

даних і присвячена ця робота.

Метою нашого дослідження є розробка методу та технології моніторингу стану атмосферного повітря за допомогою універсальної інформаційно-вимірювальної системи з використанням мобільних пристроїв, тобто системи, усі операції обробки якої здійснюються на основі універсальних мобільних комп'ютерних пристроїв (смартфон, планшет, нетбук, ноутбук тощо). При цьому важливо передбачити синхронізацію даних спостережень за станом атмосферного повітря та за джерелами викидів у нього.

Ідея розв'язання поставленої задачі

Як було зазначено вище, для оперативного моніторингу атмосферного повітря оптимальним є використання інформаційно-вимірювальної системи (ІВС), яку встановлюють на транспортний засіб (автомобіль, трамвай, велосипед, мультикоптер, безпілотний літальний апарат тощо). Для забезпечення широкого застосування технології доцільно використовувати ІВС, на основі сучасних мобільних пристроїв, наприклад, із використанням смартфонів для геолокації місця спостереження, збереження, обробки та передавання даних на сервер, а для збирання даних із датчиків можна використовувати, наприклад, Arduino, RaspberryPi та їхні аналоги [3]. Подібна технічна реалізація ІВС для оперативного моніторингу є дешевшою та поширенішою за відомі промислові аналоги, що забезпечить ширше коло застосування та збирання більшого обсягу даних, особливо із залученням активної громадськості.

Для розв'язання основної задачі, яка пов'язана з вимірюванням стану атмосферного повітря в місті та виявленням головних негативних тенденцій, проблемних місць, а в ідеалі – і причин забруднення повітря необхідно розробити відповідну інформаційну технологію збирання та обробки даних моніторингу.

Звичайно, спостереження та прогнозування забруднення атмосферного повітря проводять у багатьох країнах протягом десятків років. Серед найпоширеніших моделей прогнозування стану якості повітря можна виділити такі: SOSE, TAPM, ОНД-86 [4, 5]. Основними чинниками, що об'єднують ці моделі, є великий обсяг даних, необхідних для правильного оцінювання забруднення. Важливо те, що деякі моделі в якості відправних даних потребують значень концентрацій забруднювальних речовин у стаціонарному джерелі викиду або обсягів викидів загалом продуктів виробництва промислових об'єктів. Водночас у представленому методі оцінювання якості атмосферного повітря основним джерелом викидів небезпечних речовин є автомобільний транспорт, що рухається головними автомобільними магістралями міста.

Для розв'язання поставленої задачі пропонуємо такі метод та технологію:

I. Визначення умов проведення та планування спостережень.

Визначення K показників $F_k, k = \overline{1, K}$, які необхідно моніторити та вибір датчиків і підключення їх до ІВС.

Вибір оптимального маршруту, на якому можливе розташування проблемних місць і причин надмірного забруднення та розбиття його на M характерних ділянок довжиною $L_j, j = \overline{1, M}$. Підрахунок загального шляху L руху ТЗ із ІВС:

$$L = \sum_{j=1}^M L_j .$$

Вибір оптимальної швидкості руху $V_j, j = \overline{1, M}$, транспортного засобу залежно від швидкодії датчика та мінімальної кількості вимірів на кожній ділянці (по найповільнішому із них із часом спрацювання $t, V_j = \frac{L_j}{t \cdot N_j}$).

Задаємо швидкість V_j , довжину відрізка L_j , інтервал між вимірами датчика t та

визначаємо кількість точок спостереження L_j , $j = \overline{1, M}$.

Визначення метеоданих (напрямку і сили вітру, опадів тощо).

Визначення місця встановлення датчиків на транспортному засобі.

II. Збирання даних спостереження.

Із використанням датчика формують масив показників $F_{k,j}$, $k = \overline{1, K}$, $j = \overline{1, M}$.

Із використанням GPS-датчика визначають координати послідовних місць розташування на всіх ділянках із максимальною швидкістю U_q , $q = \overline{1, Q}$.

Із використанням відеореєстратора визначаємо кількість стаціонарних та пересувних джерел забруднення на маршруті, які можуть впливати на стан повітря вздовж вибраного маршруту руху транспортного засобу з датчиками R_j , $j = \overline{1, M}$.

Зберігаємо зібрані та оцифровані дані на комп'ютерному носії.

III. Обробка даних спостереження.

На основі середньої швидкості руху транспортного засобу на кожній ділянці V_j визначення лінійних координат місць, у яких проводили вимірювання $F_{k,j}$.

Геокодування результатів геолокації засобами геоінформаційних систем (ГІС), побудова траєкторії руху транспортного засобу на електронній карті місцевості та визначення просторових координат U_q для кожної лінійної координати з п.1.

На кожній ділянці визначають кількість стаціонарних S та пересувних R потенційних джерел забруднення.

Рахують кількість машин попутного напрямку, які рухались по ділянці, коли авто з ІВС було на початку ділянки (рис. 1).

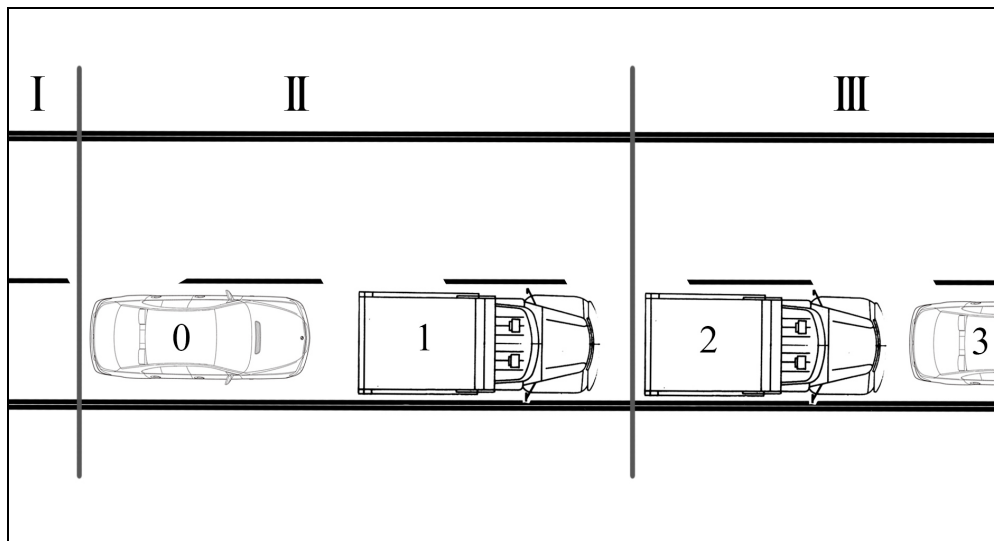


Рис. 1. Схематичне зображення принципів вимірювання на ділянці концентрації CO в атмосферному повітрі дороги

Теоретично під час обробки результатів із ділянки вимірювань оператор системи має підраховувати не тільки ті джерела забруднення, що перебували на цій ділянці, а й ті, які були на сусідніх ділянках, але в першому наближенні їх впливом можна знехтувати, оскільки навіть за відсутності вітру ТЗ самі спричиняють рух повітряних мас, отже, на самій дорозі основне забруднення спричиняють ТЗ, що нещодавно проїхали саме по ній. Звичайно, є багато випадків, коли це не так, тоді методологію підрахунку на цьому етапі треба відповідно змінити. Також у першому наближенні ТЗ з ІВС джерелом забруднення не вважають (за винятком випадків, коли доводилось зупинятись чи пригальмовувати з певних причин, тоді і це ТЗ слід рахувати, оскільки вихлопні газы «наздоганяли» датчики ІВС на Наукові праці ВНТУ, 2015, № 4

цьому ТЗ).

Наприклад, під час підрахування джерел забруднення з ділянки номером Π оператор має віднести до джерел забруднення тільки ТЗ під номером 1, оскільки ТЗ №0 є ТЗ із встановленими сенсорами.

VI. Побудова регресійної залежності між даними моніторингу CO F_j та кількістю ТЗ R_j з використанням ГІС-технологій та статистичних методів.

Експорт отриманих даних моніторингу F_j та R_j для побудови масиву точкових об'єктів на електронній карті місцевості.

Побудова матриці поверхні методом середньозваженої інтерполяції, логарифмічним методом або методом крикінгу.

Усереднити концентрації показника $F_{серj}$ на кожній ділянці.

Провести агрегування умов руху ТЗ шляхом переходу до приведеної кількості ТЗ R' на ділянках з урахуванням відповідних коефіцієнтів:

$$R' = R \cdot k_r \cdot k_d \cdot k_m,$$

де R – фактична кількість ТЗ, шт.; k_r – коефіцієнт, який враховує зниження чи збільшення викидів CO з боку ТЗ залежно від характеру рельєфу; k_d – коефіцієнт, який враховує зниження чи збільшення викидів CO з боку ТЗ через дію дорожніх знаків (зупинка перед пішохідним переходом, обмеження у швидкості тощо); k_m – коефіцієнт, який враховує підвищений викид CO з боку ТЗ відносно усередненого ТЗ через те, що це ТЗ є вантажівкою, автобусом, легковим автомобілем тощо.

Визначення показника R_j , $j = \overline{1, M}$ відбувається у напівавтоматичному режимі. Оператор системи, переглядаючи дані відеореєстратора, має підрахувати значення показника R_j для кожної ділянки довжиною L_j . Для полегшення цієї операції студентом Вінницького національного технічного університету О. В. Криликом було створено спеціальне програмне забезпечення для синхронізації відео з ГІС.

Провести кореляційний аналіз між середньою концентрацією показника $F_{серj}$ на кожній ділянці та середньою кількістю автомобілів R'_j на кожній ділянці.

Побудувати регресійну залежність між $F_{сер}$ та R' , інтегральними для всіх ділянок, що дозволить прогнозувати забруднення повітря в місті.

Оцінити похибки вимірювання та розрахунку.

Проаналізувати похибки. Визначити найменшу похибку вимірювання.

За допомогою «Google.Traffic» або «Яндекс.Пробки» переглянути прогнозовану завантаженість автомобільних доріг та на її основі зробити прогноз поширення забруднення по місту.

Приклад застосування технології

Авторами було розроблено універсальну інформаційно-вимірювальну систему оперативного екологічного моніторингу з використанням мобільних пристроїв [6], яку було адаптовано до вимірювання концентрації CO в атмосферному повітрі. Було сплановано проведення спостережень на автодорогах м. Вінниці.

Маршрут руху ТЗ з ІВС у місті був обраний так, щоб він проходив біля найвразливіших до забруднення місць (об'єктів ПЗФ різного рівня, парків, лікарень, навчальних закладів тощо). Було обрано два маршрути. Перший пролягав навколо території Вінницького національного технічного університету. А другий – по Хмельницькому шосе (від вул. Воїнів-інтернаціоналістів, тобто початку території ВНТУ, до вул. Першотравневої), а також навколо

Центрального парку культури і відпочинку міста – по вул. Першотравневій від перетину з Хмельницьким шосе до станції швидкої допомоги. Метеоумови на час проведення експерименту: вітер північно-західного напрямку, до 2 – 3 м/с, опади відсутні. Під час експерименту за допомогою відеореєстратора фіксували кількість автомобілів на магістралях, що дозволило врахувати вплив автотранспорту на ступінь забруднення атмосферного повітря.

Дані моніторингу були інтерпольовані за логарифмічним методом (рис. 2) та методом крикінгу (рис. 3 – 5).

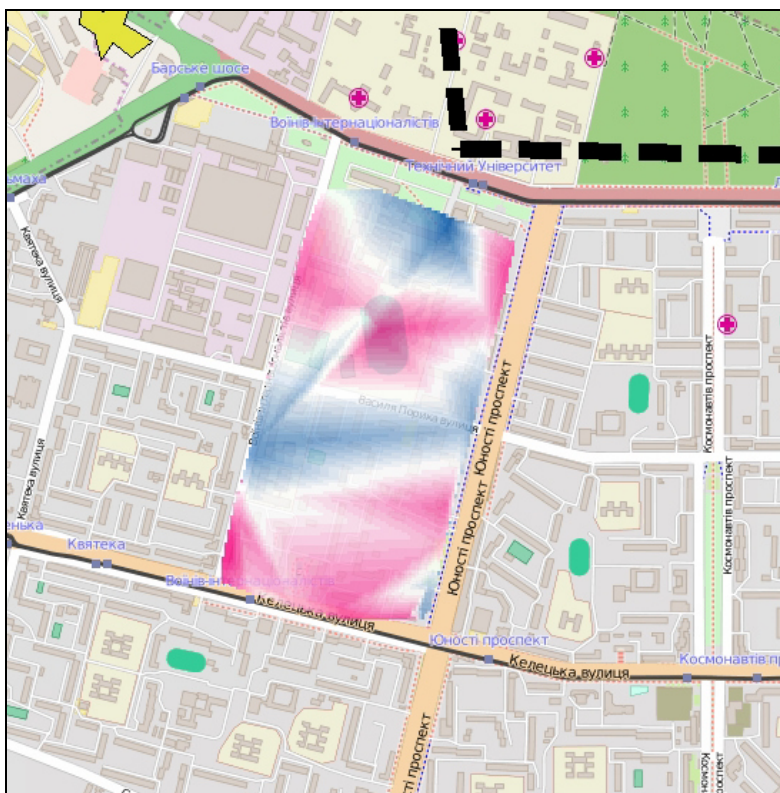


Рис. 2. Інтерполяція даних моніторингу логарифмічним методом навколо території ВНТУ (Барське шосе, вул. Воїнів-інтернаціоналістів, вул. Келецька)



Рис. 3. Інтерполяція даних моніторингу методом крикінгу навколо території ВНТУ (Барське шосе, вул. Воїнів-інтернаціоналістів, вул. Келецька)

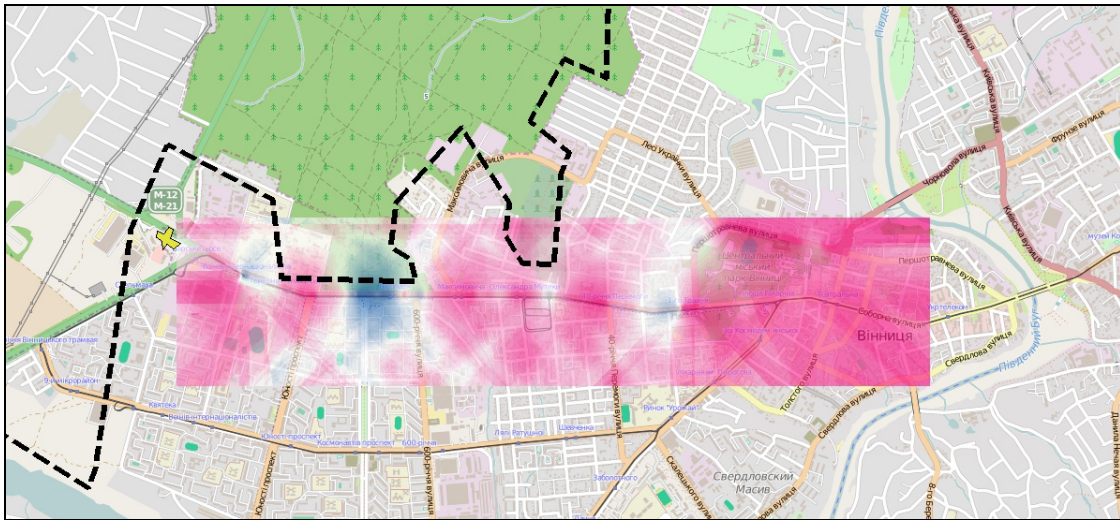


Рис. 4. Інтерполяція даних моніторингу методом крикінгу за другим маршрутом

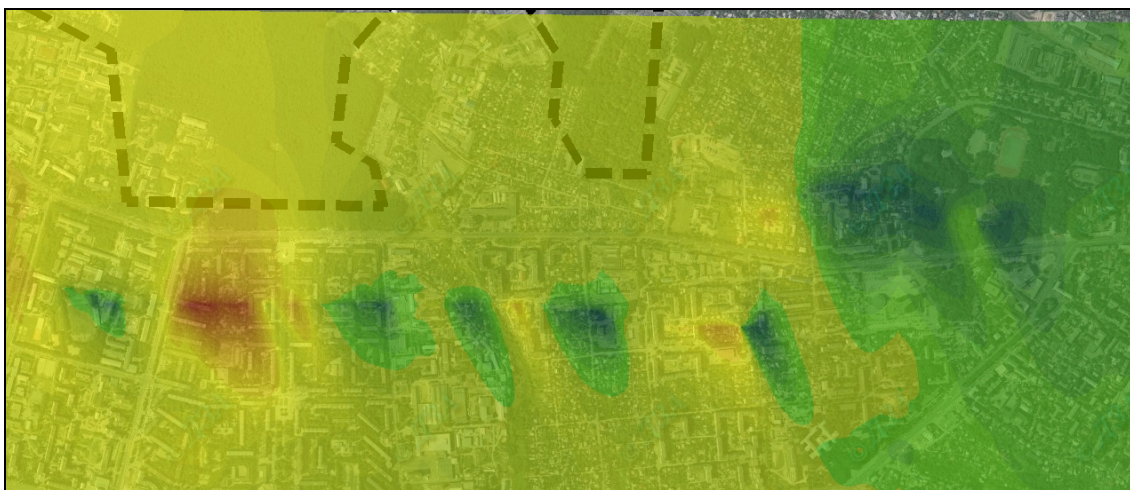


Рис. 5. Зображення матриці концентрації CO в атмосферному повітрі м. Вінниці за другим маршрутом

За результатами обробки отриманих даних експериментів рекомендуємо такі заходи: збільшити кількість вхідних даних до системи;

розбивати загальний шлях L на більшу кількість відрізків L_j ;

підвищити синхронізацію взаємодії датчиків. Для реалізації визначеної рекомендації пропонуємо намагатись, щоб коефіцієнт кратності інтервалу роботи датчиків ν різного типу максимально наближався до цілого числа. Визначаємо час спрацювання датчиків CO (T_U) та GPS (T_W). Отже,

$$\nu = \frac{T_U}{T_W}.$$

Для другого маршруту було побудовано регресійну залежність між даними моніторингу $F_{сер}$ та R' із використанням ГІС-технологій та статистичних методів за запропонованою технологією, зокрема було обчислено $F_{серj}$ і R'_j та проведено кореляційний аналіз залежності концентрації поширення CO $F_{сер}$ від R' для всього маршруту (табл. 1).

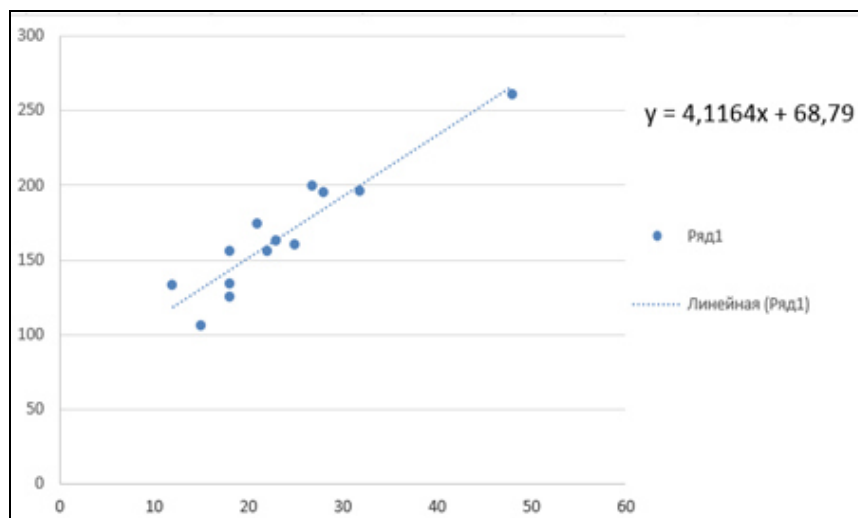
Значення коефіцієнта кореляції є більшим за 0,9. Отже, можна говорити про те, що має місце сильний стохастичний взаємозв'язок між концентрацією поширення CO та приведеною кількістю ТЗ на вулицях міста.

Таблиця 1

Залежність концентрації поширення СО від приведеної кількості транспортних засобів на ділянках другого маршруту

Номер ділянки j	Середня концентрація СО $F_{серj}$	Приведена кількість автомобілів R'_j
1	196	32
2	156	22
3	133	12
4	195	28
5	261	48
6	174	21
7	156	18
8	125	18
9	160	25
10	106	15
11	163	23
12	199	27
13	134	18
Кореляція	0,93	

Наявність кореляції дозволяє побудувати залежність між $F_{сер}$ від R' , яка дозволить прогнозувати забруднення повітря в місті. Проведемо ідентифікацію цієї залежності трьома видами регресії: лінійною (рис. 6), логарифмічною та експоненціальною.

Рис. 6. Графік лінійної залежності між F та R

Визначаємо похибки лінійної (рис. 7), логарифмічної та експоненціальної залежностей (табл. 2).

Y2	DY2
200,515	4,5148
159,351	3,3508
118,187	14,8132
184,049	10,9508
266,377	5,3772
155,234	18,7656
142,885	13,1148
142,885	17,8852
171,7	11,7
130,536	24,536
163,467	0,4672
179,933	19,0672
142,885	8,8852
	153,428
Похибка2	7,10973

Рис. 7. Похибка лінійної залежності

Таблиця 2

Значення отриманих похибок

	Похибка лінійної залежності	Похибка логарифмічної залежності	Похибка експоненціальної залежності
Значення, %	7,1	8,2	7,8

Проаналізувавши похибки, отримані експериментальним шляхом, можна зробити висновок, що найкраще прогнозування забруднення повітряного басейну міста можна здійснити за допомогою лінійної залежності між $F_{сер}$ від R' . Адже похибка в цій залежності є меншою, ніж в логарифмічній та експоненціальній залежностях.

Висновки

Запропоновано нові метод і технологію моніторингу та оцінювання стану атмосферного повітря, основним чинником забруднення якого є викиди автомобільного транспорту на магістралях міста. Головною відмінністю запропонованого методу від сучасних аналогів є використання в якості вхідних параметрів даних, отриманих від універсальної інформаційно-вимірювальної системи, побудованої на основі мобільних пристроїв та встановленої на транспортному засобі. Крім цього, технологія передбачає можливість синхронізації спостережень стану атмосферного повітря з даними спостережень параметрів джерел його забруднення. Це дозволяє значно зменшити час на збирання та збільшити обсяг і релевантність даних спостережень порівняно з аналогами. Також запропонований метод за рахунок універсального формату отриманих розрахунків дозволяє візуалізувати якісні показники стану атмосферного повітря на багатьох ГІС-системах, за необхідності ідентифікувати регресійну модель, а також за її допомогою проводити прогнозування якості повітря залежно від очікуваної кількості транспортних засобів та інших умов.

Запропонована технологія відкриває для громадських, державних і наукових організацій широкі можливості з проведення первинного незалежного оперативного моніторингу стану повітря в місті, що, у свою чергу, надасть підстави для уточнення результатів вимірювання за допомогою спеціалізованого вимірювального обладнання. Широкомасштабний моніторинг дозволить визначити проблемні місця екологічного характеру поряд із найвразливішими об'єктами інфраструктури (лікарні, школи тощо), об'єктами природно-заповідного фонду та розробити рекомендації щодо покращення стану повітря в місті. Важливою перевагою розробленої технології є можливість використовувати технологію й для інших цілей: моніторинг стану вод та інших об'єктів навколишнього середовища, завантаженості автомагістралей, руху громадського та комерційного транспорту тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Моніторинг довкілля: підручник / [Боголюбов В. М., Клименко М. О., Мокін В. Б. та ін.] ; під ред. В. М. Боголюбова. -- [2-е вид., перероб. і доп.]. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 232 с.
2. Mendez D. P-Sense: A participatory sensing system for air pollution monitoring and control / D. Mendez, A. J. Perez, M. A. Labrador, J. J. Marron // Pervasive Computing and Communications Workshops. 2011. – P. 344 – 347.
3. Chaudhry V. Arduair: Air Quality Monitoring / V. Chaudhry // International Journal of Environmental Engineering and Management. – 2013. - Volume 4, Number 6. – P. 639 – 646.
4. Peter F. Nelson. Using computer modelling to simulate atmospheric movement and potential risk of pollutants from post-combustion carbon capture projects / Peter F. Nelson, Ye Wo // Energy procedia (63). – November, 2014. – P. 976 – 985.
5. Pelliccioni A. Air pollution model and neural network: An integrated modelling system / A. Pelliccioni, T. Tirabassi // Environmental Modelling & Software. – May, 2008. – Volume 21, Issue 4. – P. 539 – 546.
6. Бондалєтов К. О. Мобільна аналітична комп'ютерна система для оперативного моніторингу стану атмосферного повітря міста / К. О. Бондалєтов, Д. Ю. Дзюняк, В. Б. Мокін // Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи : матеріали Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції, 23-26 квітня 2015 року ВНТУ. – Вінниця. – 2015. – С. 76 – 77.

Мокін Віталій Борисович – д. т. н., професор, завідувач кафедри комп'ютерного еколого-економічного моніторингу та інженерної графіки.

Дзюняк Дмитро Юрійович – аспірант кафедри комп'ютерного еколого-економічного моніторингу та інженерної графіки.

Вінницький національний технічний університет.

Бондалєтов Костянтин Олегович – інженер-програміст Департаменту інформаційних технологій.

Вінницька міська рада.

Олійник Валентина Віталіївна – студентка інституту екологічної безпеки та моніторингу довкілля.

Вінницький національний технічний університет.