

**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.)

"\_\_" \_\_\_\_\_ 2007 г.

М.П.

## **Научный отчет**

по гранту Президента Российской Федерации  
для государственной поддержки молодых российских ученых –  
кандидатов наук и их руководителей  
за счет средств федерального бюджета

по договору № **02.120.11.5390** от "**20**" апреля **2006**

«Анализ антропогенно обусловленных вариаций содержания двуокиси азота (NO<sub>2</sub>) в тропосфере Северо-западного региона России»

Шифр гранта: МК-5390.2006.5

Исполнитель гранта  
к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ (Ионов Д.В.)

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

\_\_\_\_\_ (Тимофеев Ю.М.)

**Санкт-Петербург  
2007**

## РЕФЕРАТ

Отчет о выполненной работе гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук и их руководителей за счет средств федерального бюджета, с.51, рис.20, табл. нет, источников 21, 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 двуокиси азота ( $\text{NO}_2$ ) в атмосфере, данные регулярных прямых измерений приземных концентраций  $\text{NO}_2$  в атмосфере Санкт-Петербурга.

### **Цель работы:**

Исследование суточных, недельных, сезонных и долговременных многолетних вариаций содержания двуокиси азота ( $\text{NO}_2$ ) в тропосфере Северо-западного региона России, с оценкой возможного тренда, обусловленного ростом промышленного загрязнения мегаполиса Санкт-Петербурга.

### **Новизна:**

Проинтерпретированы данные наземных наблюдений за содержанием  $\text{NO}_2$  в атмосфере в Санкт-Петербурге в 2004-2007 гг. Получены оценки вариаций содержания  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  Автоматизированной системой мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга. На основе данных многолетних спутниковых измерений GOME (1995-2007) получена уточненная оценка положительного линейного тренда тропосферного  $\text{NO}_2$  в районе Санкт-Петербурга, составляющая 18% 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	03
ВВЕДЕНИЕ	04
1. НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА СОДЕРЖАНИЕМ NO <sub>2</sub> В АТМОСФЕРЕ РАЙОНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В 2004-2007 ГГ.	07
2. ВАЛИДАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ О СОДЕРЖАНИИ NO <sub>2</sub> НА ОСНОВЕ СОПОСТАЛЕНИЙ С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ	12
3. ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ NO <sub>2</sub> В ТРОПОСФЕРЕ РАЙОНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ПО ДИСТАНЦИОННОМУ ЗОНДИРОВАНИЮ, И ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ NO <sub>2</sub> В ПРИЗЕМНОМ ВОЗДУХЕ	18
3.1 Недельный цикл содержания NO <sub>2</sub> в атмосфере Санкт-Петербурга	19
3.2 Сопоставление данных одновременных спутниковых и наземных измерений содержания NO <sub>2</sub> в атмосфере Санкт-Петербурга	33
4. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ NO <sub>2</sub> В ТРОПОСФЕРЕ БАЛТИЙСКОГО РЕГИОНА – АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И ОЦЕНКА ВРЕМЕННОГО ТРЕНДА ДЛЯ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНА РОССИИ	37
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	43
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	47

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

ОС - общее содержание

УФ - ультрафиолет

ИК - инфракрасный

БИК - ближний ИК

ERS-2 - 2<sup>nd</sup> 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 Climate 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 ( $\text{NO}_2$ ) – одна из ключевых газовых компонент в атмосферной химии. В стратосфере  $\text{NO}_2$  участвует в цикле реакций по разрушению атмосферного озона, тогда как в тропосфере фотолиз  $\text{NO}_2$  приводит к образованию  $\text{O}_3$ . Важно отметить, что повышенное содержание  $\text{NO}_2$  в приземном слое представляет прямую угрозу человеку и окружающей среде, вызывая образование фотохимического смога и кислотных дождей. При этом, до 70% выбросов  $\text{NO}_2$  в тропосферу обусловлено сжиганием топлива автомобилями и промышленными установками. Антропогенный вклад в содержание  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  в качестве индикатора антропогенного загрязнения.

Информация о глобальном распределении  $\text{NO}_2$  поступает со спутниковых систем измерений, установленных на околополярных солнечно-синхронных орбитах. 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  $\text{NO}_2$ . Позднее, в 2002 году был запущен аналогичный по геометрии и принципу измерений ОС  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$ .

Наконец, в октябре 2006 года состоялся запуск европейского спутника EPS-MetOp, на котором будет функционировать аналог аппаратуры GOME – GOME-2 [4].

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<sub>2</sub> (начиная с 1995 года) позволяет уже оценивать его долговременные изменения. Так, в работе [5] отмечены существенные сокращения антропогенных выбросов NO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> - 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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  $\text{NO}_2$  в районе Санкт-Петербурга (1995-2007), приведены оценки недельного цикла вариаций  $\text{NO}_2$  вблизи мегаполиса Санкт-Петербурга по имеющимся данным наблюдений, рассмотрены примеры регистрации сильных антропогенных загрязнений спутниковой и наземной аппаратурой, выполнено долговременное картирование поля содержания  $\text{NO}_2$  в тропосфере всего Балтийского региона, получены оценки соответствующего временного тренда содержания  $\text{NO}_2$  для Северо-западного региона. В проведенном анализе были также использованы данные прямых измерений концентраций  $\text{NO}_2$  на станциях Автоматизированной системы мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга.

## **1. НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ОБЩИМ СОДЕРЖАНИЕМ NO<sub>2</sub> В АТМОСФЕРЕ РАЙОНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В 2004-2007 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 NO<sub>2</sub> 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 (O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>4</sub>), после вычета плавно меняющихся компонент ослабления – альbedo поверхности, молекулярного и аэрозольного рассеяния и др. – описываемых полиномом. На первом этапе методом наименьших квадратов определяется содержание NO<sub>2</sub> 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 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 измерений в период с января 2004 по сентябрь 2007 года, обработанные по единому алгоритму. С начала 2004 года измерения ОС  $\text{NO}_2$  ведутся практически непрерывно. Учитывая, что регистрация спектров рассеянного солнечного излучения осуществляется не только в период сумерек, но в течение всего светового дня, в результате этих наблюдений накоплен большой объем спектроскопической информации. В среднем, в зависимости от продолжительности дня, количество регистрируемых за сутки спектров составляет от 400 до 1200, а их общее число составило около 221, 205 и 225 тысяч за 2004, 2005 и 2006 годы, соответственно.

На рисунке 1.1a представлен весь ряд наземных сумеречных измерений ОС  $\text{NO}_2$  в 2004-2007 гг. – осредненные для каждого дня наблюдений значения ОС  $\text{NO}_2$  на восходе и заходе солнца. Для сравнения на том же рисунке приведены среднемесячные значения ОС  $\text{NO}_2$ , полученные на основе аналогичных измерений за тот же период на станции Harestua, Норвегия ( $60.22^\circ$  с.ш.,  $10.75^\circ$  в.д.). Видно, что наблюдаемый в результатах наземных измерений сезонный ход  $\text{NO}_2$  соответствует климатическим данным, характеризуясь максимальным содержанием в летнее время, что обусловлено продолжительностью светового дня. Вместе с тем, в отличие от данных норвежских наблюдений, результаты измерений в Санкт-Петербурге характеризуются большим количеством повышенных значений, заметных на фоне относительно плавного годового хода ОС  $\text{NO}_2$ . Это объясняется величиной вклада антропогенного загрязнения тропосферы в ОС  $\text{NO}_2$ , который оказывается существенно более значимым для наблюдений НИИФ СПбГУ в районе Санкт-Петербурга (население 4.6 млн. человек), по сравнению с аналогичными

измерениями на станции Harestua, где ближайший источник загрязнений – столица Норвегии, Осло (население 0.6 млн. человек). Так, по результатам спутникового картирования содержания  $\text{NO}_2$  в тропосфере Балтийского региона, представленного на рис. 1.2, среднегодовое содержание в 2003-2006 гг. составило  $1.06 \cdot 10^{16}$  мол/см<sup>2</sup> в Санкт-Петербурге и  $0.47 \cdot 10^{16}$  мол/см<sup>2</sup> в Осло (карта построена на основе данных совместной интерпретации измерений SCIAMACHY в Бельгийском Институте Космической Аэронауки и Королевском Национальном Институте Нидерландов, <http://www.temis.nl/>).

На рисунке 1.16 представлены результаты измерений ОС  $\text{NO}_2$ , 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  $\text{NO}_2$  в тропосфере. Полученные таким образом данные характеризуется значительно более высокими, по сравнению с сумеречными измерениями, величинами содержания  $\text{NO}_2$  (до  $5 \cdot 10^{16}$  мол/см<sup>2</sup>). 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  $\text{NO}_2$  в тропосфере и его вариаций. Отдельной кривой на том же рисунке нанесены данные спутниковых измерений тропосферного содержания  $\text{NO}_2$  в районе Санкт-Петербурга, выполненные аппаратурой OMI (спутник AURA). Не смотря на то, что средние амплитуды вариаций содержания  $\text{NO}_2$  в тропосфере по данным спутниковых и наземных измерений совпадают, взаимная временная корреляция этих вариаций, за исключением отдельных периодом, невысока.

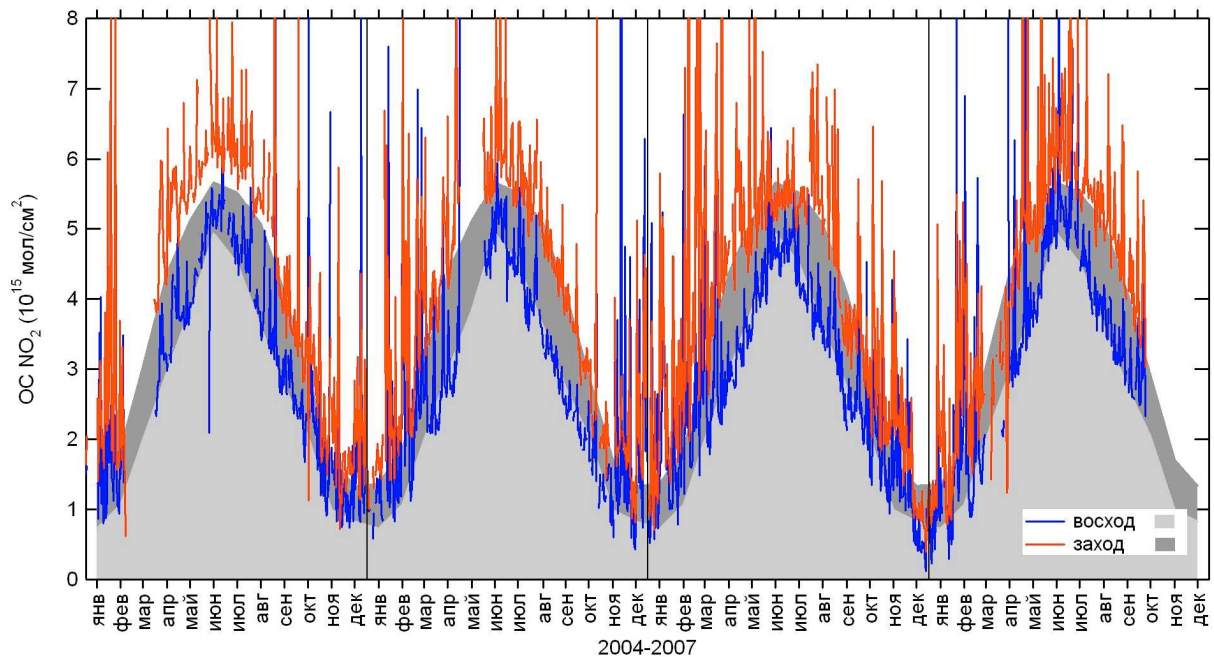


Рисунок 1.1а

Данные об ОС  $\text{NO}_2$  в районе Санкт-Петербурга по результатам сумеречных спектроскопических измерений НИИФ СПбГУ в 2004-2007 гг. Отдельными кривыми (сплошная заливка) представлены также среднемесячные значения ОС  $\text{NO}_2$ , полученные на основе аналогичных измерений за тот же период на станции Harestua (Норвегия).

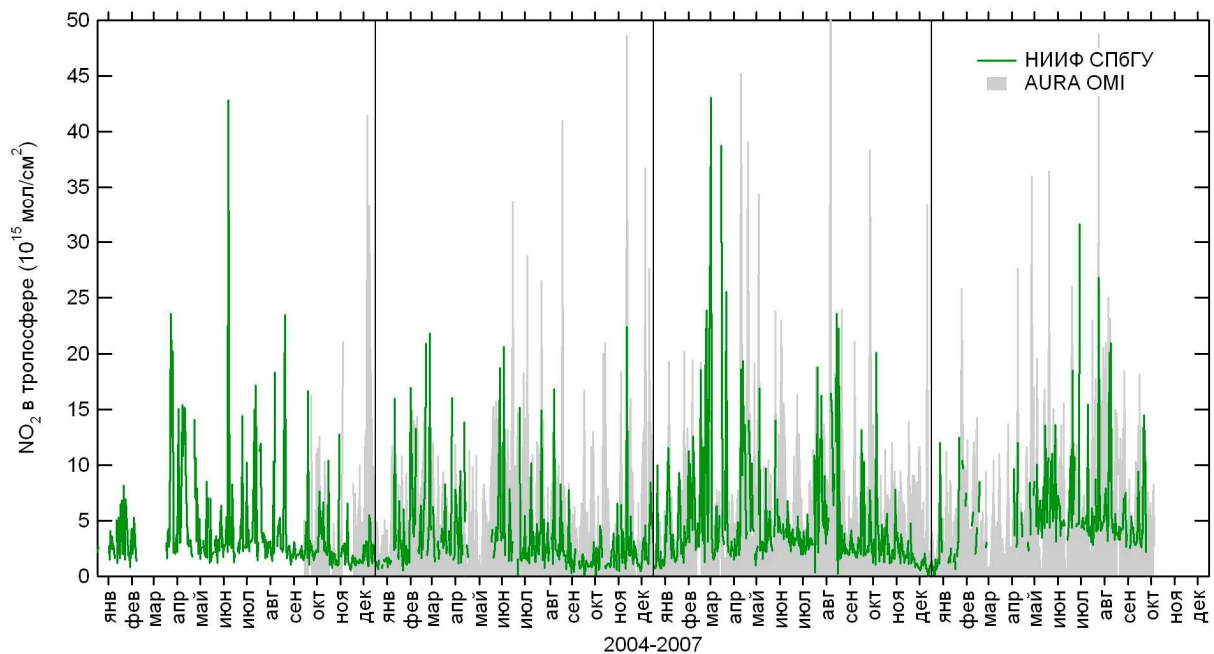


Рисунок 1.1а

Данные о содержании  $\text{NO}_2$  в тропосфере Санкт-Петербурга по результатам дневных спектроскопических измерений НИИФ СПбГУ в 2004-2007 гг. (данные измерений ОС  $\text{NO}_2$  осреднены с 10:00 до 14:00 местного времени). Отдельной кривой (сплошная заливка) представлены данные спутниковой аппаратуры OMI.

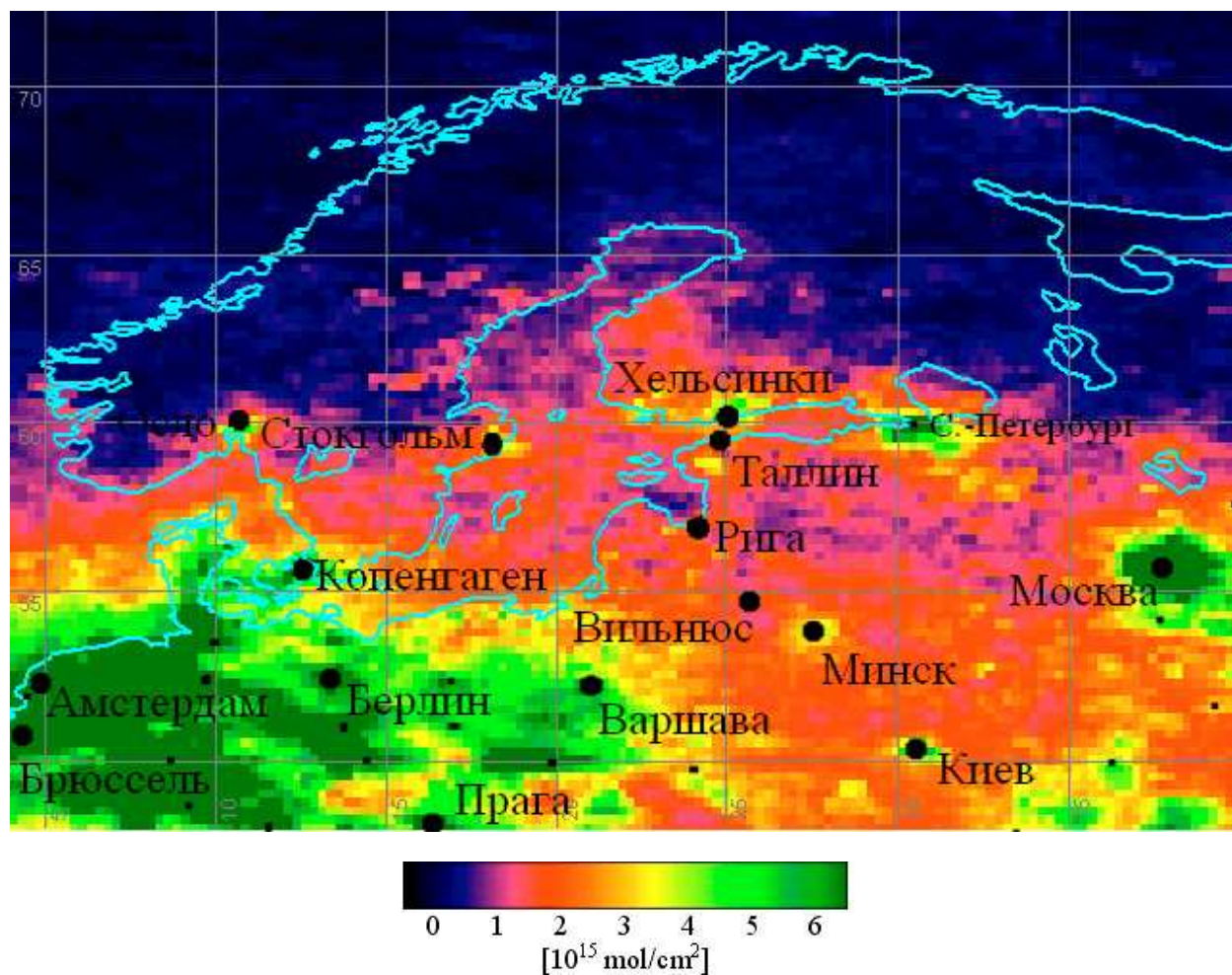


Рисунок 1.2

Среднегодовое распределение содержания  $\text{NO}_2$  ( $10^{15}$  мол/см<sup>2</sup>) в тропосфере Балтийского региона (центральная и северная Европа, северо-запад России), построенное на основе интерпретации данных спутниковых измерений SCIAMACHY в 2003-2006 гг. (<http://www.temis.nl/>).

## **2. ВАЛИДАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ О СОДЕРЖАНИИ NO<sub>2</sub> НА ОСНОВЕ СОПОСТАЛЕНИЙ С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ**

Валидация спутниковых данных об ОС NO<sub>2</sub> сопряжена с рядом трудностей. Во-первых, количество станций наземных измерений ОС NO<sub>2</sub> сравнительно невелико. Во-вторых, большинство этих измерений осуществляются сумеречным методом и, следовательно, при сопоставлении их со спутниковыми данными приходится сталкиваться с существенным пространственно-временным рассогласованием спутниковых и наземных измерений. Кроме того, содержание NO<sub>2</sub> в атмосфере испытывает значительные вариации в течение суток, обусловленные изменением освещенности при переходе от дня к ночи (с различными фотохимическими процессами), особенно при восходе и заходе Солнца. Наконец, еще одним важным фактором, затрудняющим сопоставление данных спутниковых и наземных измерений ОС NO<sub>2</sub>, является часто наблюдаемые антропогенные загрязнения, приводящие к повышенному содержанию NO<sub>2</sub> в тропосфере. Нередко, обычно незначительное тропосферное содержание NO<sub>2</sub> превышает ОС во всем столбе вышележащей атмосферы. Поскольку сумеречные наземные и дневные спутниковые измерения имеют разную чувствительность к содержанию NO<sub>2</sub> в тропосфере и разное пространственное разрешение (а пространственно-временные вариации тропосферного NO<sub>2</sub> значительно выше, чем в стратосфере), подобные загрязнения могут вносить дополнительное рассогласование в результаты сравнений.

Суточный ход содержания NO<sub>2</sub> в стратосфере обусловлен главным образом реакциями взаимного перехода NO<sub>2</sub>—NO, с преобладанием фотолиза NO<sub>2</sub> в NO на рассвете и преобразования NO в NO<sub>2</sub> (в реакции с O<sub>3</sub>) на закате. Типичный цикл ОС NO<sub>2</sub>, рассчитанный для летнего и зимнего сезонов в районе Санкт-Петербурга с помощью

фотохимической модели, представлен на рис. 2.1. Использовалась "0"-мерная модель (box model), являющаяся частью трехмерной транспортно-фотохимической модели SLIMCAT [11]. На графиках приведены кривые временного хода ОС NO<sub>2</sub> в январе и июле, отмечены время восхода и захода Солнца (зенитный угол 90°), а также среднее время момента спутниковых измерений в районе Санкт-Петербурга. Видно, что используемые в сравнениях спутниковые измерения осуществляются незадолго до или вскоре после полудня. При этом, в отличие от зимнего, летний период характеризуется более плавным изменением содержания NO<sub>2</sub> в период сумерек, что отражается в соотношении соответствующих сумеркам и середине светового дня значений – зимой величина ОС NO<sub>2</sub> в полдень может лежать между утренним и вечерним значением, а в летнее время полуденное содержание NO<sub>2</sub> оказывается даже ниже результатов обоих сумеречных наблюдений. В целом, данные спутниковых измерений ОС NO<sub>2</sub> оказываются ближе к утренним результатам наземных измерений. Однако, для корректного их сопоставления между собой, требуется вносить поправки на суточный ход ОС NO<sub>2</sub>, с учетом его сезонной изменчивости. Подобная коррекция была реализована, в частности, в работе [12], посвященной валидации данных измерений ОС NO<sub>2</sub> спутниковой аппаратурой GOME на основе сопоставлений с результатами наземных сумеречных измерений на станции Иссык-Куль (42.6° с.ш., 77.0° в.д.) в Киргизии. Используя рассчитанный для каждого месяца года суточный ход ОС NO<sub>2</sub>, утренние значения наземных измерений были приведены ко времени полудня, что позволило сократить наблюдаемое среднее расхождение с данными GOME (версия GDP3, 1996-2002 гг.) до  $0.61 \cdot 10^{15}$  мол/см<sup>2</sup> (~20%). В дальнейшем этот метод был видоизменен – поскольку количество доступных для сопоставлений спутниковых данных растет,

а время их измерений несколько отличается от полуденного, целесообразнее стало приводить спутниковые данные ко времени наземных утренних наблюдений. Например, скорректированные таким образом данные измерений GOME (версия GDP4, 2001-2003 гг.) отличаются от результатов утренних наземных измерений на Иссик-Куле в среднем на  $0.31 \cdot 10^{15}$  мол/см<sup>2</sup> (~10%). В аналогичном исследовании, посвященном валидации данных измерений содержания NO<sub>2</sub> спутниковой аппаратурой OMI, все сопоставляемые между собой данные (дневные спутниковые и сумеречные наземные) были скорректированы ко времени местного полудня [13]. В сопоставлении с результатами наземных измерений на станции Иссик-Куль в 2004-2006 гг. полученное среднее расхождение с данными OMI составило  $0.26 \cdot 10^{15}$  мол/см<sup>2</sup> (~9%). При этом, оценка расхождения данных OMI с результатами наземных измерений на другой высокогорной станции зондирования, Observatoire de Haute-Provence (OHP, 43.9° с.ш., 5.7° в.д.), составила уже  $0.71 \cdot 10^{15}$  мол/см<sup>2</sup> (~24%). Такая разница обусловлена существенно большим антропогенным вкладом в тропосферное содержание NO<sub>2</sub> вблизи OHP (французские Альпы, центральная Европа), по сравнению с Иссик-Кулем в центральная Азия.

К сожалению, даже такое невысокое, в среднем, согласие (оценки среднеквадратичных расхождений составляют 15-30%), наблюдаемое в сопоставлениях данных измерений в относительно удаленных от источников тропосферного загрязнения районах, недостижимо для наблюдений вблизи крупных населенных и промышленных центров. Например, результаты измерений ОС NO<sub>2</sub> в Звенигороде (~50 км к западу от Москвы) согласуются с данными GOME (версия GDP2.3, 1996-1998 гг.) значительно хуже – среднеквадратичные расхождения составляют ~60% [14]. В аналогичном сопоставлении данных GOME

(версия GDP4, 2004-2006 гг.) с наземными измерениями в районе Санкт-Петербурга (Петродворец, ~40 км к юго-западу от центра города) среднеквадратичное составило уже 70% [15, 16]. При этом, данные GOME систематически превышают результаты наземных измерений – в среднем на 30%, что может быть связано со значительной величиной тропосферного NO<sub>2</sub>, в большей степени регистрируемого GOME, чем наземной аппаратурой. Результат сопоставления данных наземных сумеречных наблюдений ОС NO<sub>2</sub> в Санкт-Петербурге со всеми имеющимися данными согласованных спутниковых измерений – ERS-2 GOME, ENVISAT SCIAMACHY и AURA OMI в 2004-2007 гг. – представлен на рисунке 2.2. Для количественного сопоставления результаты наземных измерений на заходе/восходе Солнца, а также данные дневных спутниковых измерений были скорректированы ко времени местного полудня, согласно [13]. Полученные оценки расхождений “спутник - наземный прибор” составили  $+0.32 \pm 1.06 \cdot 10^{15}$  мол/см<sup>2</sup> (~11±35%),  $+0.17 \pm 0.97 \cdot 10^{15}$  мол/см<sup>2</sup> (~6±32%), и  $-0.48 \pm 1.11 \cdot 10^{15}$  мол/см<sup>2</sup> (~16±37%), для данных GOME, SCIAMACHY и OMI, соответственно.



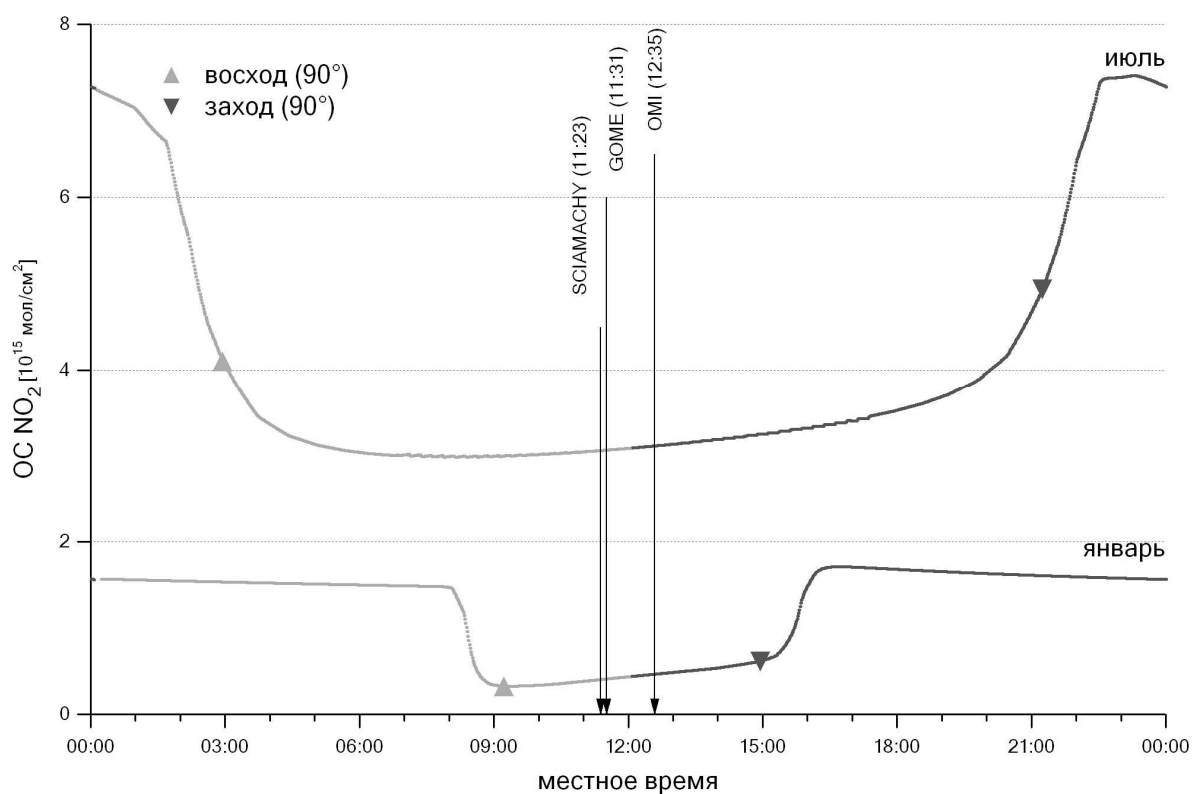


Рисунок 2.1

Результаты численного моделирования суточного хода ОС NO<sub>2</sub> [11] в районе Санкт-Петербурга, в январе и июле; отмечены время восхода и захода Солнца (зенитный угол 90°), а также среднее время момента спутниковых измерений в районе Санкт-Петербурга.

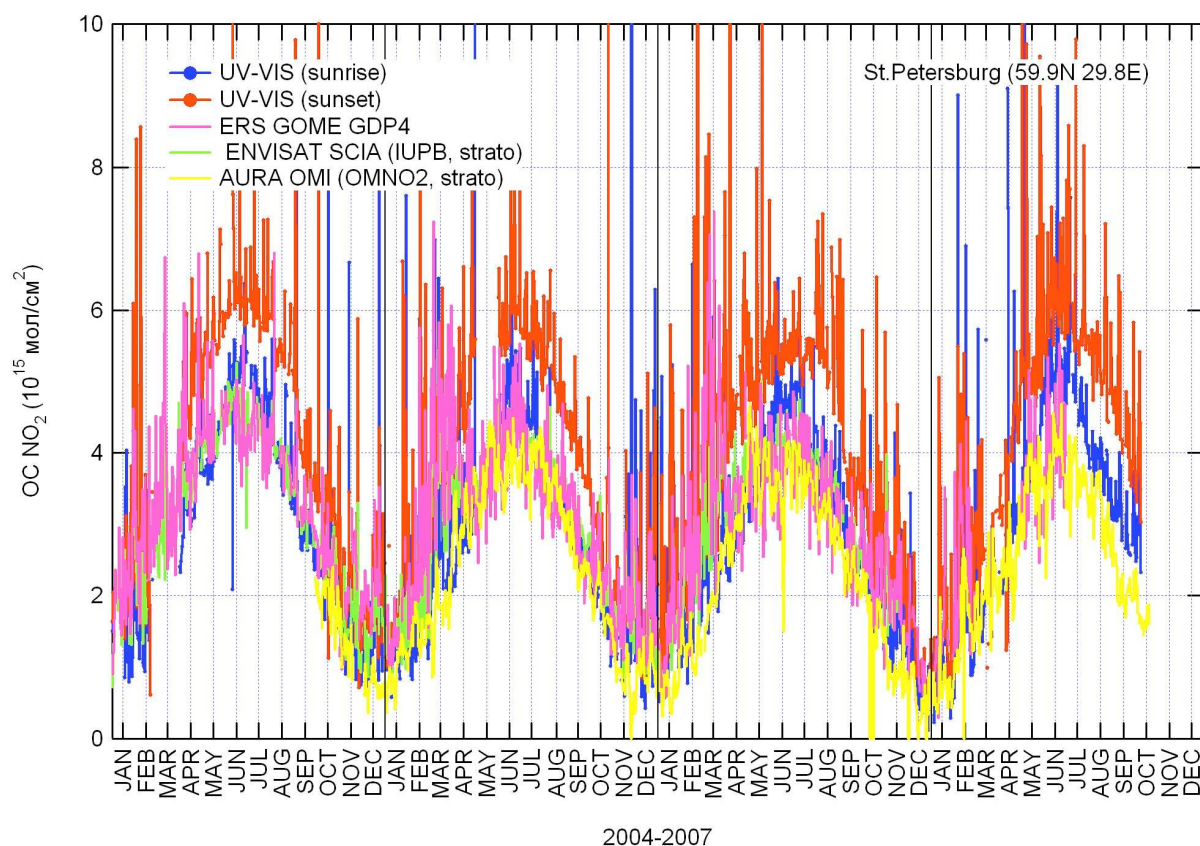


Рисунок 2.й

Результаты сумеречных наземных измерений ОС NO<sub>2</sub> в районе Санкт-Петербурга (Петродворец), в сопоставлении с данными измерений спутниковой аппаратурой GOME, SCIAMACHY и OMI в 2004-2007 гг.

### **3. ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ NO<sub>2</sub> В ТРОПОСФЕРЕ РАЙОНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ NO<sub>2</sub> В ПРИЗЕМНОМ ВОЗДУХЕ**

Глобальный мониторинг содержания NO<sub>2</sub> в атмосфере, и отдельно тропосфере выполняется спутниковой аппаратурой OMI [4] с сентября 2004 года. Как и его предшественники, GOME и SCIAMACHY, OMI представляет собой сканирующий по пространству спектрометр, осуществляющий надирные измерения уходящего (отраженного и рассеянного) излучения в УФ и видимом диапазоне спектра, 270-500 нм с разрешением 0.4-0.6 нм. Использование двумерного матричного детектора позволяет достигать также высокого пространственного разрешения измерений, 13×24 км<sup>2</sup>, и ежедневного глобального картирования с полосой пространственного сканирования 2600 км.

Измерения приземных концентраций NO<sub>2</sub> осуществляются "Автоматической системой мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга". Система предназначена для обеспечения информацией о качестве атмосферного воздуха органов исполнительной власти Санкт-Петербурга. Данные Системы 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, 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, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, каждые

20 минут). Система включает 17 станций - 14 станции павильонного типа и 3 беспавильонных станции. Все станции павильонного типа оснащены газоанализаторами оксидов азота (фирмы "Thermo Electron").

### 3.1 Недельный цикл содержания NO<sub>2</sub> в атмосфере Санкт-Петербурга

Мы рассмотрели имеющиеся у нас данные ежедневных измерений спутниковой аппаратурой OMI в районе Санкт-Петербурга и рассчитали средние за весь период (2004-2007) содержания NO<sub>2</sub> в тропосфере для каждого дня недели. Средняя удаленность подспутниковой точки измерений OMI составила 15 км. Полученные результаты недельного цикла тропосферного NO<sub>2</sub> представлены на рисунке 3.1. Видно, что минимальное содержание NO<sub>2</sub> наблюдается в воскресенье ( $3.97 \cdot 10^{15}$  мол/см<sup>2</sup>) – на 26% ниже, чем в пятницу ( $5.41 \cdot 10^{15}$  мол/см<sup>2</sup>). Этот минимум хорошо согласуется с результатами аналогичных исследований для крупных мегаполисов западной Европы [17], выявляя наличие недельного цикла содержания NO<sub>2</sub> в тропосфере Санкт-Петербурга, обусловленного интенсивностью работы промышленности и транспорта. Для сравнения, на том же рисунке приведена оценка недельного цикла для мегаполиса города Париж (Франция), выполненная на основе спутниковых измерений OMI. В целом, по сравнению с Санкт-Петербургом, тропосферное содержание NO<sub>2</sub> в районе Парижа на 50% выше. При этом, воскресный минимум составляет 34% от максимального значения в будние дни. Мы исследовали также недельный цикл содержания NO<sub>2</sub> на основе данных наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга. Результат анализа результатов измерений наземной аппаратуры НИИФ СПбГУ в 2004-2007 гг. представлен на том же рисунке 3.1. При этом в качестве

оценки тропосферного вклада в измеряемое ОС  $\text{NO}_2$  использовалось его среднее в период с 10:00 до 14:00 местного времени. Как и в результатах анализа спутниковых данных, минимальное значение содержания  $\text{NO}_2$  отмечается в воскресенье ( $4.93 \cdot 10^{15}$  мол/см<sup>2</sup>), на 22% меньше максимального значения в будние дни (пятница,  $6.36 \cdot 10^{15}$  мол/см<sup>2</sup>).

Разумеется, предполагая такую цикличность в данных дистанционных измерений содержания  $\text{NO}_2$  в тропосфере, следует ожидать наличие подобного эффекта и в данных прямых измерений в приземном воздухе Санкт-Петербурга, где и находятся основные антропогенные источники  $\text{NO}_2$ . По договоренности с Комитетом, нам были предоставлены данные ежечасных измерений приземных концентраций  $\text{NO}_2$ , полученные на трех автоматических станциях - №5 и №6 за 2004-2006 гг., и №15 в 2006 г. (см. рисунок 3.2). 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. Результаты анализа недельного цикла среднесуточных приземных концентраций  $\text{NO}_2$  для всех трех станций представлены на рисунке 3.3. Как и в данных тропосферного зондирования, вариации содержания  $\text{NO}_2$  в приземном воздухе Санкт-Петербурга характеризуются недельным циклом с выраженным воскресным минимумом (15-20%). При этом,

хотя концентрации  $\text{NO}_2$  в Кронштадте (станция №15) в несколько раз ниже среднегородских значений (станции №5 и 6), недельный цикл вариаций  $\text{NO}_2$  наблюдается также и здесь. Последнее может свидетельствовать о распространении воздействия источников воздушного загрязнения центральной части Санкт-Петербурга на качество воздуха в таких удаленных районах, как Кронштадт. Для сравнения, на том же рисунке 3.3 приведены оценки недельного цикла, полученные на основе анализа данных измерений концентраций  $\text{NO}_2$  в Париже (Франция). Использовались результаты ежечасных измерений на 6-ти автоматических станциях, расположенных в центральной части Парижа в 2006 году (данные доступны на интернет-сайте [www.airparif.fr](http://www.airparif.fr)). Видно, что средние концентрации  $\text{NO}_2$  в центре Парижа систематически ниже (30-40%) результатов аналогичных измерений в центральной части Санкт-Петербурга (станции №5 и 6). Рисунок так же содержит установленный в России уровень среднесуточной ПДК двуокиси азота в воздухе населенных мест ( $40 \text{ мкг/м}^3$ ), скорректированный для сравнения с представленными дневными концентрациями (10:00-14:00) с учетом типичного суточного цикла ( $\sim 42 \text{ мкг/м}^3$ ). Таким образом, среднегодовая дневная концентрация  $\text{NO}_2$  на двух из рассмотренных станциях превышает ПДК примерно в 1.5 раза, даже в выходные дни.

Данные ежечасных измерений концентраций  $\text{NO}_2$  в приземном воздухе позволяют также оценить суточный цикл вариаций этой газовой компоненты. Среднегодовой суточный цикл, рассчитанный на основе всех имеющихся данных, представлен на рисунке 3.4. Для сравнения здесь же приведен суточный цикл приземных концентраций  $\text{NO}_2$  в центральной части Парижа (Франция). 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 ( $\sim 50-60$  мкг/м<sup>3</sup>), по сравнению со станцией №15, расположенной в Кронштадте ( $\sim 20$  мкг/м<sup>3</sup>). Минимальное содержание NO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> меняется незначительно и начинает спадать лишь после полуночи. Выделить аналогичный суточный цикл в данных измерений на станции №15 в Кронштадте не удастся. Интересно, что подобная оценка суточного цикла приземного NO<sub>2</sub> во французской столице, рассчитанная на основе данных измерений 6-ти автоматических станции в центре Парижа в 2006 году, имеет несколько иной характер. Так, утренний рост NO<sub>2</sub> в Париже начинается раньше (3:00-4:00) и достигает максимума к 7:00-8:00, после чего приземная концентрация NO<sub>2</sub> существенно спадает. К обеденному времени содержание NO<sub>2</sub> в городском воздухе практически достигает своего ночного минимума, а затем начинает вновь расти, по мере завершения рабочего дня и возвращения горожан домой. По достижению вечернего максимума в 19:00-20:00, концентрация NO<sub>2</sub> снова падает. Данный цикл хорошо согласуется с периодичностью интенсивности городского транспорта в Париже, где основные пробки в будние дни наблюдаются только ранним утром и вечером, но не в дневное время. Чтобы оценить разницу в суточных вариациях приземных концентраций NO<sub>2</sub> в будние и воскресные дни, мы провели их отдельный анализ. Результаты оценки соответствующих циклов, рассчитанных для двух станций Санкт-Петербурга (№5 и 6) и 6-ти станций Парижа, отдельно для будних дней (с понедельника по субботу) и воскресенья, представлены на рисунке 3.5. Как уже было

отмечено при расчетах недельного цикла, воскресные концентрации  $\text{NO}_2$  в приземном воздухе заметно ниже среднего уровня для будних дней, как в Санкт-Петербурге, так и в Париже. Характерной чертой воскресного цикла в данных парижских измерений является полное исчезновение утреннего максимума  $\text{NO}_2$ , чего можно было ожидать для выходного дня. Концентрация  $\text{NO}_2$  начинает расти лишь к вечеру, что по-видимому связано с возвращением парижан в город из загородных мест отдыха. Данные же о воскресном цикле  $\text{NO}_2$  не выявляют таких особенностей, характеризуясь лишь более медленным (по сравнению с будними днями) ростом от утреннего минимума к ночи.

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 и его влияния на величину регистрируемых концентраций  $\text{NO}_2$  представлены на рисунках 3.6.1-3. Каждый рисунок содержит распределение повторяемости (а, 0-10%) и скорости ветра (б, 0-3 м/с), а также приземных концентраций  $\text{NO}_2$  (в, 0-100 мкг/м<sup>3</sup>) по направлениям (0-360°), на основе данных ежечасных измерений на станциях №5, №6 и №15, соответственно. Как видно из рисунков, преобладающее направление ветра на всех трех станциях – юго-западное, что соответствует среднеклиматическим данным для всего Санкт-Петербурга. Следует отметить, что ветер северо-западного направления (сектор 270-360°) на всех трех станциях практически не регистрируется, что по-видимому обусловлено их расположением в зоне ветровой тени близлежащих зданий. Распределения скорости ветра характеризуются несколько более высокими значениями при западном ветре. Средняя скорость ветра, по данным 2006 года,



составила 0.9, 1.8 и 1.7 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  $\text{NO}_2$  по направлению ветра не выявляет каких-либо характерных особенностей, что говорит об отсутствии влияния ветрового режима на результаты измерений.

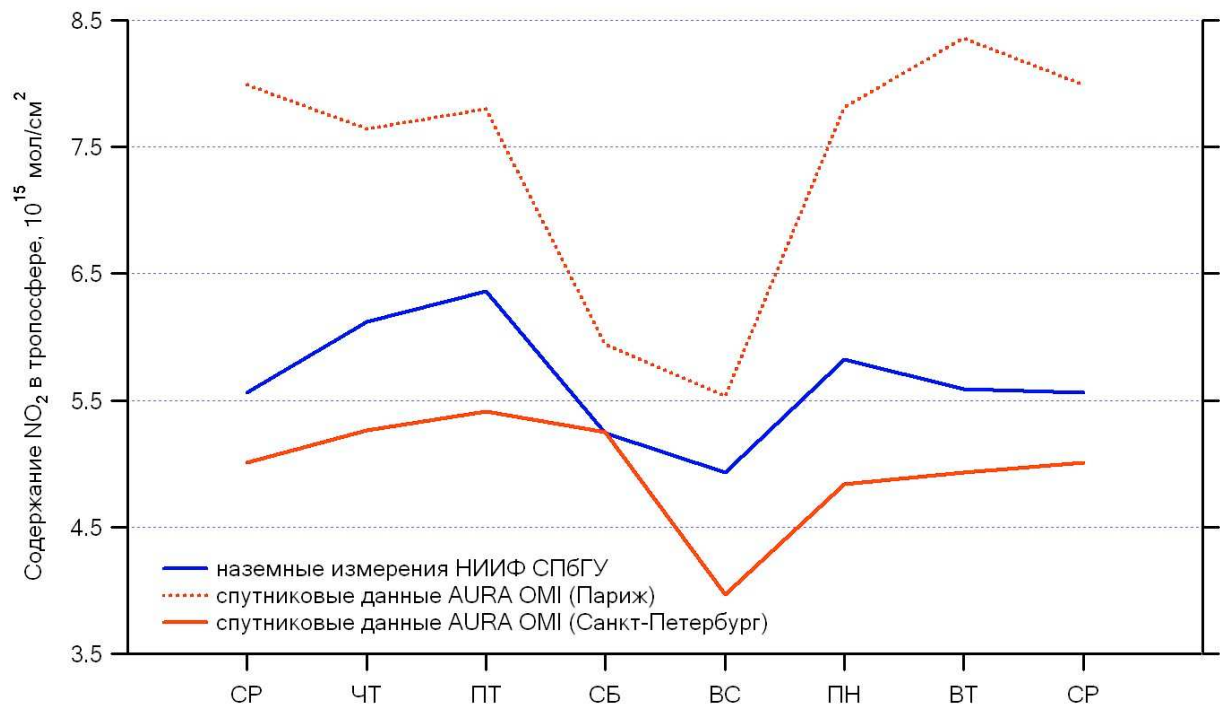


Рисунок 3.1

Недельный цикл тропосферного содержания  $\text{NO}_2$  в районе Санкт-Петербурга по данным наземных (НИИФ СПбГУ, 10:00-14:00) и спутниковых измерений (AURA OMI, ~14:00) в 2004-2007 гг.. Отдельной кривой представлены аналогичные оценки для мегаполиса Парижа, Франция (данные AURA OMI)



Рисунок 3.2

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](http://www.gov.spb.ru))

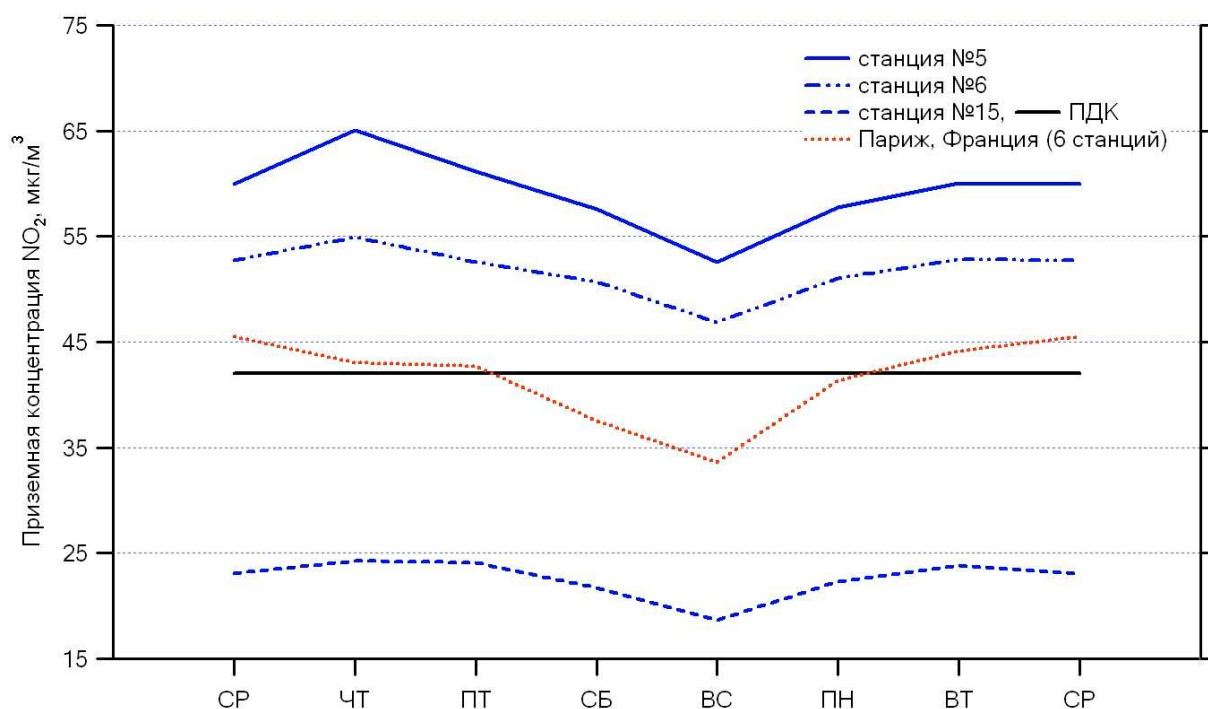


Рисунок 3.3

Недельный цикл приземных концентраций  $\text{NO}_2$  в Санкт-Петербурге по данным измерений "Автоматической системы мониторинга атмосферного воздуха" на трех станциях (№5, 6 и 15), средние за 10:00-14:00. Отдельной кривой представлены аналогичные оценки, выполненные на основе среднесуточных данных измерений 6-ти автоматических станций центральной части Парижа, Франция ([www.airparif.fr](http://www.airparif.fr))

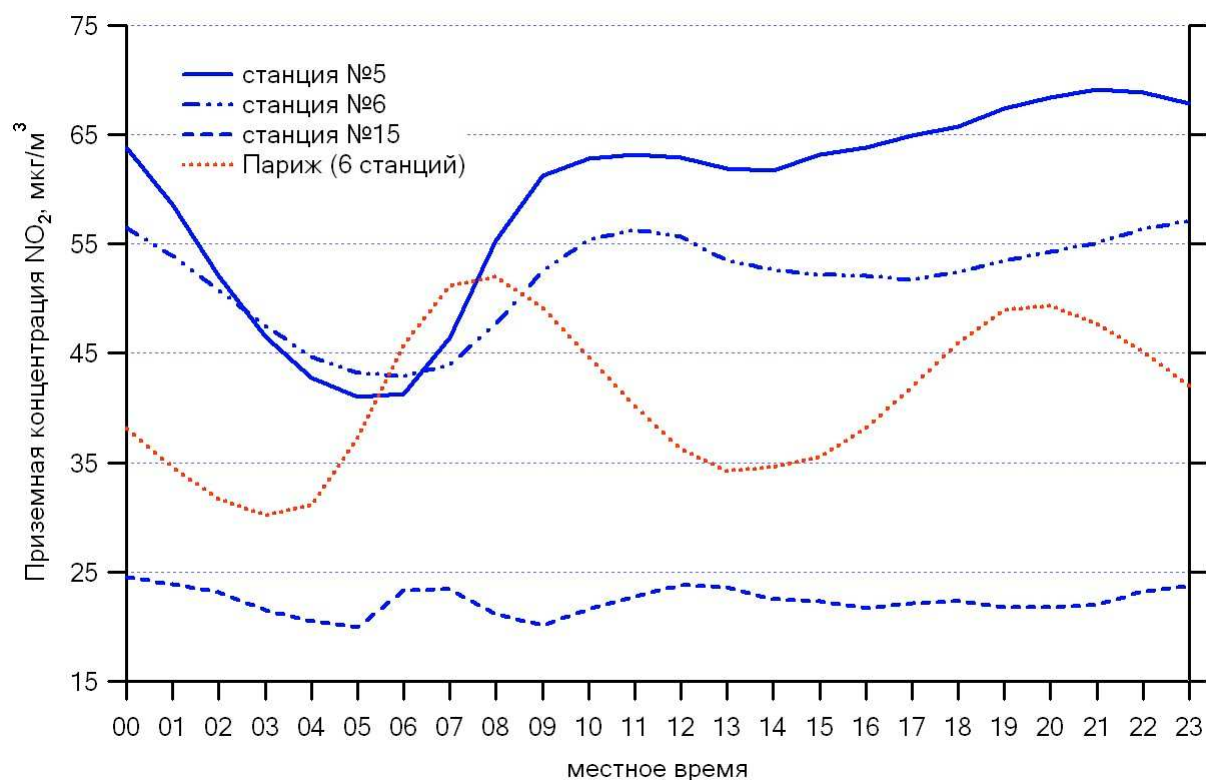
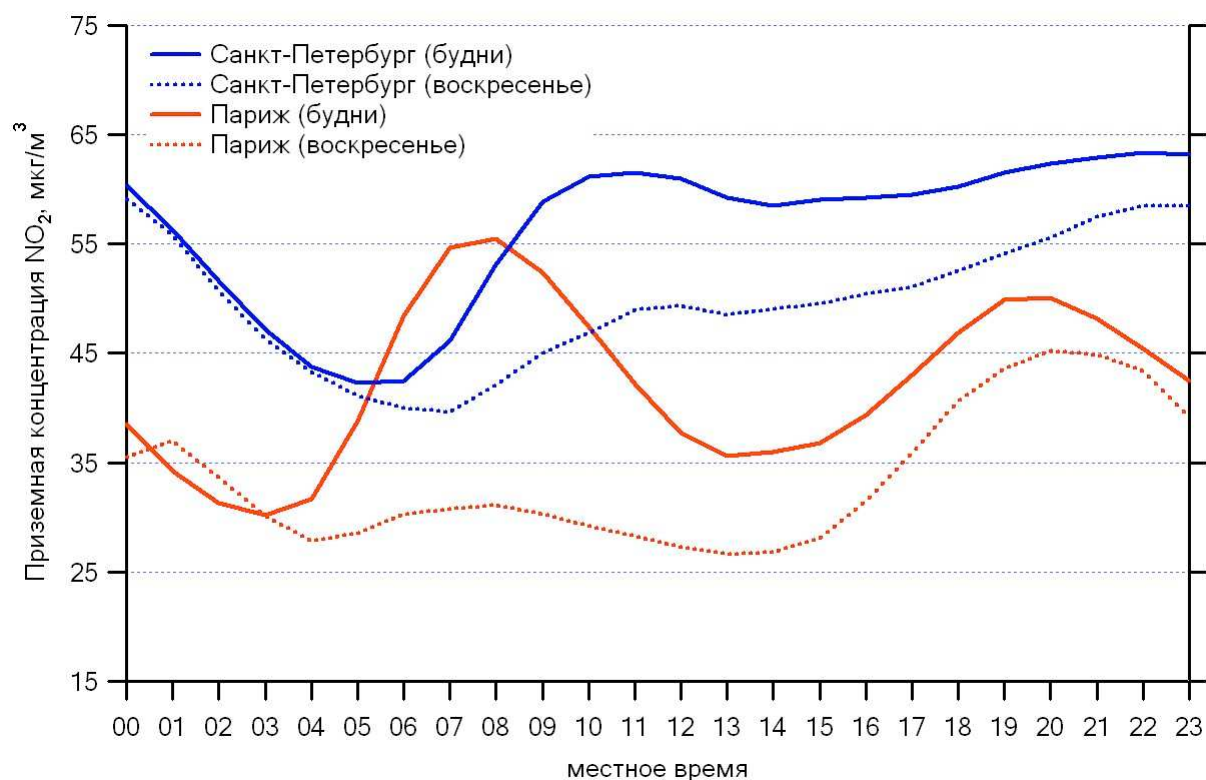


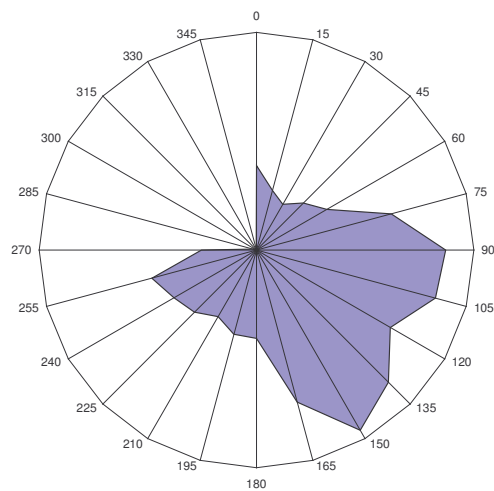
Рисунок 3.4

Суточный цикл приземных концентраций NO<sub>2</sub> в Санкт-Петербурге по данным измерений "Автоматической системы мониторинга атмосферного воздуха" на трех станциях (№5, 6 и 15). Отдельной кривой представлены аналогичные оценки, выполненные на основе осреднения данных измерений 6-ти автоматических станций центральной части Парижа, Франция ([www.airparif.fr](http://www.airparif.fr))

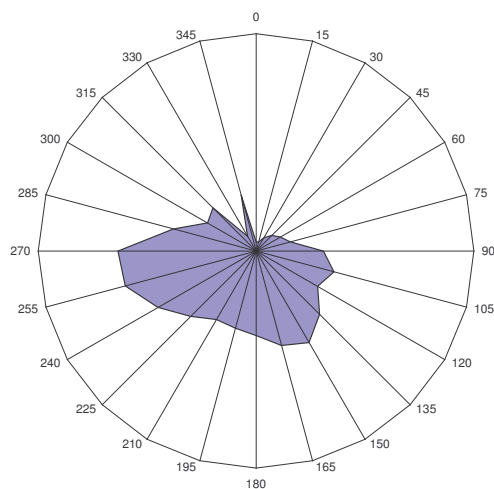


**Рисунок 3.5**

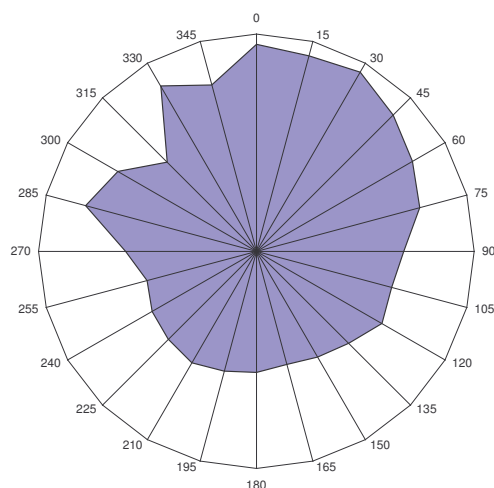
Суточный цикл приземных концентраций NO<sub>2</sub> в Санкт-Петербурге и Париже, отдельно для будних дней (понедельник-суббота) и в воскресенье. Использовались данные измерений "Автоматической системы мониторинга атмосферного воздуха" на двух станциях (№5 и 6), а также результаты аналогичных измерений 6-ти автоматических станций центральной части Парижа, Франция ([www.airparif.fr](http://www.airparif.fr))



а)



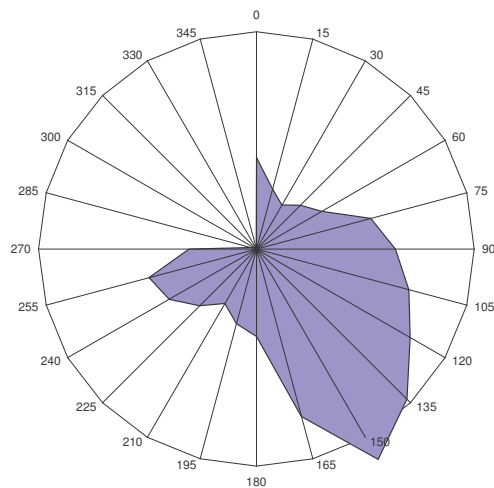
б)



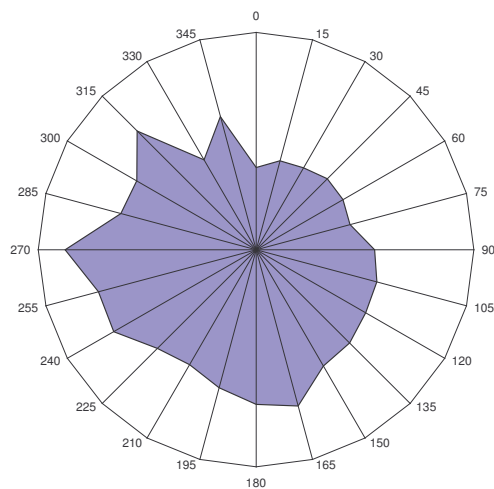
в)

Рисунок 3.6.1

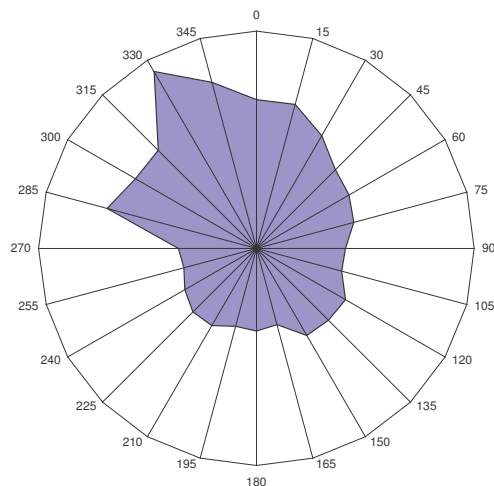
Распределение повторяемости (а, 0-10%) и скорости ветра (б, 0-3 м/с), а также приземных концентраций  $\text{NO}_2$  (в, 0-100  $\text{мкг/м}^3$ ) по направлениям (0-360°), на основе данных ежечасных измерений "Автоматической системы мониторинга атмосферного воздуха" на станции №5 в 2006 году.



а)



б)

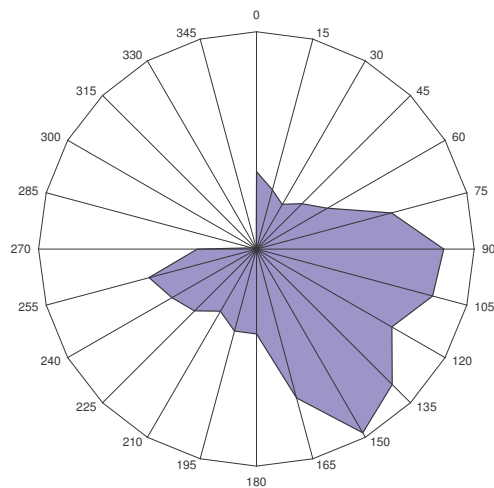


в)

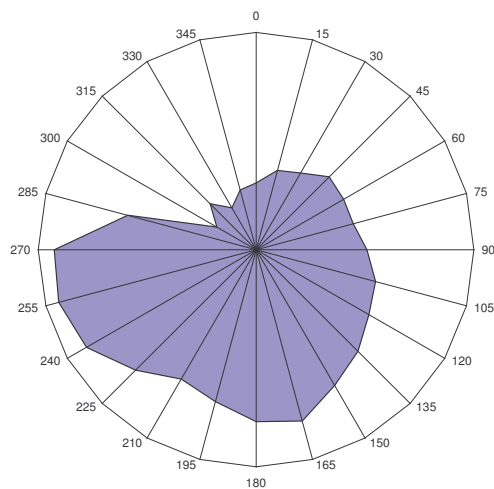
Рисунок 3.6.2

Распределение повторяемости (а, 0-10%) и скорости ветра (б, 0-3 м/с), а также приземных концентраций  $\text{NO}_2$  (в, 0-100  $\mu\text{кг}/\text{м}^3$ ) по направлениям ( $0-360^\circ$ ), на основе данных ежечасных измерений "Автоматической системы мониторинга атмосферного воздуха" на станции №6 в 2006 году.

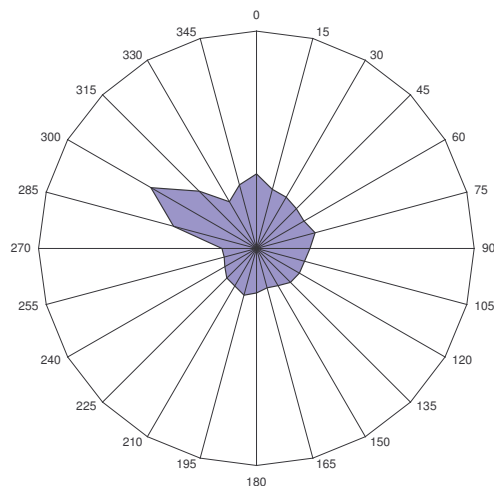




а)



б)



в)

Рисунок 3.6.3

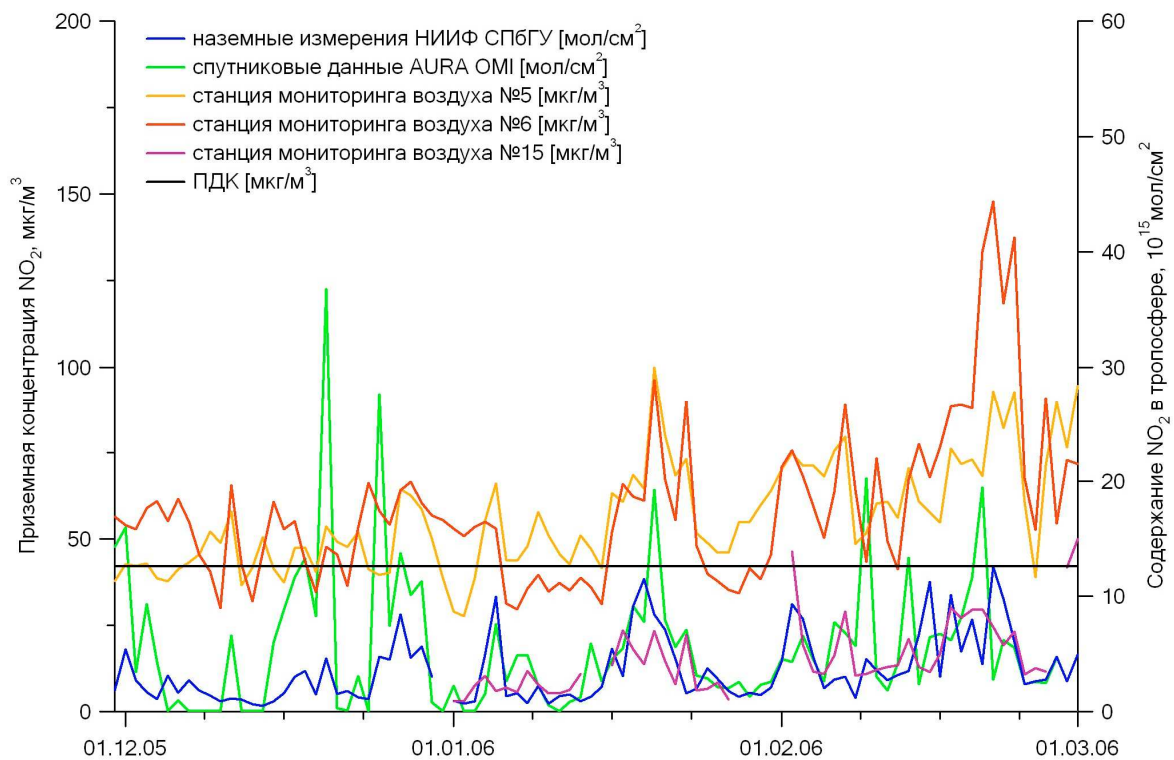
Распределение повторяемости (а, 0-10%) и скорости ветра (б, 0-3 м/с), а также приземных концентраций  $\text{NO}_2$  (в, 0-100  $\text{мкг/м}^3$ ) по направлениям (0-360°), на основе данных ежечасных измерений "Автоматической системы мониторинга атмосферного воздуха" на станции №15 в 2006 году.

### 3.2 Сопоставление данных одновременных спутниковых и наземных измерений содержания NO<sub>2</sub> в атмосфере Санкт-Петербурга

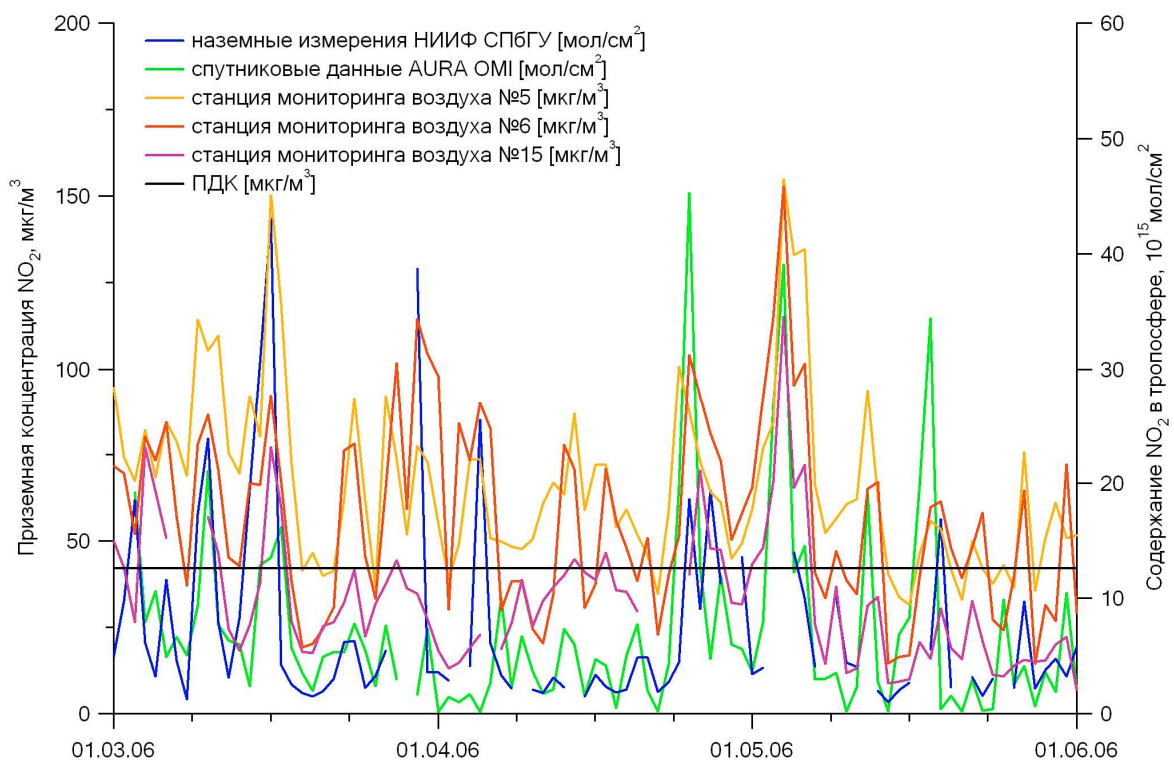
Поскольку наиболее полно данные измерений приземных концентраций NO<sub>2</sub> в Санкт-Петербурге на всех трех рассматриваемых нами станциях (№5, 6 и 15) представлены только в 2006 году, мы ограничились этим периодом для проведения сопоставлений с данными спутниковых измерений OMI и наземными измерениями НИИФ СПбГУ в Петродворце. Результаты сопоставления в виде графиков дневных значений приземного содержания NO<sub>2</sub>, зарегистрированного на станциях автоматического мониторинга, а также дневных содержаний NO<sub>2</sub> в тропосфере по данным наземного (НИИФ СПбГУ) и спутникового (AURA OMI) дистанционного зондирования представлены на рисунках 3.6 и 3.7. Рисунки так же содержат уровень среднесуточной ПДК NO<sub>2</sub>, приведенный к представленным дневным концентрациям (~42 мкг/м<sup>3</sup>). Как видно из рисунков, вариации приземного содержания NO<sub>2</sub> в Кронштадте (станция №15) существенно меньше вариаций, наблюдаемых в центральной части Санкт-Петербурга (станции №5 и 6), а их абсолютные значения – значительно ниже. Средние концентрации, регистрируемые на станциях №5 и 6 хорошо согласуются в первом полугодии (зима-весна, рисунок 3.6), но летом и осенью данные измерений станции №6 оказываются систематически ниже данных станции №5. Последнее возможно связано с ошибками абсолютной калибровки автоматической измерительной аппаратуры.

В целом, во всем массиве сравниваемых спутниковых и наземных измерений можно выделить периоды как хорошей корреляции данных, так и ситуации их взаимной несогласованности. Далек не всегда регистрируемые вариации приземного содержания NO<sub>2</sub> согласуются с

данными дистанционного наземного и спутникового зондирования. Более того, зачастую вариации приземных концентраций  $\text{NO}_2$ , одновременно регистрируемые двумя рассматриваемыми станциями (№5 и 6), существенно некоррелированы, что указывает на большую пространственную неоднородность поля приземного  $\text{NO}_2$ . 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.



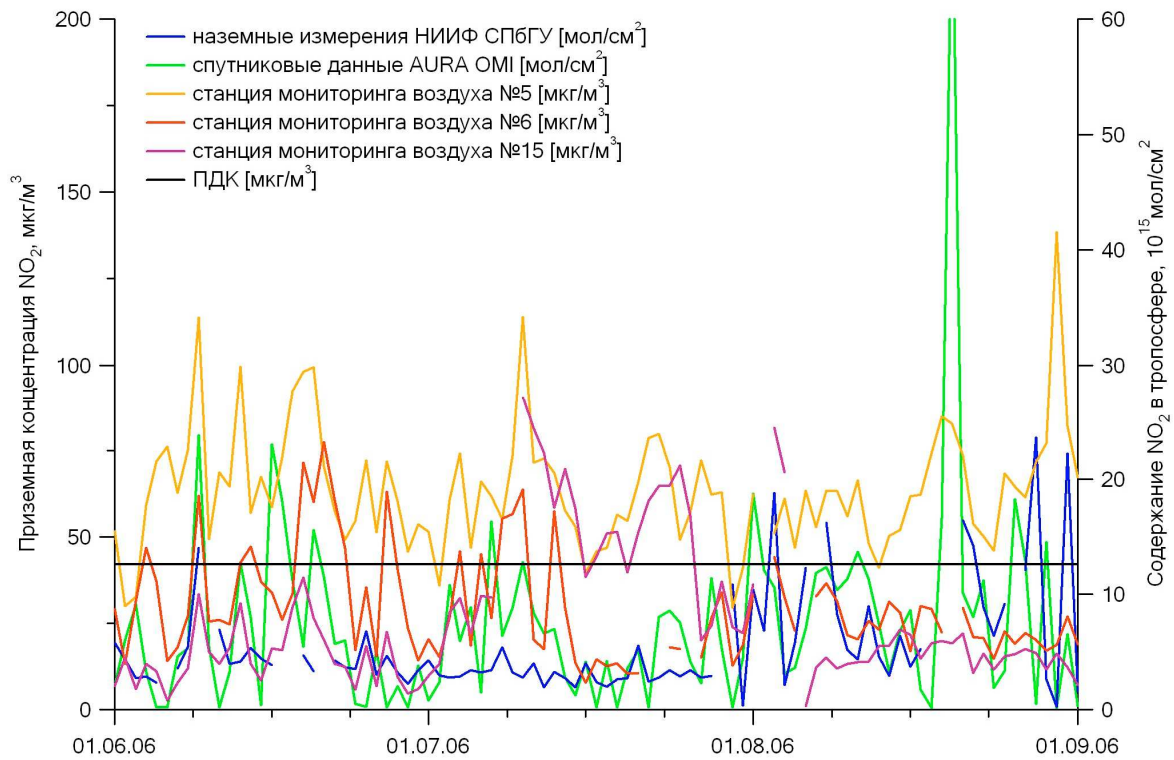
а)



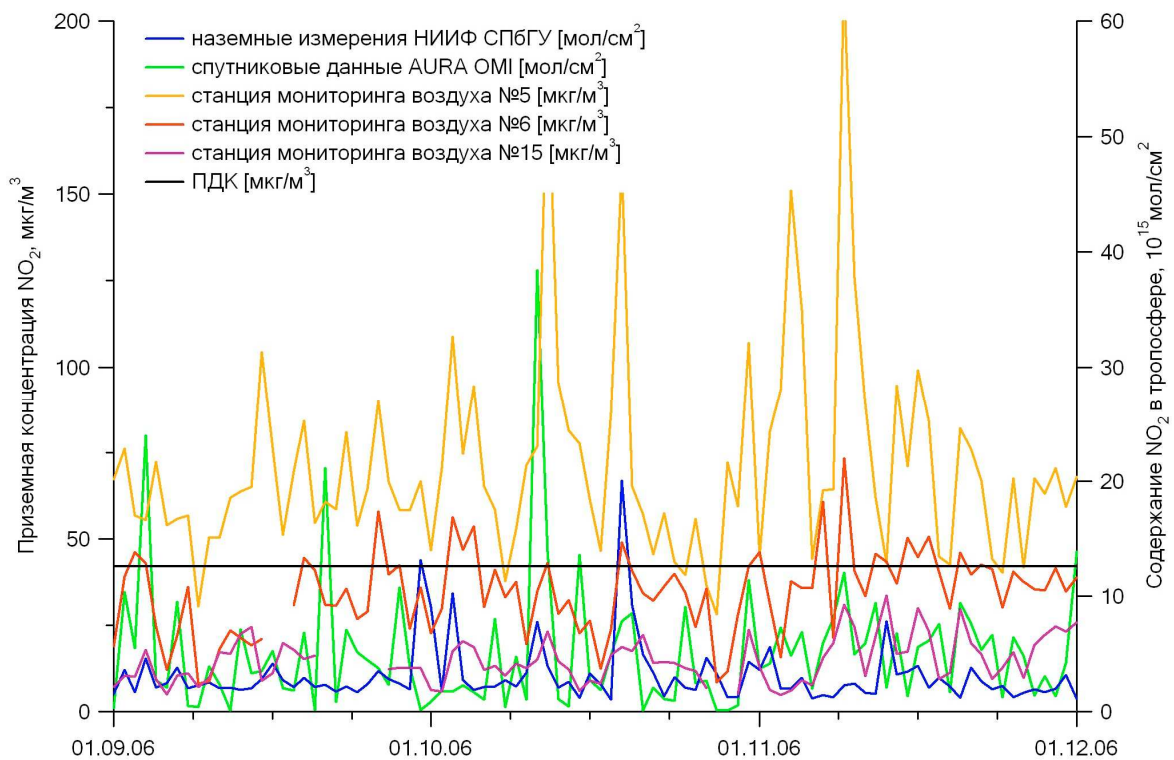
б)

**Рисунок 3.6**

Сопоставление данных о дневных (10:00-14:00) приземных концентрациях  $\text{NO}_2$  на станциях воздушного мониторинга Санкт-Петербурга (станции №5, 6 и 15) с результатами наземных (НИИФ СПбГУ) и спутниковых (AURA OMI) измерений в 2006 году (а - зима, б - весна).



а)



б)

Рисунок 3.7

Сопоставление данных о дневных (10:00-14:00) приземных концентрациях  $\text{NO}_2$  на станциях воздушного мониторинга Санкт-Петербурга (станции №5, 6 и 15) с результатами наземных (НИИФ СПбГУ) и спутниковых (AURA OMI) измерений в 2006 году (а - лето, б - осень).

#### **4. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ NO<sub>2</sub> В ТРОПОСФЕРЕ БАЛТИЙСКОГО РЕГИОНА – АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И ОЦЕНКА ВРЕМЕННОГО ТРЕНДА ДЛЯ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНА РОССИИ**

Оценки регионального пространственного распределения тропосферного содержания NO<sub>2</sub> были ранее получены нами на основе анализа многолетних данных GOME об ОС NO<sub>2</sub> [18-20]. Поскольку данные оперативной обработки результатов измерений спутниковой аппаратуры GOME представляют собой величину общего содержания NO<sub>2</sub> во всем вертикальном столбе атмосферы, для получения из них информации о поле содержания NO<sub>2</sub> отдельно в тропосфере требуется их специальная интерпретация. Один из возможных подходов заключается в использовании данных GOME об ОС NO<sub>2</sub> в атмосфере удаленных районов мирового океана для оценки стратосферной составляющей NO<sub>2</sub> в величине общего содержания. Согласно анализу карт глобальных распределений ОС NO<sub>2</sub>, поле содержания ОС NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub>, можно получить приближенную оценку тропосферного содержания NO<sub>2</sub>, и его пространственное распределение. В настоящей работе мы расширили этот анализ на весь массив измерений GOME в 1995-2007 гг., используя данные последней версии обработки, 4.0. На рисунке 4.1 представлен сезонный ход содержания NO<sub>2</sub> в районе Санкт-Петербурга, построенный на основе соответствующих среднемесячных значений, рассчитанный за весь период измерений GOME. Для сравнения на том же рисунке представлены результаты аналогичных расчетов для регионов Москвы и Парижа (Франция). Можно отметить относительно высокие содержания тропосферного

NO<sub>2</sub> для всех трех мегаполисов в зимнее время. Самые низкие среднемесячные содержания наблюдаются в Санкт-Петербурге. Содержания NO<sub>2</sub> 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.

Помимо многолетнего ансамбля данных спутниковых измерений аппаратурой GOME, накоплен уже достаточный объем измерений аналогичным прибором SCIAMACHY, позволяющим картировать поле ОС NO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> отдельно в тропосфере. Еще более высоким пространственным разрешением и периодичностью характеризуются данные измерений спутниковой аппаратуры OMI, доступные начиная с июля 2004 года. Карта среднегодового распределения тропосферного NO<sub>2</sub>, построенная по данным среднемесячного картирования в период с июля 2006 по июль 2007 года, представлена на рисунке 4.2 (данные получены по результатам интерпретации измерений OMI в Королевском Национальном Институте Нидерландов, [www.temis.nl](http://www.temis.nl)). Как и следовало ожидать, в распределении тропосферного NO<sub>2</sub> европейской части России из основных источников выделяются мегаполисы Москвы и Санкт-Петербурга.

С целью выявления возможного временного тренда, были также рассмотрены среднегодовые значения тропосферного NO<sub>2</sub> в районе обоих городов для всего периода спутниковых наблюдений GOME (1995-2007 гг.). Результаты этого анализа представлены на рисунке 4.3. Хотя имеющийся на сегодняшний день ряд непрерывных

спутниковых измерений недостаточно продолжителен для достоверных оценок, в этих данных присутствует заметный положительный тренд, составляющий ~10-20% за 10 лет, для представленных регионов (18% в Санкт-Петербурге, 21% в Москве и 9% в Париже). Эти оценки существенно ниже полученных ранее в работе [6], где использовался ряд данных GOME с 1995 по 2005 год (~40%), что обусловлено снижением среднегодовых содержаний тропосферного NO<sub>2</sub> в данных GOME в последующие годы (2006 и 2007).



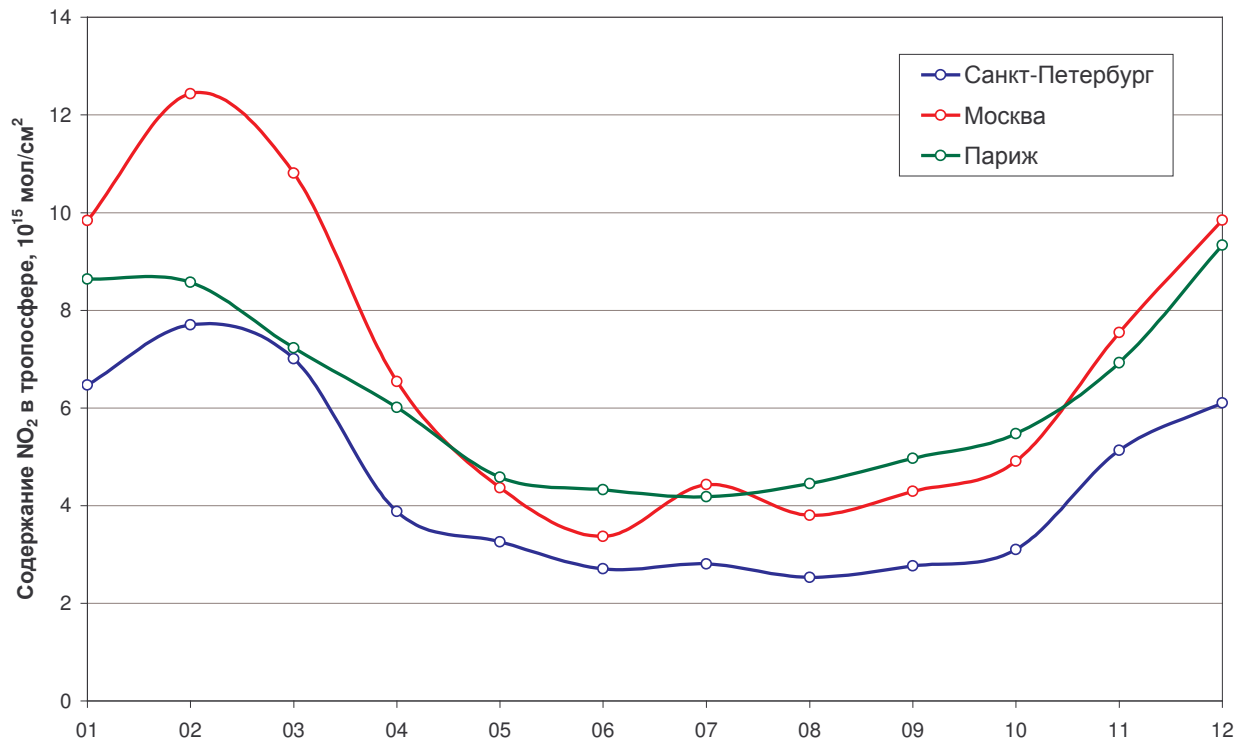


Рисунок 4.1

Сезонный ход содержания NO<sub>2</sub> в тропосфере регионов Санкт-Петербурга, Москвы и Парижа по данным спутниковых измерений GOME (GDP4.0) в 1995-2007 гг.

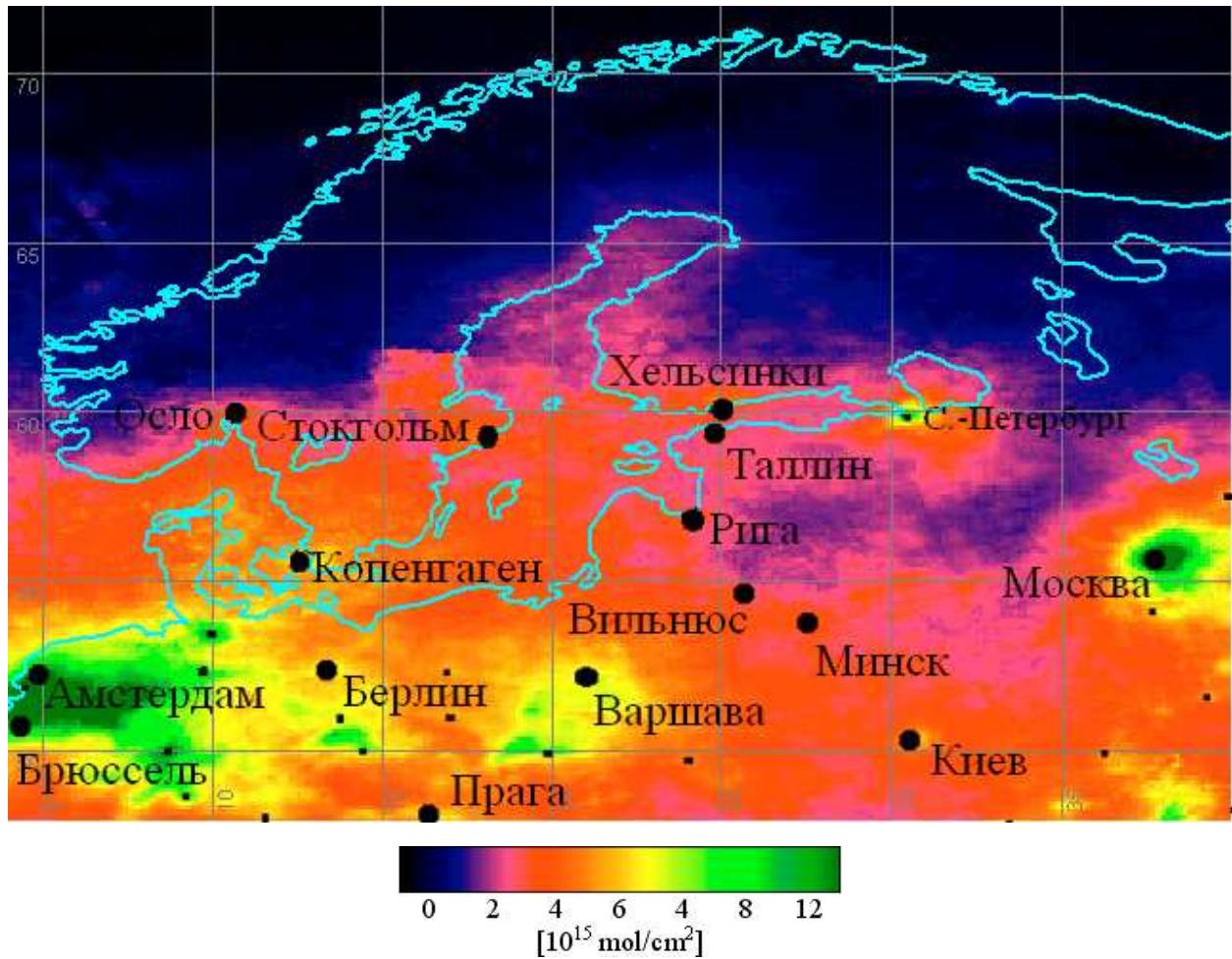
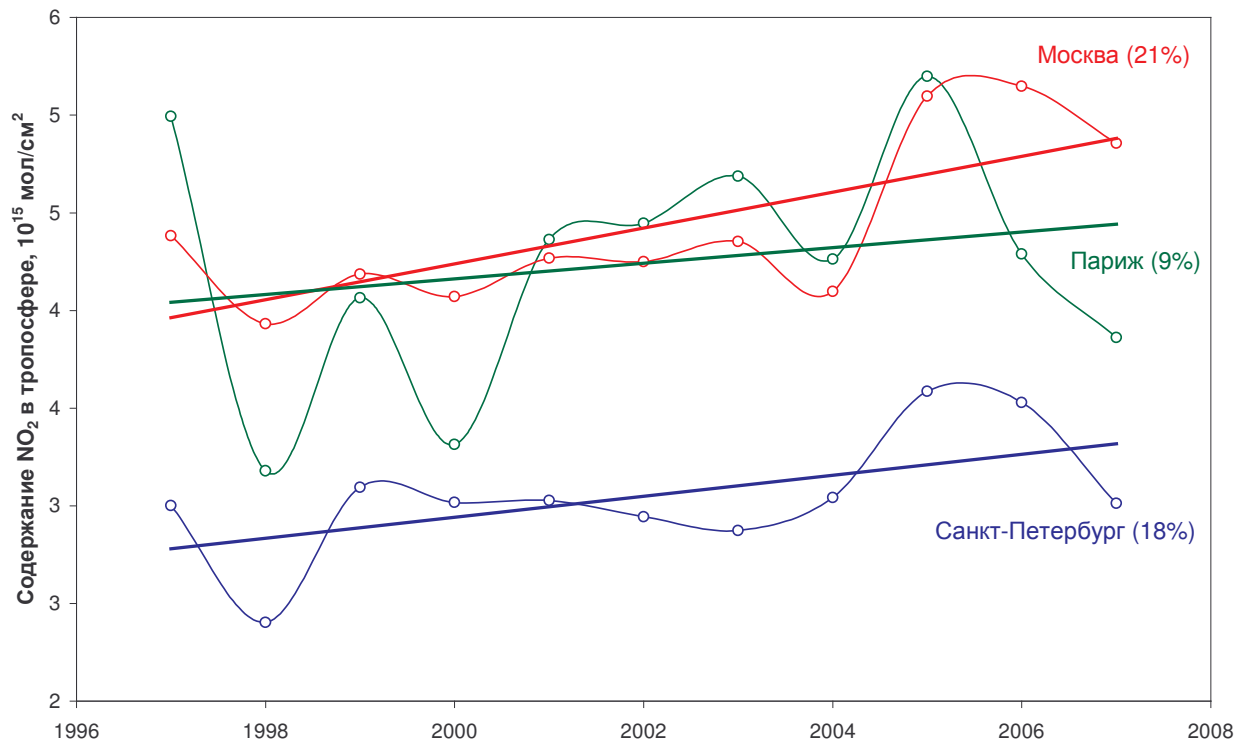


Рисунок 4.2

Среднегодовое распределение содержания  $\text{NO}_2$  в тропосфере Балтийского региона по данным спутниковых измерений AURA OMI в 2006-2007 гг. ([www.temis.nl](http://www.temis.nl))



**Рисунок 4.3**

Оценка линейного тренда содержания  $\text{NO}_2$  в тропосфере регионов Санкт-Петербурга, Москвы и Парижа по данным спутниковых измерений GOME (GDP4.0) в 1995-2007 гг. (в % за 10 лет)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках представленной научно-исследовательской работы проинтерпретированы данные наземных наблюдений за содержанием  $\text{NO}_2$  в атмосфере на основе измерений рассеянного в зенит видимого солнечного излучения в Санкт-Петербурге в 2004-2007 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 (OC)  $\text{NO}_2$  в вертикальном столбе атмосферы – переданы в международную базу данных валидации спутниковой аппаратуры ENVISAT (<http://nadir.nilu.no/calval>). В октябре 2007 года система оперативной обработки измерений полностью автоматизирована, а результаты ежедневных измерений OC  $\text{NO}_2$  доступны в сети Интернет в реальном времени ([http://troll.phys.spbu.ru/Personal\\_pages/Ionov/ksvu.html](http://troll.phys.spbu.ru/Personal_pages/Ionov/ksvu.html)).

Проведены сопоставления данных сумеречного зондирования вертикального содержания  $\text{NO}_2$  в районе Санкт-Петербурга с данными дневных измерений различной спутниковой аппаратурой – ERS-2 GOME, ENVISAT SCIAMACHY, AURA OMI. Данные спутниковых измерений, выполняемых на солнечно-синхронных орбитах, согласованы с результатами сумеречных наземных наблюдений с использованием одномерной фотохимической модели суточного хода содержания  $\text{NO}_2$  в атмосфере. В среднем, отмечено удовлетворительное согласие между данными согласованных спутниковых и наземных измерений (среднее расхождение 10-20%), при значительном среднеквадратическом расхождении ( $\sim 40\%$ ), обусловленном влиянием антропогенного тропосферного загрязнения.

Получены оценки вариаций содержания  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  Автоматизированной системой мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга. Получены согласованные оценки недельного цикла вариаций  $\text{NO}_2$  вблизи мегаполиса Санкт-Петербурга по имеющимся данным дистанционных и прямых измерений, с характерным минимумом содержания  $\text{NO}_2$  в выходные дни (20-30% от максимума в будни). Для сравнения, проанализированы данные аналогичных спутниковых и прямых приземных измерений в районе третьего по величине европейского мегаполиса – Париж (Франция). Эти данные также демонстрируют снижение содержания  $\text{NO}_2$  в атмосфере французской столицы в воскресные дни. Изучен типичный суточный цикл вариаций приземной концентрации  $\text{NO}_2$  на основе анализа прямых ежечасных измерений двух автоматических станций в центральной части Санкт-Петербурга. Минимальная средняя концентрация наблюдаются ранним утром (4:00-7:00), после чего содержание  $\text{NO}_2$  начинает быстро расти, достигая максимальных значений к 9:00-11:00 и оставаясь в дальнейшем практически постоянным вплоть до наступления ночи. В отличие от Санкт-Петербурга, суточный цикл приземной концентрации  $\text{NO}_2$  в центральной части Парижа (Франция) характеризуется двумя минимумами (ранним утром и в середине дня) и двумя максимумами – в начале и конце рабочего дня. При этом воскресный суточный цикл  $\text{NO}_2$  в Париже характеризуется только вечерним максимумом. По измерениям в Санкт-Петербурге, разница между воскресным суточным циклом и циклом в будние дни менее выражена, а максимальные содержания наблюдаются около полуночи. Следует также отметить,

что среднесуточные концентрации  $\text{NO}_2$ , наблюдаемые в центральной части Санкт-Петербурга, существенно превышают уровень загрязнения в центре Парижа, и в среднем в 1.5 раза превышают установленную в России ПДК, причем даже в выходные дни.

Осуществляемые в НИИФ СПбГУ дневные дистанционные наземные измерения интегрального содержания  $\text{NO}_2$  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.

Выполнено картирование пространственных распределений содержания  $\text{NO}_2$  в тропосфере Северо-западного региона на основе результатов измерений спутниковой аппаратуры OMI в 2006-2007 гг. Проанализирован многолетний ряд спутниковых наблюдений содержания  $\text{NO}_2$  в тропосфере Северо-западного региона в 1995-2007 гг. по данным измерений аппаратуры GOME. Выявлен сезонный ход тропосферного содержания  $\text{NO}_2$  в районе Санкт-Петербурга, характеризующийся повышенными значениями в зимнее время, что также наблюдается в данных аналогичных измерений в районе мегаполисов Москвы и Парижа. При этом, хотя средние концентрации  $\text{NO}_2$  в приземном воздухе центра Санкт-Петербурга превышают средний уровень центральной части Парижа, данные дистанционных спутниковых измерений демонстрируют более высокие значения тропосферного содержания  $\text{NO}_2$  в районе Парижа. Последнее обусловлено меньшей, по сравнению с Санкт-Петербургом, численностью населения в границах города (2.2 млн. человек в Париже, 4.5 млн. человек в Санкт-Петербурге), но большей общей численностью населения всего мегаполиса (12 млн. человек в Париже, 6 млн. человек в Санкт-Петербурге). Это косвенно подтверждается

близкими оценками тропосферного содержания  $\text{NO}_2$  для районов Парижа и Москвы, учитывая что общее населения мегаполиса последней превышает 13 млн. человек.

На основе данных многолетних спутниковых измерений GOME (1995-2007) получена уточненная оценка положительного линейного тренда тропосферного  $\text{NO}_2$  в районе Санкт-Петербурга, составляющая 18% за 10 лет. Эта величина отличается от представленной ранее оценки 38% [6], в связи с использованием данных последних лет измерений GOME. Аналогичные оценки, выполненные для регионов Москвы и Парижа, составили 21% и 9%, соответственно.

По результатам проведенных исследований подготовлен настоящий научно-технический отчет, вышло две статьи [6, 15], сделано 2 сообщения на 2 международных конференциях [16, 21].

## 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. *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. *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. *Поберовский А.В., Шашкин А.В., Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М.* Вариации содержания NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> 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. *Chipperfield M.P.* Multiannual simulations with a three-dimensional chemical transport model // *J. Geophys. Res.*, 104, D1, 1781-1805, 1999.
12. *Ionov D.V., Sinyakov V.P., Semenov V.K.* Validation of GOME (ERS-2) NO<sub>2</sub> vertical column data with ground-based measurements at Issyk-Kul (Kyrgyzstan) // *Adv. Space Res.*, 37, 2254-2260, 2006.
13. *Ionov D.V., Timofeyev Y.M., Sinyakov V.P., Semenov V.K., Goutail F., Pommereau J.-P., Bucselo E.J., Celarier E.A., Kroon M.* Ground-based validation of EOS-Aura OMI NO<sub>2</sub> vertical column data in the midlatitude mountain ranges of Tien Shan (Kyrgyzstan) and Alps (France) // *J. Geophys. Res.* 2007 (accepted for publication).
14. *Тимофеев Ю.М., Ионоу Д.В., Поляков А.В., Еланский Н.Ф., Елохов А.С., Груздеу А.Н., Постыляков О.В., Розанов Е.В.* Сопоставление

- результатов спутниковых и наземных измерений общего содержания  $\text{NO}_2$  // Известия РАН, Физика атмосферы и океана, 2000, 36(6), 802-808.
15. *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
  16. *Ионов Д.В., Поберовский А.В.* Вариации содержания  $\text{NO}_2$  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
  17. *Beirle S., Platt U., Wenig M., Wagner T.* Weekly cycle of  $\text{NO}_2$  by GOME measurements: a signature of anthropogenic sources // Atmos. Chem. Phys., 3, 2225-2232, 2003.
  18. *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  $\text{NO}_2$  по данным спутникового эксперимента GOME: анализ точности // Физическая Мысль России. 2002. N 2. С.158-165.
  19. *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.
  20. *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

окси углерода в атмосфере по данным спутникового зондирования // Материалы конференции: Международный Симпозиум стран СНГ "Атмосферная Радиация", 22-25 июня 2004, Санкт-Петербург, с.112-113

21. *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.