИ

Оценки регионального пространственного распределения тропосферного содержания NO₂ были ранее получены нами на основе анализа многолетних данных GOME об ОС NO₂ [12]. Поскольку данные оперативной обработки результатов измерений спутниковой аппаратуры GOME представляют собой величину общего содержания NO₂ во всем вертикальном столбе атмосферы, для получения из них информации о поле содержания NO₂ отдельно в тропосфере требуется их специальная интерпретация. Один из возможных подходов заключается в использовании данных GOME об ОС NO₂ в атмосфере удаленных районов мирового океана для оценки стратосферной составляющей NO₂ в величине общего содержания. Согласно анализу карт глобальных распределений ОС NO₂, поле содержания ОС NO₂ в этих районах имеет зональную структуру и характеризуется, как правило, минимальным для данной широты значением. Вычитая это значение из каждой строки исходной карты среднемесячного поля ОС NO₂, можно получить приближенную оценку тропосферного содержания NO₂, и его пространственное распределение. В настоящей работе мы расширили этот анализ на весь массив измерений GOME в 1995-2006 гг., используя данные последней версии обработки, 4.0. Пример такой оценки в виде карты среднегодового распределения NO₂ в тропосфере Балтийского региона (северная Европа и север-запад России), представлен на рисунке 3.1. Как видно из рисунка, основной особенностью поля тропосферного NO₂ на исследуемой территории является повышенное содержание в юго-западной части региона (Бельгия и Голландия), а также локальный максимум содержания NO₂

в тропосфере района Москвы (Россия). Тропосферное содержание NO_2 в районе Санкт-Петербурга, по сравнению с другими густонаселенными регионами, незначительно.

Однако, из данных индивидуальных наземных и спутниковых измерений мы видим, что вклад тропосферного загрязнения в величину ОС NO_2 над Санкт-Петербургом в отдельные дни может быть заметен (см. 1 и 2). Помимо многолетнего ансамбля данных спутниковых измерений аппаратурой GOME, накоплен уже достаточный объем измерений аналогичным прибором SCIAMACHY, позволяющим картировать поле ОС NO_2 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 NO_2 отдельно в тропосфере. Пример карты среднегодовых распределений содержания NO_2 в тропосфере Балтийского региона в 2003-2005 гг. представлен на рисунках 3.2-4 (карты получены по данным интерпретации измерений SCIAMACHY в Институте Космической Аэронавтики (Бельгия) и результатам ассимиляции в Королевском Национальном Институте Нидерландов). Как видно, данные SCIAMACHY предоставляют более детальное, по сравнению с данными GOME (рисунок 3.1), распределение тропосферного NO_2 , выделяя в европейской части России такие основные источники, как мегаполисы Москвы и Санкт-Петербурга, а также Великого Новгорода (рисунок 3.3).

Кроме того, на рисунке 3.5 представлены карты среднегодовых распределений тропосферного NO_2 по данным GOME с 1997 по 2005 гг. Видно, что от года к году пространственное распределение NO_2 в тропосфере российской части региона меняется незначительно. На

рисунке 3.6 представлены также среднемесячные карты тропосферного NO_2 , осредненные по всем данным GOME с 1995 по 2006 гг. Можно отметить относительно высокие содержания тропосферного NO_2 в районе мегаполисов Москвы и Санкт-Петербурга в конце зимы – начале весны (февраль-апрель). Действительно, если рассмотреть отдельно среднемесячные значения тропосферного NO_2 , выделенные из полученных карт для этих двух регионов, то сезонный ход для них оказывается одинаковым, характеризуясь лишь более высокими, по сравнению с Санкт-Петербургом, значениями в районе мегаполиса Москвы (рисунок 3.7). При этом максимальные содержания NO_2 в тропосфере наблюдаются в феврале, марте и апреле. Мы рассмотрели средние для зимнего-весеннего сезона значения тропосферного NO_2 в районе обоих городов для всего периода спутниковых наблюдений GOME, с целью выявления возможного временного тренда. Результаты этого анализа представлены на рисунке 3.8. Хотя имеющийся на сегодняшний день ряд непрерывных спутниковых измерений недостаточно продолжителен для достоверных оценок, в этих данных присутствует заметный положительный тренд, составляющий порядка 30% за 10 лет, для обоих регионов.

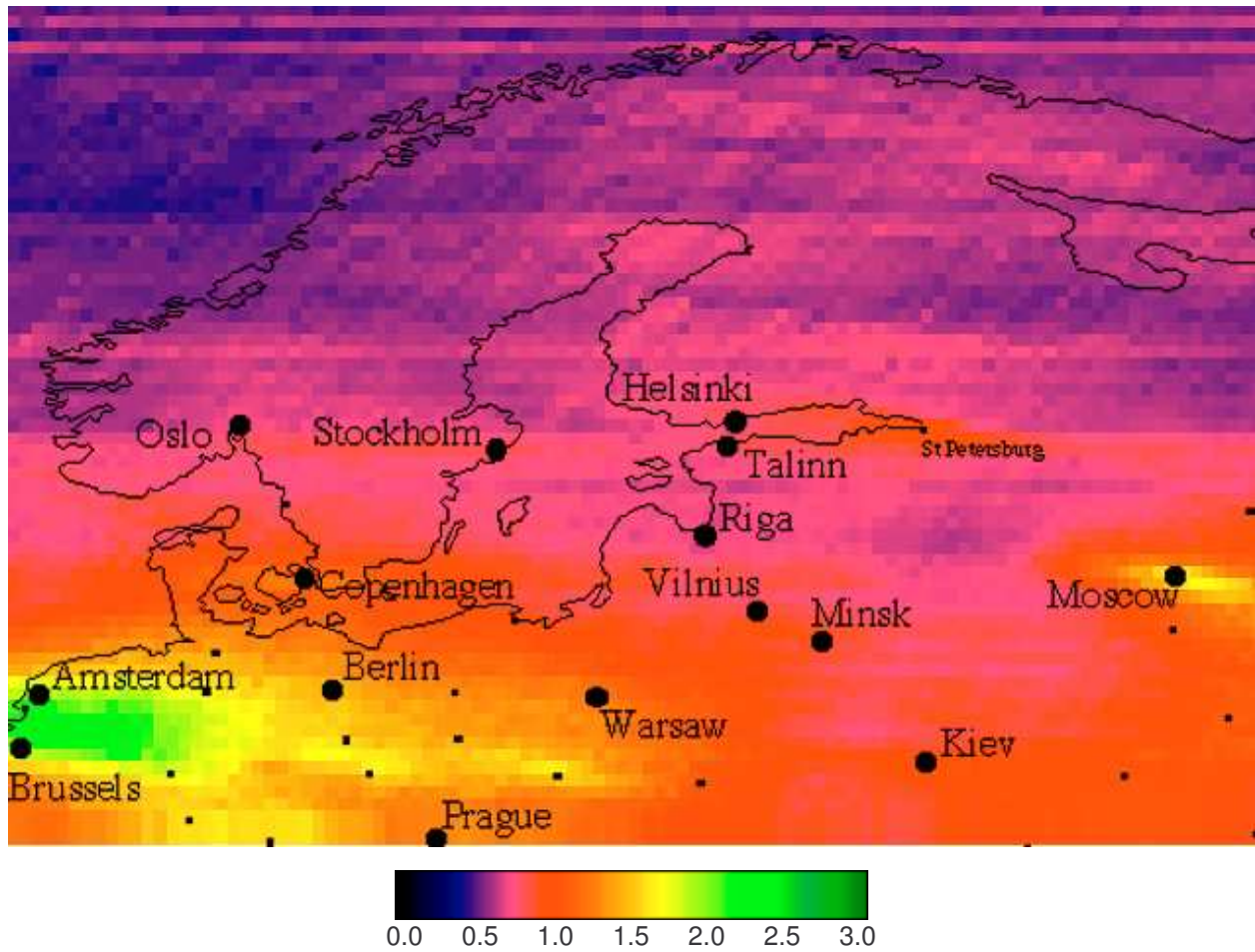


Рисунок 3.1

Среднегодовое распределение содержания NO_2 в тропосфере Балтийского региона по данным спутниковых измерений GOME (GDP4.0) в 1995-2006 гг.

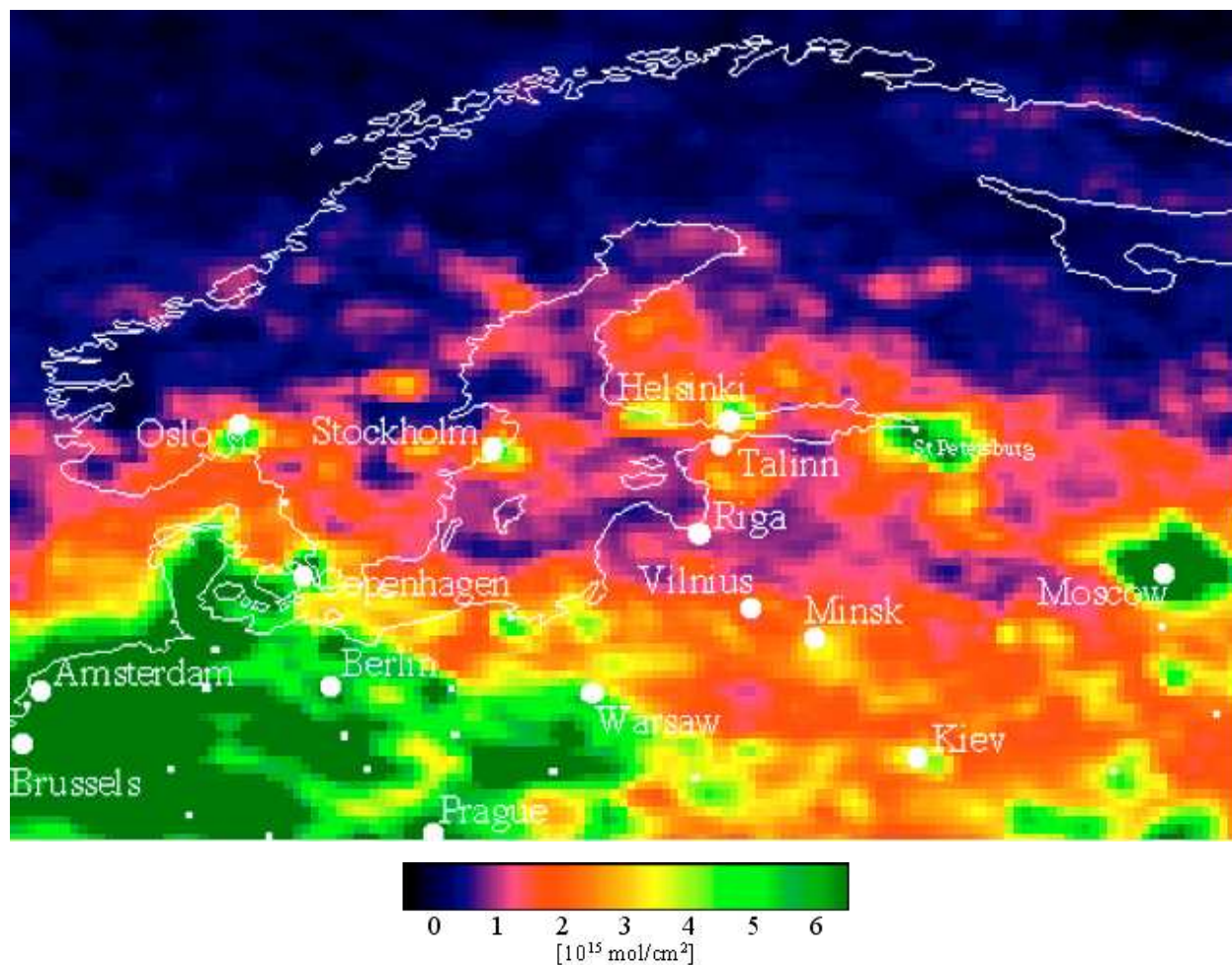


Рисунок 3.2

Среднегодовое распределение содержания NO₂ в тропосфере Балтийского региона по данным спутниковых измерений SCIAMACHY в 2003 г. (данные KNMI/IASB, <http://www.temis.nl>)

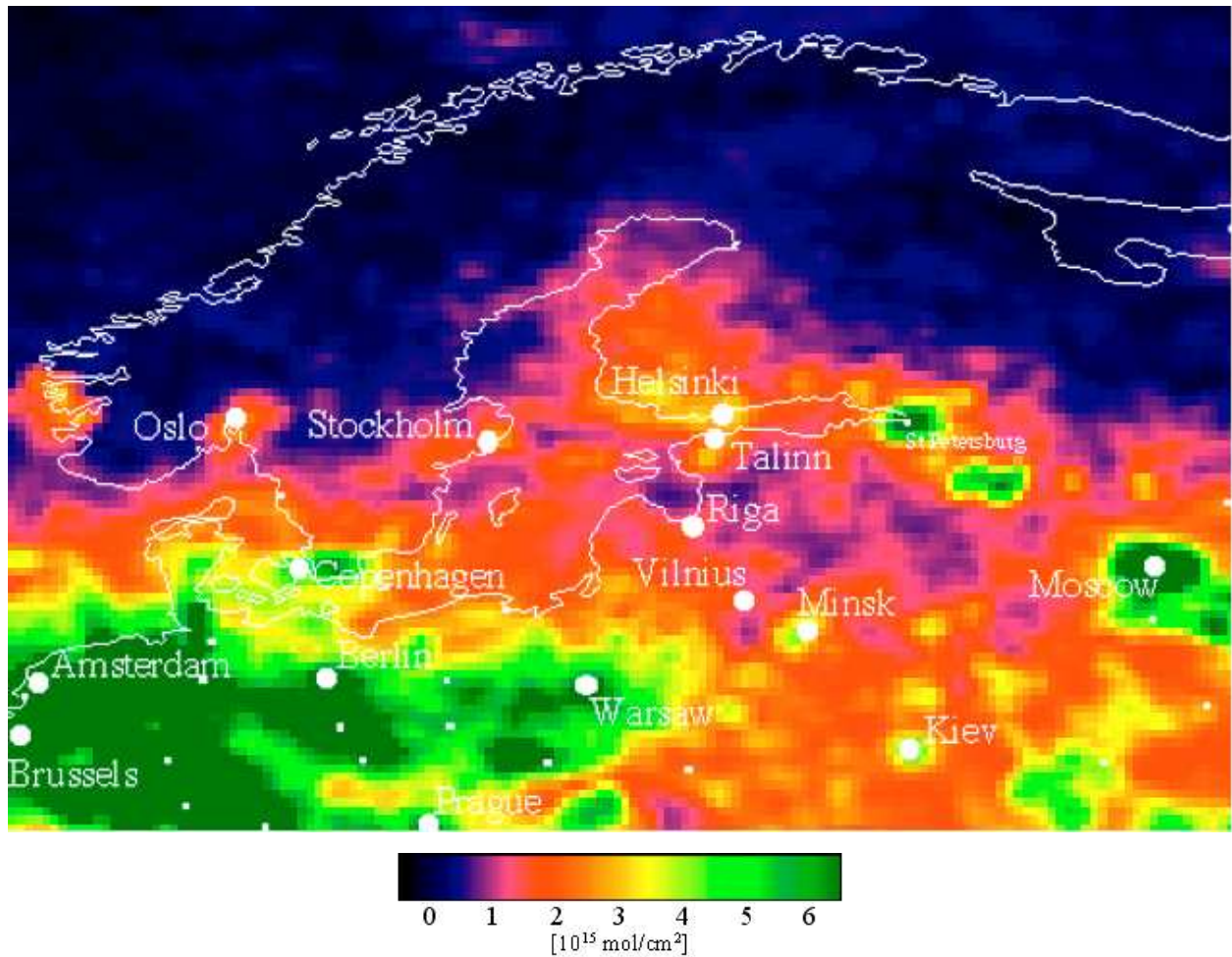


Рисунок 3.3

Среднегодовое распределение содержания NO_2 в тропосфере Балтийского региона по данным спутниковых измерений SCIAMACHY в 2004 г. (данные KNMI/IASB, <http://www.temis.nl>)

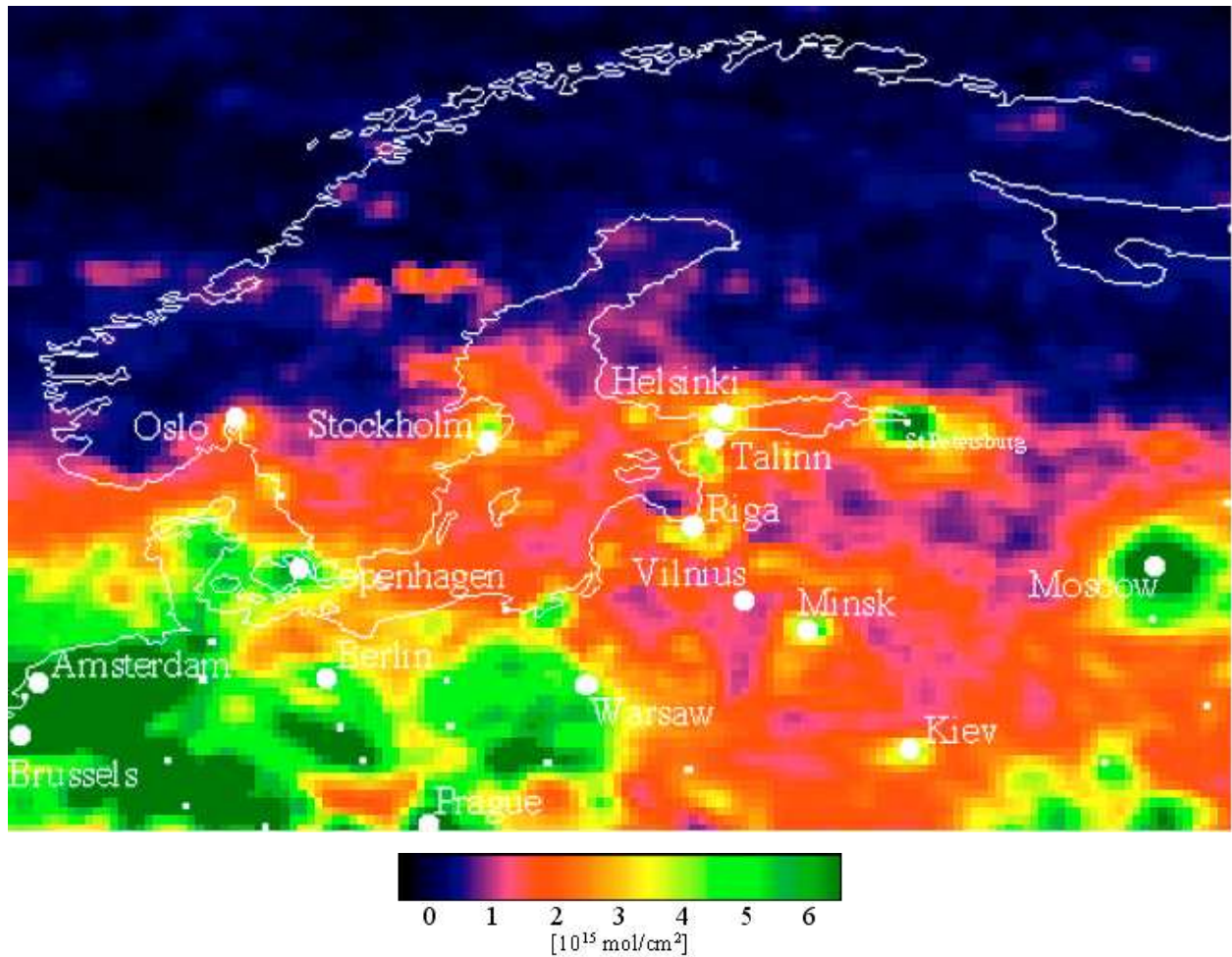


Рисунок 3.4

Среднегодовое распределение содержания NO₂ в тропосфере Балтийского региона по данным спутниковых измерений SCIAMACHY в 2005 г. (данные KNMI/IASB, <http://www.temis.nl>)

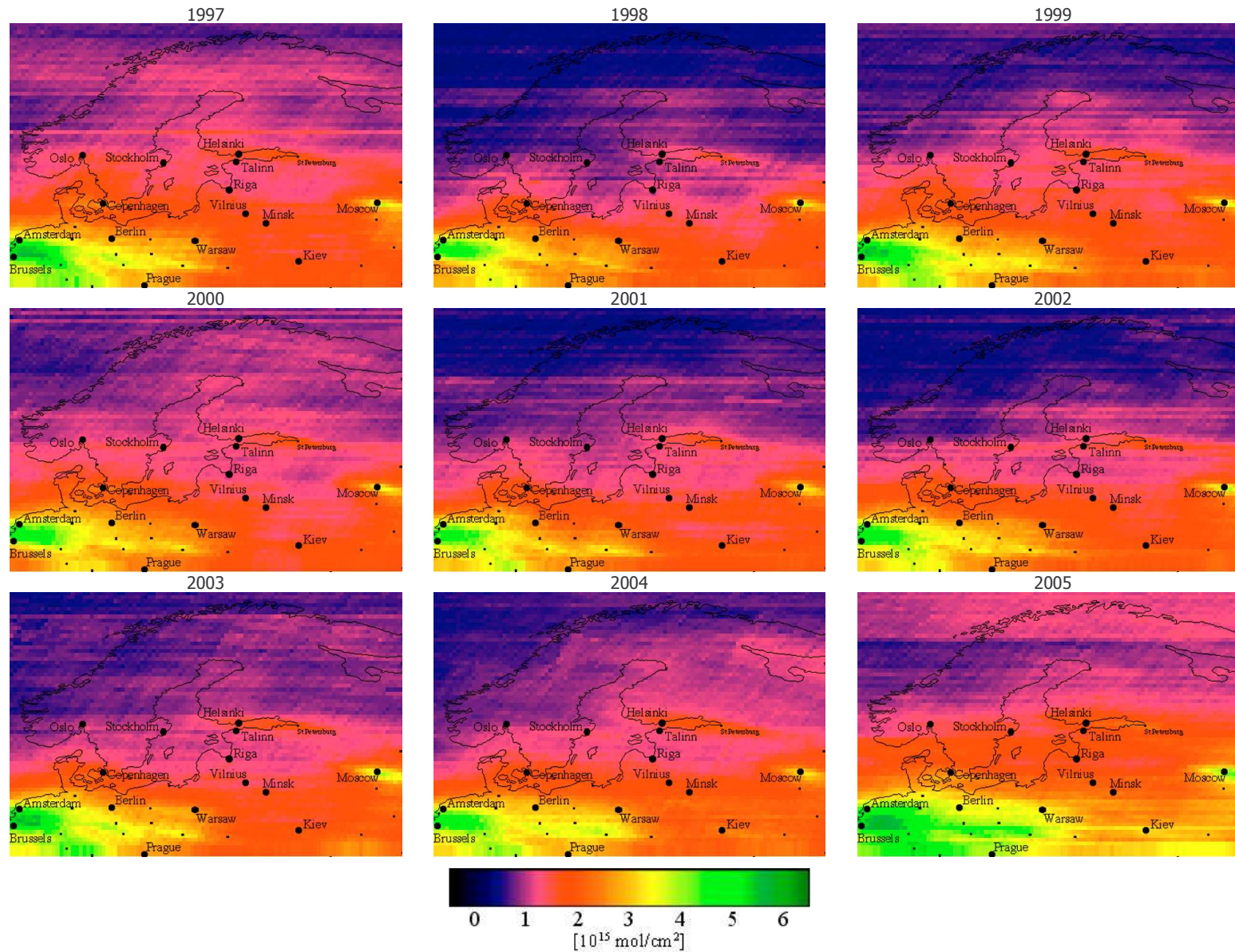


Рисунок 3.5

Среднегодовые распределения содержания NO_2 в тропосфере Балтийского региона по данным спутниковых измерений GOME (GDP4.0) в 1997-2005 гг.

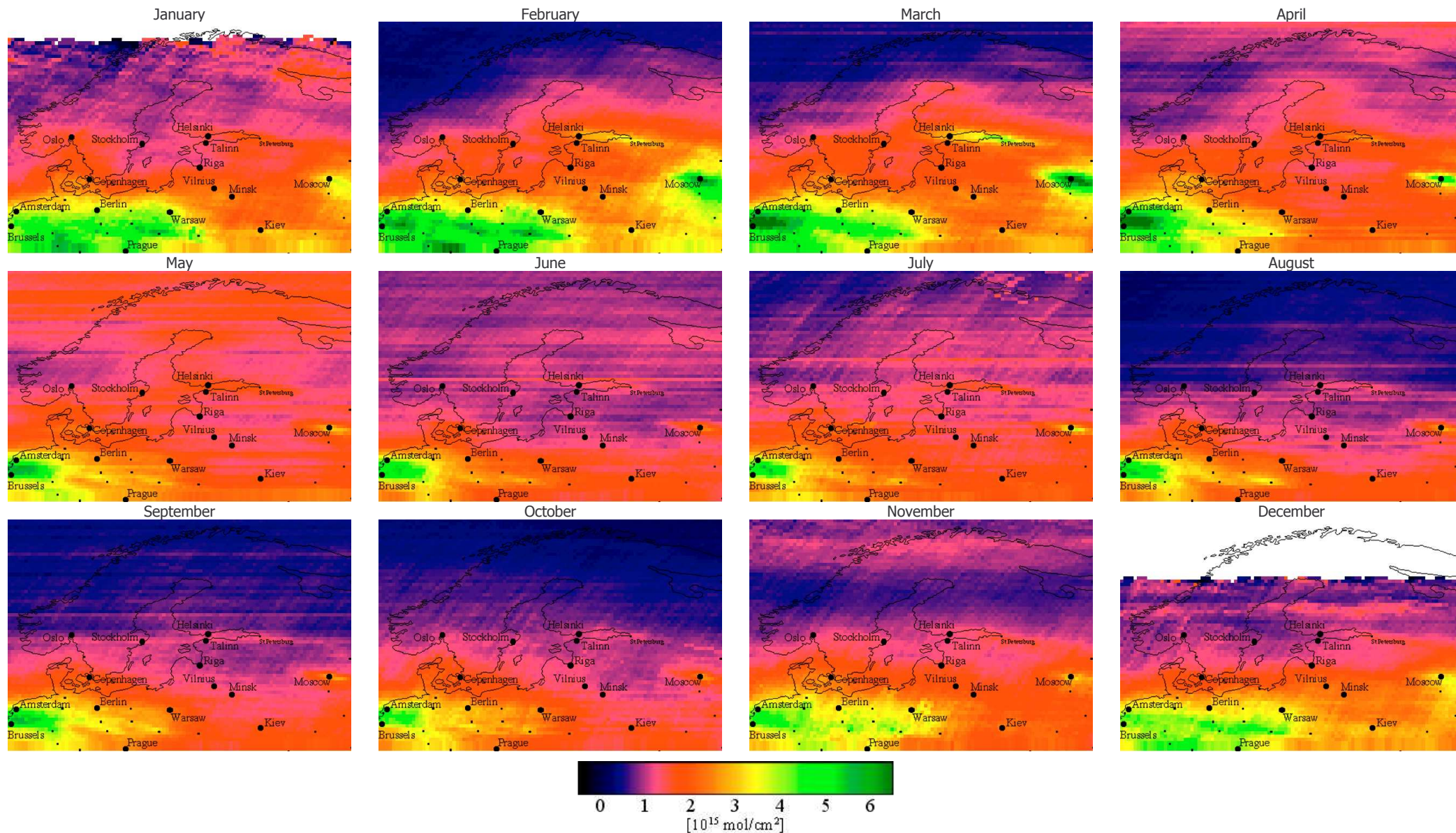


Рисунок 3.6 Среднемесячные распределения содержания NO₂ в тропосфере Балтийского региона по данным спутниковых измерений GOME (GDP4.0) в 1995-2006 гг.

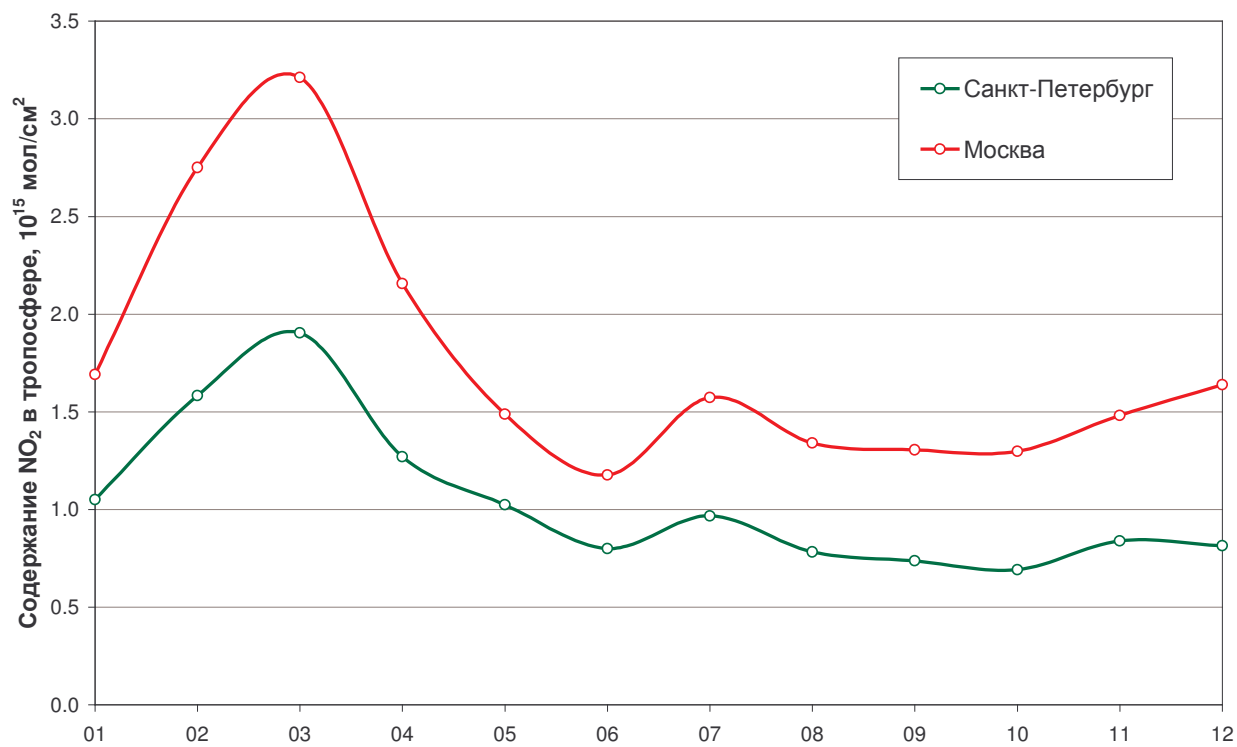


Рисунок 3.7

Сезонный ход содержания NO_2 в тропосфере регионов Москвы и Санкт-Петербурга по данным спутниковых измерений GOME (GDP4.0) в 1995-2006 гг.

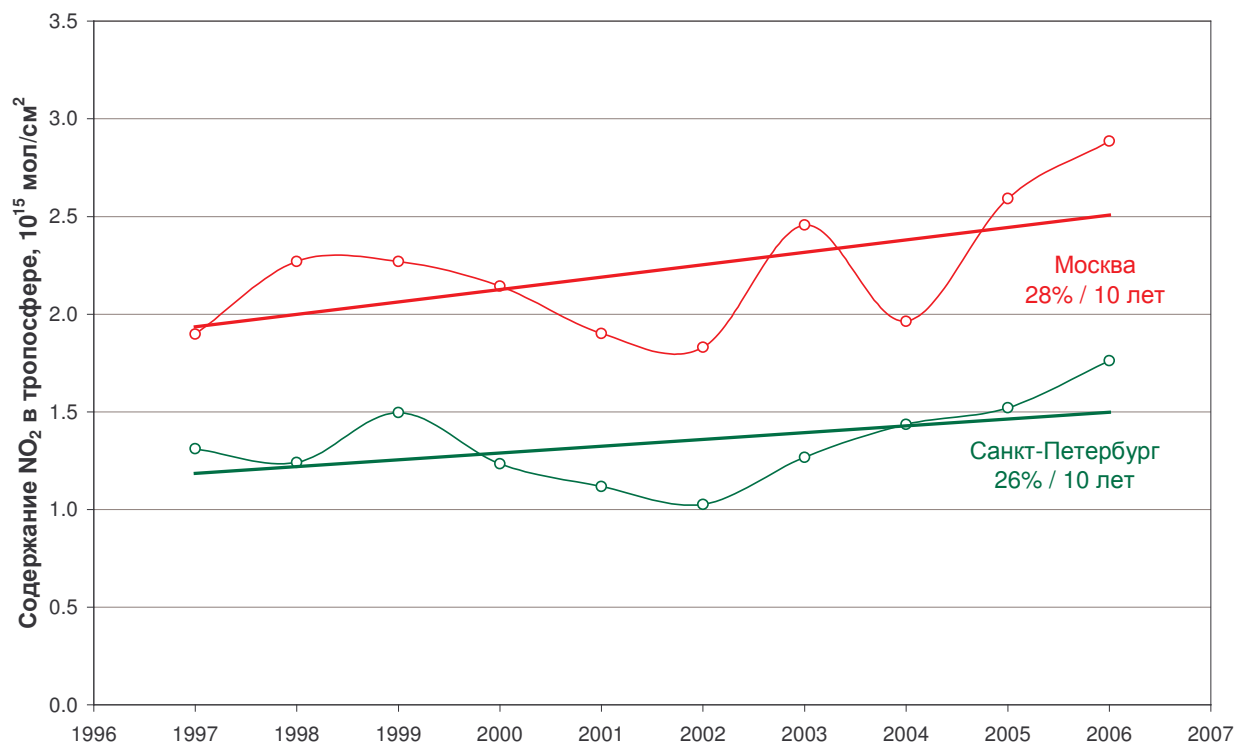


Рисунок 3.8

Оценка линейного тренда содержания NO₂ в тропосфере регионов Москвы и Санкт-Петербурга по данным спутниковых измерений GOME (GDP4.0) в 1995-2006 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 2003-2006 гг. Получены оценки вариаций содержания NO_2 в тропосфере Санкт-Петербурга, 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 (Автоматизированная система контроля и управления качеством 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. Рассмотрены примеры совместной регистрации сильных антропогенных загрязнений атмосферы спутниковой и наземной аппаратурой (январь 2006 года). Выполнено картирование пространственных распределений содержания NO_2 в тропосфере Северо-западного региона на основе результатов измерений последней версии обработки данных спутниковой аппаратуры GOME в 1995-2006 гг. Проанализирован многолетний ряд спутниковых наблюдений содержания NO_2 в тропосфере Северо-западного региона в 1995-2006 гг. Выявлен сезонный ход тропосферного содержания NO_2 в районе Санкт-Петербурга, характеризующийся повышенными значениями в конце зимы – начале весны (февраль-апрель). Получена приближенная оценка положительного линейного тренда тропосферного NO_2 , составляющая 26% за 10 лет.

Проведенные исследования важны для реализации практического использования оперативных данных современной спутниковой аппаратуры по мониторингу атмосферы в задаче регионального контроля состояния окружающей среды и оценки негативного влияния антропогенного загрязнения атмосферы. Содержание двуокиси азота (NO_2) в тропосфере в значительной мере обусловлено хозяйственной деятельностью человека и может служить одним из индикаторов антропогенного воздействия на окружающую среду. Использование оперативных данных действующих спутниковых экспериментов (GOME, SCIAMACHY) позволяет эффективно оценивать масштаб антропогенного выброса окислов азота мегаполисом Санкт-Петербурга в атмосферу Северо-западного региона России. Эта информация может быть в дальнейшем использована для общего анализа сложившейся экологической обстановки в регионе и прогноза ее дальнейшего развития с учетом экономического роста Санкт-Петербурга (промышленность, транспорт и т.д.). Результаты проведенного исследования могут дополнить систему государственного мониторинга окружающей среды при Комитете по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности (Администрация Санкт-Петербурга), а его результаты – способствовать обеспечению полноты и общедоступности информации о состоянии окружающей среды Санкт-Петербурга и Ленинградской области. В частности, данные о содержании NO_2 в тропосфере и его долговременных вариациях могут войти в геоинформационную систему (ГИС) Комитета, в дополнение к действующей автоматизированной системе контроля и управления качеством атмосферного воздуха Санкт-Петербурга (УКВ).

По результатам проведенных исследований подготовлен настоящий научно-технический отчет, сделано 7 сообщений на 5 международных конференциях [13-20].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *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.
2. *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.
3. *Ahmad S.P., Levelt P.F., Bhartia P.K., Hilsenrath E., Leppelmeier G.W., Johnson J.E.* Atmospheric Products from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) // SPIE conference on Earth Observing Systems VIII, San Diego, California, Aug 3-8, 2003.
4. *Callies J., Corpaccioli E., Eisinger M., Lefebvre A., Hahne A., Munro R., Perez-Albinana A.* Ozone monitoring by GOME-2 on the MetOp satellites // XVIII Quadriennial Ozone Symposium, l'Aquila, 12-21 September 1996, 1998.
5. *Richter A., Burrows J.P., Hendrik N., Granier C. and Niemeier U.* Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space // *Nature.* V.437. p.129-132. 2005 (doi: 10.1038/nature04092).
6. *Шашкин А.В., Поберовский А.В.* Спектрометрические наземные измерения общих содержаний NO₂ и O₃ // *Материалы конференции: Международный Симпозиум стран СНГ "Атмосферная Радиация", 22-25 июня 2004, Санкт-Петербург.*
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 Stratospheric 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., Макарова М.В., Поберовский А.В., Елохов А.С., Груздев А.Н., Джола А.В., Гречко Е.И., Кашин Ф.В., Арефьев В.Н.* Региональное картирование содержаний двуокиси азота, метана и окиси углерода в атмосфере по данным спутникового зондирования // *Материалы конференции: Международный Симпозиум стран СНГ "Атмосферная Радиация", 22-25 июня 2004, Санкт-Петербург, с.112-113*
13. *Ionov D.V., Sinyakov V.P., Semenov V.K.* Validation of GOME (ERS-2) NO₂ vertical column data with ground-based measurements at Issyk-Kul (Kyrgyzstan) // *Adv. Space Res.*, 37, 2254-2260, 2006.
14. *Ionov D., Goutail F., Pommereau J.-P.* Validation of satellite data on total NO₂: GOME, SCIAMACHY and OMI nadir viewing instruments

- compared to UV-visible SAOZ network // Proc. of 3rd International DOAS Workshop, Bremen, 20-22 March, 2006.
15. *Goutail F., Ionov D., Borchi F., Bazureau A.* NO₂ pollution monitoring above the city of Paris using SAOZ measurements // Proc. of 3rd International DOAS Workshop, Bremen, 20-22 March, 2006.
 16. *Ionov D., Timofeyev Y., Poberovsky A., Shalamyansky A., Semenov V., Sinyakov V.* Validation of satellite total ozone and NO₂ data by ERS-2 GOME, ENVISAT SCIAMACHY and AURA OMI with ground-based UV-Visible measurements over Russia and NIS // EGU General Assembly 2006, Vienna, Austria, 2-7 April 2006, Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 09502, 2006.
 17. *Ionov D., Goutail F., Pommereau J.-P., Bazureau A., Kyro E., Portafaix T., Held G., Ericksen P., Dorokhov V.* Ten years of NO₂ comparisons between ground-based SAOZ and satellite instruments (GOME, SCIAMACHY, OMI) // Atmospheric Science Conference, ESRIN, Frascati, Italy, 8-12 May 2006.
 18. *Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М., Шаламянский А.М., Гутайл Ф., Поммеро Ж.-П., Сняжков В.П., Семенов В.К.* Спутниковые измерения общего содержания озона и NO₂ аппаратурой OMI (спутник AURA): оценки точности на основе сопоставлений с данными наземных измерений // Материалы конференции: Международный Симпозиум стран СНГ "Атмосферная Радиация", 27-30 июня 2006, Санкт-Петербург, с.86-87
 19. *Ионов Д.В., Поберовский А.В., Гончаров С.* Вариации содержания NO₂ в тропосфере по данным одновременных спутниковых и наземных измерений в районе Санкт-Петербурга // Материалы конференции: Международный Симпозиум стран СНГ "Атмосферная Радиация", 27-30 июня 2006, Санкт-Петербург, с.123-124

20. *Ionov D., Timofeyev Y., Goutail F., Pommereau J.-P., Shalamyansky A.*
Delta-validation of ENVISAT SCIAMACHY total ozone and NO₂ with the
data of ground-based UV-VIS measurements (M-124 and SAOZ) //
Proc. of 3rd Workshop on the Atmospheric Chemistry Validation of
Envisat (ACVE-3), ESRIN, Italy, 4-7 December 2006, ESA SP-642,
2006.