

**РАНЖИРОВАНИЕ ГОРОДСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ
БЕЛАРУСИ ПО УРОВНЮ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АТМОСФЕРНЫЙ
ВОЗДУХ В РЕЗУЛЬТАТЕ СТАЦИОНАРНОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА
В БЫТОВОМ СЕКТОРЕ**

А. В. Мальчихина¹, О. Ю. Круковская²

¹ С.н.с., Институт природопользования НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь,

² С.н.с., Институт природопользования НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь,
o-krukowskaya@tut.by

Аннотация

В статье представлены результаты оценки выбросов загрязняющих веществ (оксиды азот, суммарные твердые частиц, оксид углерода, неметановые летучие органические соединения, диоксид серы, отдельные тяжелые металлы – цинк, медь и свинец) в атмосферный воздух при стационарном сжигании топлива в городах Беларуси по состоянию на 2019 г. Выполнено ранжирование, выделены 4 группы по уровню воздействия бытового сектора на атмосферный воздух.

Ключевые слова: загрязнение атмосферного воздуха, урбанизированные территории, диоксид азота, оксид углерода, твердые частицы, диоксид серы, неметановые летучие органические соединения, тяжелые металлы.

**RANKING OF URBAN SETTLEMENTS IN BELARUS
BY THE LEVEL OF IMPACT ON THE ATMOSPHERIC AIR
OF STATIONARY FUEL COMBUSTION IN THE HOUSEHOLD SECTOR**

H. W. Malchykhina, O. Y. Krukowskaya, S. V. Kakareka

Abstract

The article presents the results of assessing the emissions of pollutants (nitrogen oxides, total particulate matter, carbon oxide, non-methane volatile organic compounds, sulfur dioxide, individual heavy metals - zinc, copper, and lead) into the atmospheric air due to stationary fuel combustion in the cities of Belarus as for 2019 year. Ranking was performed, and four groups of cities in Belarus were identified according to the level of impact of the household sector on the atmospheric air.

Keywords: atmospheric air pollution, urban areas, nitrogen dioxide, carbon oxide, particulate matter, sulfur dioxide, non-methane volatile organic compounds, heavy metals.

Введение. Качество атмосферного воздуха имеет прямую связь с заболеваемостью и уровнем смертности [1]. Вредное воздействие загрязненного воздуха на здоровье человека в первую очередь связано с его химическим составом [2].

Согласно [3], до 44% из общего объема выбросов твердых частиц, содержащихся в воздухе в жилых помещениях, связано с использованием бытовых источников топлива. Сжигание древесных материалов, наряду с другими видами топлива, является одним из главных источников загрязнения воздуха в бытовых условиях. В результате сгорания древесины, помимо твердых частиц, образуется широкий спектр газообразных загрязнителей, включая оксиды азота, летучие органические соединения и оксиды углерода [1].

Несмотря на то, что использование древесных материалов в качестве топлива в бытовых энергетических системах (отопления, подогрева воды и приготовления пищи) в настоящее время считается климатически безопасным, эпидемиологические исследования подчеркивают связь между сжиганием древесины и увеличением числа случаев преждевременной смертности, связанной с заболеваниями респираторной и сердечно-сосудистой систем [1]. Соединения, выделяющиеся при сжигании древесины, могут провоцировать воспалительные процессы, вызывать гибель клеток и генетические нарушения, а также отрицательно влиять на эпителий дыхательных путей [2]. Следовательно, вещества, образующиеся при сжигании древесных материалов, могут представлять значительную опасность для здоровья человека и подлежат оценке.

Вместе с тем, несмотря на значимость бытового сектора как источника выбросов загрязняющих веществ с выраженным негативным воздействием на здоровье людей, в настоящее время в Беларуси его оценки не входят в программу статических наблюдений за выбросами загрязняющих веществ [3] и выполняются только в рамках подготовки национальных данных в рамках обязательств по Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния. Указанные исследования выполняются в Институте природопользования НАН Беларуси, они предусматривают периодическую высокодетализированную (по сетке $0,1^\circ \times 0,1^\circ$) оценку [4]. До настоящего момента для получения значения выбросов от бытового сектора высокой детализации использовалось распределение с использованием косвенного параметра, основанного на плотности расселения.

Целью данного исследования является совершенствование методической основы оценки выбросов с учетом используемых систем отопления и водоснабжения на уровне отдельных городских населенных пунктов и анализ полученных результатов, включающий ранжирование городов.

Материалы и методы. В рамках исследования выполнена оценка поступления загрязняющих веществ (оксиды азот (NO_x), суммарные твердые частицы (TSP), оксид углерода (CO), неметановые летучие органические соединения (НМЛОС), диоксид серы (SO_2), а также отдельные тяжелые металлы – цинк (Zn), медь (Cu) и свинец (Pb)) в атмосферный воздух от бытовых источников сжигания в Брестской области по состоянию на 2019 год.

В качестве исходных данных использованы сведения о благоустройстве жилых помещений в разрезе административных районов, типов местности и типов жилых помещений по данным переписи населения 2019 года; структуре потребления ТЭР населением в разрезе направлений использования, видов ТЭР,

типов жилых помещений по данным выборочного обследования 2015 года; статистические данные по реализации топлива населению в разрезе административных областей, видов топлива в 2019 году [3].

Для оценки выбросов использован метод удельных показателей, в качестве данных о деятельности использованы данные о количестве израсходованного топлива:

$$E_{i,a} = \sum_j EF_{i,j} \cdot F_{j,a},$$

где $EF_{i,j}$ – удельный показатель выбросов загрязняющего вещества i при стационарном сжигании топлива j в бытовом секторе, согласно [4]; $F_{j,a}$ – потребление топлива j в бытовом секторе в пределах административно-территориальной единицы a .

Количество израсходованного в каждом районе топлива является суммой потребления на различные нужды:

$$F_{j,a} = \sum_d F_{d,j,a},$$

где $F_{d,j,a}$ – потребление топлива j в бытовом секторе в пределах административно-территориальной единицы a для направления использования d . Рассматривались следующие основные направления использования топлива: отопление, горячее водоснабжение, приготовление пищи, освещение и работа приборов.

Количество топлива в пределах административных районов израсходованное на определенные нужды установлено, исходя из общего количества топлива в административной области, структуры потребления топливно-энергетических ресурсов населением в стране в целом по направлениям использования на основании выборочных обследований и сведений о количестве жилых помещений различного типа, оборудованных различными видами благоустройства. При оценке количества израсходованного топлива в разрезе административных районов было принято допущение о равном потреблении топлива одного вида на одинаковые нужды для жилых помещений одного типа (одноквартирные дома/квартиры), расположенные в одном и том же типе местности.

Первоначальная оценка получена на уровне административных районов и городов областного подчинения в разрезе типов местности. Выбросы в отдельных городах в пределах административных районов определены пропорционального численности населения, исходя из суммарных значений выбросов в пределах административных районов от жилых помещений, расположенных в городской местности.

Ранжирование городских населенных пунктов выполнено с учётом всей совокупности данных о воздействии посредством кластерного анализа с предварительной нормировкой [5] на основании данных о количестве жилых помещений с различными видами благоустройства, результирующими суммарными и

приведенными на одного жителя выбросами всех рассматриваемых поллютантов. Обработка и визуализация данных выполнялись в среде программирования RStudio [6].

Результаты и обсуждение. Суммарные выбросы от стационарного сжигания топлива в бытовом секторе по состоянию на 2019 г. в Беларуси 145,0 тыс. т оксида углерода (CO), 4,7 тыс. т оксидов азота (NO_x), 10,3 тыс. т неметановых летучих органических соединений (НМЛОС), 16,2 тыс. т твердых частиц, включая 14,9 тыс. т твердых частиц с аэродинамическим диаметром до 2,5 мкм (ВЧ2,5), 5,4 т бензо(а)пирена и 4,8 г ЭТ диоксинов/фуранов, 0,965 т цинка, 0,234 т меди. Вклад источников, относящихся к этой категории в валовые выбросы в стране для отдельных загрязняющих веществ, находится в диапазоне от 3 до 73% [4].

Согласно выполненной оценке, для большей части загрязняющих веществ на городскую местность меньшая часть валовых выбросов в секторе (17,9–23,0%). Исключение составляют оксиды азота, вклад бытовых стационарных источников в городах, для которых оценивается в 61,6% выбросов от категории. Высокая доля выбросов оксидов азота в городах по сравнению с другими загрязняющими веществами связана с преимущественно термическим характером образования этих поллютантов и, соответственно, сходным уровнем образования при сжигании различных видов топлива, а также более высокой суммарной численностью жилых помещений в городах по сравнению с сельской местностью.

Выполненная оценка позволила установить количество жилых помещений с различными видами благоустройства в городах. Из общего числа жилых помещений в городской местности находятся 3098611 (76,0%). В городской местности преобладающим типом жилых помещений являются квартиры (86,1%), в сельской местности – многоквартирные дома (72,8%). Фактором в значительной степени определяющим уровень воздействия на атмосферный воздух является использование в жилых помещениях индивидуальных систем отопления и подогрева воды. Суммарно в стране печными отопительными системами оборудовано 11,9% жилых помещений. В городах располагается 180310 жилых помещений, с печным отоплением. Из общего в городах 318245 жилых помещений оборудованы индивидуальными системами газового отопления, 4689 единиц – индивидуального электрического, 46350 – прочими индивидуальными отопительными системами. Наибольшее число жилых помещений с печным отоплением на урбанизированных территориях расположено в Бобруйске, Витебске, Могилеве, Полоцке и Речице. Индивидуальные системы газового отопления наиболее распространены в Минске, Гомеле, Бресте, Барановичах и Могилеве. Прочие индивидуальные отопительные системы (кроме электрических) наиболее широко представлены в Бобруйске, Минске, Витебске, Могилеве и Борисове.

Индивидуальными системами подогрева воды в стране снабжены суммарно 809720 жилых помещений, в том числе 399095 жилых помещений в городах. В большинстве (76,3%) таких жилых помещений для подогрева воды использует-

ся природный газ. В 78572 жилых помещениях в городах для подогрева воды используется электрическая энергия. Наибольшее число жилых помещений, где осуществляется индивидуальный подогрев воды посредством сжигания топлива, расположено на урбанизированных территориях в Барановичах, Минске, Гомеле, Бресте, Гродно и Борисове.

С учетом такой структуры размещения различных видов благоустройства в городах Беларуси выбросы NOx от рассматриваемой категории источников варьируют в диапазоне от 0,03 кг в гп. Красная Слобода (Солигорский район) до 0,13 т в Гомеле и 1,00 т в Минске. Наибольшее абсолютное количество загрязняющих веществ для большинства загрязняющих веществ выброшено в Минске. Помимо столицы, наиболее высокие уровни выбросов отмечаются в Бобруйске, Витебске, Могилеве.

Кластерный анализ на основании объединенных данных об инфраструктуре бытового сектора, численности населения и результирующих выбросах от стационарного сжигания топлива в бытовом секторе выявил наличие 4 неравномерных по количеству групп городов. К первой, наиболее многочисленной группе, относятся 125 городских населенных пунктов, в которых суммарно проживает 1,14 млн человек (15,6% населения страны). Вторую группу составляют 63 городских населенных пункта, в которых проживает 1,44 млн человек (19,7%), третью – 11 городских населенных пунктов, с суммарной численностью населения 2,71 млн человек (37,1%). Четвертая группа включает только один город – г. Минск (рисунок 1, таблица 2).



Рисунок 1 – Распределение городских населенных пунктов по группам кластерного анализа выбросов от бытового сжигания топлива и величине выбросов оксидов азота

Большая часть регионов Беларуси характеризуется количественным преобладанием городов первой группы на своей территории. Доля (по количеству) городов первой группы в областях убывает в ряду Гродненская (83,9 %) – Минская (78,6 %) – Брестская (62,1 %) – Витебская (61,0 %) – Гомельская (45,5 %) – Могилевская (34,8%). В восточных регионах страны преобладают количественно города второй группы: 48,5 % в Гомельской и 56,5 % в Могилевской областях. Больше всего городов 3 группы расположено в Витебской области (Витебск, Орша, Полоцк), по 2 города в Брестской (Барановичи, Брест), Гомельской (Гомель, Речица) и Могилевской (Бобруйск, Могилев) областях, по одному – в Гродненской (Гродно) и Минской (Борисов) областях.

В целом группировка городов в группы сходна с распределением по численности населения. К первой группе относятся городские населенные пункты с численностью населения в диапазоне 0,5–101,5 тыс. человек, ко второй – 0,7–126,4 тыс. человек, к третьей – 141,0–510,6 тыс. человек (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики групп городов

Показатель	Группа городов			
	1	2	3	4
Количество городов	125	63	11	1
Суммарная численность населения, млн человек	1,14	1,44	2,71	2,02
Диапазон численности населения в отдельных городах, тыс. человек	0,5-101,5	0,7-126,4	66,4-510,6	2016,5
Диапазон количества жилых помещений (тыс. ед), обеспеченных отдельными видами благоустройства:				
Квартиры всего	0,2-44,4	0,1-46,5	21,4-207,2	842,9
Одноквартирные дома всего	0,1-5,7	0,3-7,4	5,2-20,7	14,5
Квартиры с централизованным отоплением	0-44,3	0,1-44,6	20,4-203,9	835,6
Одноквартирные дома с централизованным отоплением	0-1,1	0-1,9	0,8-8,4	5,8
Одноквартирные дома с индивидуальным газовым отоплением	0-4,1	0-5,5	1,0-10,6	7,5
Одноквартирные дома с индивидуальным печным отоплением	0-0,5	0,2-1,7	0,4-2,6	0,6
Одноквартирные дома с индивидуальным газовым подогревом воды	0-3,7	0-4,7	0,9-8,3	6,0

Общее число жилых помещений в отдельных городах первой группы находится в диапазоне 0,3–50,1 тыс. единиц, второй группы – 0,4–53,9 тыс. единиц, третьей группы – 26,6–227,9 тыс. единиц, четвертой группы – 857,4 тыс. единиц. Группы городов различаются по количеству жилых помещений с различными видами благоустройства. В городах первой групп количество домов с индивидуальным печным отоплением находится в диапазоне от 0 до 0,5 тыс. единиц, с индивидуальным газовым отоплением – от 0 до 4,1 тыс. единиц, с централизованным отоплением – от 0 до 1,1 тыс. единиц. Города второй группы характеризуются количеством домов с печным отоплением в диапазоне от 0,2 до 1,7 тыс. единиц, третьей группы – от 0,4 до 2,6 тыс. единиц. Доля жилых по-

мещений с отдельными видами благоустройства варьирует в широком диапазоне и не имеет статистически значимых различий между группами городов.

Группы городов характеризуются различными величинами выбросов загрязняющих веществ. От группы к группе возрастает среднее значение выбросов рассматриваемых загрязняющих веществ. Средние значения выбросов NOx возрастают от 0,003 т в первой групп до 0,010 т во второй, до 0,063 т в третьей группе и до 1,000 т в четвертой группе. При этом диапазоны значений в отдельных городах первой, второй и третьей групп пересекаются: 0–0,028 т в первой группе, 0,001–0,042 т во второй группе и 0,006–0,129 т в третьей группе (таблица 2).

Таблица 2 – Выбросов от стационарного сжигания топлива в бытовом секторе в отдельных городах в разрезе групп городов

Показатель	Группа городов:			
	1	2	3	4
NOx, тонн				
диапазон в отдельных городах	0-0,028	0,001-0,042	0,006-0,129	1,000
суммарно	0,387	0,633	0,694	-/-
среднее	0,003	0,010	0,063	-/-
TSP, тонн				
диапазон в отдельных городах	0-0,016	0,006-0,058	0,024-0,118	0,198
суммарно	0,674	1,504	0,648	-/-
среднее	0,005	0,024	0,059	-/-
CO, тонн				
диапазон в отдельных городах	0,003-0,169	0,05-0,509	0,459-1,118	4,484
суммарно	6,667	13,901	7,303	-/-
среднее	0,053	0,221	0,664	-/-
НМЛЮС, тонн				
диапазон в отдельных городах	0-0,01	0,004-0,04	0,016-0,075	0,168
суммарно	0,420	0,966	0,420	-/-
среднее	0,003	0,015	0,038	-/-
SO2, тонн				
диапазон в отдельных городах	0-0,002	0,001-0,006	0,003-0,013	0,034
суммарно	0,074	0,160	0,069	-/-
среднее	0,001	0,003	0,006	-/-
Zn, кг				
диапазон в отдельных городах	0,017-0,95	0,364-3,162	1,404-7,077	8,788
суммарно	41,329	89,624	38,499	-/-
среднее	0,331	1,423	3,500	-/-
Cu, кг				
диапазон в отдельных городах	0,004-0,230	0,088-0,772	0,338-1,715	2,157
суммарно	9,996	21,731	9,326	-/-
среднее	0,080	0,345	0,848	-/-
Pb, кг				
диапазон в отдельных городах	0,002-0,097	0,036-0,312	0,15-0,659	0,610
суммарно	4,013	8,251	3,622	-/-
среднее	0,032	0,131	0,329	-/-

Аналогичным образом наблюдается рост средних значений выбросов других загрязняющих веществ от группы к группе.

В расчете на 1 жителя в результате бытового сжигания топлива в городах Беларуси, согласно выполненной оценке, было выброшено NO_x в диапазоне 0,007–1,079 г, НМЛОС – 0,0302–4,956 г, CO – 0,718–70,338 г, SO₂ – 0,0048–0,9203 г., TSP – 0,046–8,206 г, Zn – 0,0027–0,5136 г, Cu – 0,0006–0,1241 г, Pb – 0,0003–0,0507 г. Наиболее высокими приведенными значениями выбросов для всех рассматриваемых веществ характеризуются города второй группы (рисунок 2). Для г. Минска для большей части рассматриваемых загрязняющих веществ характерны относительно низкие значения приведенных выбросов: 0,496 г NO_x, 0,0983 г TSP, 2,224 г CO, 0,0832 г НМЛОС, 0,017 г SO₂, 0,0044 г Zn, 0,0011 г Cu, 0,0003 г Pb.

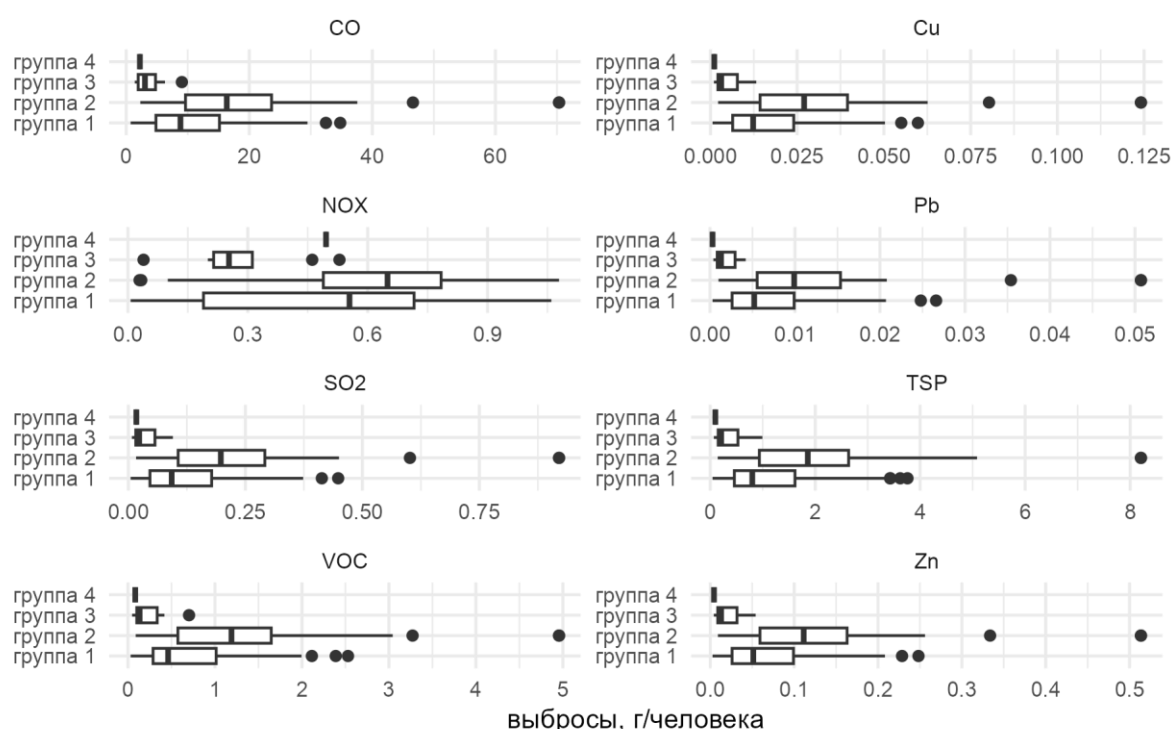


Рисунок 2 – Распределение приведенных на 1 человека значений выбросов в разрезе групп городов

Средние для страны приведенные в расчете на 1 человека выбросы составляют 0,3718 г NO_x, 0,4145 г TSP, 4,432 г CO, 0,2703 г НМЛОС, 0,0461 г SO₂, 0,0244 г Zn, 0,0059 г Cu, 0,0023 г Pb. Для отдельных городов приведенные значения значительно отличаются от средних для страны. Максимальное относительное отклонение изменяется в ряду NO_x (2,9 раз) – CO (15,9 раз)–НМЛОС (18,3 раза) – TSP (19,8 раз) – SO₂ (20,0 раз) – Zn и Cu (21,0 раз) – Pb (22,0 раз). Значительные отклонения связаны с неравномерностью распространения жилых помещений с различными видами благоустройства и использованием твердого топлива относительно мест проживания населения. Отклонение более чем в 10 раз отмечается для городских населенных пунктов с небольшой численностью населения и относительно более высоким числом жилых помещений с локальной генерацией энергии для отопления и подогрева воды, в том числе с ис-

пользованием твердого топлива – гп. Сураж, гп. Яновичи, гп. Логишин, гп. Городище, гп. Лоев, гп. Октябрьский, гп. Домачево.

Полученные результаты показывают значительное расхождение между оценкой выбросов для отдельных населенных пунктов на основе численности населения и фактическими выбросами в конкретных городах. Это подчеркивает необходимость учета специфики использования твердого топлива и систем отопления в разных населенных пунктах при оценке воздействия на атмосферный воздух и разработке мер по улучшению качества воздуха.

Список цитированных источников

1. Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: An analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project / R. Beelen [et al.] // *Lancet*. – 2014. – Vol. 383, No. 9919. – P. 785–795

2. Ultrafine particles (UFPs) from domestic wood stoves: genotoxicity in human lung carcinoma A549 cells / L. Marabini [et al.] // *Mutat. Res. – Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.* – 2017. – Vol. 820, No. April. – P. 39–46.

3. Интерактивная информационно-аналитическая система распространения официальной статистической информации / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dataportal.belstat.gov.by/>.

4. Belarusian emission inventory data informative inventory report to CLRTAP/EMEP 2020. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ceip.at/status-of-reporting-and-review-results/2020-submissions>.

5. Hartigan J. A., Wong M. A. Algorithm AS 136: A K-means clustering algorithm // *Appl. Stat.* – 1979– No. 28. – P. 100–108.

6. RStudio: Open source & professional software for data science teams – RStudio. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rstudio.com/>.