

УДК 681.5.08:620.179.1:622.341

DOI: 10.31474/2415-7902-2026-2-17-174-182

Швець Д.В., Григор'єв Ю.І., Котов І.А., Григор'єв І.Є.

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА АВТОМАТИЗОВАНОЇ ЕКСПЕРТНОЇ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ВАНТАЖОПОТОКУ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ

Мета. Удосконалення методики радіаційного неруйнівного контролю для мінімізації похибки вимірювань масової частки загального заліза в широкому діапазоні, зокрема в багатих рудах і концентратах, шляхом подолання обмежень традиційного ядерно-фізичного методу.

Методика. Дослідження поєднує теоретичний аналіз взаємодії гамма-випромінювання з речовиною та серію експериментів. Еталонну базу сформовано з проб залізної руди (Fe 40–60 %), концентрату (61–68 %) і державних стандартних зразків (10–40 %). Вимірювання проводилися з використанням сцинтиляційного детектора NaI(Tl). Для порівняння точності застосовувався статистичний апарат: розрахунок середнього зміщення, абсолютної та середньоквадратичної похибок, коефіцієнта конкордантності Ліна, а також аналіз збіжності за графіками Бленда-Альтмана.

Результати. Доведено, що традиційний метод реєстрації комптонівського розсіювання на багатих рудах та концентратах переходить у зону «насичення», втрачаючи чутливість і генеруючи пропорційну систематичну похибку. Запропоновано модифікований підхід із використанням розрахункового параметра поглинутого пробною випромінювання, що враховує зростання ймовірності фотоефекту. Це суттєво підвищило чутливість: середньоквадратична похибка зменшилася до 0,364 %, середнє зміщення — до 0,25 %, а коефіцієнт узгодженості з еталонним хімічним аналізом зріс до 0,9864.

Наукова новизна. Доведено ефективність переходу від однопараметричної реєстрації розсіяного випромінювання до багатопараметричного врахування його взаємодії з середовищем із високим вмістом заліза. Встановлено функціональні залежності, які математично доводять здатність параметра поглинання виводити систему із зони нечутливості, зберігаючи оптимальний нахил градувальної характеристики.

Практична значимість. Модифікований метод забезпечує вищу точність експрес-аналізу. Його впровадження для автоматизованого контролю вантажопотоків дозволить ефективно управляти процесами дезінтеграції, стабілізувати якість товарного концентрату та підвищити енергоефективність рудозбагачувальних фабрик.

Ключові слова: неруйнівний контроль, ядерно-фізичний метод, комптонівське розсіювання, ідентифікація, енергоефективність.

Вступ. Гірничодобувна промисловість є стратегічною галуззю для національної економіки України, формуючи значну частку ВВП та забезпечуючи стабільні експортні надходження. Цьому сприяє й колосальний ресурсний потенціал: на частку країни припадає близько 20% світових запасів залізної руди (абсолютна першість у світовому рейтингу) і 6% світового виробництва товарної сировини (7-ме місце в світі).

В умовах інтенсифікації гірничо-металургійного виробництва стабілізація якісних показників вантажопотоків залізорудної сировини стає критично важливим завданням. Вміст загального заліза в товарній руді та концентраті безпосередньо визначає ефективність подальшого металургійного переділу.

В той же час, експертна оцінка параметрів рудопотоку в умовах рудозбагачувальних фабрик дозволяє оптимізувати процес переробки залізорудної сировини та забезпечити підвищення енергоефективності процесів дезінтеграції рудних мінералів, на які припадають близько 50% загальних витрат електроенергії в технологічному ланцюзі отримання залізорудного концентрату [1].

Таким чином, удосконалення методів оперативного неруйнівного контролю якості руд є не лише технічним, а й важливим економічним завданням, спрямованим на ресурсозбереження та підвищення конкурентоспроможності галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оперативний неруйнівний контроль якості залізорудної сировини традиційно базується на використанні ультразвукових, магнітометричних та ядерно-фізичних методів.

Ультразвукові методи [2,3] знаходять застосування у контролі густини пульп та параметрів подрібнення, проте їх використання для прямого визначення елементного складу твердих середовищ ускладнюється через високе загасання сигналу та структурну неоднорідність матеріалу.

Магнітометричні методи [4,5], попри свою розповсюдженість, обмежені визначенням вмісту виключно магнетитового (магнітного) заліза. Це робить його малоефективним при аналізі руд зі складним мінералогічним складом, що містять значні включення гематиту або мартиту.

Найбільш універсальним для визначення вмісту загального заліза ($Fe_{заг}$) є ядерно-фізичний метод, заснований на реєстрації обернено розсіяного гамма-випромінювання (комptonівське розсіювання) [6-8]. Однак практика показує, що даний метод забезпечує високу точність лише в області низьких та середніх вмістів заліза. При переході до багатих руд та концентратів, що мають високі значення ефективного атомного номера середовища, чутливість методу падає, а похибка вимірювань зростає. Це обумовлено тим, що у середовищі з високою концентрацією заліза ймовірність фотоелектричного поглинання починає домінувати над ймовірністю розсіювання. У зв'язку з цим актуальним завданням є модифікація зазначеного методу шляхом врахування інтенсивності поглинутого гамма-випромінювання, що забезпечить необхідну інформативність та точність у зоні високих концентрацій заліза в сировині.

Мета статті (постановка завдання). Ядерно-фізичні методи експрес-аналізу залізорудної сировини, що базуються на реєстрації обернено розсіяного гамма-випромінювання, характеризуються високою продуктивністю та репрезентативністю. Проте їхня точність суттєво знижується при контролі високозбагачених продуктів через нелінійний характер залежності інтенсивності від вмісту заліза в області високих концентрацій. Метою роботи є удосконалення методики радіаційного контролю для мінімізації похибки вимірювань у широкому діапазоні якісних характеристик руд.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Встановити функціональні залежності інтенсивності розсіяної та поглинутої компонент гамма-випромінювання від вмісту загального заліза в рудних пробах;
2. Розробити модифікований метод ядерно-фізичного контролю, що забезпечує підвищення точності аналізу за рахунок комплексного врахування параметрів взаємодії випромінювання із середовищем з високим вмістом заліза.

Виклад основного матеріалу. При реалізації ядерно-фізичного методу, заснованого на реєстрації комptonівського розсіювання, потік первинних гамма-квантів з початковою енергією E_0 від радіоізотопного джерела спрямовується на досліджувану гірську масу. В результаті взаємодії з речовиною частина квантів зазнає некогерентного розсіювання. Енергія розсіяного кванта E' визначається кутом розсіювання θ і описується наступною формулою [9]:

$$E' = \frac{E_0}{1 + (E_0 / m_e c^2)(1 - \cos \theta)} \quad (1)$$

де $m_e c^2$ – енергія спокою електрона.

Розсіяне випромінювання реєструється сцинтиляційним детектором, що складається з монокристала NaI(Tl) та фотоелектронного помножувача. У кристалі енергія гамма-квантів перетворюється на світлову енергію (сцинтиляції), інтенсивність якої пропорційна поглинутій енергії. Фотоелектронний помножувач перетворює ці спалахи на електричні імпульси, які далі фіксуються лічильним пристроєм. Вміст заліза визначається на підставі попередньо встановлених калібрувальних залежностей «інтенсивність – концентрація».

Однак суттєвим недоліком даної схеми є низька геометрична ефективність

реєстрації. Оскільки площа вхідного вікна детектора значно менша за площу опромінюваної поверхні матеріалу, прилад фіксує лише 10–15% загального потоку розсіяних квантів. Це призводить до високої статистичної похибки та втрати інформативності. Збільшення об'єму сцинтилятора для підвищення ефективності реєстрації є економічно недоцільним і призводить до суттєвого збільшення габаритів установки, що ускладнює її експлуатацію в промислових умовах. Дане обмеження підтверджує необхідність переходу від реєстрації лише розсіяного випромінювання до комплексного врахування параметрів поглинання (фотоефекту).

Для підвищення точності контролю в області високих вмістів заліза висунуто гіпотезу про доцільність переходу до багатопараметричної реєстрації. Пропонується побічно враховувати не лише інтенсивність комптонівського розсіювання, а й внесок фотоелектричного поглинання, ймовірність якого різко зростає при збільшенні ефективного атомного номера опромінюваного середовища.

Згідно із законом збереження енергії та балансом потоку частинок, загальна кількість випромінених джерелом гамма-квантів N_0 у геометрії 4π складається з трьох компонент: повної кількості розсіяних речовиною гамма-квантів; кількості поглинутих речовиною квантів внаслідок фотоефекту; кількості квантів, що пройшли крізь шар речовини без взаємодії.

Враховуючи використання низькоенергетичних джерел випромінювання та значну товщину насипного шару гірської маси на конвеєрі, шар матеріалу можна розглядати як напівнескінченне середовище. За цих умов частка гамма-квантів, що пройшли наскрізь, є нехтовно малою.

Інтенсивність вторинного гамма-випромінювання, що виходить із досліджуваного середовища, залежить від масового коефіцієнта ослаблення μ_m , який є функцією від вмісту загального заліза ($\mu_m = f(Fe_{заг})$). Процес поширення гамма-випромінювання в умовах широкого пучка та товстого шару поглинача супроводжується ефектами багаторазового розсіювання. Тому класичний закон Бугера-Ламберта-Бера [10] модифікується введенням дозового фактора накопичення B , що залежить від енергії квантів та товщини шару:

$$N(x) = N_0 B e^{-\mu_m \rho x} \quad (2)$$

де N_0 – початкова інтенсивність; $N(x)$ – інтенсивність після розсіювання; ρ – густина матеріалу проби, г/см³; x – глибина проникнення, см.

Зменшення кількості зареєстрованих гамма-квантів при підвищенні вмісту загального заліза в опромінюваній руді зумовлено різким зростанням ймовірності фотоелектричного поглинання. Зі збільшенням ефективного атомного номера середовища вторинні розсіяні кванти, що мають меншу енергію, інтенсивно поглинаються атомами заліза всередині рудного матеріалу і не досягають детектора. Комплексне врахування параметрів μ_m та апаратурної оцінки поглинутого випромінювання дозволяє лінеаризувати градувальну характеристику приладу в зоні високих концентрацій корисного компонента.

Методика проведення експериментальних досліджень включала наступні етапи:

1. Підготовка еталонної бази. Для випробувань були сформовані представницькі проби залізної руди з масовою часткою $Fe_{заг}$ у діапазоні 40–60% та залізрудного концентрату (61–68%). Референсні значення вмісту заліза в пробах попередньо визначалися стандартизованим методом хімічного аналізу. Для перекриття діапазону низьких вмістів (10–40%) використовувалися атестовані державні стандартні зразки.

2. Формування досліджуваного шару. Рудний матеріал поміщався у вимірювальну циліндричну кювету (висота 5 см, діаметр 10 см). Для мінімізації впливу повітряних зазорів між гранулами на результати контролю здійснювалося ущільнення шару

металевим вантажем з подальшим досипанням матеріалу та вирівнюванням поверхні.

3. Проведення вимірювань. Вимірювальний блок встановлювався безпосередньо на поверхню сформованої проби. Реєстрація спектра розсіяного випромінювання здійснювалася з часом експозиції (накопичення) 60 с.

4. Врахування структурної неоднорідності. Для компенсації похибок, викликаних нерівномірністю укладання частинок, для кожної фізичної проби проводилося три цикли вимірювань. Після кожного циклу здійснювалося повне переформування проби (пересипання з повторним ущільненням згідно з п. 2). Таким чином, для кожної проби виконувалася серія з 9 вимірювань (3 пересипання $\times$ 3 заміри).

5. Вимірювання державних стандартних зразків. Аналіз монолітних стандартних зразків проводився шляхом контактного встановлення приладу на їхню поверхню з виконанням серії з трьох вимірювань (час експозиції 60 с).

На початковому етапі експерименту вимірювальна апаратура була налаштована на реєстрацію спектра обернено розсіяного гамма-випромінювання. Відповідно до розробленої методики, було виконано вимірювання на атестованих державних стандартних зразках у діапазоні масової частки заліза 10–40% та технологічних пробах залізної руди (40–60%), хімічний склад яких було попередньо підтверджено стандартним аналітичним методом.

На масиві отриманих експериментальних даних було проведено градування вимірювального тракту. Шляхом математичної апроксимації встановлено функціональну залежність інтенсивності розсіяного гамма-випромінювання від вмісту заліза в руді. Далі на базі запропонованої математичної моделі, було здійснено побічний розрахунок інтенсивності поглинутого гамма-випромінювання для кожної контрольної точки. Порівняльні результати побудови градувальних характеристик наведено на рис. 1.

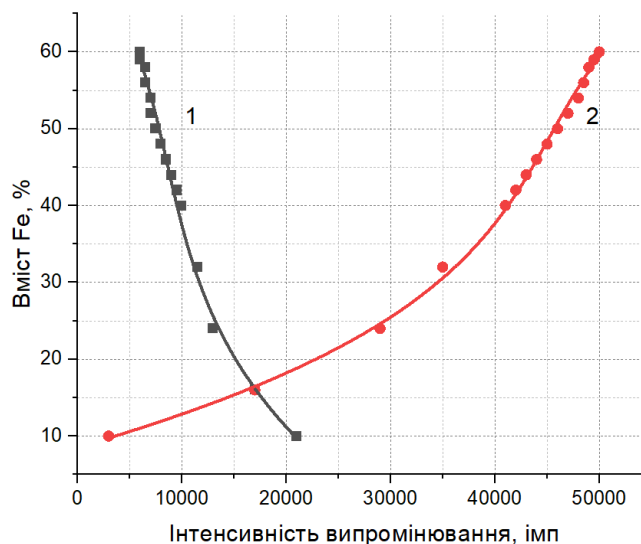


Рисунок 1 - Залежності інтенсивностей розсіяного (1) та поглинутого (2) гамма-випромінювання від вмісту корисного компонента.

Аналіз отриманих графічних залежностей демонструє причини різної точності методів. Для методу, заснованого на реєстрації зворотного розсіяння гамма-квантів, можна спостерігати, що в зоні високих вмістів $Fe_{заг}$ геометричний нахил графіка стрімко зростає. Це зумовлює критичне падіння чутливості методу. У зазначеній зоні апаратного «насичення» мінімальні флуктуації сигналу спричиняють суттєву інструментальну похибку вимірювань.

Водночас чутливість запропонованого модифікованого методу, який базується на оцінці інтенсивності поглинутого випромінювання, у зоні високих вмістів $Fe_{заг}$ є

вищою, що, відповідно, зумовлює підвищення апаратної чутливості. Завдяки цьому в зоні 60–70 % зміна вмісту $Fe_{заг}$ впевнено фіксується, що забезпечує суттєве зниження інструментальної похибки та підтверджує перспективність використання даного методу для оперативного контролю якості залізорудної продукції.

Далі було детально досліджено вузький діапазон високих вмістів $Fe_{заг}$ (60–70 %), що є характерним для товарного залізорудного концентрату. Було проведено порівняльну оцінку розрахункових значень масової частки корисного компонента, отриманих традиційним та запропонованим модифікованим методом.

Порівняння результатів еталонного хімічного аналізу проб з розрахунковим вмістом заліза від інтенсивності зареєстрованого розсіяного випромінювання та розрахунковим вмістом заліза від інтенсивності поглинутого випромінювання наведено на рис. 2.

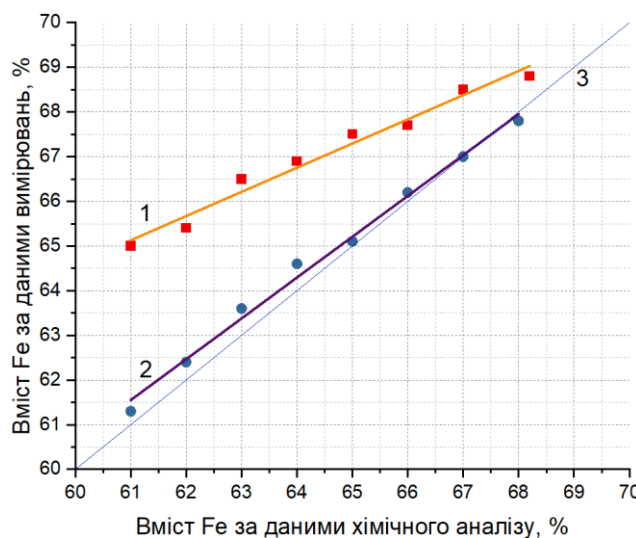


Рисунок 2 - Порівняння результатів еталонного хімічного аналізу проб з: 1 – розрахунковим вмістом заліза від інтенсивності зареєстрованого розсіяного випромінювання; 2 – розрахунковим вмістом заліза від інтенсивності поглинутого випромінювання. 3 – лінія ідеальної збіжності

Результати вимірювань, отримані традиційним способом – шляхом прямої реєстрації потоку зворотно розсіяних на пробі гамма-квантів (1), характеризуються значним відхиленням від лінії ідеальної збіжності (3): лінія тренду проходить вище, що вказує на суттєву систематичне завищення результатів в усьому досліджуваному діапазоні. Натомість результати, отримані з використанням запропонованого параметра – кількості поглинених пробкою гамма-квантів (2), демонструють значно вищий ступінь узгодженості з еталонними хімічними даними. Для оцінки узгодженості використаємо метрики середнього зміщення (MBE), середньої абсолютної (MAE) та середньоквадратичної (RMSE) похибок, а також коефіцієнт конкордантності Ліна (CCC), що розраховані відносно лінії ідеальної збіжності.

Таблиця 1 – Оцінка узгодженості результатів відносно лінії ідеальної збіжності

Метрика	Зворотнє розсіяння	Поглинуте випромінювання
MBE	2,538 %	0,25 %
MAE	2,538 %	0,3 %
RMSE	2,744 %	0,364 %
CCC	0,4345	0,9864

Аналіз даних для методу реєстрації зворотного розсіяння математично

підтверджує візуально спостережувану систематичну похибку. Низький коефіцієнт конкордантності Ліна (0,4345) доводить вкрай слабку узгодженість цього масиву з хімічним аналізом, незважаючи на наявність внутрішньої лінійної залежності. Перехід до використання розрахункового параметра поглиненого випромінювання демонструє суттєве покращення усіх статистичних показників. Середнє зміщення знижується на порядок до 0,25%, що свідчить про успішне нівелювання систематичної складової похибки. Середня абсолютна та середньоквадратична похибки зменшуються майже у 8 разів порівняно з першим методом, становлячи 0,3% та 0,364% відповідно. Водночас коефіцієнт конкордантності Ліна зростає до 0,9864, максимально наближаючись до одиниці.

Для більш глибокого аналізу характеру виявлених похибок в усьому діапазоні досліджуваних концентрацій результати було додатково візуалізовано за допомогою методу Бленда-Альтмана (рис. 3).

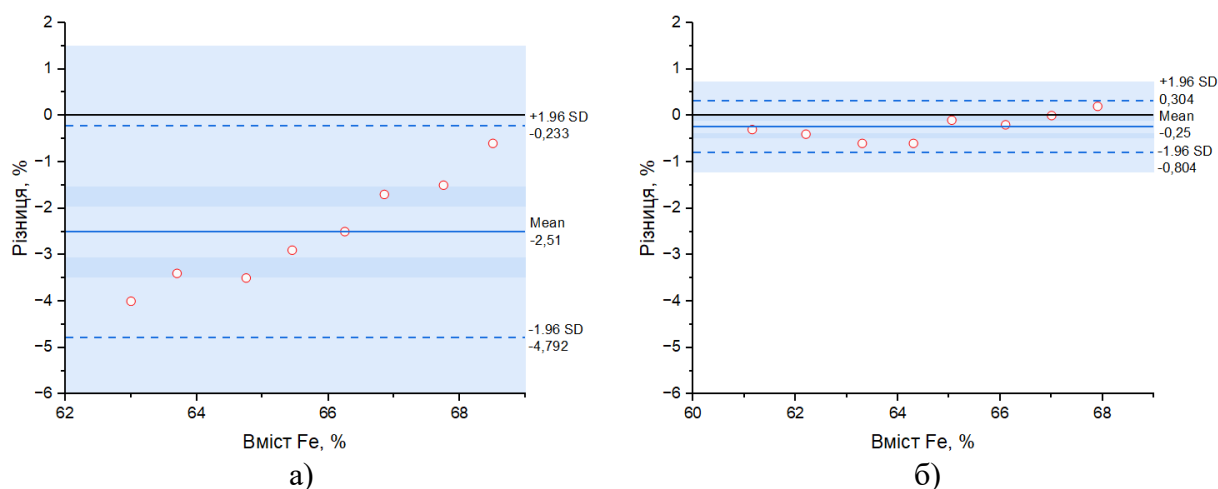


Рисунок 3 - Графіки Бленда-Альтмана для оцінки збіжності результатів вимірювання вмісту $Fe_{заг}$: а) методом реєстрації розсіяного випромінювання; б) методом врахування поглиненого випромінювання

На графіку методу реєстрації зворотного розсіяння (а), окрім значного середнього зміщення (-2,51%) та широких 95% меж узгодженості, чітко простежується пропорційна систематична похибка. Точки розташовуються у діагональному тренді, що свідчить про залежність величини похибки від фактичного вмісту заліза. Натомість графік параметра поглинутого випромінювання (б) демонструє високу узгодженість. Середнє зміщення наближається до нуля (-0,25%), а 95% довірчий інтервал є максимально вузьким (від -0,80% до +0,30%). Точки розподілені навколо лінії середнього зміщення хаотично, без жодних видимих трендів.

Це візуально підтверджує відсутність пропорційної та адитивної систематичної похибки та повністю узгоджується зі статистичними метриками, що доводить високу точність методу поглинутого випромінювання в області високих концентрацій заліза.

Висновки. На підставі проведеного комплексу теоретичних та експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки.

1. Доведено, що для оперативного контролю якості залізорудної сировини та продуктів збагачення з високою масовою часткою загального заліза доцільно застосовувати модифікований ядерно-фізичний метод. Метод базується на комплексному врахуванні параметрів взаємодії випромінювання з речовиною, зокрема, на побічній оцінці інтенсивності поглинутого пробою гамма-випромінювання (ймовірності фотоефекту).

2. Встановлено, що традиційні методи, засновані виключно на реєстрації комптонівського розсіювання, в області високих вмістів корисного компонента

переходять у зону «насичення». Це зумовлює різке падіння чутливості апаратури та неприйнятно високу похибку вимірювань.

Напрямки подальших досліджень будуть зосереджені на теоретичному та експериментальному обґрунтуванні граничних значень геометричного коефіцієнта, що характеризує частку фактично зареєстрованих детектором гамма-квантів від повного потоку оберненого розсіювання. Планується детальне вивчення впливу даного параметра на метрологічні характеристики та підсумкову точність вимірювань у промислових умовах.

Список літератури

1. Хорольський В. П., Хорольська О. В., Хорольський К. Д., Рябікіна К. Г., Рябікіна Н. І., Діянов І. П., Романів А. В., Гайдай Д. Д. Управління інноваційним розвитком підприємств регіону з техногенними територіями. Кривий Ріг : Чернявський Д.О., 2018. 496 с.
2. Morkun V., Morkun N., Fischerauer G., Tron V., Haponenko A., Bobrov Y. Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. *Mining of Mineral Deposits*. 2024. Vol. 18, no. 3. P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>
3. Porkuian O., Morkun V., Morkun N., Tron V., Haponenko I., Davidkovich A. Influence of the Magnetic Field on Love Waves Propagation in the Solid Medium. 2020 *IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, 22–24 April 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/elnano50318.2020.9088802>
4. Boisvert L., Bazin C., Caron J., Lavoie F. Development and Testing of a Method to Estimate the Mineral Composition of Ore from Chemical Assays with a View toward Geometallurgy: Application to an Iron Ore Concentrator. *Geomaterials*. 2022. Vol. 12, no. 04. P. 70–92. URL: <https://doi.org/10.4236/gm.2022.124006>
5. Tverdostup M. On measuring the components of inductive impedance using the three voltmeter method. *System technologies*. 2024. Vol. 1, no. 150. P. 135–140. URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-1-150-2024-13>
6. Development of the method to operatively control quality of iron ore raw materials at open and underground extraction / A. Azaryan et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, no. 5 (95). P. 13–19. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144003>
7. Qin R.-l., Li C.-y., Qin Z.-j., Zhang Z.-h., Cai J. A Compton scattering background subtraction method of gamma energy spectrum based on Gaussian function convolution. *Radiation Physics and Chemistry*. 2024. P. 112202. URL: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112202>
8. Abdelnour M. R., Liu J., Hossny K., Wajid A. M., Li W., Liu Z. Prompt gamma neutron activation analysis: A review of applications, design, analytics, challenges, and prospects. *Radiation Physics and Chemistry*. 2025. P. 112693. URL: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2025.112693>
9. Sharaf J. M. Practical aspects of Compton scatter densitometry. *Applied Radiation and Isotopes*. 2001. Vol. 54, no. 5. P. 801–809. URL: [https://doi.org/10.1016/s0969-8043\(00\)00333-x](https://doi.org/10.1016/s0969-8043(00)00333-x)
10. Kaur T., Sharma J., Singh T. Experimental measurement of effective atomic numbers and albedo factors for some alloys using the backscattering technique. *Applied Radiation and Isotopes*. 2020. Vol. 158. P. 109065. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109065>

References

1. Khorolskyi V. P., Khorolska O. V., Khorolskyi K. D., Riabykina K. H., Riabykina N. I., Diianov I. P., Romaniv A. V., Haidai D. D. (2018) *Management of innovative development of enterprises in regions with technogenic territories [Upravlinnia innovatsiynym rozvytkom pidpriemstv rehionu z tekhnohennymy terytoriiamy]*. Kryvyi Rih : Cherniavskyi D.O.
2. Morkun, V., Morkun, N., Fischerauer, G., Tron, V., Haponenko, A., Bobrov, Y. (2024). Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. *Mining of Mineral Deposits*, 18 (3), 1–8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>
3. Porkuian, O., Morkun, V., Morkun, N., Tron, V., Haponenko, I., Davidkovich, A. (2020). Influence of the Magnetic Field on Love Waves Propagation in the Solid Medium. 2020 *IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 761-766. <https://doi.org/10.1109/elnano50318.2020.9088802>
4. Boisvert, L., Bazin, C., Caron, J., Lavoie, F. (2022). Development and Testing of a Method to Estimate the Mineral Composition of Ore from Chemical Assays with a View toward Geometallurgy: Application to an Iron Ore Concentrator. *Geomaterials*, 12 (04), 70–92. <https://doi.org/10.4236/gm.2022.124006>
5. Tverdostup M. (2024) On measuring the components of inductive impedance using the three voltmeter method. *System technologies*, 1(150), 135–140. URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-1-150-2024-13>
6. Azaryan A., Gritsenko A., Trachuk A., Shvets D. (2018). Development of the method to operatively control quality of iron ore raw materials at open and underground extraction. *Eastern-European Journal of*

Enterprise Technologies, 5 (5-95), 13-19. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144003>

7. Qin, R.-l., Li, C.-y., Qin, Z.-j., Zhang, Z.-h., Cai, J. (2024). A Compton scattering background subtraction method of gamma energy spectrum based on Gaussian function convolution. *Radiation Physics and Chemistry*, 226, 112202. doi:10.1016/j.radphyschem.2024.112202

8. Abdelnour, M. R., Liu, J., Hossny, K., Wajid, A. M., Li, W., Liu, Z. (2025). Prompt gamma neutron activation analysis: A review of applications, design, analytics, challenges, and prospects. *Radiation Physics and Chemistry*, 234, 112693. doi: 10.1016/j.radphyschem.2025.112693

9. Sharaf, J. M. (2001). Practical aspects of Compton scatter densitometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 54(5), 801–809. [https://doi.org/10.1016/s0969-8043\(00\)00333-x](https://doi.org/10.1016/s0969-8043(00)00333-x)

10. Kaur, T., Sharma, J., Singh, T. (2020). Experimental measurement of effective atomic numbers and albedo factors for some alloys using the backscattering technique. *Applied Radiation and Isotopes*, 158, 109065. doi:10.1016/j.apradiso.2020.109065

Надійшла до редакції 05.04.2026

Shvets D. V., Hryhoriev Y. I., Kotov I. A., Hryhoriev I. Y.

ADVANCING METHODS FOR NON-DESTRUCTIVE IDENTIFICATION AND AUTOMATED EXPERT ASSESSMENT OF IRON ORE MATERIAL FLOW PARAMETERS

Purpose. The purpose of this work is to improve the methodology of radiation non-destructive testing to minimize the measurement error of the mass fraction of total iron across a wide range, particularly in rich ores and concentrates, by overcoming the physical limitations of the traditional nuclear-physical method.

Methodology. The research combines a theoretical analysis of gamma-ray interaction with matter and a series of experiments. The reference base was formed from technological samples of iron ore (Fe content 40–60%), concentrate (61–68%), and state standard reference materials (10–40%). Measurements were performed using a NaI(Tl) scintillation detector. To evaluate the accuracy of both approaches, a statistical apparatus was applied: calculation of mean bias error (MBE), mean absolute error (MAE), root-mean-square error (RMSE), Lin's concordance correlation coefficient (CCC), and agreement analysis using Bland-Altman plots.

Results. It has been proven that the traditional method of registering Compton scattering on rich ores enters a "saturation" zone, losing sensitivity and generating a significant proportional systematic error. A modified approach is proposed that uses the calculated radiation absorbed by the sample, accounting for the increased probability of the photoelectric effect. This solution significantly enhanced sensitivity: the root-mean-square error was reduced to 0.364%, the mean bias error decreased to 0.25%, and the concordance coefficient with the reference increased to 0.9864.

Scientific novelty. The effectiveness of transitioning from single-parameter registration of scattered radiation to multi-parameter accounting of its interaction with a high-iron-content medium has been demonstrated. Functional dependencies have been established that mathematically demonstrate the absorption parameter's ability to extract the measuring system from the insensitivity zone, reliably maintaining the calibration curve's optimal slope.

Practical significance. The developed method provides fundamentally higher precision for rapid analysis. Its implementation for the automated monitoring of cargo flows will allow enterprises to efficiently manage raw material disintegration processes, stabilize the quality of commercial concentrate, and increase the energy efficiency of beneficiation plants.

Keywords: non-destructive testing, nuclear-physical method, Compton scattering, identification, energy efficiency.

Відомості про авторів

Швець Дмитро Валерійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна, dmitriy.shvets@knu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5126-6405

Григор'єв Юліан Ігорович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відкритих гірничих робіт, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна, yulian.hryhoriev@knu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1780-5759

Котов Ігор Анатолійович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна, rioxito@knu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2445-6259

Григор'єв Ігор Євгенійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничої справи, ТОВ «Технічний університет «МЕТІНБЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна, igor.hryhoriev@mipolytech.education, ORCID: 0009-0006-2787-106X

Shvets Dmytro, Ph.D., Associate Professor of the Modeling and Software Department, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, dmitriy.shvets@knu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5126-6405

Hryhoriev Yulian, Ph.D., Associate Professor of the Open-Pit Mining Department, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, yulian.hryhoriev@knu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1780-5759

Kotov Ihor, Doctor of Sciences, Professor of the Modeling and Software Department, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, rioexito@knu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2445-6259

Hryhoriev Ihor, Ph.D., Associate Professor of the Mining Department, LLC "Technical University "METINVEST POLYTECHNIC", Zaporizhzhia, Ukraine, ihor.hryhoriev@mipolytech.education, ORCID: 0009-0006-2787-106X