

Є. Є. Лашко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна

МЕТРОЛОГІЧНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ДЖЕРЕЛ ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ ГІРНИЧОВИДОБУВНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Анотація. **Актуальність.** Гірничовидобувна промисловість належить до найбільш екологічно навантажених галузей промисловості, діяльність якої супроводжується утворенням значних обсягів пилу, газоподібних викидів, аерозолів і вторинного забруднення територій. **Об'єкт дослідження:** математична модель метрологічної оцінки результатів вимірювань. **Мета статті:** розробка науково обгрунтованого підходу до метрологічної оцінки результатів вимірювань джерел техногенного забруднення гірничовидобувного підприємства з урахуванням невизначеності вимірювань і факторів впливу виробничого середовища. **Результати дослідження.** У статті розглянуто питання метрологічного забезпечення вимірювань джерел техногенного забруднення гірничовидобувних підприємств. Обгрунтовано необхідність застосування метрологічно підтверджених методів вимірювань для забезпечення достовірності результатів екологічного моніторингу. Запропоновано підхід до оцінювання результатів вимірювань на основі аналізу похибок, невизначеності вимірювань і відповідності результатів встановленим нормативним вимогам. Розроблено математичну модель оцінювання сумарної невизначеності результатів вимірювань концентрацій забруднювальних речовин у повітрі та на поверхнях гірничовидобувного підприємства. **Висновки.** Впровадження метрологічно обгрунтованих процедур дозволяє підвищити достовірність екологічної оцінки техногенного впливу й ефективність управління еколого-виробничою безпекою. Сфера використання отриманих результатів: результати вимірювань концентрацій забруднювальних речовин є основою для прийняття управлінських рішень, розроблення природоохоронних заходів, оцінювання ризиків для персоналу та населення.

Ключові слова: метрологічне забезпечення, стандартизація, техногенне забруднення, гірничовидобувне підприємство, невизначеність вимірювань, екологічний моніторинг, пилове забруднення.

Вступ

Постановка проблеми. Сучасні гірничовидобувні підприємства є складними техногенними системами, функціонування яких супроводжується утворенням значних обсягів пилогазових викидів, аерозолів, продуктів згоряння палива, а також вторинного пилення від відкритих поверхонь кар'єрів, відвалів і транспортних комунікацій.

В умовах посилення екологічних вимог і необхідності забезпечення екологічної безпеки промислових регіонів особливого значення набуває достовірність результатів вимірювань параметрів техногенного забруднення.

Однією з ключових проблем сучасного екологічного моніторингу є не лише визначення концентрацій забруднюючих речовин, а й оцінювання метрологічної надійності отриманих результатів. Недостатня увага до невизначеності вимірювань, впливу умов відбору проб, калібрування обладнання та людського фактора може призводити до систематичних похибок, що у свою чергу впливає на прийняття управлінських і природоохоронних рішень.

Для гірничовидобувних підприємств зазначена проблема ускладнюється значною просторовою та часовою мінливістю джерел забруднення, нестабільністю технологічних процесів, складними аеродинамічними умовами кар'єрного простору та впливом метеорологічних факторів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання метрологічного забезпечення екологічних вимірювань розглядається у кількох взаємопов'язаних наукових напрямках: стандартизація вимірювань, оцінювання невизначеності результатів,

забезпечення якості вимірювальних процедур і розвиток систем моніторингу промислових викидів.

Важливим етапом розвитку сучасної метрології стало впровадження стандарту ISO/IEC 17025, який визначає вимоги до сертифікації випробувальних і калібрувальних лабораторій. Дослідження показують, що забезпечення метрологічної простежуваності та валідація методів вимірювання є основними умовами отримання достовірних результатів, особливо у випадку складних вимірювальних задач [2].

У роботах, присвячених аналізу вимог міжнародних стандартів, підкреслюється необхідність відповідності вимірювального обладнання конкретному вимірювальному завданню й обов'язковість дотримання встановлених процедур виконання вимірювань, що забезпечує необхідний рівень точності та відтворюваності результатів [3].

Дослідження у сфері стандартизації методів вимірювання також підтверджують, що узгодженість методик, правильний вибір діапазону вимірювань і метрологічне підтвердження обладнання є визначальними факторами достовірності результатів [4].

Одним із ключових напрямів сучасних досліджень є оцінювання невизначеності вимірювань у природному середовищі. На відміну від лабораторних умов, екологічні вимірювання характеризуються значною варіабельністю параметрів середовища, що призводить до суттєвого зростання сумарної невизначеності.

Показано, що значний внесок у загальний бюджет невизначеності може становити саме етап відбору проб, особливо при вимірюваннях концентрацій забруднюючих речовин у повітрі, ґрунті чи воді [5]. Це положення є особливо актуальним для гірни-

човидобувних підприємств, де концентрації пилу мають імпульсний характер і значною мірою залежать від технологічних операцій.

У роботах, присвячених оцінюванню якості моделей атмосферного забруднення, доведено, що допустимі характеристики моделей повинні визначатися з урахуванням невизначеності вимірювань, оскільки самі експериментальні дані мають обмежену точність [6]. Це свідчить про необхідність інтеграції метрологічних підходів у моделювання процесів розсіювання забруднень.

У гірничій промисловості питання забезпечення якості аналітичних досліджень традиційно розглядаються у контексті процедур QA/QC. Дослідження, присвячені дорозвідці родовищ, демонструють ефективність використання дублювання вимірювань, контрольних проб і статистичного порівняння результатів для підвищення достовірності даних [7].

Водночас, більшість існуючих досліджень зосереджена на геохімічних або лабораторних вимірюваннях, тоді як питання метрологічної оцінки польових вимірювань атмосферних викидів залишаються недостатньо дослідженими.

Останні дослідження демонструють активний розвиток автоматизованих систем моніторингу пилових концентрацій із застосуванням цифрових технологій і методів штучного інтелекту. Такі системи дозволяють отримувати дані у реальному часі, проте створюють нові метрологічні виклики, пов'язані з калібруванням сенсорів, дрейфом характеристик і залежністю показів від метеорологічних умов [8].

Додатково зазначається, що мережі низькоякісних сенсорів потребують складних процедур калібрування для забезпечення достовірності даних, оскільки без регулярної перевірки їхні покази можуть втрачати точність [9].

Аналіз попередніх досліджень показує, що існуючі підходи до оцінювання джерел техногенного забруднення переважно орієнтовані на визначення концентрацій забруднюючих речовин без достатнього врахування метрологічної складової результатів вимірювань.

Особливо це стосується гірничовидобувних підприємств, де:

- джерела забруднення є просторово розподіленими;
- інтенсивність викидів має випадковий характер;
- умови вимірювань змінюються у часі;
- відбір проб часто здійснюється у нестаціонарних умовах.

Отже, актуальною науково-практичною задачею є розробка підходу до метрологічної оцінки результатів вимірювань джерел техногенного забруднення, який урахує специфіку гірничовидобувного виробництва та дозволить підвищити достовірність екологічного моніторингу.

Метою роботи є розробка науково обґрунтованого підходу до метрологічної оцінки результатів вимірювань джерел техногенного забруднення гірничовидобувного підприємства з урахуванням не-

значеності вимірювань і факторів впливу виробничого середовища.

Основний матеріал

Основними джерелами техногенного забруднення на гірничовидобувних підприємствах є:

- буропідривні роботи;
- процеси дроблення та транспортування гірничої маси;
- відвали та хвостосховища;
- автомобільні та конвеєрні транспортні системи;
- допоміжні виробничі процеси.

Забруднення проявляється у вигляді пилових викидів, газоподібних продуктів згоряння, вторинного пиління та локального забруднення ґрунтів. Особливістю таких джерел є їх просторово-часова мінливість, що суттєво ускладнює процес вимірювання та подальшу інтерпретацію результатів.

Метрологічне забезпечення вимірювань включає сукупність організаційних і технічних заходів, спрямованих на досягнення цілісності та необхідної точності вимірювань. До основних складових належать:

- застосування повірених і каліброваних засобів вимірювальної техніки;
- використання стандартизованих методик вимірювань;
- контроль умов проведення вимірювань;
- оцінка похибок і невизначеності результатів;
- статистична обробка даних.

Для умов гірничовидобувного виробництва додатковими факторами впливу є підвищена запиленість, вібрації, температурні коливання та нерівномірність потоків забруднювальних речовин.

Процеси утворення, переносу й осадження пилових частинок у відкритих гірничих виробках характеризуються складною нелінійною взаємодією технологічних процесів й аеродинамічних явищ [10].

На відміну від стаціонарних джерел викидів, пилові джерела кар'єрів мають просторово розподілений і часово змінний характер, що зумовлює необхідність використання стохастичних підходів до опису результатів вимірювань.

У загальному вигляді миттєва концентрація пилу описується як:

$$C(t, x, y, z) = F \left(\begin{matrix} Q(t), V(t), T(t), H(t), \\ S(t), G(t), M(t) \end{matrix} \right), \quad (1)$$

де $Q(t)$ – інтенсивність пиловиділення; $V(t)$ – вектор швидкості повітряного потоку; $T(t)$ – температура; $H(t)$ – відносна вологість; $S(t)$ – площа активного пиління; $G(t)$ – параметри турбулентності; $M(t)$ – характеристики механічного впливу (рух транспорту, дроблення, підривні роботи).

Результат вимірювання є інтегральною величиною за певний інтервал часу усереднення:

$$C_{\tau} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} C(t) dt, \quad (2)$$

де $C(t)$ – функція часу; τ – тривалість інтервалу усереднення.

Отже, навіть за сталих середніх значеннях параметрів результат вимірювання містить випадкову складову, пов'язану з турбулентними флуктуаціями й імпульсними викидами пилу.

Інтенсивність пиловиділення можна представити у вигляді випадкового процесу:

$$Q(t) = Q_0 + \xi(t), \quad (3)$$

де Q_0 – детермінована частина величини; $\xi(t)$ – випадкова флуктуація.

Для технологічних операцій циклічного типу (буріння, дроблення, транспортні операції) доцільним є використання моделі пуассонівських процесів, що дозволяє описати випадкову появу імпульсних джерел пилу. Автокореляційна функція процесу пиловиділення визначається як:

$$R_Q(\tau) = E[\zeta(t)\zeta(t+\tau)], \quad (4)$$

де E – математичне сподівання, що дозволяє врахувати часову залежність між послідовними вимірюваннями.

Перенесення пилових частинок описується рівнянням адвекції–дифузії:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \cdot \nabla C = \nabla \cdot (K_t \nabla C) + S_Q - \lambda C, \quad (5)$$

де $C=C(x, y, z, t)$ – концентрація речовини; t – час; $V=(u, v, w)$ – вектор швидкості потоку; ∇C – градієнт концентрації; $U \cdot \nabla C$ – конвективний перенос; K_t – коефіцієнт турбулентної дифузії; $\nabla \cdot (K_t \nabla C)$ – дифузійна складова; S_Q – джерело пилу; λC – коефіцієнт осадження частинок.

Турбулентність призводить до випадкових флуктуацій швидкості потоку:

$$V(t) = \bar{V} + v'(t), \quad (6)$$

де \bar{V} – середнє (математичне сподівання або осереднене за часом значення); $v'(t)$ – пульсаційна (відхильна) складова, для якої виконується умова, що формує додаткову складову невизначеності результатів вимірювання:

$$u_t^2 = \left(\frac{\partial C}{\partial U} \right)^2 \cdot u^2(U), \quad (7)$$

де u_t – сумарна стандартна невизначеність; $\partial C/\partial U$ – коефіцієнт чутливості; $u(U)$ – стандартна невизначеність величини.

Для кар'єрних умов характерна анізотропна турбулентність, обумовлена складною геометрією виробки, що додатково підвищує варіабельність концентрацій.

Сумарна стандартна невизначеність визначається відповідно до узагальненого закону поширення невизначеності:

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) +$$

$$+ 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial F}{\partial x_j} \right) \text{cov}(x_i, x_j), \quad (8)$$

де F – це функція від кількох змінних, яка вимірюється чи розраховується; $\text{cov}(x_i, x_j)$ – це коваріація між двома змінними, яка враховує їхню кореляцію.

Умови гірничого виробництва характеризуються корельованістю параметрів, зокрема між швидкістю вітру й інтенсивністю пиління, а також між вологістю та дисперсністю частинок. Урахування коваріаційних членів дозволяє уникнути систематичного заниження оцінки невизначеності.

Сумарна невизначеність результату вимірювання подається як:

$$u_c^2 = u_{inst}^2 + u_{cal}^2 + u_{samp}^2 + u_{turb}^2 + u_{proc}^2, \quad (9)$$

де u_i – стандартні невизначеності окремих складових (інструментальна, калібрувальна, відбору проб, турбулентності); u_{proc} – складова, пов'язана зі стохастичною мінливістю технологічного процесу.

Остання визначається через дисперсію інтенсивності пиловиділення:

$$u_{proc}^2 = \left(\frac{\partial C}{\partial Q} \right)^2 D_Q. \quad (10)$$

Запропонована модель дозволяє розділити метрологічну та фізичну складові невизначеності, що є принципово важливим для інтерпретації результатів у задачах цивільної безпеки.

Експериментальні дослідження проводилися для умов типового відкритого гірничовидобувного підприємства з багатоджерельною структурою пиловиділення. Основними зонами контролю визначено ділянки інтенсивного технологічного впливу, транспортні коридори та периферійні ділянки кар'єру.

Розташування контрольних точок визначалося з урахуванням напрямків переважаючих вітрів, геометрії кар'єру та можливих зон накопичення пилу.

Вимірювання концентрацій пилу здійснювалися із застосуванням комбінованого підходу, що включає гравіметричні й оптичні методи. Для кожної точки виконувалась серія вимірювань із різними інтервалами усереднення, що дозволило оцінити вплив часової мінливості процесів.

Одночасно реєструвалися метеорологічні параметри, що дозволило сформувати масив даних для подальшого статистичного аналізу.

З метою підвищення достовірності результатів застосовувалися:

- дублювання вимірювань різними засобами;
- контроль стабільності показів приладів;
- виключення аномальних значень на основі статистичних критеріїв.

Середнє значення концентрації визначалося як:

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i, \quad (11)$$

а дисперсія результатів:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2. \quad (12)$$

Додатково визначалась автокореляційна функція вибірки, що дозволило оцінити часову залежність вимірювань й обґрунтувати інтервал усереднення.

Бюджет невизначеності формувався відповідно до рекомендацій GUM із урахуванням специфіки польових вимірювань. До складу бюджету включено інструментальну, калібрувальну, методологічну та стохастичну складові. Загальна стандартна невизначеність визначалась як:

$$u_c = \sqrt{u_{inst}^2 + u_{cal}^2 + u_{samp}^2 + u_{turb}^2 + u_{proc}^2 + u_{stat}^2 \dots} \quad (13)$$

Просторова неоднорідність пилових потоків є основним джерелом невизначеності. Для її оцінювання використовувалась дисперсія концентрацій у різних точках вимірювання:

$$u_{samp} = \frac{s_{spatial}}{\sqrt{n}}. \quad (14)$$

Отримані результати підтвердили, що для відкритих кар'єрів ця складова може перевищувати інструментальну невизначеність у декілька разів.

Флуктуації швидкості повітряного потоку оцінювалися за результатами вимірювань анемометричних параметрів. Турбулентна складова визначалась як:

$$u_{turb} = \left(\frac{\partial C}{\partial V} \right) \cdot \sigma_V, \quad (15)$$

де σ_V – стандартне відхилення швидкості.

Встановлено, що за несприятливих метеорологічних умов внесок цієї складової може досягати 20–30 % сумарної невизначеності.

Коливання інтенсивності роботи технологічного обладнання призводять до додаткової мінливості концентрацій.

Ця складова оцінювалась через дисперсію значень концентрацій у періоди активних технологічних операцій.

Розрахунок розсіювання здійснювався з урахуванням усіх факторів впливу та необхідних інструментів для розрахунку й аналізу (рис. 1).

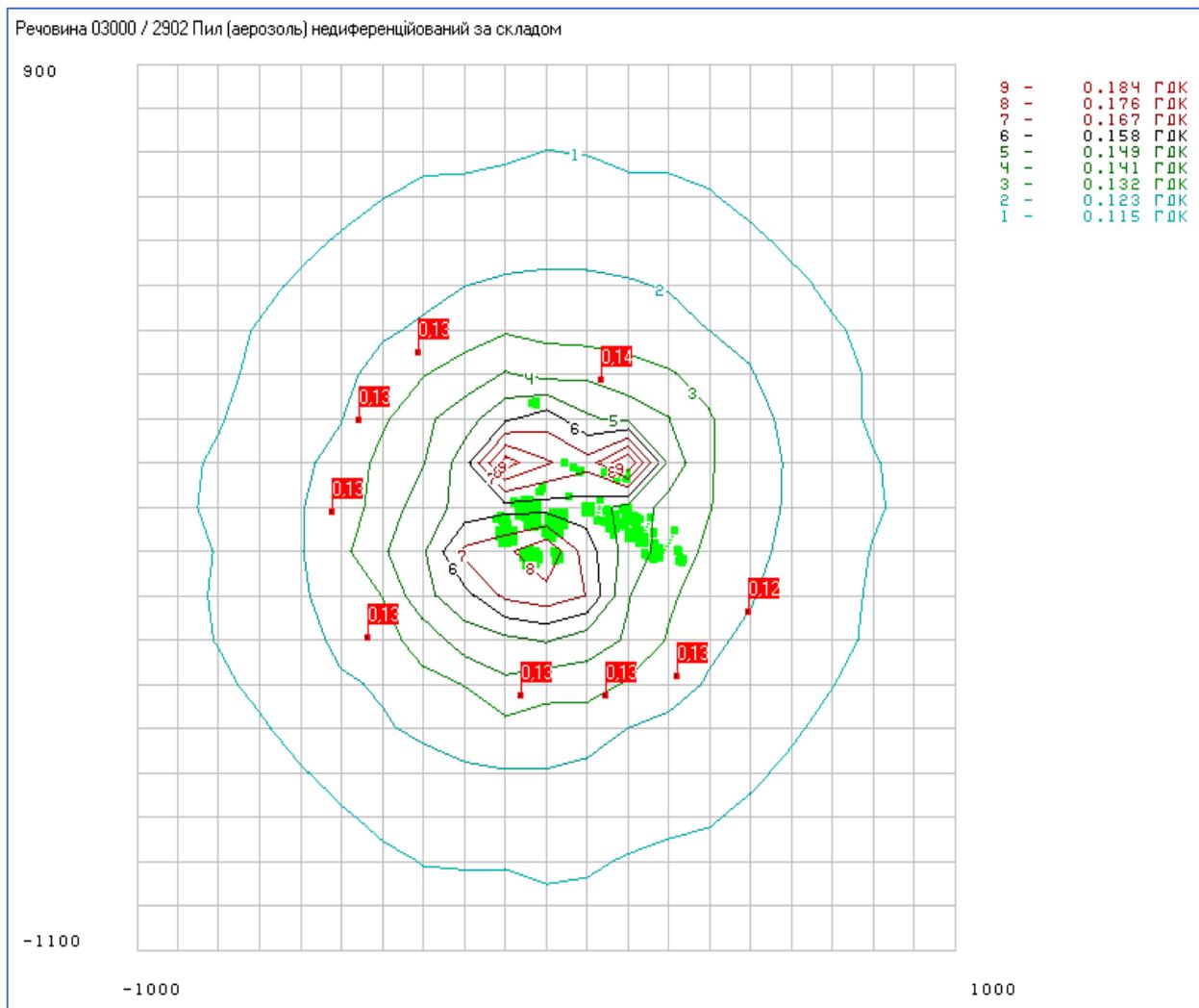


Рис. 1. Концентрації у заданих точках розрахункового промайданчику Рижівського гранітного кар'єру (м. Горішні Плавні Полтавської обл.)

Отримані результати показали, що врахування стохастичного характеру пиловиділення призводить до збільшення оціненої розширеної невідзначеності на 15–35 % порівняно з класичними підходами. Це свідчить про систематичне заниження оцінок ризику за використання спрощених методик.

Установлено, що найбільший внесок у сумарну невизначеність формують процес відбору проб і турбулентна мінливість повітряного потоку.

Водночас, інструментальна складова у більшості випадків не перевищує 10–15 % загальної невизначеності.

Запропонована модель дозволяє пояснити значні розбіжності між результатами вимірювань, отриманими у різні часові інтервали, та забезпечує коректну інтерпретацію даних за оцінки відповідності нормативним вимогам [11].

Функціонування гірничовидобувних підприємств супроводжується формуванням небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть створювати загрозу здоров'ю працівників, населенню прилеглих територій і об'єктам критичної інфраструктури.

До таких факторів належать пилові аерозолі, газоподібні продукти згоряння, вторинне пиління від відвалів і транспортних потоків.

У системі цивільної безпеки результати вимірювань концентрацій забруднюючих речовин виконують функцію інформаційної основи для:

- оцінки рівнів безпеки;
- прогнозування розвитку небезпечних ситуацій;
- прийняття управлінських рішень щодо обмеження виробничих процесів;
- впровадження захисних заходів;
- інформування органів місцевого самоврядування та служб цивільного захисту.

Проте, прийняття рішень на основі вимірювань без урахування їх метрологічної невизначеності може призводити як до недооцінки рівня безпеки, так і до необґрунтованих обмежень виробництва. У випадках, коли виміряні концентрації знаходяться поблизу гранично допустимих значень, саме величина невизначеності визначає правильність класифікації ситуації як безпечної або потенційно небезпечної.

Запропонована у роботі модель дозволяє перейти від детермінованої оцінки концентрацій до ймовірнісної оцінки безпеки, що відповідає сучасним принципам управління ризиками у сфері цивільної безпеки.

У рамках концепції цивільної безпеки результат вимірювання концентрації пилу розглядається як випадкова величина:

$$C \approx N(\bar{C}, u_c^2), \quad (16)$$

де N – стандартне позначення нормального (гаусівського) розподілу з математичним сподіванням і дисперсією, що дозволяє визначити ймовірність перевищення граничного значення:

$$P(C > C_{\text{lim}}) = 1 - \Phi\left(\frac{C_{\text{lim}} - \bar{C}}{u_c}\right), \quad (17)$$

де Φ – функція нормального розподілу.

Отже, замість бінарної оцінки («перевищення / відсутність перевищення») формується кількісна оцінка ризику, яка може бути використана для:

- раннього попередження небезпечних ситуацій;
- адаптивного управління технологічними процесами;
- оптимізації режимів пилопригнічення;
- формування сценаріїв реагування служб цивільного захисту.

Особливої актуальності це набуває для кар'єрів, розташованих поблизу населених пунктів, де пилове забруднення може мати транскордонний характер у межах локальної територіальної громади. Наукова новизна отриманих результатів полягає у такому:

1. Розробці математичної моделі метрологічної оцінки результатів вимірювань пилових джерел гірничовидобувного підприємства з урахуванням турбулентної мінливості повітряного потоку та стохастичного характеру пиловиділення.

2. Вдосконаленні підходу до формування бюджету невизначеності шляхом уведення складової, пов'язаної з турбулентними флуктуаціями та просторовою неоднорідністю пилових потоків.

3. Запропонованні підходу до використання результатів метрологічної оцінки у задачах управління ризиками у сфері цивільної безпеки.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованого підходу для:

- підвищення достовірності систем екологічного та виробничого моніторингу;
- обґрунтування заходів зниження пилового навантаження;
- підтримки прийняття рішень службами цивільного захисту;
- зменшення ризиків впливу техногенних факторів на персонал і населення.

Висновки

1. Метрологічна оцінка результатів вимірювань є необхідною умовою достовірного визначення рівнів техногенного забруднення гірничовидобувних підприємств.

2. Основними джерелами невизначеності є нестабільність технологічних процесів й особливості відбору проб у складних виробничих умовах.

3. Запропонована математична модель дозволяє комплексно оцінювати вплив факторів виробничого середовища на результати вимірювань.

4. Упровадження метрологічно обґрунтованих процедур сприяє підвищенню ефективності систем еколого-виробничого моніторингу й управління техногенною безпекою.

Використання засобів штучного інтелекту

Автор підтверджує, що не використовував технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lashko, Y., Chencheva, O., Levchenko, L., Myshchenko, I., & Bolibrukh, B. (2025). Evaluation of the aerological condition during open-pit mining operations based on three-dimensional models of quarries. *Advanced Information Systems*, 9(2), 18–24. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.2.03>
2. Voitenko, S., Barvynskyi, O., Babych, O., & Mosharenkov, V. (2022). CONSIDERATION OF THE REQUIREMENTS OF EN ISO/IEC 17025 REGARDING THE CALIBRATION LABORATORY IN THE QUESTIONS OF THE PROCESS OF THE VALIDATION OF PROCEDURES FOR THE CALIBRATION OF MEASURING EQUIPMENT. *CONTROL, NAVIGATION AND COMMUNICATION SYSTEMS*, 3(69), 13–17. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.3.013>
3. Melnichenko, O., Horoshilov, O., & Maletska, O. (2019). Analysis of requirements for equipment and methods under ISO/IEC 17025:2017. *Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia*, 80(1), 67–74. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.01.067>
4. Trishch, R., Maletska, O., Cherniak, O., Semionova, J., & Jancis, V. (2020). ANALYSIS OF THE REQUIREMENTS OF INTERNATIONAL AND NATIONAL STANDARDS FOR MEASUREMENT METHODS AND METROLOGICAL EQUIPMENT. *INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SCIENTIFIC SOLUTIONS FOR INDUSTRIES*, (1(11)), 156–162. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.156>
5. Glavič-Cindro, D., Hazou, E., Korun, M., Krištof, R., Osterman, P., Petrovič, T., Vodenik, B., & Zorko, B. (2020). Measurement uncertainty arising from sampling of environmental samples. *Appl Radiat Isot.* 2020 Feb;156:108978. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.108978> Epub 2019 Nov 9. PMID: 31770713.
6. Pernigotti, D., Gerboles, M., Belis, C., & Thunis, P. (2013). Model quality objectives based on measurement uncertainty. Part II: NO₂ and PM₁₀. *ATMOSPHERIC ENVIRONMENT*, 79, 869–878. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.045> JRC83406.
7. Слободян, Б. І., Гейченко, М. В., & Менасова, А. Ш. (2025). Практика застосування процедури забезпечення якості і контролю якості (QA/QC) при дорозвідці Полохівського родовища літію. *Мінеральні ресурси України*, (1), 33–40. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.1.33-40>
8. George, A., & Usman, U. (2025). AI-Enabled safety and risk management in mining environments. Manuscript. ResearchGate. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/398512017_AI-Enabled_Safety_and_Risk_Management_in_Mining_Environments
9. Williams, D. E. (2019). Low Cost Sensor Networks; How Do We Know the Data are Reliable? *ACS sensors*. <https://doi.org/10.1021/acssensors.9b01455> Corpus ID: 201668778.
10. Lashko, Y., Sukach, S., Laktionov, I., Chencheva, O., Rieznik, D., & Kortsova, O. (2025). Predictive Mathematical and Computer Model for Determining Harmful Effects of Dust Pollution on the Environment and Workers. *Baltic Journal of Modern Computing*, 13(2), 436–452. <https://doi.org/10.22364/bjmc.2025.13.2.08>
11. On Approval of the Procedure for Determining the Values of Background Concentrations of Pollutants in the Atmospheric Air, Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine No. 286 (2021) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0700-01#Text>

Received (Надійшла) 21.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Лашко Євгеній Євгенович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна;
Yevhenii Lashko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Civil and Labour Safety, Geodesy and Land Management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine;
e-mail: evgeny.lashko.lj@gmail.com; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0001-9691-4648>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57203623830>.

**Metrological evaluation of the results of measurements
of sources of technogenic pollution at a mining enterprise**

Yevhenii Lashko

Abstract. Relevance. The mining industry is one of the most environmentally burdensome industries, whose activities are accompanied by the formation of significant amounts of dust, gaseous emissions, aerosols, and secondary pollution of territories. **Object of research:** mathematical model of metrological assessment of measurement results. **Purpose of the article.** Development of a scientifically sound approach to the metrological assessment of measurement results of sources of man-made pollution at mining enterprises, taking into account measurement uncertainty and factors influencing the production environment. **Research results.** The article discusses the issue of metrological support for measurements of sources of man-made pollution at mining enterprises. The necessity of using metrologically verified measurement methods to ensure the reliability of environmental monitoring results is substantiated. An approach to evaluating measurement results based on the analysis of errors, measurement uncertainty, and compliance of results with established regulatory requirements is proposed. A mathematical model for evaluating the total uncertainty of measurement results for pollutant concentrations in the air and on the surfaces of mining enterprises has been developed. **Conclusions.** The implementation of metrologically sound procedures increases the reliability of environmental assessment of anthropogenic impact and the effectiveness of environmental and industrial safety management. Scope of application of the obtained results: the results of measurements of pollutant concentrations form the basis for management decisions, the development of environmental protection measures, and the assessment of risks to personnel and the population.

Keywords: metrological support, standardization, man-made pollution, mining enterprise, measurement uncertainty, environmental monitoring, dust pollution.