

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

УДК 504.3.054

*С. В. КАКАРЕКА, О. Ю. КРУКОВСКАЯ***ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИОКСИДА АЗОТА  
В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ МИНСКА***(Представлено академиком В. Ф. Логиновым)**Институт природопользования НАН Беларуси, Минск**Поступило 23.06.2014*

**Введение.** Для условий городской застройки характерна высокая неоднородность концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, что усложняет оценку качества воздушной среды на основании данных стационарного мониторинга. В наибольшей степени поля концентраций загрязняющих веществ неоднородны в городах при плотной высотной застройке вдоль улиц с интенсивным движением автомобильного транспорта. Впервые особые условия рассеивания выбросов от передвижных источников на городских улицах были отмечены в 1970-х годах [1]. Было установлено, что на улицах, где высота зданий сопоставима или превышает ширину улицы, формируются зоны практически замкнутой циркуляции, названные «уличными каньонами». Различные аспекты распределения концентраций загрязняющих веществ в условиях городской застройки отражены в [2; 3]. Вместе с тем наличие замкнутой циркуляции в «уличных каньонах» в городах Беларуси ранее не отмечалось и экспериментальные исследования распространения примесей в таких условиях не проводились.

Цель исследования – выявление зон специфической циркуляции воздуха в Минске и изучение особенностей распространения загрязняющих веществ в них. Исследование выполнено на примере диоксида азота – одного из приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха в городах Беларуси, поступление которого на 67 % определяется автомобильным транспортом.

**Материалы и методы исследования.** Вследствие особенностей планировки в Минске большая часть улиц с интенсивным движением транспорта характеризуется благоприятными условиями рассеяния примесей загрязняющих веществ и выноса их за пределы города. Вместе с тем в центральной части города расстояние между прилегающими к улице зданиями часто на отдельных участках не превышает 30 м.

В качестве объектов исследования были выбраны 10 участков улиц в центральной и восточной частях Минска, в том числе два участка в центральной части, которые по параметрам относятся к «уличным каньонам»: ул. Сурганова вблизи пересечения с пр. Независимости и ул. Куйбышева вблизи пр. Машерова. На ул. Сурганова в качестве объекта исследования был выбран участок длиной 230 м между пересечением с пр. Независимости и ул. К. Чорного, ориентированный с юго-востока на северо-запад. Высота зданий по обеим сторонам ул. Сурганова на данном участке составляет около 25 м, ширина улицы – 29 м. Движение транспорта на данном участке двухстороннее по трем полосам в каждом направлении суммарной среднесуточной интенсивностью 2600 ед/ч. На ул. Куйбышева был выбран участок длиной 110 м между пр. Машерова и ул. Киселева, ориентированный с юго-запада на северо-восток. Высота зданий составляет на выбранном участке 20 м, ширина улицы – 23 м. Улица имеет районное значение; движение осуществляется по двум полосам в каждом направлении суммарной среднесуточной интенсивностью 1600 ед/ч.

Измерение концентраций диоксида азота выполнялось в 2011–2013 гг. по стандартизированной методике путем аспирирования воздуха в течение 20 мин на барботеры с последующим фотометрическим определением [4]. В рамках исследования опробование выполнялось на расстоянии 1–3 м от края проезжей части с подветренной стороны улицы, в «уличных каньонах» – синхронно с двух сторон. В качестве контрольных использованы данные о содержании диоксида азота на автоматических постах сети Национальной системы мониторинга окружающей среды (НСМОС) в Минске и на постоянных площадках.

Всего выполнено 176 измерений содержания диоксида азота вблизи проезжей части 10 участков улиц Минска, в том числе 43 измерения содержания диоксида азота в «уличных каньонах», составляющие 11 серий по 3–4 измерения в каждой.

В Минске в сроки опробования в выбранных «уличных каньонах» было облачно, температура воздуха находилась в диапазоне 15,5–19,8 °С, преобладал слабый ветер западного и северо-западного направлений. Сторона улицы (наветренная/подветренная) устанавливалась по отношению к направлению ветра на уровне крыш зданий. В сроки выполнения экспериментальных исследований содержание диоксида азота в атмосферном воздухе в Минске составило 16–56 мкг/м<sup>3</sup> (июль 2012 г.), 24–92 мкг/м<sup>3</sup> (июль 2013 г.). За период 2008–2013 гг. ветры западного направления зарегистрированы в Минске в 10,6 % наблюдений, северо-западного – 14,0 % наблюдений.

**Результаты и их обсуждение.** Полученные средние концентрации диоксида азота в атмосферном воздухе приведены в табл. 1. Вблизи изучаемых участков улиц среднее содержание диоксида азота составило 81,0 мкг/м<sup>3</sup>, что в 2,9 раз выше фонового содержания данного загрязняющего вещества в Минске по данным наблюдений на станциях НСМОС.

Т а б л и ц а 1. Среднее содержание NO<sub>2</sub> в атмосферном воздухе вблизи участков дорог Минска

Место отбора	Средняя интенсивность движения транспорта, ед/час	NO <sub>2</sub> , мкг/м <sup>3</sup>	Кратность превышения содержания в жилой зоне
ул. Скорины, 10	984	47,0	1,69
ул. Филимонова, 63	1545	48,5	1,75
пр-т Независимости, 95	4119	60,2	2,17
ул. Куйбышева, 45	561	60,5	2,18
Круглая площадь	2089	68,1	2,45
МКАД, 2-й км	5310	69,0	2,49
ул. Филимонова, 24	942	82,4	2,97
ул. Бобруйская, 7	1716	82,8	2,98
ул. Радиальная, 52	1838	129,8	4,67
ул. Сурганова, 14	1211	161,7	5,82
Среднее	2032	81,0	2,92

На отдельных участках улиц кратность превышения содержания диоксида азота в жилой зоне вблизи проезжей части изменялись в диапазоне 1,7–5,8 раз. Измеренные концентрации в «уличных каньонах» составили на ул. Сурганова – 45–244 мкг/м<sup>3</sup>, на ул. Куйбышева – 20–121 мкг/м<sup>3</sup> (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Содержание диоксида азота в атмосферном воздухе «уличных каньонов»

Серия	Место отбора	Дата	Время	Содержание NO <sub>2</sub> , мкг/м <sup>3</sup>	
				диапазон	среднее
1	ул. Сурганова, 14	16.07.2012	10.25–10.45	45,0–177,8	113,8
2			10.50–11.10	141,9–200,2	167,4
3			11.25–11.45	178,3–243,8	216,5
4			12.10–12.30	134,6–171	533,9
5	ул. Куйбышева, 45	18.07.2012	11.35–11.55	19,9–106,3	61,7
6			12.10–12.30	25,2–99,2	58,1
7			12.40–13.00	46,3–106,7	88,0
8	ул. Куйбышева, 45	16.07.2013	11.05–11.25	32,5–54,7	46,9
9			11.25–11.45	32,4–120,9	82,2
10			12.10–12.30	28,0–76,7	52,4
11			12.47–13.07	45,9–54,8	49,2

Установлено, что среднее содержание диоксида азота в пределах «уличных каньонов» выше, чем вблизи других автомобильных дорог со сходной интенсивностью движения транспорта.

В пределах «уличных каньонов» отмечены повышенные в 4,6 раз концентрации диоксида азота по отношению к средним концентрациям в городе, что существенно (в 2,7–3,5 раз) выше, чем по данным наблюдений на станциях НСМОС, расположенных вблизи автомобильных дорог.

Оценка содержания диоксида азота с различных сторон (подветренной и наветренной) «уличных каньонов» относительно направления ветра на уровне крыш зданий показала статистически значимые различия для отдельных опробований. Среднее измеренное содержание диоксида азота в «уличном каньоне» на ул. Сурганова составило 161,7 мкг/м<sup>3</sup>, в том числе с подветренной стороны – 145,1 мкг/м<sup>3</sup>, с наветренной – 178,6 мкг/м<sup>3</sup>. Аналогично в «уличном каньоне» на ул. Куйбышева, концентрация диоксида азота с подветренной стороны составила 50,7 мкг/м<sup>3</sup>, что меньше, чем с наветренной, где в среднем наблюдалась концентрация диоксида азота 71,0 мкг/м<sup>3</sup>. При этом в пределах каждого из рассматриваемых «уличных каньонов» различие между концентрациями диоксида азота с наветренной и подветренной сторон статистически значимо.

Более высокие концентрации диоксида азота с наветренной стороны отмечены в 9 сериях опробований из 11. Соотношение между средним измеренным содержанием диоксида азота с наветренной и подветренной сторон на ул. Куйбышева составляет 1,40, на ул. Сурганова – 1,23. Следовательно, для «уличного каньона» с более выраженными особенностями циркуляции отмечается большее различие между концентрациями с подветренной и наветренной.

В ходе отбора проб воздуха интенсивность движения транспортных средств составила 987–2622 ед/ч. Для участка по ул. Сурганова отмечена интенсивность движения в среднем 2422 ед/ч, что более чем в 2 раза превышает интенсивность по ул. Куйбышева (1123 ед/ч). Полученные значения интенсивностей движения соответствуют 70–88 % среднесуточной часовой интенсивности на данных участках улиц (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Интенсивность движения транспорта в период опробования

Серия	Место отбора	Дата	Время	Интенсивность движения транспорта		
				Фактическая за время опробования (20 мин) в разрезе категорий и направлений (легковые/грузовые/малые коммерческие/автобусы/тракторы/мотоциклы)		маш/ч
				нечетная сторона	четная сторона	
1	ул. Сурганова, 14	16.07.2012	10.25–10.45	311/13/32/1/0/0	339/27/44/2/2/0	2313
2		16.07.2012	10.50–11.10	412/15/35/1/1/2	305/28/42/5/3/0	2547
3		16.07.2012	11.25–11.45	348/25/32/0/2/0	382/31/50/0/4/0	2622
4		16.07.2012	12.10–12.30	297/10/40/0/2/0	321/22/40/0/3/0	2205
5	ул. Куйбышева, 45	18.07.2012	11.35–11.55	209/2/37/0/4/0	140/3/16/0/1/0	1236
6		18.07.2012	12.10–12.30	140/1/15/0/3/0	162/2/18/0/1/0	1026
7		18.07.2012	12.40–13.00	190/0/28/0/5/0	186/4/18/0/1/0	1296
8		16.07.2013	11.05–11.25	151/5/10/1/0/0	134/7/16/4/0/1	987
9		16.07.2013	11.25–11.45	160/5/17/1/0/0	157/6/17/4/0/0	1101
10		16.07.2013	12.10–12.30	160/5/18/1/0/0	183/2/19/4/0/0	1176
11		16.07.2013	12.47–13.07	141/4/14/0/1/0	168/1/14/1/0/0	1032

Установлено, что между интенсивностью движения и измеренным содержанием диоксида азота в атмосферном воздухе в «уличных каньонах» наблюдается статистически значимая линейная зависимость, не выявленная при других условиях рассеяния в городе. В целом наблюдается закономерная тенденция к увеличению выбросов оксидов азота с увеличением интенсивности движения транспорта, которая также зависит от структуры транспортного потока. При общей интенсивности 988 ед/ч, увеличение доли грузовых автомобилей и автобусов с 5 до 10 % приведет к росту выбросов оксидов азота на 22 %.

Был выполнен расчет выбросов диоксида азота от автомобильного транспорта за период опробования с использованием модели COPERT 4 с учетом интенсивности движения транспорт-

ных средств в разрезе категорий и экологических классов, метеорологических условий, характеристик топлива и других показателей [5]. Выбросы диоксида азота при различной интенсивности и структуре транспортных потоков за период опробования (20 мин) составили на ул. Сурганова от 113,7 до 127,7 мг/км, на ул. Куйбышева – от 43,4 до 76,5 мг/км. Наибольший вклад в выбросы диоксида азота во всех сериях опробования внесли малые коммерческие грузовые (30–46 %) и легковые (32–63 %) автомобили (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Поступление диоксида азота в атмосферный воздух от автомобильного транспорта в пределах «уличных каньонов» за период опробования (20 мин), мг NO<sub>2</sub>/км

Серия	По категориям транспортных средств					По направлениям движения		Всего	
	легковые автомобили	грузовые автомобили	малые коммерческие грузовые автомобили	автобусы	тракторы	нечетная сторона	четная сторона	мг/км	мг
1	42,1	22,1	45,4	3,0	1,1	68,2	45,5	113,7	26,2
2	46,5	23,8	48,8	5,9	2,2	80,2	47,1	127,3	29,3
3	47,3	31,0	46,1	0,0	3,3	77,3	50,3	127,7	29,4
4	40,0	17,7	54,8	0,0	2,8	75,7	39,6	115,3	26,5
5	22,7	2,8	48,3	0,0	2,8	63,2	13,3	76,5	8,4
6	19,7	1,7	21,0	0,0	2,2	30,1	14,5	44,5	4,9
7	24,5	2,2	37,3	0,0	3,3	50,2	17,1	67,3	7,4
8	18,4	6,6	14,4	4,9	0,0	25,9	18,5	44,4	4,9
9	20,5	6,1	23,2	4,9	0,0	35,2	19,5	54,8	6,0
10	22,2	3,9	24,7	4,9	0,0	36,5	19,2	55,7	6,1
11	20,0	2,8	19,1	1,0	0,6	29,3	14,1	43,4	4,8

Связь между уровнем выбросов и средним содержанием диоксида азота в пределах уличных каньонов статистически достоверно описывается линейной зависимостью. Принимая в качестве городского фона среднее содержание диоксида азота в ландшафтно-рекреационной зоне Минска – 31,6 мкг/м<sup>3</sup>, согласно [6], связь между выбросами и концентрацией может быть описана зависимостью

$$C_{\text{NO}_2} = 4,90E_{\text{NO}_2} + 31,6,$$

где  $C_{\text{NO}_2}$  – содержание диоксида азота в атмосферном воздухе, мкг/м<sup>3</sup>;  $E_{\text{NO}_2}$  – выбросы диоксида азота, мкг/м. Линейная зависимость с такими коэффициентами является статистически достоверной и объясняет 85 % дисперсии измеренного содержания диоксида азота.

В соответствии с полученной регрессионной линейной моделью, в условиях изучаемых «уличных каньонов» увеличение интенсивности движения, приводящее к увеличению выбросов диоксида азота на 1 г, увеличивает в свою очередь его концентрацию в атмосферном воздухе на обочине дороги на высоте 1,5 м на 4,9 мкг/м<sup>3</sup>.

Полученные результаты в целом согласуются с наблюдениями, выполненными в других городах Европы (Лондоне, Париже, Копенгагене, Берлине), и результатами моделирования распространения примесей в условиях «уличных каньонов». Максимальные суточные значения на высоте 1–2 м отмечаются в диапазоне 50–340 мкг/м<sup>3</sup> при направлении ветра, близком к перпендикулярному направлению улицы [7]. Следовательно, представленные результаты исследований концентраций диоксида азота в пределах «уличных каньонов» близки к максимальным наблюдаемым их значениям в местах опробования. Превышение концентраций в «уличных каньонах» по отношению к среднему содержанию в городах составляет 2,5–4,5 раза и отмечается во всех случаях проведения подобных сравнений [8].

Отношение высоты зданий, прилегающих к улице, к расстоянию между ними (ширина проезжей части, зеленая зона, тротуар), определяющее особенности циркуляции атмосферного воздуха в «уличном каньоне», на ул. Сурганова составляет 0,86, на ул. Куйбышева – 0,87. При таком соотношении сторон «уличного каньона» формируется поле ветра и концентраций с одним центром, смещенным к подветренной стороне [9]. Соотношение концентраций на различных сторо-

нах «уличного каньона» зависит от скорости ветра и изменяется в пределах 1,2–2,6 раз в диапазоне скорости ветра 1–9 м/с [10]. Следовательно, полученное в данном исследовании значение различий содержания диоксида азота в 1,2–1,4 раза приближается к нижней границе диапазона различий, что может быть объяснено невысокой скоростью ветра в сроки опробования.

Таким образом, экспериментально подтверждено наличие на территории Минска «уличных каньонов» и существенная неоднородность распространения диоксида азота в атмосферном воздухе, проявляющаяся в повышенном на 21–40 % содержании диоксида азота с наветренной стороны относительно направления ветра на уровне крыш зданий. Различие между концентрациями на сторонах «уличного каньона» возрастает при увеличении соотношения высоты зданий к ширине улицы. Сопоставление полученных результатов с аналогичными исследованиями позволяет сделать вывод, что измеренные концентрации диоксида азота при аналогичных интенсивностях движения являются одними из наиболее высоких, наблюдаемых в данных «уличных каньонах», однако различие между содержанием с наветренной и подветренной сторон может возрастать до 2,5 раз при скорости ветра 8–9 м/с. Следовательно, при высокой скорости ветра (5 м/с и более) в городе в целом формируются благоприятные условия рассеивания загрязняющих веществ, тогда как в «уличных каньонах» могут формироваться локальные зоны очень высоких концентраций. Помимо обследованных, к улицам, где могут создаваться такие условия, в Минске могут быть отнесены участки улиц Кирова, Энгельса, Маркса, Комсомольской, Волгоградской, Интернациональной, Киселева, Первомайской и некоторые другие, а также некоторые улицы в других городах Беларуси.

## Литература

1. Hoydysh W. G., Griffiths R. A., Ogawa Y. // APCA Paper. 1974. N 14. P. 175.
2. DePaul F. T., Sheih C. M. // *Atm. Env.* 1985. Vol. 19, N 4. P. 555–559.
3. Georgii H. W., Busch E., Weber E. Investigation of the temporal and spatial distribution of the emission concentration of carbon monoxide in Frankfurt/Main. Report of the Institute for Meteorology and Geophysics, University of Frankfurt/Main, 1967.
4. Сборник методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении измерений в области охраны окружающей среды: В 3 ч. Минск. 2011. Ч. 3. С. 26.
5. Ntziachristos L., Gkatzoflias D., Kouridis C., Samaras Z. // *Information technologies in environmental engineering.* 2009. P. 491.
6. Круковская О. Ю. // Молодежь в науке-2013: прил. к журн. «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі»: В 5 ч. Минск, 2014. Ч. 1. С. 53.
7. Berkowicz R., Palmgren F., Hertel O., Vignati E. // *Science of the total environment.* 1996. Vol. 189. P. 259–265.
8. Ghenu A., Rosant J.-M., Sini J.-F. // *Environmental Modelling & Software.* 2008. Vol. 23, N 3. P. 314.
9. Sini J. F., Anquetin S., Mestayer P. G. // *Atm. Env.* 1996. Vol. 30(15). P. 2659.
10. Vardoulakis S., Valiantis M., Milner J., ApSimon H. // *Atm. Env.* 2007. Vol. 41(22). P. 4622.

S. V. KAKAREKA, O. Y. KRUKOWSKAYA

sk001@yandex.ru

## PECULIARITIES OF THE NITROGEN DIOXIDE DISTRIBUTION IN THE ATMOSPHERIC AIR OF THE ROAD NETWORK IN MINSK

### Summary

Results of the first studied peculiarities of the nitrogen dioxide distribution in the atmospheric air in Minsk based on measurements in special conditions in ‘street canyons’ are described. It is shown that the ratio between ‘street canyons’ and background mean air concentrations of nitrogen dioxide is 2.2–5.8. In accordance to measurements, the nitrogen dioxide concentration on the windward side of street canyons is 1.2–1.4 times greater than its content on the leeward when the wind direction is close to the perpendicular direction of the street. A relation between emissions of nitrogen dioxide from vehicles based on the structure of traffic flows and nitrogen dioxide concentrations in street canyons in Minsk is evaluated.