

ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ У ВИЯВЛЕННІ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН

Машиністов В.Е., Балакін В.Ф., Рак П.В., Соловійова І.А., Николаєнко Ю.М.
Навчально-науковий інститут «Дніпровський металургійний інститут»
Українського державного університету науки і технологій
пр. Науки, 4, 49000, м. Дніпро
viktormashinistov3@gmail.com

У статті розглянуто можливості застосування гамма-випромінювання для виявлення вибухонебезпечних речовин і предметів, зокрема мін. Узагальнено результати попередніх досліджень, присвячених використанню гамма-випромінювання для дистанційного виявлення неоднорідностей у середовищі. Розглянуто фізичні основи взаємодії гамма-квантів із речовиною, включаючи комптонівське розсіювання, фотоэффект. Особливу увагу приділено методу зворотного розсіювання як найбільш перспективному для задач виявлення вибухонебезпечних речовин. Проведено аналіз спектральних характеристик випромінювання та їх зв'язку з хімічним складом речовин. Показано, що використання джерел типу Co-60 дозволяє отримувати інформацію про структуру середовища та виявляти приховані об'єкти. Запропонований підхід базується на опроміненні досліджуваного об'єкта гамма-випромінюванням та реєстрації зворотно розсіяного сигналу за допомогою багатоканального спектрометра. Фізичною основою методу є процеси взаємодії гамма-квантів із речовиною, насамперед комптонівське розсіювання, а також фотоэффект, що можуть супроводжуватися характеристичним випромінюванням. При взаємодії випромінювання з речовиною формується енергетичний спектр, який містить інформацію про її елементний склад. Особливий інтерес становлять спектральні лінії, що відповідають таким елементам, як вуглець (С), азот (N) та кисень (O), які є основними компонентами більшості вибухових речовин. Ключовою ідеєю методу є виявлення аномально підвищеного рівня сигналів, що відповідають зазначеним елементам, у спектрі зворотно розсіяного випромінювання. Така аномалія інтерпретується як індикатор можливого наявності вибухонебезпечної речовини. Визначено переваги, обмеження та перспективи використання гамма-спектру зворотного розсіяного сигналу для виявлення, ідентифікації та локалізації вибухонебезпечних речовин. Використання гамма-випромінювання для виявлення вибухонебезпечних речовин дозволить досліджувати значні території за відносно невеликий проміжок часу при його прийнятних масогабаритних характеристиках. В цілому пристрої, які можуть бути розроблені з використанням гамма-випромінювання, можуть повністю відповідати вимогам, які пред'явлені ООН (International Standards for Humanitarian Mine Clearance Operations/-UN-1996). *Ключові слова:* гамма-випромінювання, речовини, зворотне розсіювання, гамма-спектрометрія, детектування.

Gamma radiation in the detection of explosive substances. Mashinistov V., Balakin V., Rak P., Solovyova I., Nikolayenko Yu.

The article examines the possibility of stagnant gamma-vipromining for identifying unsafe speeches and objects, including min. The results of previous studies devoted to the use of gamma-vipromotion for remote detection of inhomogeneities in the medium have been confirmed. The physical basis of the interaction of gamma quanta with speech, including Compton dispersion and the photo effect, is examined. Particular respect is given to the method of gate dissection as the most promising for the task of identifying faulty speech. An analysis of the spectral characteristics of vibration and their connection with the chemical storage of resins was carried out. It has been shown that a vicoristic device of the Co-60 type allows one to retrieve information about the structure of the core and detect the presence of objects. The identification of the approach is based on the evaluation of the target object, gamma-ray prominence and registration of the return scattered signal using an additional multi-channel spectrometer. The physical basis of the method is the process of interaction of gamma quanta with speech, firstly Compton scattering, as well as a photographic effect that can be accompanied by characteristic vibration effects. With the interaction of vibration with speech, an energy spectrum is formed that contains information about its elemental storage. It is of particular interest to determine the spectral lines that correspond to such elements as carbon (C), nitrogen (N) and acidity (O), which are the main components of most vibukhic acids. The key idea of the method is the identification of an abnormally elevated level of signals that correspond to the designated elements in the spectrum of reversal scattering. This anomaly is interpreted as an indicator of the possible manifestation of a disordered speech disorder. The advantages, boundaries and prospects of using the gamma spectrum of the gateway Russian signal for the detection, identification and localization of unsafe speeches have been identified. The use of gamma-viprominuing for the identification of unsafe speeches allows one to trace significant territories in a relatively short period of time with very favorable mass and dimensional characteristics. In general, the devices that can be separated from the vicors of gamma-viprominuvaniya can closely resemble the effects presented by the UN (International Standards for Humanitarian Mine Clearance Operations/-UN-1996). *Key words:* gamma-vipromining, speech, portal dispersion, gamma spectrometry, detection.

Постановка проблеми. Сучасні виклики у сфері техногенної та екологічної безпеки зумовлюють необхідність створення ефективних методів дистанційного виявлення вибухонебезпечних речовин

(ВНР), зокрема у контейнерах, транспортних засобах та ґрунтовому середовищі. Особливої актуальності ця проблема набула в умовах значного мінного забруднення територій.



Існуючі методи виявлення вибухових речовин мають низку обмежень, пов'язаних із недостатньою селективністю, складністю реалізації, трудомісткістю, невисоким темпом пошуку та, головне, недостатньо безпечні. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки нових фізичних підходів, здатних забезпечити одночасно дистанційність, інформативність і надійність ідентифікації, високий рівень безпеки виконання пошукових робіт.

Проблема виявлення вибухонебезпечних речовин (ВНР) є однією з ключових у сфері національної безпеки, цивільного захисту та протимінної діяльності. Особливої актуальності ця задача набула в Україні в умовах значного забруднення територій вибухонебезпечними об'єктами, що створює загрозу для населення, інфраструктури та економічної діяльності.

Особливе місце серед відомих методів займає гамма-випромінювання завдяки своїй високій проникній здатності та можливості взаємодії з речовиною на атомному рівні. Це дозволяє не лише виявляти приховані об'єкти, але й отримувати інформацію про їх внутрішню структуру та елементний склад. Зокрема, методи гамма-радіографії, зворотного розсіювання та гамма-активаційного аналізу широко застосовуються для контролю вантажів, огляду транспортних засобів і виявлення вибухових пристроїв.

Водночас використання гамма-методів пов'язане з низкою технічних труднощів, зокрема необхідністю застосування джерел іонізуючого випромінювання та складністю обробки спектрометричних даних.

Актуальність дослідження. Актуальність роботи обумовлена необхідністю розробки ефективних методів очищення територій від мін, що є важливою складовою екологічної безпеки. Використання гамма-випромінювання дозволяє здійснювати дистанційний аналіз складу ґрунту та виявляти сторонні об'єкти за їх спектральними характеристиками.

Зв'язок роботи з науковими та практичними завданнями. Робота пов'язана з вирішенням задач у напрямках:

- екологічної безпеки територій;
- неруйнівного контролю;
- радіаційної фізики та спектрометрії.

Практичне значення полягає у створенні передумов для розробки нових засобів гуманітарного розминування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні відомі публікації, наприклад, [1-3], в яких приводяться результати досліджень по розробці засобів і методів виявлення ВНР. Однак існуючі методи потребують подальшого розвитку, зокрема у напрямі підвищення точності, інформативності методів. Метою даної роботи є аналіз можливостей застосування гамма-випромінювання для виявлення вибухонебезпечних речовин, дослідження фізичних основ методу та визначення перспектив його подальшого розвитку.

Виділення невирішених частин проблеми. Недостатньо дослідженими залишаються:

- можливості використання розсіяного гамма-випромінювання;
- вплив властивостей навколишнього середовища на точність виявлення, ідентифікації та локалізації ВНР;
- параметри джерел випромінювання.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає у наступному:

- вперше запропоновано підхід до виявлення ВНР, що базується на аналізі спектрального складу зворотно розсіяного гамма-випромінювання з акцентом на виявленні елементів С, N, O;
- удосконалено метод використання зворотного розсіювання шляхом переходу від інтегральної оцінки сигналу до спектрометричного аналізу;
- набув подальшого розвитку підхід до дистанційної ідентифікації матеріалів на основі їх елементного складу.

Методологічне значення. Методологічне значення роботи полягає у розширенні можливостей гамма-спектрометричних методів для задач ідентифікації складних багатоконпонентних середовищ.

Запропонований підхід поєднує:

- фізику взаємодії випромінювання з речовиною;
- методи спектрального аналізу;
- принципи дистанційного зондування.

Загальнонаукове значення полягає у демонстрації можливості використання спектральних характеристик зворотно розсіяного випромінювання як інформативного параметра для визначення хімічного складу об'єктів.

Основний матеріал. З метою забезпечення надійного, безпечного і швидкого виявлення мін під поверхнею землі пропонується технічне рішення, що базується на опроміненні ділянки території, яка досліджується на предмет наявності мін, гамма-випромінюванням. Це електромагнітне коливання, яке випромінюється ядрами атомів при їх радіоактивних перетвореннях у вигляді високоенергетичних квантів, має високу проникаючу здатність. Зокрема, товщина шару половинного ослаблення гамма-випромінювання в ґрунті складає 10-14 см.

Вся енергія гамма-випромінювання поглинається речовиною, в якій воно поширюється, шляхом іонізації її атомів. Встановлено, що в середньому на один акт іонізації витрачається енергія гамма-випромінювання в 33,85 електрон-Вольт. Саме вказана властивість поширення гамма-випромінювання в речовині створює умови для реалізації способу виявлення ВНР, причому за допомогою відомих технічних засобів. Для вирішення задач сформульованих в рамках підходу, що пропонується, до виявлення вибухонебезпечних речовин і, зокрема, мін, передбачається використовувати гамма-випромінювання з енергією, яка не перевищує значення 2 МеВ. В цьому діапа-

зоні енергій основними процесами, що супроводжують поширення гамма-випромінювання в речовині, є фотоэффект і ефект Комптона.

При фотоэффекті має місце повне поглинання гамма-кванту, в результаті чого зв'язаний електрон атому вивільнюється і вся енергія гамма-кванту перетворюється в кінетичну енергію фотоелектрону.

Ефект Комптона - це процес розсіювання гамма-квантів на вільних електронах речовини і на електронах зовнішньої оболонки атому. В результаті цього гамма-квант передає електрону енергію E_e , яка є частиною від енергії E_γ і електрон покидає атом, а гамма-квант $E_{\gamma'} = E_\gamma - E_e$ зі зменшеною енергією поширюється далі, змінивши напрям свого руху на кут θ між напрямом руху падаючого і розсіяного гамма-кванту. В подальшому розсіяний гамма-квант може таким же чином послідовно взаємодіяти з іншими атомами речовини, в якій він поширюється, якщо його енергії буде достатньо для вибивання електрону із атому. Загалом при опроміненні речовини гамма-квантами з енергією порядку 1 МеВ, в середньому може бути десятки тисяч таких взаємодій. При кожній із них із атомів речовини вторинного джерела електромагнітних коливань вибивається електрон, змінюється напрям руху налітаючого гамма-кванту та зменшується його енергія.

Суть підходу, що пропонується, ілюструється за допомогою рис. 1. Ділянка земної поверхні опромінюється моноенергетичним первинним джерелом гамма-квантами з енергією E_γ . В результаті багатократної взаємодії з атомами речовини ґрунту, в ньому відтворюється вторинне об'ємне джерело гамма-випромінювання великого об'єму, спектр якого є суцільним, від енергії E_γ до 0. Вторинне випромінювання, на відміну від первинного, роз-

сіюється рівномірно у всіх напрямках, в тому числі і в зворотному ($\theta=180^\circ$). Атоми речовини, в якій поширюються гамма-кванти, поглинають і практично зразу випромінюють енергію строго певного значення E_e для кожного із них. Це створює умови для визначення кількісного і якісного хімічного складу даної речовини. Описані процеси відображаються у вигляді спектру енергії розсіяного гамма-випромінювання, вимірюючи і аналізуючи який, можна здійснювати пошук, локалізацію і ідентифікацію об'єктів з відомими фізичними та хімічними властивостями.

Так, коли опромінюється ґрунт, в якому знаходиться об'єкт, наприклад, міна, який має фізико-хімічні характеристики, які відмінні від характеристик навколишнього середовища, то він буде мати суттєво інший спектр гамма-випромінювання, ніж ґрунт. Цю властивість і пропонується використовувати для виявлення мін. Детектор (скануючий гамма-спектрометр) розміщується поряд із первинним джерелом, щоб запобігти попаданню в детектор прямого випромінювання від первинного джерела. Одержаний гамма-спектр зворотного розсіяного сигналу порівнюється із гамма-спектром випромінювання відомих мін, на підставі чого приймається рішення про відсутність або наявності міни на території, що обслідується.

Для оцінки можливості використання підходу, що пропонується для виявлення мін, був проведений експеримент. Відомо, що в калійному добриві міститься радіоактивний ізотоп калій-40 в 0,012% кількості його маси. Цим джерелом опромінювались суміші різних речовин, якими заповнювалась верхня третина проби. Гамма-спектрометр розміщувався на поверхні проби.

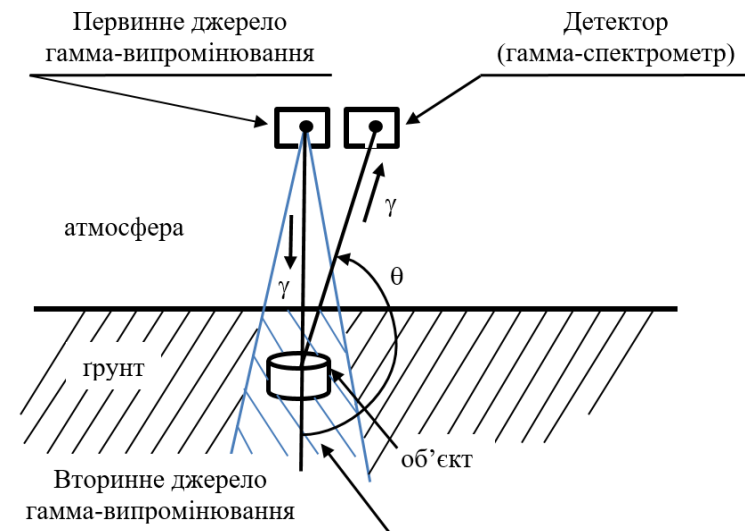


Рис. 1. Геометрія виявлення об'єктів в ґрунті

Деякі результати експериментів приведені на рис. 2, на якому показана якісна залежність кількості гамма-квантів, що потрапляють в канали спектрометра (ось Y) від енергії гамма-квантів, що випромінювались вторинним джерелом (ось X). Досліджувались калій і азот в складі відповідних добрив. Об'єкт-це імітатор вибухонебезпечних речовин, в склад яких, крім азоту, обов'язково входить вуглець (графіт). В експерименті використовувалась суміш саме цих елементів.

Із рис.2 видно, що для різних сумішей вид отриманих спектрограм різний. Зокрема, вони відрізняються видом і рівнем пагорбів і впадин на приведених залежностях. Таким чином, можна сподіватись, що запропонований підхід може використовуватися для виявлення мін. Тому потрібно і далі проводити дослідження в цьому напрямі, Тим більше, що для цього не потрібно вкладати значні кошти, При позитивних результатах це дасть можливість сформулювати вимоги до кон-

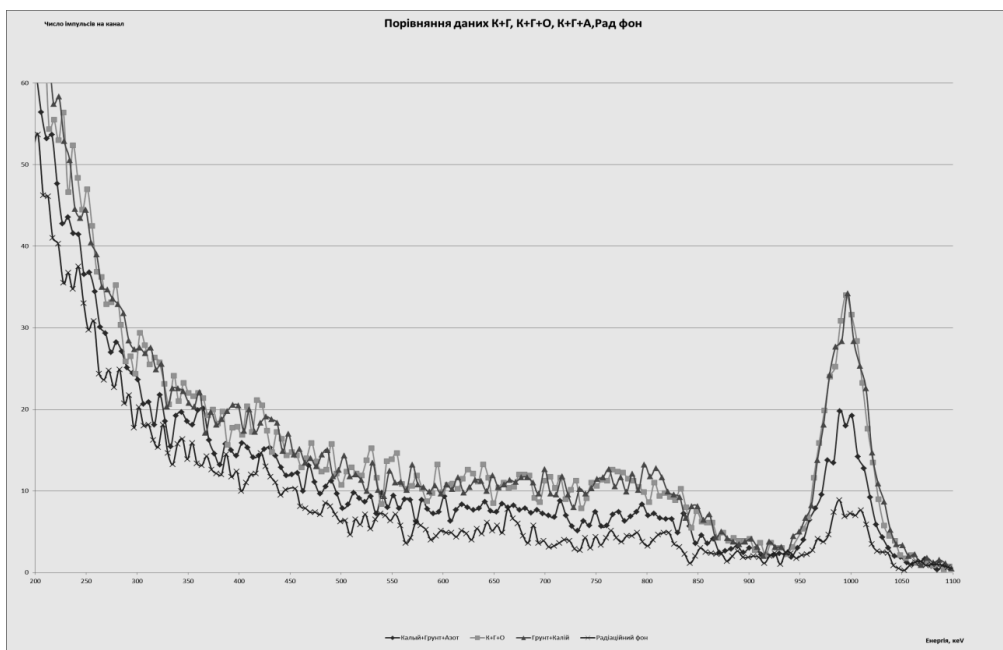


Рис. 2. Гамма-спектрограми (якісна залежність)

кретних технічних засобів для виявлення мін, що може допомогти вирішити глобальну проблему очищення територій від них.

Результати експерименту показали, що в принципі можливо використовувати розсіяне гамма-випромінювання для виявлення та локалізації мін.

В подальшому необхідно провести натурні експерименти з використанням джерел гамма-випромінювання як на імітаторах мін, так і на їх реальних зразках. Також необхідно виявити можливості даного підходу в залежності від властивостей ґрунту та об'єктів, що знаходяться в них, характеристик джерела опромінення, а також по часу пошуку та точності виявлення їх місцезнаходження. Це дасть можливість сформулювати шляхи конкретних інженерних розробок, виходячи із фізико-технічних вимог та забезпечення потрібного рівня надійності пошуку мін та його безпечності.

Оцінки показують, що для отримання енергії гамма-випромінювання, достатньої для використання її в якості зондуємого сигналу при пошуку мін, достат-

ньо маси радіонуклідів в декілька десятків міліграм.

Пристрій, в якому може бути реалізований запропонований підхід, складається з джерела, що генерує зондуєме гамма-випромінювання і яке має локальну систему радіаційного захисту, коліматор, який формує пучок гамма-квантів та скануючий гамма-спектрометр, який приймає зворотній сигнал у вигляді спектру електромагнітного випромінювання. На підставі аналізу спектральних характеристик робиться висновок щодо виявлення та ідентифікації мін. Завдяки скануванню поверхні, що досліджується, з частотою, наприклад, 50 Гц, створюються умови для отримання одного її енергетичного зображення за час не більш ніж 20 мсек.

Висновки. В результаті проведених досліджень:

1. Запропоновано ефективний метод виявлення мін.
2. Підтверджено можливість використання гамма-випромінювання для ідентифікації об'єктів.
3. Метод забезпечує підвищення рівня безпеки та продуктивності пошукових робіт.

Використання гамма-випромінювання для виявлення вибухонебезпечних речовин дозволить досліджувати значні території за відносно невеликий проміжок часу при його прийнятних масогабаритних характеристиках. В цілому пристрої, які можуть бути розроблені з використанням гамма-випромінювання, можуть повністю відповідати вимогам, які пред'яв-

лені ООН (International Standards for Humanitarian Mine Clearance Operations/-UN-1996).

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на:

- проведення натурних випробувань;
- розробку промислових зразків обладнання;
- підвищення точності методу.

Література

1. Іваненко О. В., Петренко М. С. Методи виявлення вибухонебезпечних предметів у ґрунті. Технічні науки та технології. 2024. № 2. С. 45–52.
2. Коваленко Д. П., Шевченко І. Л. Система виявлення вибухонебезпечних об'єктів на основі безпілотних літальних апаратів. Інформаційні технології і системи безпеки. 2022. № 3. С. 106–115.
3. Перспективні технології та методики пошуку вибухонебезпечних матеріалів. Карпов А., Кустов М., Басманов О., Кулаков О. 2024 рік: матеріали конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій». Харків: НУ ЦЗУ. 2024. С. 183-184.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026