

УДК 53.082.53

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТРОПОСФЕРНОЙ ДВУОКИСИ АЗОТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ В МИНСКЕ

*И. И. БРУЧКОВСКИЙ<sup>1), 2)</sup>*

<sup>1)</sup>Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ,  
ул. Курчатова, 7-816, 220045, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ,  
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

Представлены результаты первых измерений вертикального профиля концентрации двуокиси азота над г. Минском в 2017 г. при помощи многоосевого регистратора спектров MARS-B и анализ полученных пространственно-временных рядов. Восстановление вертикальных распределений двуокиси азота осуществлялось с использованием метода многоосевой дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии в диапазоне 338–370 нм и алгоритма PgiAM решения обратной задачи в течение светового дня. По итогам сравнительного анализа величин измерений предложен вариант классификации многообразия зарегистрированных профилей двуокиси азота по шести группам. Представлены ряды данных концентрации в приземном слое и общего содержания двуокиси азота, проведены их статистическое исследование, сравнения с уровнем предельно допустимой концентрации двуокиси азота для человека. Выполнено сравнение значений приземной концентрации с данными импактного газоанализатора сети мониторинга Белгидрометцентра (пост № 11). Анализ полученных величин отвергает гипотезу об их статистической связи на масштабе временного ряда 1 мес.

**Ключевые слова:** дифференциальная оптическая абсорбционная спектроскопия; двуокись азота; вертикальное распределение двуокиси азота.

---

### Образец цитирования:

Бручковский ИИ. Восстановление вертикального профиля концентрации тропосферной двуокиси азота по результатам измерений в Минске. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2020;1:95–104.  
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-1-95-104>

### For citation:

Bruchkouski I. First tropospheric measurements of the vertical profile of nitrogen dioxide concentration in Minsk. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2020;1:95–104. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-1-95-104>

---

### Автор:

**Илья Игоревич Бручковский** – научный сотрудник лаборатории оптических средств измерений<sup>1)</sup> и лаборатории оптико-физических измерений отдела аэрокосмических исследований<sup>2)</sup>.

### Author:

**Ilya I. Bruchkouski**, scientific researcher at the optical measuring instruments laboratory<sup>a</sup> and the laboratory of optical and physical measurements, aerospace research department<sup>b</sup>.  
[bruchkovsky2010@yandex.ru](mailto:bruchkovsky2010@yandex.ru)



## FIRST TROPOSPHERIC MEASUREMENTS OF THE VERTICAL PROFILE OF NITROGEN DIOXIDE CONCENTRATION IN MINSK

I. I. BRUCHKOUSKI<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>National Ozone Monitoring Research and Education Center, Belarusian State University,  
7-816 Kurčatava Street, Minsk 220045, Belarus

<sup>b</sup>A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University,  
7 Kurčatava Street, Minsk 220045, Belarus

The first measurement results of the vertical profiles of nitrogen dioxide over Minsk employing the multi-axis recorder of spectra MARS-B and analysis of the obtained spatio-temporal series for 2017 is presented. The vertical profiles of nitrogen dioxide have been retrieved in spectral region 338–370 nm by combining the multi-axis differential optical absorption spectroscopy method and PriAM algorithm for inverse problem solving during daylight. A comparative analysis of the measurement results has been carried out. The classification by dividing the obtained variety of registered nitrogen dioxide profiles into six groups has been presented. Obtained time series of surface layer nitrogen dioxide concentrations as well as nitrogen dioxide total columns have been presented, their statistics have been analyzed, and comparisons with the level of the maximum permissible concentration of nitrogen dioxide for a human have been performed. The values of near-surface concentrations have been compared with the impact gas analyzer data by monitoring network of the Belhydrometcentre (post No. 11), the analysis of the obtained data rejects the hypothesis of their statistical relationship on the scale of a 1-month time series.

**Keywords:** differential optical absorption spectroscopy; nitrogen dioxide; nitrogen dioxide profile.

### Введение

В последние годы большое внимание уделяется вопросу влияния антропогенных эмиссий на глобальное состояние озонового слоя, исследуются механизмы воздействия антропогенных выбросов на погоду и климат. В настоящее время значительно изменяют состав атмосферы выбросы окислов азота, связанные со сгоранием органического топлива. Они оцениваются в пересчете на двуокись азота ( $\text{NO}_2$ ), которая в основном образуется в результате окисления окиси азота.

Двуокись азота – ключевой компонент семейства азотных составляющих атмосферы, играющих важную роль в балансе озона. Окислы азота  $\text{NO}_x$  являются фотохимически активными газами, причем в процессе разрушения стратосферного озона доминирует природный азотно-окисный цикл благодаря большому содержанию в стратосфере частиц  $\text{NO}_x$  по сравнению с другими частицами [1]. В тропосфере в присутствии достаточного количества долгоживущих летучих органических соединений  $\text{NO}_2$ , наоборот, способствует дополнительному образованию озона.

Различают естественную и антропогенную компоненты двуокиси азота. Естественная компонента проявляет себя в стратосфере в озоновом цикле. Антропогенная компонента, которая по своей абсолютной величине может превосходить естественную на порядок, в основном образуется в тропосфере в результате окисления окиси азота. Двуокись азота имеет класс опасности 3, характеризуется влиянием на репродуктивную функцию человека, мутагенной и канцерогенной активностью, а также играет одну из ключевых ролей в формировании климатических особенностей Земли. При этом  $\text{NO}_2$  является одним из сильнейших загрязнителей атмосферы.

Цель работы – восстановление временных рядов вертикальных распределений общего содержания и приземной концентрации двуокиси азота над г. Минском в течение 2017 г. и проведение первичного анализа полученных рядов. Для достижения этой цели использовался пассивный метод дистанционного зондирования MAX-DOAS (multi-axis differential optical absorption spectroscopy) применительно к данным, полученным с помощью прибора MARS-B, созданного в Национальном научно-исследовательском центре мониторинга озоносферы (ННИЦ МО) БГУ.

### Материалы и методы

Многоосевая модификация метода DOAS является относительно новым способом [2], позволяющим восстанавливать вертикальное распределение тех малых газовых составляющих, которые имеют полосы поглощения в видимом и ближнем УФ-диапазонах (двуокись азота, двуокись серы, оксид брома, формальдегид и глиоксаль).

Идея MAX-DOAS состоит в том, чтобы зарегистрировать солнечный свет, рассеянный из различных направлений визирования. На практике обычно используются углы возвышения над горизонтом. В основе лежит уравнение Бугера – Ламберта – Бэра, записанное для распространения излучения в атмосфере [3]:

$$I(\lambda, L) = I_0(\lambda) \exp \left( - \int_0^L \left( \sum_j \sigma_j(\lambda) c_j(l) + \varepsilon_R(\lambda, l) + \varepsilon_M(\lambda, l) \right) dl \right), \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность источника в отсутствие поглотителей;  $\sigma_j$  – сечения поглощения малых газовых составляющих;  $c_j$  – концентрация  $j$ -й малой газовой составляющей;  $\varepsilon_R$  и  $\varepsilon_M$  – коэффициенты ослабления из-за рассеяния Рэля и Ми соответственно. В таком случае измеряемая величина – наклонное содержание  $S_j$  – является интегральной концентрацией  $j$ -й газовой микропримеси вдоль неизвестного пути света длиной  $L$ :

$$S_j(L) = \int_0^L c_j(l) dl.$$

В целях уменьшения ошибки в качестве  $I_0(\lambda)$  на практике используется измерение в зенитном направлении в полдень, называемое *опорным спектром* (англ. *reference spectrum*), а определяемые в ходе DOAS-анализа величины  $S_j$  именуется *дифференциальными наклонными содержаниями*, или *DSCD* (англ. *differential slant column density*).

Кроме описанных в формуле (1) трех основных процессов, есть еще один процесс второго порядка малости, пренебрежение которым накладывает на точность метода ограничение, а именно ринг-эффект. Сущность последнего проявляется в виде небольшого уширения линий поглощения и уменьшения их глубины при наблюдении с Земли в рассеянном атмосферой солнечном свете. Природа ринг-эффекта объясняется передачей части энергии излучения вращательным степеням свободы молекул воздуха (неэластичное вращательное рамановское рассеяние) [4]. Его величина не превышает нескольких процентов от интенсивности линии, однако она сравнима с вкладом в оптическую толщину поглощения двуокиси азота. Ринг-эффект учитывают с помощью введения в процедуру DOAS-анализа фиктивного сечения поглощения  $\sigma_{\text{Ring}}(\lambda)$ , которое рассчитывается методами квантовой механики.

Процедура DOAS-анализа (ее еще называют решением прямой задачи) представляет собой минимизацию целевой функции  $\chi$  масштабированных сечений поглощения одновременно нескольких малых газовых составляющих, коэффициентов полинома, сечения ринг-эффекта и измеренного спектра поглощения, который получается путем удаления фраунгоферовых линий:  $\ln I(\lambda, L) - \ln I_0(\lambda)$ . Для минимизации функции  $\chi$  обычно применяется нелинейный метод Левенберга – Марквардта в подходящем диапазоне длин волн  $\lambda_1 - \lambda_2$ :

$$\chi^2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left( \ln I(\lambda, L) - \ln I_0(\lambda) + \sum_j \sigma_j(\lambda) DSCD_j(L) + \sum_m p_m \lambda^m \right) d\lambda \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $p_m$  – коэффициенты полинома степени  $m$ ; последнее слагаемое учитывает медленно меняющуюся часть для рассеяний Рэля и Ми, а также для других атмосферных примесей с широкой полосой поглощения. Диапазон длин волн выбирается так, чтобы в нем содержались спектральные особенности сечений поглощений целевых малых газовых составляющих.

На практике также необходимо учитывать дополнительные эффекты, которые зависят от конкретной приборной реализации. Общая и обычная трудность состоит в том, что калибровка по длинам волн измеренных в лаборатории сечений поглощения и регистрируемого спектра всегда отличается, причем с течением времени она может изменяться. Учесть это можно путем замены в уравнении (2) величины  $I(\lambda, L)$  на  $I(a + b\lambda, L)$ , где  $a$  и  $b$  – так называемые параметры сдвига и растяжения (англ. *shift* и *stretch*), которые участвуют в процедуре минимизации целевой функции одновременно со всеми сечениями поглощения и коэффициентами полинома.

Таким образом, предварительно проводится процедура DOAS-анализа в целях вычисления параметров *shift* и *stretch*, физический смысл которых есть не что иное, как параметры точной калибровки спектра по длинам волн. Обычно калибруемый спектр разбивается на несколько (9–15) окон, и для каждого из них рассчитываются величины *shift* и *stretch*.

Еще одна особенность практической реализации метода состоит в том, что уравнение (1) справедливо только для бесконечно узкой аппаратной функции спектрометра. В реальности есть разница между применением операции свертки до или после поглощения. Эта разница сильно зависит от спектральной структуры источника излучения: для сплошного источника она маленькая, а для солнечного спектра заметно проявляется при наличии сильных поглотителей, которые имеют структурные спектры [5]. Данное явление получило название  $I_0$ -эффекта, учет которого осуществляется математически, на этапе выполнения операции свертки сечений поглощения малых газовых составляющих с аппаратной функцией спектрометра.

Таким образом, результатом решения прямой задачи для одной серии углов возвышения  $\alpha$  будет набор дифференциальных наклонных содержаний  $DSCD_j(\alpha)$ , рассчитанных относительно опорного спектра, измеренного под углом  $90^\circ$  в полдень.

Физическое основание возможности восстановления информации о высотном распределении малой газовой составляющей состоит в том, что величины  $DSCD_j(\alpha)$  различаются для неодинаковых углов возвышения  $\alpha$  при расположении слоя исследуемой малой газовой составляющей на разных высотах. Однако чем выше находится этот слой, тем ближе величины измерений  $DSCD_j(\alpha)$  для различных  $\alpha$ , что определяет чувствительность метода по высоте. При этом распределение аэрозольного поглощения является важным фактором, оказывающим влияние на процедуру восстановления вертикального профиля малой газовой составляющей.

Распределение аэрозольного поглощения может быть восстановлено с использованием измеренных  $DSCD(\alpha)$  димера кислорода. Димер кислорода – это столкновительный комплекс, который имеет спектральные особенности в диапазоне длин волн 340–490 нм, и вместе с тем его распределение в атмосфере известно, так как известно распределение кислорода. Единственный фактор, который может оказывать воздействие на изменчивость  $DSCD(\alpha)$  димера кислорода – это аэрозольное поглощение. Подбирая параметры последнего в модели переноса излучения, можно минимизировать разницу между набором измеренных и моделированных  $DSCD(\alpha)$  димера кислорода, получая таким образом параметры аэрозольного поглощения из спектральных измерений методом MAX-DOAS [3].

Решение задачи восстановления высотного распределения малой газовой составляющей в атмосфере по рассчитанным значениям  $DSCD_j(\alpha)$  (ее также называют обратной задачей) может быть реализовано с применением модели переноса излучения *RTM* (от англ. *radiative transfer model*). В данной работе для обработки  $DSCD_j(\alpha)$  в целях получения профиля концентрации двуокиси азота использовалась модель переноса излучения *SCIATRAN* [6] в составе алгоритма восстановления PriAM.

На первом шаге алгоритм итерационно запускает *RTM* для оптимизации профиля аэрозоля таким образом, чтобы обеспечивалось максимальное согласие между измеренными  $DSCD(\alpha)$  и моделированными  $DSCD(\alpha)$  димера кислорода. На втором шаге в *RTM* используются полученные на первом шаге профили аэрозоля, при этом алгоритм оптимизирует профиль концентрации двуокиси азота так, чтобы минимизировать разность между измеренными  $DSCD(\alpha)$  и моделированными  $DSCD(\alpha)$  двуокиси азота.

Измерения эпизодически проводились в г. Минске начиная с 2011 г. на площадке НИИЦ МО БГУ в точке с координатами:  $53,837245^\circ$  с. ш.,  $27,475946^\circ$  в. д. при помощи многоосевого регистратора спектров MARS-B [7], разработанного на базе лабораторного спектрографа изображения Oriel MS257.

Измерения на постоянной основе в г. Минске начаты в январе 2017 г. и продолжаются по сей день в диапазоне длин волн 338–370 нм для углов возвышения  $1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  и  $90^\circ$  в одном азимутальном направлении (на север). Время регистрации одного спектра занимает 4 с. За период наблюдений получено около 3 млн дневных спектров, которые обработаны методом DOAS в целях получения наклонных толщ двуокиси азота. DOAS-анализ проводился при помощи программного обеспечения *QDOAS v.2.111*. При этом для восстановления аэрозольного поглощения и  $DSCD(\alpha)$  двуокиси азота применялись следующие настройки:

Диапазон длин волн	338–370 нм
Опорный спектр	Зенитный спектр, зарегистрированный около 11:30 UTC ( $\pm 15$ мин)
Сечения поглощения:	
NO <sub>2</sub> (298 К)	Vandaele et al. (1998) с $I_0$ -коррекцией ( $10^{17}$ молекул/см <sup>2</sup> )
NO <sub>2</sub> (220 К)	Vandaele et al. (1998) с $I_0$ -коррекцией ( $10^{17}$ молекул/см <sup>2</sup> )
O <sub>3</sub> (223 К)	Serdyuchnko et al. (2014) с $I_0$ -коррекцией ( $10^{20}$ молекул/см <sup>2</sup> )
O <sub>3</sub> (243 К)	Serdyuchnko et al. (2014) с $I_0$ -коррекцией ( $10^{20}$ молекул/см <sup>2</sup> )
O <sub>4</sub> (293 К)	Thalman and Volkamer (2013)
НСНО (293 К)	Meller and Moortgat (2000)
Сечение ринг-эффекта	Ring_QDOAS_SAO2010
Параметры полинома	Полином 5-го порядка (6 коэффициентов)
Сдвиг интенсивности	Постоянная величина (const)

В данных настройках имеется указание на коррекцию температурного смещения спектра, а параметры полинома соответствуют полиному для медленно меняющейся спектральной компоненты.

Предварительная обработка спектров включала в себя вычитание темнового сигнала, который измерялся в ночное время ежесуточно.

### Результаты и их обсуждение

Все многообразие восстановленных профилей концентрации двуокиси азота за исследуемый период наблюдений (2017) можно условно разделить на шесть групп.

К первой группе относятся профили «чистых» дней, для которых общее содержание двуокиси азота в столбе атмосферы составляет около  $0,5 \cdot 10^{16}$  молекул/см<sup>2</sup>, приземная концентрация равна 2–5 млрд<sup>-1</sup>. Характерный профиль концентрации двуокиси азота для первой группы представлен на рис. 1.

Вторая группа характеризуется выраженными утренними и вечерними всплесками, совпадающими по времени с интенсивностью дорожного движения. При этом вся двуокись азота находится в слое до 50–100 м, приземная концентрация в часы пик достигает 10–20 млрд<sup>-1</sup>, относительно быстрое перемещение воздушных масс приводит к уменьшению концентрации загрязнений в середине дня. Типичный профиль концентрации двуокиси азота для второй группы представлен на рис. 2.

В третью группу входят случаи наблюдаемого развития конвективных процессов, при которых происходит подъем загрязненного приземного слоя на высоту 100–1200 м. Лучше всего это заметно в первой половине дня, после прогрева солнечным излучением подстилающей поверхности. При этом воздух в нижнем слое очищается до 0–2 млрд<sup>-1</sup>, тогда как общее содержание может оставаться постоянным. К вечеру загрязненный воздух может снова опускаться. Такие процессы наблюдались с апреля по октябрь, но преимущественно в летние месяцы. На рис. 3 представлен профиль концентрации двуокиси азота для одного из таких случаев.

К четвертой группе можно отнести наблюдение одиночных всплесков концентрации двуокиси азота, не связанных с дорожным движением. Наблюдаемые всплески имели продолжительность от 5 мин до 1 ч, причем за это время концентрация NO<sub>2</sub> могла возрастать до 20–80 млрд<sup>-1</sup> (рис. 4).

В пятую группу входят случаи аномально высоких концентраций двуокиси азота, характеризующиеся стабильно высокими значениями (15–30 млрд<sup>-1</sup>) в течение 3–10 ч (рис. 5).

К шестой группе относится комбинированное загрязнение. Обобщение классификации дневных профилей представлено на рис. 6.

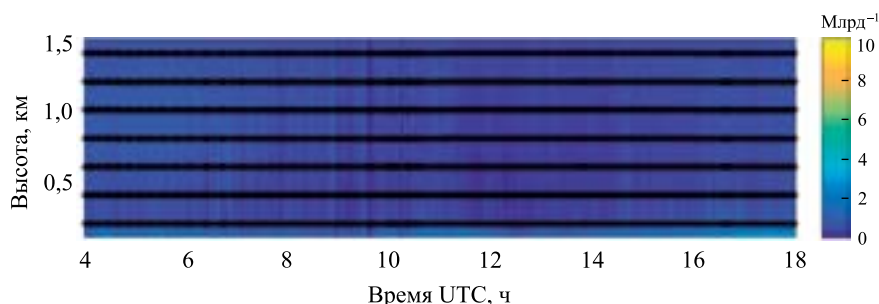


Рис. 1. Вертикальное распределение NO<sub>2</sub> для «чистого» дня (7 марта 2017 г.)

Fig. 1. NO<sub>2</sub> vertical profile: «clean» day (2017 March 7)

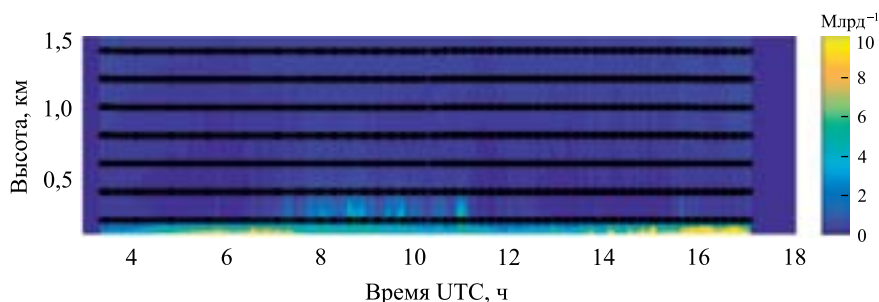


Рис. 2. Вертикальное распределение NO<sub>2</sub>

при интенсивном движении автотранспорта (25 августа 2017 г.)

Fig. 2. NO<sub>2</sub> vertical profile: traffic pollution (2017 August 25)

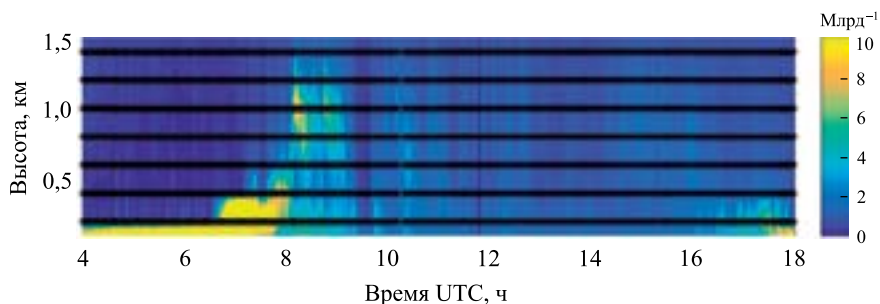


Рис. 3. Вертикальное распределение NO<sub>2</sub> при конвективном подъеме (10 июня 2017 г.)  
 Fig. 3. NO<sub>2</sub> vertical profile: upwelling convection (2017 June 10)

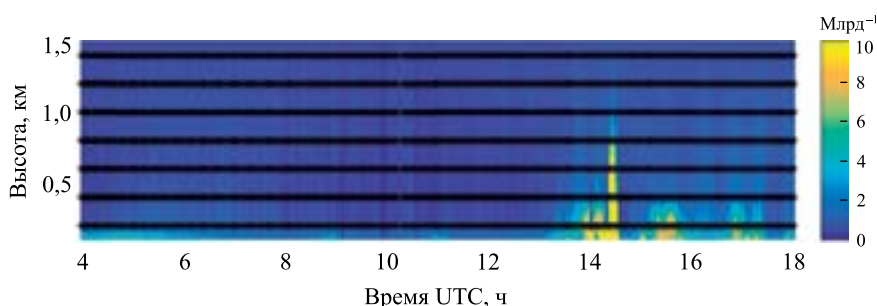


Рис. 4. Вертикальное распределение NO<sub>2</sub>: одиночные всплески (21 июня 2017 г.)  
 Fig. 4. NO<sub>2</sub> vertical profile: strong plumes (2017 June 21)

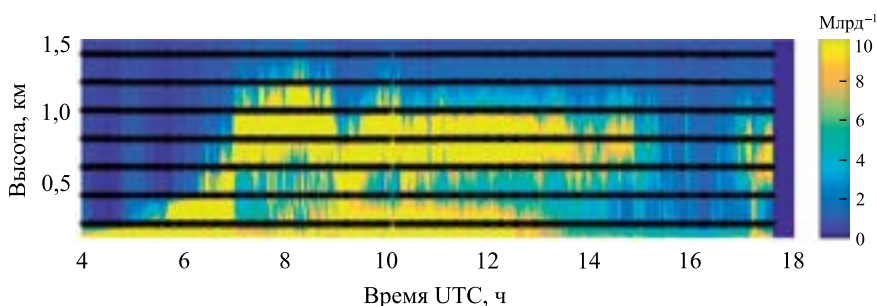


Рис. 5. Вертикальное распределение NO<sub>2</sub>: аномальный случай (19 мая 2017 г.)  
 Fig. 5. NO<sub>2</sub> vertical profile: anomaly case (2017 May 19)

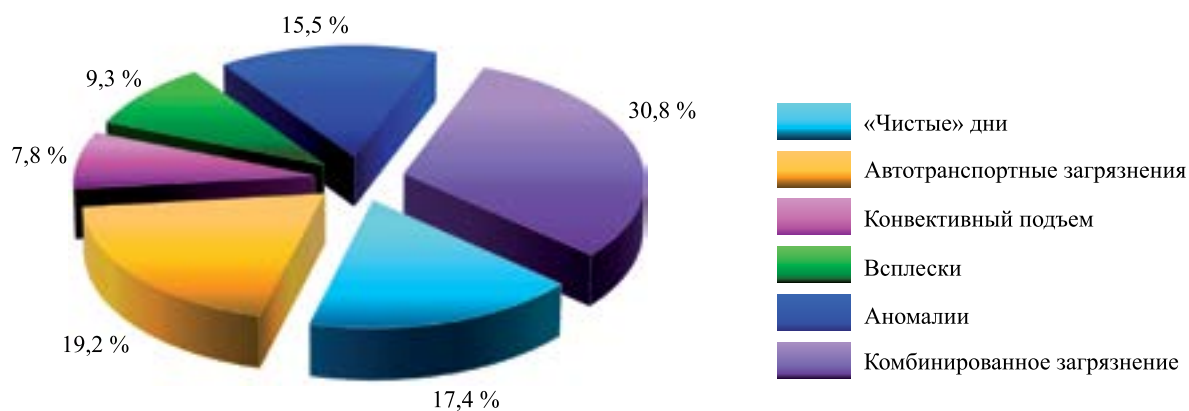


Рис. 6. Вертикальные распределения NO<sub>2</sub> по методу MAX-DOAS в г. Минске (2017)  
 Fig. 6. NO<sub>2</sub> profiles by MAX-DOAS method in Minsk (2017)

Для расчета общего содержания двуокиси азота полученный профиль концентрации интегрировался по высоте. Приземное содержание  $\text{NO}_2$  вычислялось как концентрация в нижнем слое оптимизированного профиля в модели переноса излучения, которая затем пересчитывалась в единицы – млрд<sup>-1</sup>. Результаты в виде временных рядов для 2017 г. представлены на рис. 7.

Предварительная обработка данных по общему содержанию двуокиси азота в целях проведения статистического анализа состояла в сглаживании соответствующего временного ряда и выявлении его аномальных значений. Сглаживание проводилось методом скользящего среднего по 50 точкам, что соответствует усреднению в интервале времени около 30 мин.

Замечено, что более 90 % всех изменений общего содержания двуокиси азота в течение года происходят в пределах до  $1,5 \cdot 10^{16}$  молекул/см<sup>2</sup>, при этом среднегодовое значение составляет  $1,0 \cdot 10^{16}$  молекул/см<sup>2</sup>.

Для приземной концентрации двуокиси азота установлена предельно допустимая среднесуточная величина – 0,04 мг/м<sup>3</sup>, или 19,7 млрд<sup>-1</sup>. Интерес представляет исследование аномалий, значения которых превосходят  $1,5 \cdot 10^{16}$  молекул/см<sup>2</sup>, а также случаев превышения среднесуточной предельно допустимой концентрации (ПДК): в 5 % наблюдений за 2017 г. зарегистрировано такое превышение. Увеличение среднесуточной ПДК более чем в 2 раза наблюдалось в 0,2 % случаев.

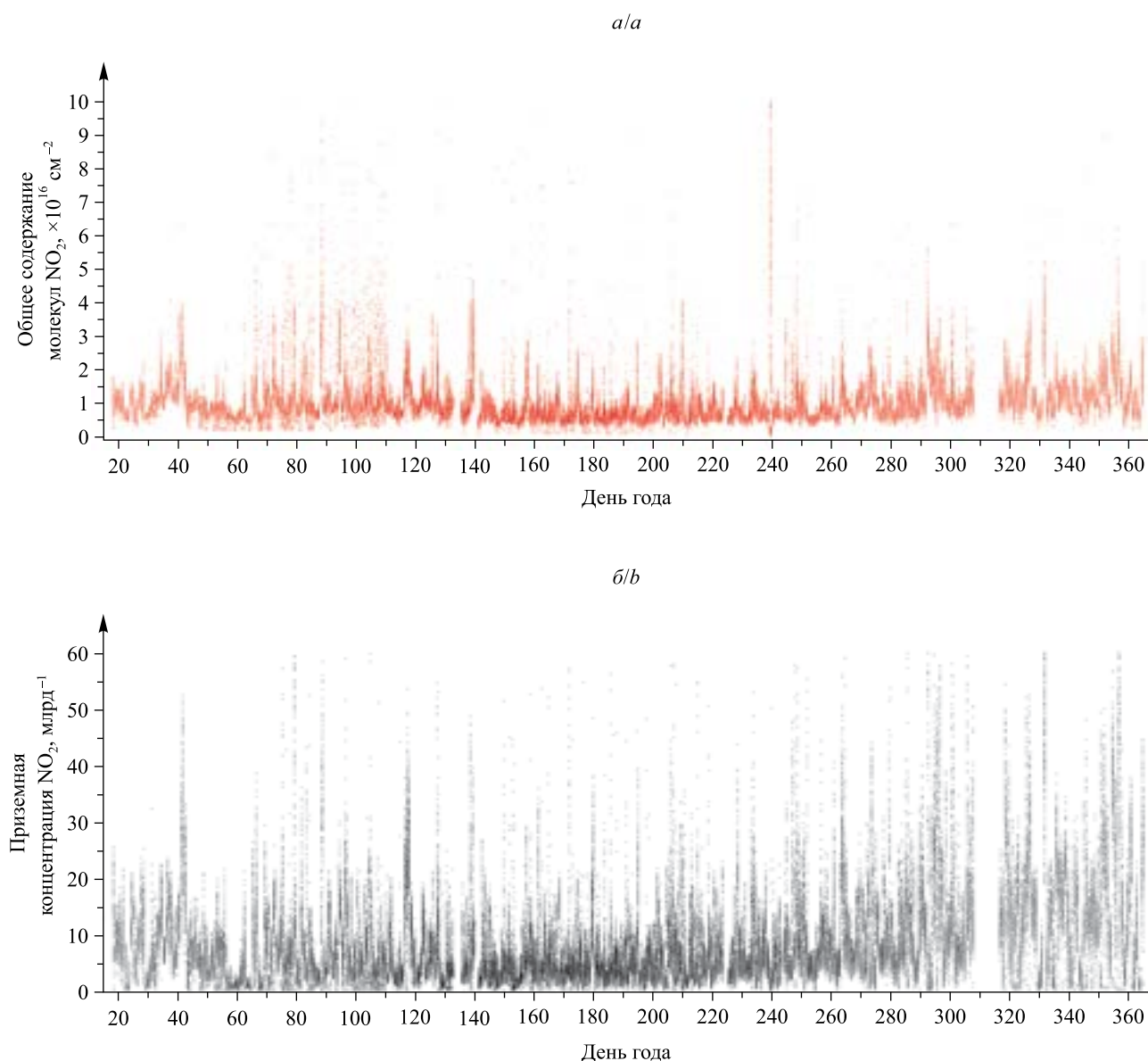


Рис. 7. Результаты наблюдений  $\text{NO}_2$  по методу MAX-DOAS в г. Минске (2017):

*a* – общее содержание; *б* – приземная концентрация

Fig. 7.  $\text{NO}_2$  MAX-DOAS measurements in Minsk (2017):

*a* – total column; *b* – near-surface concentration



На рис. 8 представлены гистограммы распределения временных рядов двуокиси азота над г. Минском для общего содержания и приземной концентрации. Стоит отметить, что идентичная форма распределения может указывать на преобладающий вклад в общее содержание локальных источников двуокиси азота.

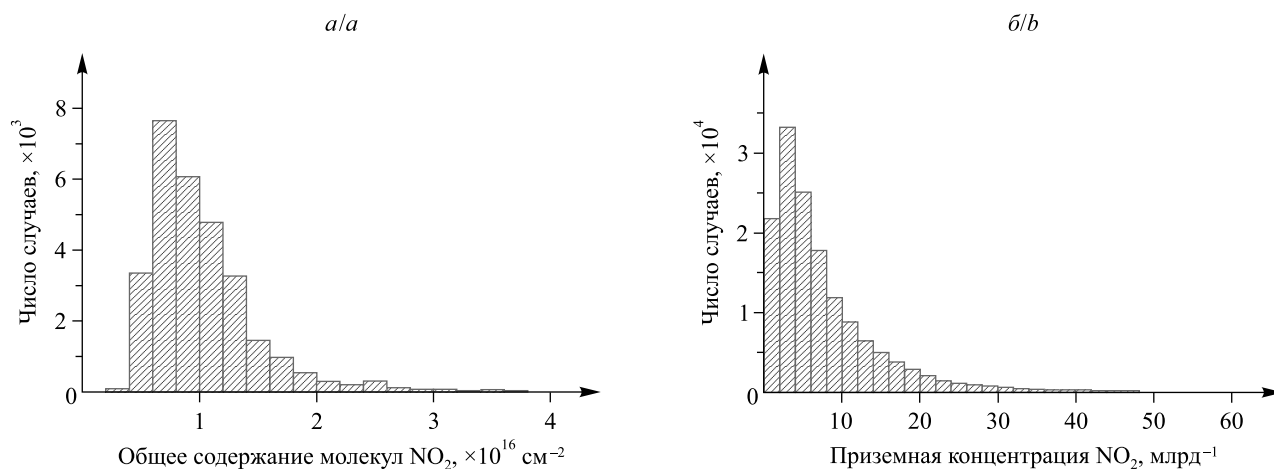


Рис. 8. Гистограммы распределения временных рядов двуокиси азота в г. Минске (2017):  
*a* – общее содержание; *b* – приземная концентрация

Fig. 8. NO<sub>2</sub> time series statistical distribution in Minsk (2017):  
*a* – total column; *b* – near-surface concentration

На рис. 9 представлено сравнение данных, найденных по методу MAX-DOAS, и ближайшей стационарной точки мониторинга Белгидрометцентра – поста № 11, полученных методом отбора проб на масштабе времени 1 мес.

В рамках данной работы проверялась следующая гипотеза: достаточно ли велика разность между стандартными отклонениями распределений двух временных рядов данных (см. рис. 9, *a*) для того, чтобы ее можно было объяснить действием независимого фактора, а не случайностью, связанной с малым объемом выборки.

Для обоих рядов были рассчитаны средние значения, коэффициент корреляции, стандартные отклонения и корреляционная таблица. Наглядной иллюстрацией последней служит корреляционное поле (см. рис. 9, *b*). Среднее значение для метода MAX-DOAS составило 6,09 млрд<sup>-1</sup>, для импактного метода – 14,9 млрд<sup>-1</sup>, стандартные отклонения – 4,2 и 14,2 млрд<sup>-1</sup> для MAX-DOAS и импактного методов соответственно, что позволило отвергнуть гипотезу о статистической связи двух рядов данных, полученных разными методами.

Кроме того, найденная величина коэффициента корреляции ( $r = 0,24$ ) соответствует слабой связи исследуемых временных рядов (по шкале Чеддока).

Объяснить вышеуказанный факт можно тем, что импактные измерения в большей степени подвержены влиянию пространственных неоднородностей поля исследуемого объема воздуха, в то время как метод MAX-DOAS подразумевает усреднение измеряемой величины вдоль пути световых лучей в атмосфере, попадающих в прибор из малого телесного угла небесной сферы. Как правило, при этом речь идет о расстояниях 5–10 км в зависимости от прозрачности атмосферы. Кроме того, в данных газоанализатора возможно наличие значительной шумовой компоненты.

За 2017 г. проведено 146 500 измерений уровня тропосферной двуокиси азота, причем в 5 % случаев зафиксировано превышение ее среднесуточной ПДК. Во временном масштабе содержание двуокиси азота в атмосфере превышало среднесуточную ПДК в течение 73 ч в году.

На рис. 10 представлен среднегодовой (2017) дневной ход общего содержания двуокиси азота над г. Минском, полученный методом скользящего среднего по 500 точкам.

На рис. 10 заметно наличие суточной компоненты в виде фоновой подставки, т. е. плавная часть дневного хода двуокиси азота частично определяется выбросами автотранспорта. При этом в течение года можно наблюдать около 20 резких кратковременных выбросов (продолжительность выброса не превышает 30 мин), в ходе которых общее содержание двуокиси азота увеличивается в 1,5–6,0 раза по сравнению с фоновым среднегодовым значением 10<sup>16</sup> молекул/см<sup>2</sup>. При статистическом исследовании причинно-следственной связи выбросов с направлением ветра не выявлено преимущественного направления ветра, при котором выбросы происходят чаще всего.



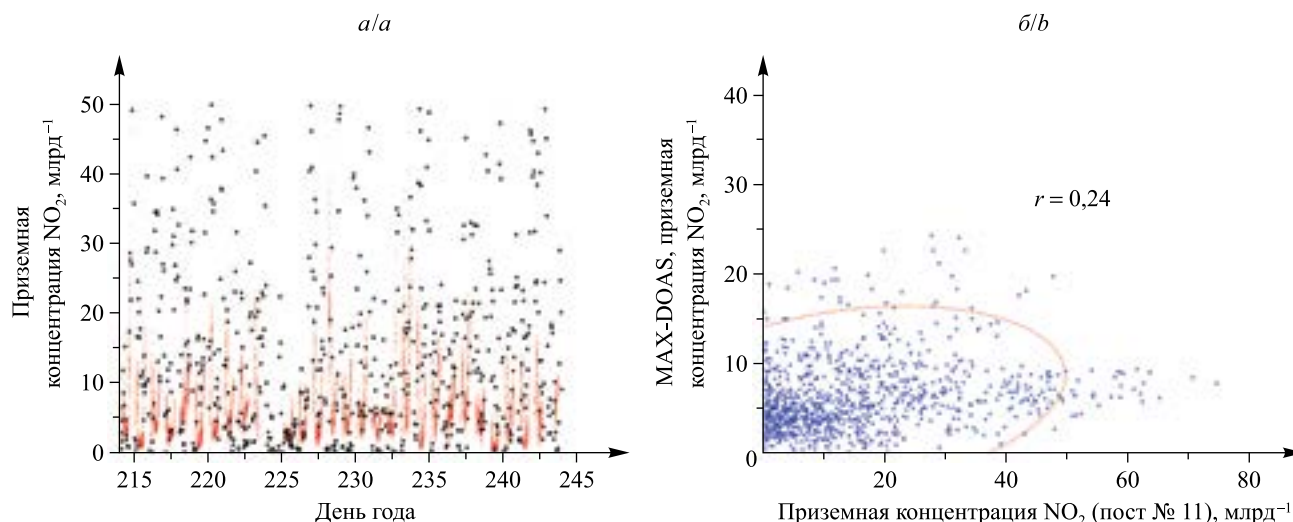


Рис. 9. Сравнение данных о приземной концентрации двуокиси азота в г. Минске (август 2017 г.), полученных методом MAX-DOAS (а, красные точки) и импактным методом отбора проб с использованием газоанализатора (а, черные точки), и корреляционное поле (б)

Fig. 9. NO<sub>2</sub> near-surface concentration time series comparison in Minsk (2017 August): MAX-DOAS method (a, red dots); impact sampling method by calibrated gas analyzer (a, black dots); correlation matrix (b)

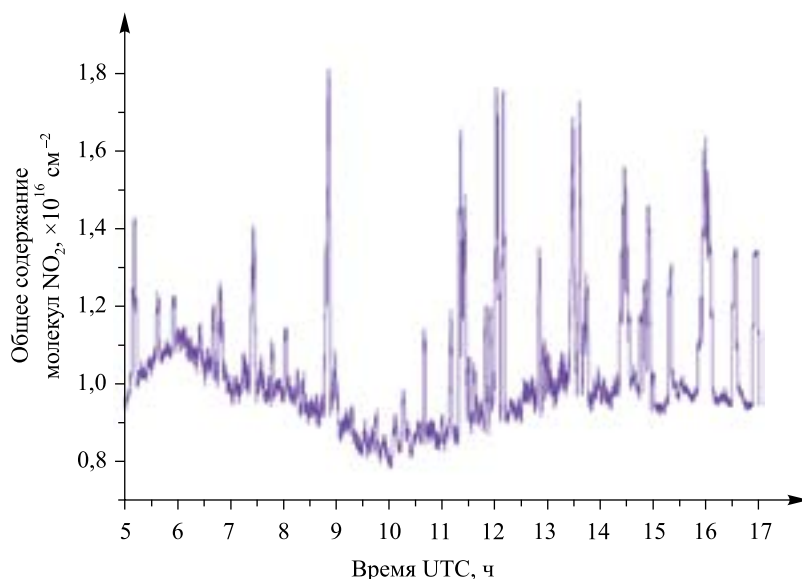


Рис. 10. Среднегодовой дневной ход двуокиси азота над г. Минском

Fig. 10. NO<sub>2</sub> total column averaged for 1 year time series, Minsk

Таким образом, проанализирована концентрация тропосферной двуокиси азота над г. Минском. Методом MAX-DOAS обработан массив данных, включающий в себя около 3 млн спектров за 2-летний период (с января 2017 по декабрь 2018 г.), приведены результаты статистической обработки для 2017 г., а именно:

- классифицированы вертикальные распределения двуокиси азота и представлены их шесть типичных дневных ходов;
- исследованы статистические распределения временных рядов общего содержания и приземной концентрации двуокиси азота;
- проведено сравнение ряда данных, полученного методом MAX-DOAS, с рядом данных импактного газоанализатора сети мониторинга Белгидрометцентра (пост № 11);
- проанализирован среднегодовой дневной ход тропосферной двуокиси азота.

Восстановленные по методу MAX-DOAS приземные концентрации двуокиси азота сравнивались с данными импактного газоанализатора стационарной точки мониторинга Белгидрометцентра. Анализ рядов данных, полученных вышеуказанными методами, отвергает гипотезу об их статистической связи.

### Библиографические ссылки

1. Ларин ИК. *Химическая физика озонового слоя*. Москва: ГЕОС; 2013. 159 с.
2. Irie H, Kanaya Y, Akimoto H, Iwabuchi H, Shimizu A, Aoki K. First retrieval of tropospheric aerosol profiles using MAX-DOAS and comparison with lidar and sky radiometer measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2008;8:341–350. DOI: 10.5194/acp-8-341-2008.
3. Platt U, Stutz J. *Differential optical absorption spectroscopy: principles and applications*. Berlin: Springer-Verlag; 2008. 598 p. DOI: 10.1007/978-3-540-75776-4.
4. Grainger JF, Ring J. Anomalous fraunhofer line profiles. *Nature*. 1962;193(4817):762. DOI: 10.1038/193762a0.
5. Wagner T, Dix B, von Friedeburg C, Frieß U, Sanghavi S, Sinreich R, et al. MAX-DOAS O<sub>4</sub> measurements: a new technique to derive information on atmospheric aerosols – principles and information content. *Journal of Geophysical Research*. 2004;109(D22):D22205. DOI: 10.1029/2004JD004904.
6. Reed AJ, Thompson AM, Kollonige DE, Martins DK, Tzortziou MA, Herman JR, et al. Effects of local meteorology and aerosols on ozone and nitrogen dioxide retrievals from OMI and pandora spectrometers in Maryland, USA during DISCOVER-AQ 2011. *Journal of Atmospheric Chemistry*. 2015;72(3–4):455–482. DOI: 10.1007/s10874-013-9254-9.
7. Бручковский ИИ, Боровский АН, Демин ВС, Красовский АН. Прибор для дистанционной регистрации двуокиси азота в атмосфере. *Вестник БГУ. Серия 1. Физика. Математика. Информатика*. 2013;1:41–45.

### References

1. Larin IK. *Khimicheskaya fizika ozonovogo sloya* [Chemical physics of the ozone layer]. Moscow: GEOS; 2013. 159 p. Russian.
2. Irie H, Kanaya Y, Akimoto H, Iwabuchi H, Shimizu A, Aoki K. First retrieval of tropospheric aerosol profiles using MAX-DOAS and comparison with lidar and sky radiometer measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2008;8:341–350. DOI: 10.5194/acp-8-341-2008.
3. Platt U, Stutz J. *Differential optical absorption spectroscopy: principles and applications*. Berlin: Springer-Verlag; 2008. 598 p. DOI: 10.1007/978-3-540-75776-4.
4. Grainger JF, Ring J. Anomalous fraunhofer line profiles. *Nature*. 1962;193(4817):762. DOI: 10.1038/193762a0.
5. Wagner T, Dix B, von Friedeburg C, Frieß U, Sanghavi S, Sinreich R, et al. MAX-DOAS O<sub>4</sub> measurements: a new technique to derive information on atmospheric aerosols – principles and information content. *Journal of Geophysical Research*. 2004;109(D22):D22205. DOI: 10.1029/2004JD004904.
6. Reed AJ, Thompson AM, Kollonige DE, Martins DK, Tzortziou MA, Herman JR, et al. Effects of local meteorology and aerosols on ozone and nitrogen dioxide retrievals from OMI and pandora spectrometers in Maryland, USA during DISCOVER-AQ 2011. *Journal of Atmospheric Chemistry*. 2015;72(3–4):455–482. DOI: 10.1007/s10874-013-9254-9.
7. Bruchkouski II, Borovski AN, Demin VS, Krasouski AN. Instrument for remote registration of atmospheric nitrogen dioxide. *Vestnik BGU. Seriya 1. Fizika. Matematika. Informatika*. 2013;1:41–45. Russian.

Статья поступила в редколлегию 25.11.2019.  
Received by editorial board 25.11.2019.