ПІЛОТНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ З КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛЮВАННЯ АТМОСФЕРНОГО ЗАБРУДНЕННЯ М. КИЇВ

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. У роботі вперше проведено пілотне моделювання атмосферного забруднення у м. Київ від усіх відомих джерел діоксиду азоту, діоксиду сірки та аміаку. Для моделювання використано як дані звітності Держстатистики «2-ТП Повітря» щодо річних обсягів викидів від стаціонарних джерел у м. Київ, так і дані міжнародної георозподіленої бази даних викидів ЕМЕР, яка складається на підставі звітів про обсяги викидів від окремих країн. Також було проведено оцінку обсягу та просторового розподілу викидів SO_2 та NO_2 від автотранспорту. Оцінки ЕМЕР щодо викидів від стаціонарних джерел для усіх розглянутих речовин завжди більше, ніж відповідні дані зі звітів Держстатистики. Автотранспорт, згідно із проведеними оцінками, відповідає менше ніж за 50% викидів SO_2 та NO_2 у м. Київ. Попри не дуже реалістичний просторовий розподіл викидів у даних ЕМЕР, моделювання на основі цих даних дозволяє отримати краще співпадіння результатів розрахунків із даними вимірів, ніж моделювання на основі даних емісій зі звітів Держстатистики. Але навіть у сценарії викидів ЕМЕР розраховані концентрації SO_2 та NO_2 занижені у порівнянні з даними вимірів приблизно у 2 рази, що свідчить про відповідне заниження обсягів викидів у даних ЕМЕР та набагато більше заниження викидів у звітах Держстатистики. Щодо аміаку, навіть у сценарії ЕМЕР, в якому емісії NH_3 у декілька разів перевищують відповідні обсяги зі звітів Держстатистики, розраховані концентрації у 7–25 разів занижені у порівнянні з даними вимірів NH_3 . З отриманих результатів можна зробити висновок, що на державному рівні у даних Держстатистики наявна інформація тільки про декілька відсотків від загального обсягу викидів аміаку у м. Київ. Результати роботи свідчать про необхідність невідкладного виконання рекомендацій експертів ЕМЕР, наявних в опублікованій рецензії на Національний звіт України за даним протоколом, і, в першу чергу, складання і верифікація георозподіленої інвентаризації викидів згідно з методиками ЕМЕР.

Ключові слова: забруднення атмосфери, CALPUFF, Київ, SO_2 , NO_2 , NH_3 , ЕМЕР.

Аннотация. В работе впервые проведено пилотное моделирование атмосферного загрязнения в г. Киев от всех известных источников диоксида азота, диоксида серы и аммиака. Для моделирования использованы как данные отчетности Госстатистики «2-ТП Воздух» по годовым объемам выбросов от стационарных источников в г. Киев, так и данные международной геораспределенной базы данных выбросов ЕМЕР, которая составляется на основании отчетов об объемах выбросов отдельных стран. Также была проведена оценка объема и пространственного распределения выбросов SO_2 и NO_2 от автотранспорта. Оценки ЕМЕР по выбросам от стационарных источников для всех рассмотренных веществ больше, чем соответствующие данные из отчетов Госстатистики. Автотранспорт, согласно проведенным оценкам, отвечает менее, чем за 50% выбросов SO_2 и NO_2 в г. Киев. Несмотря на не очень реалистичное пространственное распределение выбросов в данных ЕМЕР, моделирование на основе этих данных позволяет получить лучшее совпадение результатов расчетов с данными измерений, чем моделирование на основе данных эмиссий из отчетов Госстатистики. Но даже в сценарии выбросов ЕМЕР рассчитанные концентрации SO_2 и NO_2 занижены по сравнению с данными измерений примерно в 2 раза, что свидетельствует о соответствующем занижении объемов выбросов в данных ЕМЕР и гораздо большим занижении выбросов в отчетах Госстатистики. Для аммиака, даже в сценарии ЕМЕР, в котором объемы эмиссий NH_3 в несколько раз превышают соответствующие выбросы из отчетов Госстатистики, рассчитанные концентрации в 7–25 раз занижены по сравнению с данными измерений NH_3 . Из полученных результатов можно сделать вывод, что на государственном уровне в данных Госстатистики имеется информация только о нескольких процентах от общего объема выбросов аммиака в г. Киев. Результаты работы свидетельствуют о необходимости безотлагательного выполнения рекомендаций экспертов ЕМЕР, содержащихся в опубликованной рецензии

на Национальный отчет Украины по данному протоколу, и, в первую очередь, составление и верификация геораспределенной инвентаризации выбросов согласно методикам ЕМЕП.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, CALPUFF, Київ, SO₂, NO₂, NH₃, ЕМЕП.

Abstract. For the first time, a pilot simulation of atmospheric pollution in Kiev from all known sources of nitrogen dioxide, sulfur dioxide and ammonia was carried out. For modeling, we used both the reports of on annual emissions of stationary sources in Kiev from the State Statistics Service of Ukraine (SSSE) and the data of the international geo-distributed EMEP emission database, which is compiled on the basis of reports of separate countries. An assessment was also made of the volume and spatial distribution of SO₂ and NO₂ emissions from vehicles. EMEP estimates for emissions from stationary sources for all substances considered are always greater than the corresponding data from the SSSE reports. According to estimates, road transport is responsible for less than 50% of SO₂ and NO₂ emissions in Kiev. Despite the unrealistic spatial distribution of emissions in the EMEP data, modeling based on these data allows us to obtain a better match of the calculation results with the measurement data than modeling based on the emission data from the SSSE reports. Even in the EMEP emission scenario, the calculated SO₂ and NO₂ concentrations are underestimated by about 2 times compared with the measurement data, which indicates a corresponding underestimation of the emission volumes in the EMEP data, and a much greater underestimation of emissions in the SSSE reports. For ammonia, even in the EMEP scenario, in which the volumes of NH₃ emissions are several times higher than the corresponding emissions from the SSSE reports, the calculated concentrations are underestimated by 7–25 times in comparison with the data of NH₃ measurements. From the obtained results, it can be concluded that at the SSSE reports contain information about only a few percent of the total ammonia emissions in Kiev. The results of the work indicate the need for urgent implementation of the recommendations of EMEP experts contained in the published review of the National Report of Ukraine on this protocol and, first of all, the compilation and verification of geo-distributed emission inventory according to EMEP methods.

Keywords: air pollution, CALPUFF, Kyiv, SO₂, NO₂, NH₃, EMEP.

DOI: 10.34121/1028-9763-2020-1-61-72

1. Вступ

Рівень атмосферного забруднення у м. Київ протягом останнього десятиріччя характеризується як високий [1]. Проте окремі дослідження, які були проведені щодо моделювання атмосферного забруднення у м. Київ (наприклад, такі, як [2]), стосувались здебільшого оцінки впливу на навколишнє середовище окремих джерел забруднень, таких, як теплові електростанції. В окремих дослідженнях [3] зроблено спробу врахування усіх джерел забруднень, однак верифікацію проведено на підставі недостатньо репрезентативної вибірки вимірів. Моніторинг атмосферного забруднення у м. Київ проводиться на регулярній основі Центральною геофізичною обсерваторією (ЦГО) на стаціонарних постах спостережень, і в окремих випадках додаткові виїзні моніторингові дослідження проводяться в обраних районах м. Київ для з'ясування локального впливу окремих джерел забруднень. Одне з цікавих досліджень було проведене ЦГО (керівник роботи – Л.Я. Табачний) протягом жовтня-листопада 2013 р. на Харківському масиві у м. Київ [4], яке показало значне перевищення забруднення за рядом показників (зокрема, за аміаком, діоксидом сірки, фенолом та хлористим воднем (табл. 1)) у даному районі у порівнянні із гранично допустимими концентраціями (ГДК) і з середніми значеннями концентрацій відповідних речовин по всьому м. Київ. За такими речовинами, як діоксид азоту, було виявлене перевищення ГДК по всьому м. Київ. З оглядом на величезну кількість джерел забруднень у м. Київ (на рис. 1 показані найбільш потужні стаціонарні джерела зазначених речовин), а також величезний вплив автотранспорту неможливо точно вказати джерела, які призвели до перевищень, зазначених у звіті [4], без проведення додаткового аналізу засобами математичного моделювання. При цьому подібний аналіз може бути успішним тільки за рядом умов, таких як: 1) адекватна оцінка потужностей викидів з основних джерел забруднень; 2) використання сучасних моделей атмосферної дисперсії; 3) використання детальних тривимірних та розпо-

Метою роботи є моделювання атмосферного забруднення у м. Київ від усіх джерел діоксиду сірки, діоксиду азоту та аміаку, співставлення результатів із даними вимірів та верифікація наявних даних інвентаризації викидів.

2.1. Офіційна інформація Держстатистики

Рисунок 1 – Основні стаціонарні джерела забруднення у м. Києві
згідно з результатами обробки даних звітів «2-ТП Повітря»

ISSN 1028-9763. Математичні машини і системи, 2020, № 1

приємств звітуються за загальними викидами неметанових летких органічних сполук (НМЛОС), до яких належить і фенол, і формальдегід, і багато інших речовин. Отже, встановити джерело перевищення фенолу у 2013 р. з наявною інформацією неможливо. Тому у даній роботі проведено пілотне моделювання діоксидів сірки та азоту, а також аміаку, за якими також було виявлене перевищення ГДК у 2013 за даними дослідження [4] (табл. 1).

Таблиця 1 – Осереднені значення вимірів концентрацій забруднюючих речовин у повітрі, отримані в роботі [4] за жовтень–листопад 2013 р.

Речовина	Середня концентрація, мг/м ³		
	Харківськ. масив	Київ	
		Загал.	Лівий берег
Діоксид сірки	0,055	0,024	0,023
Оксид вуглецю	1	0,6	0,2
Діоксид азоту	0,065	0,095	0,083
Оксид азоту	0,030	0,07	-
Сірководень	0,002	0,001	0,001
Фтористий водень	0,005	0,005	0,003
Хлористий водень	0,094	0,060	0,040
Формальдегід	0,007	0,007	0,006
Аміак	0,043	0,010	0,010
Фенол	0,006	0,001	0,001
Пил	0,14	0,12	0,10
Бенз/а/пірен (нг/м ³)	0,3	0,2	0,3

2.2. Дані викидів за протоколом ЕМЕР

У рамках міжнародного протоколу ЕМЕР, що діє під егідою ООН, Україна надає звітність щодо обсягів викидів за різними ЗР та різними видами діяльності. На відміну від України, більшість країн видає дані у георозподіленому вигляді, що передбачається угодою ЕМЕР. Рецензія на звіти України у рамках протоколу ЕМЕР, опублікована на сайті цієї організації (https://www.ceip.at/fileadmin/inhalte/emep/pdf/2018_S3/Ukraine_S3_Review2018_.zip), рекомендує Україні також надавати дані щодо обсягів викидів ЗР у георозподіленому вигляді. Проте викиди зі звітів із України та інших країн, які не надали викиди у георозподіленому вигляді спеціалістами ЕМЕР, також перетворюють викиди на просторовій сітці з дозволом 0,1 град (111 км у меридіональному напрямку) [6].

Для такого перетворення використовується спеціальна методика, яка враховує карти розподілу населення, доріг тощо і була використана для складання глобального георозподіленого інвентора викидів EDGAR [7]. Рис. 2 представляє викиди у тон/рік/км² у 2013 р. за даними ЕМЕР для території навколо Києва (представлені тільки SO₂ та NH₃, тоді розподіл викидів NO₂ аналогічний розподілу викидів SO₂ і близький за амплітудою викидів). Як видно з рисунків, викиди SO₂ та NO₂ характеризуються великим максимумом, розташованим приблизно у південній частині м. Київ. Відповідна комірка ЕМЕР не повністю знаходиться в межах м. Києва, але саме викиди з цієї комірки репрезентують м. Київ у глобальному інвенторі викидів ЕМЕР.

Рисунок 2 – Просторовий розподіл сумарної інтенсивності викидів ЗР згідно з даними ЕМЕР (тон/км²/рік); зліва – SO₂, справа – NH₃

2.3. Оцінка викидів від автотранспорту у м. Київ

Обсяг викидів ЗР в атмосферне повітря у м. Києві у 2013 році, за даними органів статистики, складав 247,7 тис. т [8], із них 215,8 тис. т від пересувних джерел, зокрема, від автотранспорту – 205,8678 тис. т [9], і лише 31,9 тис. т викидів від стаціонарних джерел [10] (тобто, лише 17% від загального обсягу емісії ЗР у місті). Обсяг автомобільних викидів діоксиду азоту був 17981,6 т [11] і складав 60% від загальних викидів у м. Києві, оксиду азоту – 66% (118,8 т), оксиду вуглецю – 96 (158112,0 т), неметанових летких органічних сполук – 82% (25021,2 т). Водночас по ряду інших ЗР переважали викиди від стаціонарних джерел. Так, обсяг діоксиду сірки від автотранспорту склав лише 13% (1784,8 т), сажі – 30% (2132,1 т). В основу офіційної методики розрахунку статистичних показників викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від транспортних засобів [12] покладені статистичні дані щодо споживання палива двигунами внутрішнього згоряння автотранспорту юридичних і фізичних осіб, залізничного, водного й авіаційного транспорту, а також питомі викиди забруднюючих речовин, які надходять у повітря від використання 1-єї тонни палива. При моделюванні необхідно враховувати нерівномірність руху транспорту [13]. Найбільшу кількість емісії ЗР спричиняють перемінні режими роботи двигуна (різка зміна швидкості, пуску, в холостому режимі). Близько 50% викидів автотранспорту в межах міста припадає на траси з малою швидкістю руху і менше 25% – на швидкісній трасі [14]. Також рівень забруднення повітря шкідливими викидами автомобілів залежить від їх технічного стану у процесі експлуатації, якості пального, структури автопарку, об'єму перевезень і величини пробігів. Річні викиди Q діоксиду сірки, діоксиду азоту в атмосферне повітря за даними сайту Головного управління статистики у м. Києві [15] були розподілені в емісійній моделі «згори – до низу» по сітковій області (17x15 комірок розміром 2x2 км) Q_i , $i = 1, \dots, 255$ з урахуванням коефіцієнтів просторової неоднорідності, K , пронормованих у діапазоні від 0 (відсутність автошляхів у комірці) до 3 (максимальна довжина автошляхів, що потрапили в комірку, щільність потоку і наявність заторів) та коефіцієнтів зміни інтенсивності руху за місяцями року (K_M), годинами доби та днями тижня (K_D):

$$Q_i = K_i \left(Q / \sum_{i=1}^{255} K_i \right) K_M K_D. \text{ Коефіцієнт просторової неоднорідності емісії ЗР для кожної ко-}$$

мірки тут оцінюється за формулою $K = L * q * K_m K_o$, де L – довжина автошляхів, що потрапили в комірку, q – середня щільність потоку стабільного руху [16], K_m – коефіцієнт нерівномірності інтенсивності руху транспорту на магістралях загальноміського значення, K_o – коефіцієнт рівня обслуговування – підвищення щільності потоку при переході до не-

стабільного руху [17]. На рис. 3 показані рівні інтенсивності викидів від автотранспорту SO₂ та NO₂ за 2013 р. (г/м²с), які були використані у подальших розрахунках.

2.4. Порівняння різних оцінок викидів

Порівнюємо дані викидів по м. Київ згідно з оцінками ЕМЕР з даними зі звітів Держстатистики «2-ТП Повітря» за 2014 рік і з додатковими оцінками викидів від автотранспорту, зробленими у даній роботі. При обробці даних ЕМЕР м. Київ було покрито сіткою з розміром «дрібних» комірок 800х800 м. Кожна дрібна комірка попадала в одну з «великих» комірок сітки ЕМЕР. Потужність джерела на одиницю площі (г/м²с) вважалась рівною у великій та дрібній комірках. Але при сумуванні обсягів викидів враховувались тільки ті дрібні комірки, які попадали на територію м. Києва. Таким чином, тільки частина викиду з великої комірки ЕМЕР з найбільшим викидом, яка обговорювалась вище (рис. 2), враховувалась як викид у м. Київ, що могло призвести до заниження обсягів викидів у м. Київ при обробці даних ЕМЕР. Проте навіть при такому способі обробки, стосовно викидів від різних стаціонарних джерел та енергетичних установок, оцінки ЕМЕР для всіх 4-х розглянутих речовин (NH₃, CO, SO₂, NO₂) завжди більше, ніж ті, що дають наші звіти Держстатистики «2-ТП Повітря». Причому, якщо по SO₂ заниження даних по стаціонарних джерелах зі звітів 2-ТП у порівнянні з ЕМЕР порівняно невелике - близько 30%, то по NO₂ і CO це заниження вже у 3-5 разів, а по NH₃ – у 7 разів більше. Також варто звернути увагу і на те, що, всупереч розхожій думці, автотранспорт, згідно з оцінками ЕМЕР, не є домінуючим джерелом у Києві ні по SO₂, ні по NO₂. Оцінки викидів від автотранспорту, зроблені у даній роботі та описані вище, зазначені у рядку «ІПММС» у табл. 2. Як видно з наведених даних, оцінки викидів від автотранспорту ІПММС значно перевищують оцінки викидів від автотранспорту ЕМЕР, але все одно, навіть згідно з оцінками ІПММС, вплив автотранспорту не є домінуючим, якщо порівняти його з загальним обсягом викидів SO₂ та NO₂ в інвенторі ЕМЕР.

Таблиця 2 – Порівняння обсягів викидів у м. Київ від різних джерел та згідно з різними базами даних

Інвентори	Загальна кількість, тонн	Автотранспорт, тонн	Стаціонарні +енергетичні установки, тонн
NH ₃			
ЕМЕР	1001	0.44	523+1.3
2-ТП			76
CO			
ЕМЕР	21546	10036	8468+2215
2-ТП			2100
SO ₂			
ЕМЕР	14480	534	246 +13325
2-ТП			9847
ІПММС		1270	
NO _x			
ЕМЕР	24455	2306	2510+18887
2-ТП			7813
ІПММС		13800

Рисунок 3 – Інтенсивність викидів ЗР (г/м²с) від автотранспорту, оцінена для 2013 р;
SO₂ – зверху; NO₂ – знизу

3. Результати моделювання забруднення

3.1. Моделювання метеорологічних умов

Моделювання метеорологічних умов за період вимірів (03.10–06.12.2013 р.) здійснювалось із використанням моделі WRF (www2.mmm.ucar.edu/wrf), в якій зовнішня обчислювальна область охоплювала всю територію України із просторовим дозволом 0,15 град., а вкладена область охоплювала м. Київ та прилеглі території із просторовим дозволом 0,025 град. У табл. 3 приведені статистичні характеристики (середнє відхилення ME, середнє абсолютне відхилення MAE та коефіцієнт кореляції) порівняння швидкості, напрямку вітру і приземної температури, розрахованих WRF, та відповідних вимірів на метеостанції «Жуляни», яке свідчить про високу якість розрахунків моделі у порівнянні з даними вимірів трьох метеостанцій навколо м. Київ.

Таблиця 3 – Статистичні характеристики порівняння розрахованих метеопараметрів (швидкість та напрямок приземного вітру, температура) та вимірів на метеостанціях Жуляни, Бориспіль, Гостомель. Порівняння надане для результатів розрахунків у зовнішній (D01) та внутрішній (D02) розрахункових областях

Параметр	ME	MAE	Кор. коеф.	ME	MAE	Кор. коеф.
	D01			D02		
WS, м/с	1,055	1,330	0,831	0,855	1,145	0,853
WD, град.	3,587	17,631	0,698	2,439	19,279	0,705
T2, град. С	-0,113	1,399	0,957	0,044	1,356	0,959

3.2. Результати моделювання атмосферного забруднення

У розрахунках було використано модель CALPUFF, рекомендовану Агентством охорони навколишнього середовища США [18]. Модель CALPUFF широко застосовується у світі, а також неодноразово була верифікована авторами роботи на підставі порівняння з даними натурних вимірів і успішно застосована для розв'язання багатьох практичних задач із моделювання атмосферного забруднення в Україні [19, 20, 21]. Для моделювання фотохімічних трансформацій речовин у моделі наявна схема RIVAD/ARM3 [18], яка була використана у даній роботі. Інтенсивності викидів задавались тільки для SO₂ та NO₂, тоді як у результаті розрахунку формувались дані для 6 речовин: SO₂, SO₄, NO, NO₂, HNO₃, NO₃. Фонова концентрація озону у даній роботі задавалась значенням, яке використовується у моделі CALPUFF за замовчуванням: 40 ppb. Розрахунок концентрації аміаку проводився

окремо. У даній роботі було проведено два сценарії розрахунку для умов вимірів у жовтні-листопаді 2013 р. [4].

- «Базовий сценарій» розрахунків SO_2 та NO_2 : викиди у межах м. Київ для стаціонарних джерел були взяті зі звітів «2-ТП-Повітря» (п. 2.1), викиди від автотранспорту у межах м. Київ взяті згідно з оцінками ІПММС (п. 2.3), а усі інші викиди, включаючи викиди за межами м. Київ, згідно з оцінками ЕМЕР (п. 2.2). У межах м. Київ із загального інвентора ЕМЕР були відняті викиди, оцінені ЕМЕР для стаціонарних джерел та енергетичних установок, а також викиди, оцінені ЕМЕР від автотранспорту.

- «Сценарій ЕМЕР»: розрахунок концентрацій SO_2 , NO_2 та NH_3 здійснювався на підставі викидів ЕМЕР. Для моделювання процесів осідання необхідно додатково вказати ряд характеристик, які у загальному випадку залежать від речовини забруднювача.

У розрахунках була використана сітка з просторовим дозволом 800 м, яка покривала м. Київ і у вузлах якої були задані елементарні площинні джерела забруднень від автотранспорту та викиди з бази даних ЕМЕР. Викиди зі стаціонарних джерел моделювались як точкові джерела. Висота труб та температури викидів для найпотужніших стаціонарних підприємств (ТЕЦ, завод «Енергія» тощо) були взяті з літературних джерел, зокрема, з таблиці у роботі [22]. Висота викидів дрібних стаціонарних джерел покладалась рівною 20 м.

На рис. 4 представлені розраховані парціальні внески у середнє забруднення SO_2 за жовтень-листопад 2013 р. у базовому сценарії розрахунків від таких джерел забруднень: 1) викидів ЕМЕР за винятком стаціонарних джерел та автотранспорту у межах м. Київ; 2) викидів точкових джерел у межах м. Київ; 3) викидів Трипільської ТЕЦ; 4) викидів автотранспорту у межах м. Київ згідно з оцінками ІПММС.

З порівняння результатів на рис. 4 б та 4 д видно, що, згідно з розрахунками, принаймні у лівобережній частині міста, ТЕЦ-4, а не автотранспорт є основним джерелом забруднення повітря SO_2 . На рис. 4 а викиди ЕМЕР створюють не дуже реалістичний максимум концентрацій SO_2 у південній частині Києва, оскільки частина комірки ЕМЕР з великими значеннями викидів SO_2 (див. обговорення до рис. 2 а) знаходиться частково за межами м. Київ, тоді як викиди стаціонарних джерел і автотранспорту бралися у базовому сценарії лише з тієї частини комірки, яка знаходилась у межах м. Київ. Сумарна концентрація від різних джерел діоксидів азоту та сірки, розрахована у базовому сценарії та осереднена за жовтень-листопад 2013 р., показана на рис. 5.

Порівняння даних вимірів і розрахунків, проведених у базовому сценарії, показане у табл. 4. Як видно з даної таблиці, розрахована концентрація усіх речовин набагато менше за дані вимірів: за рівнями концентрацій NO_2 заниження у 2,5–3,5 рази, за рівнями концентрацій SO_2 заниження у 3–9 разів. Такі сильні заниження не можуть бути пов'язані з похибкою моделі і є наслідком, у першу чергу, заниження обсягів викидів у статистичній звітності [4]. Вони свідчать про велику кількість неінвентаризованих джерел викидів. З аналогічною ситуацією, коли заниження результатів моделі у порівнянні з даними вимірів свідчило про наявність неінвентаризованих джерел забруднень, автори роботи вже стикались на практиці [19].

Результати розрахунків концентрацій NO_2 та SO_2 , отримані з використанням інтенсивності емісій, згідно з даними ЕМЕР, набагато краще узгоджуються з даними вимірів, ніж результати базового сценарію. Концентрації NO_2 у сценарії ЕМЕР занижені у 2–3 рази в середньому по м. Київ, але практично співпадають із вимірами на Харківському масиві (табл. 4). Концентрації SO_2 у сценарії ЕМЕР занижені у 1,5–2,5 рази у порівнянні з вимірами, що набагато краще результатів базового сценарію.

На рис. 6 приведені результати моделювання концентрацій у випадку використання виключно викидів ЕМЕР. Як видно з рисунку, просторовий розподіл забруднення виглядає не дуже реалістичним, оскільки за причин, указаних у розділі 2, максимум розподілу

концентрацій зміщений у бік південної границі м. Київ. Проте, згідно з табл. 4, результати розрахунків за даним сценарієм набагато краще узгоджуються з даними вимірів, ніж результати у базовому сценарії. Цей результат підтверджує більшу реалістичність сумарного обсягу викидів ЕМЕР у м. Київ у порівнянні із статистичною звітністю «2-ТП Повітря».

Рисунок 4 – Парціальні внески у концентрацію SO₂ у повітрі за жовтень-листопад 2013 р. у базовому сценарії розрахунків від таких джерел забруднень: а) викидів ЕМЕР за винятком стаціонарних джерел та автотранспорту у межах м. Київ; б) викидів точкових джерел у межах м. Київ; в) викидів Трипільської ТЕЦ; д) викидів автотранспорту у межах м. Київ згідно з оцінками ІПММС

Рисунок 5 – Просторовий розподіл розрахованої середньої концентрації за жовтень–листопад 2013 р. у базовому сценарії розрахунків; SO₂ (зліва), NO₂ (справа). Маркерами показано розташування регулярних постів вимірів ЦГО, за якими здійснювалось осереднення вимірів

Рисунок 6 – Просторовий розподіл розрахованої середньої концентрації за жовтень–листопад 2013 р. у сценарії розрахунків на підставі даних ЕМЕР; SO₂ (зліва), NO₂ (справа). Маркерами показано розташування регулярних постів вимірів ЦГО, за якими здійснювалось осереднення вимірів

Таблиця 4 – Порівняння виміряних та розрахованих для різних сценаріїв середніх концентрацій у м. Києві за жовтень–листопад 2013 р.

ЗР	Виміри	Базовий, мг/м3	ЕМЕР, мг/м3
Київ			
NO ₂	0,095	0,028	0,031
SO ₂	0,024	0,005	0,015
NH ₃	0,01	-	0,0013
Лівий берег			
NO ₂	0,083	0,032	0,045
SO ₂	0,023	0,007	0,013
NH ₃	0,01	-	0,0015
Харківський масив			
NO ₂	0,065	0,02	0,059
SO ₂	0,055	0,006	0,02
NH ₃	0,043	-	0,0017

Розраховані концентрації аміаку за сценарієм викидів ЕМЕР у 7–25 разів занижені в порівнянні з даними вимірів. При цьому, згідно з табл. 2, загальний обсяг викидів NH₃, за даними ЕМЕР, у 7 разів перевищує оцінки викидів зі звітів Держстатистики [4]. Саме тому на основі даних Держстатистики не було сенсу проводити моделювання аміаку. Наведені результати свідчать про те, що наявна на державному рівні інформація про викиди аміаку у м. Київ охоплює не більше, ніж усього декілька відсотків фактичних викидів.

4. Висновки

У роботі вперше проведено пілотне моделювання атмосферного забруднення у м. Київ від усіх відомих джерел діоксиду азоту (NO₂), діоксиду сірки (SO₂) та аміаку (NH₃). Для моделювання використано як дані звітності Держстатистики «2-ТП Повітря» щодо річних обсягів викидів від стаціонарних джерел у м. Київ, так і дані міжнародної георозподіленої бази даних викидів ЕМЕР, яка складається на підставі звітів від окремих країн. Також у даній роботі було проведено оцінку обсягу та просторового розподілу обсягів викидів SO₂

та NO₂ від автотранспорту. Моделювання проведене для умов жовтня-листопада 2013 р., коли Центральною геофізичною обсерваторією, додатково до регулярних вимірів у м. Київ, було проведене експедиційне дослідження атмосферного забруднення на Харківському масиві, де регулярні виміри не проводяться. Результати аналізу наявної інформації стосовно викидів від різних стаціонарних джерел та енергетичних установок показали, що оцінки викидів ЕМЕР для усіх розглянутих речовин завжди перевищують відповідні значення зі звітів Держстатистики. При цьому, якщо для SO₂ заниження даних викидів зі звітів Держстатистики у порівнянні з даними ЕМЕР порівняно невелике, близько 30%, то для NO₂ це заниження вже у 3–5 разів, а для NH₃ – у 7 разів. Всупереч загально поширеним уявленням, автотранспорт, згідно з оцінками ЕМЕР, не є домінуючим джерелом діоксидів азоту та сірки в м. Київ. Оцінки викидів від автотранспорту, зроблені у даній роботі, значно перевищують оцінки викидів від автотранспорту ЕМЕР, але також не перевищують вплив інших джерел SO₂ та NO₂.

Моделювання атмосферного забруднення було проведене для двох сценаріїв викидів: у базовому сценарії викиди від стаціонарних джерел та енергетичних установок у м. Київ задавались на підставі інформації зі звітів Держстатистики, дані викидів від автотранспорту задавались на підставі оцінок, зроблених у даній роботі, а інші викиди, у тому числі за межами м. Київ, задавались на підставі даних ЕМЕР. У другому сценарії усі викиди задавались на підставі ЕМЕР. Попри не дуже реалістичний просторовий розподіл викидів ЕМЕР, моделювання на основі сценарію ЕМЕР дозволяє отримати краще співпадіння результатів розрахунків із даними вимірів, ніж моделювання на основі викидів зі звітів Держстатистики. Але навіть у сценарії ЕМЕР результати розрахунків SO₂ та NO₂ занижені у порівнянні з даними вимірів приблизно у 2 рази, що свідчить про відповідне заниження обсягів викидів у даних ЕМЕР, та набагато більше заниження обсягів викидів у звітах Держстатистики. Щодо результатів моделювання аміаку, то навіть у сценарії ЕМЕР розраховані концентрації аміаку у 7–25 разів занижені у порівнянні з даними вимірів. З отриманих результатів можна зробити висновок, що на державному рівні у звітах Держстатистики «2-ТП Повітря» наявна інформація тільки про декілька відсотків від загального обсягу викидів аміаку. Результати роботи свідчать про необхідність невідкладного виконання рекомендацій експертів ЕМЕР, наявних в опублікованій рецензії на Національний звіт України за даним протоколом, та, в першу чергу, складання і верифікацію георозподіленої інвентаризації викидів згідно з методиками ЕМЕР.

ПОДЯКИ

Робота була підтримана грантом Президента України для докторів наук за 2019 р. Ф84/56099.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Мінекологія. Екологічний паспорт. Київ, 2018. URL: https://ecodep.kyivcity.gov.ua/files/2019/1/22/eco_pasport_2017.pdf
2. Безрук З.Д., Порєв В.А. Дослідження приземних концентрацій викидів сміттєспалювального заводу «Енергія». *Проблеми машиностроєння*. 2013. Т. 16, № 6. С. 37–42.
3. Shavrina A.V., Sosonkin M.G., Veles A.A., Nochvay V.I., Blum O.B. Integrated Modeling of Surface And Tropospheric Ozone For Kiev City. *Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security* / eds. I. Barnes, M.M. Kharytonov. Springer, Dordrecht, 2008. doi: 10.1007/978-1-4020-8846-9_26.
4. Табачний Л.Я. та ін. Звіт про виконання науково-дослідної роботи «Визначення негативного екологічного впливу сміттєспалювального заводу «Енергія» ПАТ Київенерго» на рівень забруднення атмосферного повітря на території Дарницького району м. Києва» за договором № 01/0913/32-13 від 10.09.2013 р. Київ: Центральна геофізична обсерваторія, 2013. 20 с.

5. Держстатистики. Звіт про викиди забруднюючих речовин і парникових газів у атмосферне повітря від стаціонарних джерел викидів, форма № 2-ТП (повітря) (2014 рік). Київ: Державна служба статистики України, 2015.
6. Wankmueller R. Documentation of the new EMEP gridding system. *Technical report CEIP*. 2017. N 5. URL: https://webdab01.umweltbundesamt.at/download/EMEP_gridding_system_documentation.pdf.
7. Crippa M., Guizzardi D., Muntean M., Schaaf E., Dentener F., van Aardenne J.A., Monni S., Doering U., Olivier J.G.J., Pagliari V., Janssens-Maenhout G. Gridded emissions of air pollutants for the period 1970–2012 within EDGAR v4.3.2, Earth Syst. Sci. Data, 10, 1987–2013. 2018. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-10-1987-2018>.
8. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища у м. Києві у 2015 році. Київ: Міністерство енергетики та захисту довкілля, 2016. URL: <https://menr.gov.ua/news/31201.html>.
9. Викиди забруднюючих речовин та парникових газів у атмосферу від пересувних джерел: статистичний бюлетень за 2013 р. Київ: Державна служба статистики України, 2014. Ч. I. С. 9. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/07/Arch_vikid_bl.htm.
10. Викиди забруднюючих речовин та діоксиду вуглецю у атмосферне повітря (1990–2018pp.). Головне управління статистики у м. Києві. URL: <http://kiev.ukrstat.gov.ua/p.php3?c=1730&lang=1>.
11. Викиди окремих забруднюючих речовин та діоксиду вуглецю в атмосферне повітря у 2013 році. Головне управління статистики у м. Києві. URL: <http://kiev.ukrstat.gov.ua/p.php3?c=3016&lang=1>.
12. Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від транспортних засобів. Державний комітет статистики України, наказ № 452 від 13.11.2008. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/metod_polog/metod_doc/2008/452/metod.htm.
13. Степанчук О.В. Методологія підвищення ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі міст: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.20. К.: Київський національний університет будівництва та архітектури, 2018. 302 с.
14. Арканова А.А. Урегулювання проблеми забруднення атмосферного повітря міста викидами автотранспорту» (на основі досвіду іноземних країн). Полтава: Полтавський національний педагогічний університет ім. Короленка, 2016. URL: <http://oblrada.pl.ua/uploads/1stud/2016/01.pdf>.
15. Викиди діоксиду сірки та діоксиду азоту в атмосферне повітря (1990–2018 роки). Головне управління статистики у м. Києві. URL: <http://www.kiev.ukrstat.gov.ua/p.php3?c=2946&lang=1>.
16. Петров В.Ю., Петухов М.Ю., Якимов М.Р. Анализ режимов работы улично-дорожной сети крупных городов на примере города Перми. Пермь: ПГТУ, 2004. 150 с.
17. Гук В.І., Шкодовський Ю.М. Транспортні потоки: теорія їх застосування в урбаністиці. Х.: Золоті сторінки, 2009. 27 с.
18. Scire J.S., Strimaitis, D.G., Yamartino, R.J. A user's guide for the CALPUFF dispersion model (Version 5). USA, Concord: Earth Tech, Inc., 2000. 521 p.
19. Kovalets I.V., Asker C., Khalchenkov A.V., Persson C., Lavrova T.V. Atmospheric dispersion of radon around uranium mill tailings of the former Pridneprovsky Chemical Plant in Ukraine. *J. of Environmental Radioactivity*. 2017. N 172. P. 173–190.
20. Халченков О.В., Ковалець І.В. Використання моделі CALPUFF для моделювання радіоактивного забруднення внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС. *Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2019*: Чотирнадцята міжнар. наук.-практ. конф. (Чернігів, 24–26 червня 2019 р.). Чернігів: ЧНТУ, 2019. С. 55–58.
21. Kovalets I.V., Maistrenko S.Y., Khalchenkov A.V., Zagreba T.A., Khurtsilava K.V., Anulich S.N., Besspalov V.P., Udovenko O.I. Povitrya web-based software system for operational forecasting of atmospheric pollution after manmade accidents in Ukraine. *Наука та інновації*. 2017. № 13 (6). P. 11–22.
22. Криваковская Р.В., Ночвай В.И. Оценка влияния погрешности данных мониторинга на точность идентификации мощностей выбросов точечных источников загрязнения воздуха. *Электронное моделирование*. 2013. Т. 35, № 6. С. 87–97.

Стаття надійшла до редакції 13.01.2020