

## АНАЛІЗ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВІД КАР'ЄРНИХ РОЗРОБОК

Русакова Т.І. [ORCID]

*Дніпровський національний університет імені О. Гончара, д.т.н.,  
професор. Україна*

**Анотація.** У роботі проаналізовано динаміку викидів суспендованих твердих частинок  $PM_{2.5}$  та  $PM_{10}$ , що утворюються внаслідок кар'єрних розробок. На основі статистичних даних досліджено структуру та зміну обсягів пилового забруднення атмосферного повітря у 2020–2023 роках. Встановлено, що пилові частинки є домінуючим компонентом викидів, причому найбільшу частку становлять частинки  $PM_{10}$ . Виявлено нерівномірний характер динаміки викидів із піковими значеннями у 2021 році та подальшим зниженням у 2022–2023 роках. Обґрунтовано вплив технологічних процесів, метеорологічних умов та організації виробництва на формування пилового навантаження. Показано, що дрібнодисперсні частинки  $PM_{2.5}$  становлять підвищену небезпеку для здоров'я людини через здатність до тривалого перебування в атмосфері та переносу на значні відстані. Отримані результати можуть бути використані для прогнозування рівнів забруднення та розробки ефективних природоохоронних заходів.

**Ключові слова:** пилове забруднення, кар'єрні розробки,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ , атмосферне повітря, викиди, динаміка, прогнозування

**Вступ.** Гранітна промисловість належить до відносно стабільних галузей, що обумовлено стійким зростанням попиту з боку будівельного сектору на гірські матеріали, зокрема щебінь, облицювальний камінь і будівельні блоки. Активізація інфраструктурного будівництва та урбанізаційні процеси сприяють подальшому розвитку видобувної діяльності. Водночас технологічні процеси видобутку граніту супроводжуються значними викидами твердих частинок, газоподібних домішок та забруднюючих речовин у атмосферне повітря і водні об'єкти, що формує суттєве антропогенне навантаження на довкілля та створює екологічні ризики [1].

**Матеріали дослідження.** Основними джерелами пиловиділення в кар'єрах є буріння свердловин, проведення підривних робіт, дроблення та

сортування гірської маси, а також транспортування матеріалу внутрішньокар'єрними дорогами. Утворений пил характеризується значною часткою дрібнодисперсних фракцій, зокрема PM2.5 та PM10, які здатні тривалий час перебувати у зваженому стані та переноситися на значні відстані. Це призводить до погіршення якості атмосферного повітря та підвищує ризики для здоров'я як працівників кар'єрів, так і населення прилеглих територій. За результатами досліджень, у зонах впливу гранітних кар'єрів спостерігається перевищення нормативних концентрацій PM2.5 та PM10, що підтверджує їх негативний вплив на навколишнє середовище [2].

Додатковим фактором екологічного навантаження є використання хімічних речовин у процесах видобутку та обробки гірських порід, що може призводити до забруднення поверхневих і підземних вод. Потрапляння забруднюючих речовин у водні об'єкти викликає деградацію екосистем, зміну гідрохімічних показників та зниження якості води, що безпосередньо впливає на стан здоров'я населення [3].

Вплив дрібнодисперсного пилу є особливо небезпечним через його здатність проникати в глибокі відділи дихальної системи. Наукові дослідження свідчать про зв'язок між тривалим впливом пилових частинок та розвитком захворювань дихальної і серцево-судинної систем, хронічних запальних процесів, а також неврологічних порушень [3]. За даними епідеміологічних досліджень, у працівників кар'єрів і мешканців прилеглих територій спостерігається підвищений рівень захворюваності на респіраторні хвороби, алергічні реакції та інші патологічні стани [2]. Особливо високий рівень ризику характерний для населення, що проживає на відстані до 500 м від кар'єрів, де концентрації пилу є максимальними [4].

Попри значну кількість наукових досліджень, присвячених як технологічним аспектам видобутку, так і оцінюванню екологічного впливу, низка питань залишається недостатньо вивченою. Зокрема, потребують подальшого дослідження закономірності просторового розповсюдження пилових викидів, їх залежність від метеорологічних умов, технологічних параметрів видобутку та характеристик джерел утворення пилу. Крім того,

обмеженою є інтеграція сучасних інформаційних технологій, зокрема методів математичного моделювання, геоінформаційних систем та цифрових інструментів аналізу даних, для комплексного оцінювання та прогнозування впливу забруднення на довкілля і здоров'я населення [5].

Забруднення атмосферного повітря є однією з найбільш гострих екологічних проблем, характерних для кар'єрної промисловості з видобутку граніту та виробництва щебеню. На основі статистичних даних Державної служби статистики України на рисунку 1 наведено структуру викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від діяльності, пов'язаної з кар'єрними розробками та видобуванням корисних копалин (за винятком вугілля) за 2023 рік.

Аналіз представлених даних свідчить, що найбільшу частку у структурі викидів становлять тверді частинки PM10 – 56% (2474,3 т). Значну частку також займають викиди оксиду вуглецю – 21% (937,5 т) та тверді частинки PM2.5 – 11% (501,3 т). Менші обсяги припадають на діоксид азоту – 7% (291,2 т), діоксид сірки – 4% (170,1 т) та неметанові леткі органічні сполуки – 1% (62,9 т).

Аналіз розподілу викидів (рис. 1) підтверджує, що пилові частинки є домінуючим фактором забруднення атмосферного повітря в кар'єрній промисловості. Водночас рівень і характер забруднення залежать від комплексу чинників, серед яких: кліматичні умови регіону, концентрація пилу в повітрі, гранулометричний склад частинок, їх хімічний склад, а також кислотність пилу.

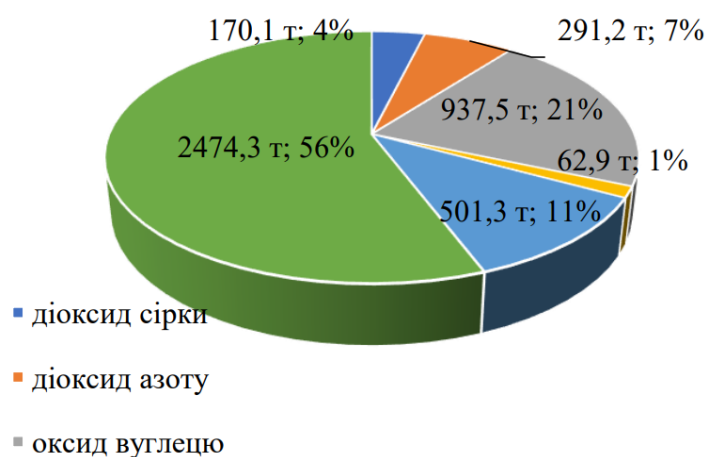


Рисунок 1 – Розподіл викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від кар'єрних розробок у 2023 році

Пилоутворення в кар'єрах відбувається внаслідок вибухових робіт, транспортування матеріалів, вітрової ерозії, руйнування ґрунтового покриву та руху вантажного транспорту. Забруднене повітря не лише створює дискомфорт, але й чинить суттєвий негативний вплив на здоров'я людини, особливо осіб із захворюваннями органів дихання.

У процесах видобутку граніту та виробництва щебеню можна виділити два основні механізми утворення пилу. По-перше, пил генерується безпосередньо під час вибухових і технологічних процесів – дроблення, сортування та обробки гірської маси. Такий пил представлений переважно частинками фракції PM10, які швидко осідають і формують локальні зони забруднення поблизу джерел утворення.

По-друге, значні обсяги осілого пилу можуть повторно підніматися у повітря під дією руху транспорту та вітрових потоків. У цьому випадку пил поширюється на значні відстані, формуючи так звані розподілені джерела забруднення, зокрема вздовж транспортних шляхів. Такі викиди складніше піддаються контролю та мають більш широкий просторовий вплив.

Дрібнодисперсні частинки PM2.5 утворюються у менших обсягах, однак становлять підвищену небезпеку через здатність тривалий час перебувати у повітрі та переноситися на значні відстані повітряними потоками. Чим вища концентрація таких частинок у повітрі, тим більший ризик для здоров'я людини.

Особливу небезпеку становлять частинки PM2.5, які через малі розміри легко проникають у глибокі відділи дихальної системи, потрапляють у кровоносну систему та можуть поширюватися по всьому організму. Завдяки своїм фізичним властивостям вони ефективно долають природні бар'єри організму, що обумовлює їх високий патогенний потенціал. Крім того, ці частинки здатні тривалий час залишатися у повітрі та впливати навіть на населення, яке проживає на значній відстані від джерел викидів.

З огляду на зазначене, питання оцінювання впливу гранітної промисловості як потужного джерела пилового забруднення залишається

актуальним. Не менш важливим є розроблення та впровадження ефективних заходів щодо зниження пилового навантаження на прилеглі території.

На рисунку 2 представлено динаміку зміни обсягів викидів суспендованих твердих частинок розміром 2,5 мкм (PM2.5), що утворюються внаслідок кар'єрних розробок, за період 2020–2023 років.

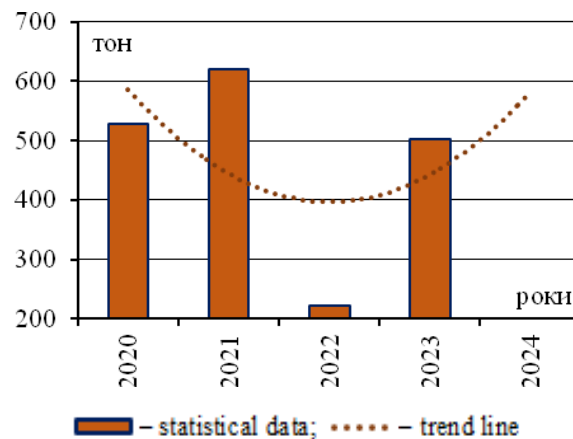


Рисунок 2 – Динаміка зміни обсягів викидів речовин у вигляді суспендованих твердих частинок розміром 2.5 мкм від кар'єрних розробок за період 2020-2023 років

Аналіз графічних даних свідчить про нерівномірний характер зміни обсягів викидів у досліджуваній період. У 2020 році обсяг викидів становив близько 530 т, після чого у 2021 році спостерігається його зростання до приблизно 620 т, що може бути пов'язано з інтенсифікацією видобувних робіт або збільшенням обсягів виробництва.

У 2022 році відбувається різке зниження обсягів викидів до рівня близько 220 т, що є мінімальним значенням за аналізований період. Таке зниження може бути зумовлене як скороченням виробничої діяльності, так і впровадженням пилопригнічувальних заходів або зміною технологічних процесів.

У 2023 році спостерігається повторне зростання викидів до рівня близько 500 т, що свідчить про відновлення виробничої активності або недостатню ефективність заходів зі зниження пилового навантаження.

Загалом динаміка характеризується значними коливаннями, що вказує на залежність обсягів викидів PM2.5 від виробничих, технологічних та, ймовірно, зовнішніх факторів (економічних, організаційних, метеорологічних).

Додатково варто зазначити, що трендова крива демонструє тенденцію до стабілізації показників після різкого спаду у 2022 році, однак рівень викидів у 2023 році залишається високим, що підтверджує актуальність проблеми пилового забруднення від кар'єрних розробок.

Тенденція зміни обсягів частинок PM<sub>2.5</sub> від кар'єрних розробок описується наступним рівнянням:

$$y(x) = d_2 \cdot x^2 + d_1 \cdot x + d_0, \quad (1)$$

де  $x$  – роки,  $d_2 = 46.98$ ,  $d_1 = -282.7$ ,  $d_0 = 821.9$ , величина достовірності апроксимації складає  $R^2 = 0.822$ .

**Висновки.** Аналіз динаміки викидів суспендованих твердих частинок PM<sub>2.5</sub> та PM<sub>10</sub> від кар'єрних розробок показав їх суттєву варіабельність, що свідчить про залежність обсягів викидів від виробничих, технологічних і зовнішніх факторів.

Встановлено, що тверді частинки є домінуючим компонентом забруднення атмосферного повітря від кар'єрних розробок, причому особливу небезпеку становлять частинки PM<sub>2.5</sub> через їх здатність до тривалого перебування в атмосфері та проникнення в організм людини.

Отримані результати підтверджують необхідність удосконалення систем екологічного моніторингу та впровадження ефективних заходів зниження пилового навантаження, зокрема з урахуванням як локальних, так і розподілених джерел пиловиділення.

Перспективним напрямом подальших досліджень є застосування методів математичного моделювання та інформаційних технологій для прогнозування динаміки викидів і оцінювання зон їх поширення.

## ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Sasikala, & Chandran, S. (2015). Impact of granite quarry on human life and environment a case study of vellarada panchayat of thiruvananthapuram district, Kerala. International conference on climate change and developing world, 1, 342-350. URL: <https://www.researchgate.net/publication/273694964>
2. Okafor, O. C., Njoku, C., & Akwuebu, A. N. (2023). Environmental impact of quarrying on air quality in Ebonyi state, Nigeria. Environmental Sciences Europe, 35, 98. URL: <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00793-6>

3. Lucas, L. S. R., Augusto L. A., & Gasparotto, J. (2022). Toxicological effects of mining hazard elements. *Energy Geoscience*, 3, 255-256. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2022.03.003>
4. Nemer, M., Giacaman, R., & Husseini, A. (2020). Lung function and respiratory health of populations living close to quarry sites in palestine: a cross-sectional study. *International journal of environmental research and public health*, 17(17):6068. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph17176068>
5. Wajs, J., Trybała, P., Górniak-Zimroz, J., Krupa-Kurzynowska, J., & Kasza, D. (2021). Modern solution for fast and accurate inventorization of open-pit mines by the active remote sensing technique-case study of Mikoszków granite mine (Lower Silesia, SW Poland). *Energies*, 14(20), 6853. URL: <https://doi.org/10.3390/en14206853>

## **ANALYSIS AND PREDICTION OF DUST POLLUTION IN ATMOSPHERIC AIR FROM QUARRY MINING**

Tetiana Rusakova

**Abstract.** *The paper analyzes the dynamics of emissions of suspended particulate matter PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> generated by quarry operations. Based on statistical data, the structure and temporal variation of air pollution in 2020–2023 are investigated. It is established that particulate matter is the dominant component of emissions, with PM<sub>10</sub> accounting for the largest share. The results reveal a non-uniform trend with peak emission levels in 2021 followed by a significant decrease in 2022–2023. The influence of technological processes, meteorological conditions, and production organization on dust formation is substantiated. Particular attention is given to fine particles PM<sub>2.5</sub>, which pose increased health risks due to their ability to remain in the atmosphere for long periods and to be transported over considerable distances. The obtained results can be applied for pollution forecasting and for the development of effective environmental protection measures.*

**Keywords:** *dust pollution, quarry operations, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, air pollution, emissions, dynamics, prediction*