ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВА ТЕХНІКА

Стаття та будь-який пов'язаний з нею опублікований матеріал поширюється за ліцензією Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).
The article and any related published material are licensed under the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).

УДК 519.876.5:534.2:623.26.
DOI: https://doi.org/10.17721/2519-481X/2026/91-08

Сергій ТОЛЮПА, доктор технічних наук, професор
e-mail: serhii.toliupa@knu.ua
ORCID ID: 0000-0002-1919-9174
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Ігор ЯРМОЛАЙ, доктор філософії (інформаційні системи та технології)
e-mail: mazay0606@knu.ua
ORCID ID: 0009-0001-7013-5790
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Ігор ПАМПУХА, кандидит технічних наук, доцент
e-mail: ihor.pampukha@knu.ua
ORCID ID: 0000-0002-4807-3984
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Олександр ГРИБОК, кандидит педагогічних наук, доцент
e-mail: oleksandr.hrybok@knu.ua
ORCID ID: 0009-0005-8124-0560
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕЙСМОАКУСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ ДИСТАНЦІЙНОЇ РОЗВІДКИ ВИБУХОВИХ ПОЛІВ

Вступ. ***У контексті сучасних збройних конфліктів та кризових ситуацій дистанційне виявлення вибухових подій є надзвичайно важливою складовою ситуаційної обізнаності. Детонація боєприпасів або вибухових речовин супроводжується стрімким вивільненням енергії, що породжує взаємопов'язані хвильові процеси у двох різних середовищах: пружні сейсмічні хвилі в ґрунті та акустичні хвилі в атмосфері. Комплексна реєстрація цих сигналів дає змогу виявляти, ідентифікувати та визначати місцезнаходження джерел вибухів за межами прямої оптичної або радіолокаційної видимості. Математичні моделі у поєднанні з чисельними методами сприятимуть розвитку теорії та практики дистанційного сейсмоакустичного моніторингу вибухових подій шляхом вирішення низки критичних проблем у сфері пасивної локалізації та аналізу.***

Метою дослідження є розробка комплексної математичної моделі генерації та поширення зв'язаних сейсмоакустичних полів у двошаровій системі "земля-повітря" та відповідної обчислювальної бази для підвищення точності пасивної локалізації (TDOA), визначення координат, глибини детонації та ТНТ-еквівалента джерел вибухів у режимі реального часу в умовах відсутності прямої видимості, складної топографії та інтенсивних перешкод.

Методи. ***Дослідження ґрунтується на інтеграції чисельних методів обчислювальної математики та математичного апарату теорії ймовірностей і випадкових процесів (модель розсіювання хвильового потоку, імпульсні потоки Пуассона та Бернуллі, аналіз моментів).***

Результати. ***Розроблено двошарову математичну модель системи "земля–повітря" з урахуванням кінематичних та динамічних граничних умов, що забезпечує точний розрахунок пасивної локалізації джерела. Аналітично доведено нестаціонарність шумового фону в полі вибуху за наявності тривалих сигналів внаслідок ефекту інтегрального накопичення, а також визначено межі застосовності формул Кемпбелла. Обґрунтовано оптимальний чисельний стек для обробки в режимі реального часу, а також розроблено алгоритм інтегрування моментних моделей інтерференції з чисельним розрахунком хвильових полів.***

Висновки. ***Розроблено комплексну математичну модель генерації та поширення зв'язаних сейсмоакустичних полів вибухового походження для дистанційного зондування в умовах складної інтерференції, відсутності оптичної видимості та впливу систем радіоелектронної боротьби. На відміну від класичних підходів, які розглядають сейсмічний та акустичний канали ізольовано, запропоновано двошарову систему "земля-повітря", що враховує ефекти взаємодії середовищ (сейсмічні хвилі, пов'язані з повітрям, та вторинне звукове випромінювання).***

Ключові слова: ***дистанційне зондування, сейсмоакустичні хвилі, зв'язність середовища, нестаціонарний шум, формули Кемпбелла, математична модель, сейсмоакустичний моніторинг.***

Вступ

Необхідність удосконалення систем дистанційної розвідки зумовлена специфікою сучасного театру воєнних дій: робота за відсутності оптичної видимості: застосування димових завад, маскування, сприятливий для противника рельєф, щільна міська забудова, заліснена місцевість або нічний час унеможливлюють використання візуальних чи оптико-електронних каналів спостереження; складна завадова обстановка: реальні умови експлуатації характеризуються високим рівнем фонового шуму – природного (вітер, опади, сейсмічні шуми), техногенного (рух важкої техніки, робота генераторів) та інтенсивного навмисного радіоелектронного придушення активних локаторів; вимоги до оперативності: час від моменту детонації до видачі точних координат цілі й оцінки її типу має

© Толюпа Сергій, Ярмолай Ігор, Пампуха Ігор, Грибок Олександр, 2026

ISSN 2519-481X

обчислюватися секундами для забезпечення ефективної контрбатарейної боротьби або оцінки завданого ураження (Stein & Vaisession, 2002)

Методи

Для вирішення поставленої задачі використано комплекс теоретичних, чисельних та статистичних методів. Методи суцільного середовища та математичної фізики, які використовуються для опису поширення пружних сейсмічних хвиль у ґрунті, моделювання акустичних (інфразвукових) хвиль у повітрі, врахування неперервності прискорень, нормальних і дотичних напружень на межі розділу "земля–повітря". Чисельні методи обчислювальної математики. FDTD (Finite-Difference Time-Domain): метод скінченних різниць у часовій області на рознесеній сітці для обчислення хвильових процесів на рівнинній місцевості. CPML (Convolutional Perfectly Matched Layer): згорткові поглинаючі шари для усунення нефізичних відбиттів поверхневих (Релея) та ковзних акустичних хвиль на зовнішніх межах обчислювальної області. SEM (Spectral Element Method): метод спектральних елементів із використанням поліномів Ґаусса–Лобото–Лежандра для високоточного розрахунку поширення хвиль в умовах складного рельєфу (гірська чи міська місцевість). Parallel computing (технології паралельних обчислень CUDA/OpenCL на GPU) – для забезпечення роботи FDTD-модуля в режимі реального часу. Методи теорії ймовірностей, математичної статистики та випадкових процесів для моделювання пуассонівських та бернуллівських потоків при описі дискретних імпульсних завад із флуктуючими амплітудами.

Результати

Розроблено двошарову математичну модель системи "земля–повітря" з урахуванням кінематичних і динамічних граничних умов, яка забезпечує точний розрахунок TDOA та оцінку тротилового еквівалента джерела. Аналітично доведено нестаціонарність шумового фону у вибуховому полі за наявності тривалих сигналів через інтегральний ефект накопичення та визначено межі застосовності формул Кемпбелла. Обґрунтовано оптимальний чисельний стек (3D-FDTD+CPML на GPU та SEM) для реального часу та розроблено алгоритм інтеграції моментних моделей завад із чисельним розрахунком хвильових полів.

Проблематика та недоліки існуючих підходів. Класичні методи сейсмоакустичного моніторингу зазвичай розглядають поширення пружних хвиль у ґрунті та акустичних хвиль у повітрі як два ізольовані процеси. Таке спрощення суттєво знижує точність дистанційної ідентифікації з наступних причин: ігнорування ефектів зв'язаності середовищ: вибух біля поверхні землі генерує складне взаємозв'язане сейсмоакустичне поле. Акустична хвиля, поширюючись у повітрі, викликає супутній прогин поверхні ґрунту (повітряно-зв'язані сейсмічні хвилі), а сейсмічна хвиля під час виходу на поверхню генерує вторинне випромінювання звуку в атмосферу; помилки локалізації та розпізнавання: неврахування трансформації енергії на межі розділу "земля-повітря" призводить до викривлення фронту хвиль, хибного визначення часу їх прибуття (TDOA) та значних похибок у розрахунку координат джерела; викривлення енергетичних оцінок: ізольовані моделі не дозволяють адекватно оцінити реальний розподіл енергії вибуху між атмосферною та ґрунтовою складовими, що перешкоджає точному визначенню потужності вибухового пристрою (його тротилового еквівалента) та заглиблення джерела.

На сьогодні вирішення питань забезпечення сейсмоакустичного моніторингу та впливу ударної хвилі на об’єкти описується в роботах вітчизняних та закордонних дослідників, а саме: Мостовий В.С., Вижва С.А., Щербина С.В., Кендзера О.В., Габріель Альберт (Gabriel Albert – французький вчений, який вивчав ударні хвилі та працював над їхнім математичним описом), Гаізим Вальцман (Garry J. Walzmann – американський фізик, який спеціалізується в галузі ударної фізики та вибухових явищ), Джон Соломон (John Solomon – вчений, який працює у галузі фізики ударних хвиль та механіки матеріалів), Кевін Трюк (Kevin M. Truscott – інженер та вчений, який досліджує взаємодію ударних хвиль із структурами), Леонардо Бассані Leonardo Bassani – італійський вчений, який вивчав фізику вибухів та ударні хвилі), Джеймс Р. Мелвіль (James R. Melville – фізик, який спеціалізується у дослідженні ударних явищ та механіки матеріалів). Історично сейсмоакустичний моніторинг застосовувався для аналізу землетрусів і описується в роботах Ярмолая І. & Пампухи І. (2024) та Mikhailenko A., Mikhailov G. & Reshetova (2014). Метою такого дослідження був прогноз сейсмічних подій (Мостовий, Мостовий & Осадчук, 1996). Сучасні сейсологічні дослідження базуються на математичних моделях автоматизованих систем сейсмічного моніторингу розкриті в роботах (Mostovoi V. et al., 2001) і (Robinson E.A., 1997) та математичних моделях штучного інтелекту (Ярмолай І.О., 2025). В (Dando B. & Goertz-Allmann BP, 2023) розглядається питання виявлення атак у російсько-українському конфлікті за допомогою даних сейсмічних масивів. Також наукова публікація (Grigoli F., Cesca S. & Amoroso O., 2014) дає можливість автоматичного визначення місця сейсмічних подій за допомогою аналізу когерентності хвильових форм. В (Young C., et al., 2002) наведено аналіз локальних сейсмоакустичних подій, які підтвердили важливість сейсмоакустичного моніторингу. Враховуючи реалії нашого життя в умовах військового протистояння в (Albert D.G. & Taherzadeh S., 2013) розглядаються питання ґрунтових коливань, які спричинені поверхневими та приповерхневими вибухами. В (Negraru P.T. 2010) показано, як сейсмоакустичні сигнали застосування для дослідження локальних ефектів місцевості, що є вкрай важливим при сейсмоакустичному моніторингу. Таким чином застосування сейсмоакустичного моніторингу для оцінки динаміки стану об’єктів є актуальним сучасним підходом для вирішення цієї складної моніторингової задачі.

Для опису зв'язаних сейсмоакустичних хвиль середовище моделюється як двошарова система: верхня півпросторова зона відповідає стисливій атмосфері ($z > 0$), а нижня – пружному ґрунту ($z < 0$).

Рівняння стану в повітряному середовищі ($z > 0$). Акустичне поле в повітрі описується рівнянням для надлишкового акустичного тиску $p(x,z,y,t)$:

$$\frac{1}{c_a^2}\frac{\partial^2 p}{\partial^2 t} - \nabla^2 p = F_a(x,z,y,t) \quad (1)$$

де c_a – швидкість звуку в повітрі,

$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа,

F_a – функція джерела вибуху в атмосфері.

Зв'язок між тиском p та вектором ρ зміщення частинок повітря $\mathrm{w} = (w_x, w_y, w_z)$:

$$\nabla p = -\rho_a \frac{\partial^2 \mathrm{w}}{\partial t^2} \quad (2)$$

де ρ_a – густина повітря.

Рівняння стану в ґрунтовому середовищі (z < 0). Сейсмічні коливання в ґрунті описуються динамічним рівнянням Нав'є-Коші для вектора зміщень $\mathrm{u}(x,z,y,t) = (u_x, u_y, u_z)$:

$$\rho_s \frac{\partial^2 \mathrm{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu)\nabla(\nabla \times \mathrm{u}) + \mu \nabla^2 \mathrm{u} + F_s(x,z,y,t), \quad (3)$$

де ρ_s – густина ґрунту,

λ, μ – параметри Ляме,

$F_s(x,z,y,t)$ – вектор сил джерела вибуху в ґрунті.

Компоненти тензора напружень $\sigma_{i,j}$ у пружному середовищі:

$$\sigma_{i,j} = \lambda(\nabla \times \mathrm{u})\delta_{i,j} + \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), \quad (4)$$

Граничні умови на межі розподілу "земля–повітря" (z = 0). Взаємодія середовищ описується системою кінематичних та динамічних граничних умов при z = 0:

Кінематична умова (неперервність нормальних прискорень): зміщення частинок повітря по нормалі відповідає вертикальному зміщенню поверхні ґрунту:

$$\left.\frac{\partial p}{\partial z}\right|_{z=0^+} = -\rho_a \left.\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}\right|_{z=0} \quad (5)$$

Динамічна умова для нормальних напружень: вертикальне напруження в ґрунті врівноважується акустичним тиском повітря:

$$\sigma_{zz}\Big|_{z=0^-} = (\lambda \nabla \times \mathrm{u} + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z})\Big|_{z=0^-} = -p\Big|_{z=0^+} \quad (6)$$

Динамічна умова для дотичних напружень: важаючи повітря нев'язким середовищем, дотичні (касаційні) напруження на поверхні дорівнюють нулю:

$$\sigma_{xz}\Big|_{z=0^-} = \mu\left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}\right)\Big|_{z=0^-} = 0, \quad (7)$$

$$\sigma_{yz}\Big|_{z=0^-} = \mu\left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}\right)\Big|_{z=0^-} = 0.$$

Початкові умови та умови на нескінченності. Початкові умови (t = 0):

$$\mathrm{u}\Big|_{t=0} = 0, \ \left.\frac{\partial u}{\partial t}\right|_{t=0} = 0, \ p\Big|_{t=0} = 0, \ \left.\frac{\partial p}{\partial t}\right|_{t=0} = 0 \quad (8)$$

Умови випромінювання Зоммерфельда (на зовнішніх межах): забезпечують поглинання хвиль на межах обчислювальної області без їхнього хибного відбиття:

$$\lim_{r\to\infty} r\left(\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{c_a}\frac{\partial p}{\partial t}\right) = 0 \quad (9)$$

Для розв'язання системи зв'язаних сейсмоакустичних рівнянь у часовій області найефективнішим вибором є комбінація FDTD із згортковими поглинаючими шарами (CPML) для рівнинної місцевості або метод спектральних елементів (SEM) за наявності складної топографії (таблиця 1).

Таблиця 1

Порівняння чисельних методів для розв'язання рівнянь

Метод	Точність на межі "земля–повітря"	Обчислювальна складність	Обробка рельєфу	Оптимальний сценарій
FDTD + CPML	Висока (на плоскій сітці)	Низька O(N), ідеальний паралелізм	Складна (виникає ефект "сходинок")	Оперативний моніторинг, великі об'єми даних, рівнинна місцевість
SEM (Спектральні елементи)	Дуже висока (криволінійні сітки)	Середня/Висока (матриця мас діагональна)	Відмінна (адаптивне заповнення)	Високоточні розрахунки в гірській чи міській місцевості
FEM (Скінченні елементи)	Висока	Висока (потребує звернення матриць)	Відмінна	Стаціонарні задачі або моделювання складного геологічного середовища

Джерело: складено авторами.

Аналіз та обґрунтування вибору.

1. FDTD з поглинаючими шарами CPML (основний вибір для оперативності)

Рознесена сітка (Staggered Grid): схема Вірьє (Virieux) дозволяє розв'язувати рівняння першого порядку для швидкостей зміщення та напружень/тиску з високим порядком точності (наприклад, $O(\Delta t^2, \Delta x^4)$.

Граничні умови на межі z=0: зв'язаність середовищ враховується через явну дискретизацію неперервності нормальних напружень і прискорень безпосередньо у вузлах сітки.

Роль CPML (Convolutional PML): звичайний PML погано гасить низькочастотні поверхневі хвилі (хвилі Релея) та ковзні акустичні хвилі. CPML вирішує цю

проблему за допомогою згорткового формулювання, гасячи хвилі на штучних межах розрахункової області без відбиттів.

Паралелізація: проста структура сітки FDTD дозволяє легко масштабувати обчислення на GPU (через CUDA/OpenCL), що забезпечує обробку даних у режимі реального часу.

2. SEM як альтернатива для складного рельєфу

Якщо вибух відбувається у місцевості з перепадами висот, FDTD створює апаратурні артефакти (хибне дифракційне розсіювання на "сходинках" сітки).

Метод спектральних елементів (SEM) поєднує гнучкість FEM у побудові неструктурованих сіток із високою швидкістю FDTD за рахунок використання поліномів Лаґерра/Ґаусса–Лобото–Лежандра, що робить матрицю мас строго діагональною.

Для побудови розвідувальної системи реального часу рекомендовано використати 3D-FDTD (4-го порядку за простором) + CPML, реалізований на GPU. Для калібрування системи в умовах складного рельєфу слід застосовувати SEM.

Для використання чисельних методів сформуємо математичну модель вибухового поля.

В задачах аналізу параметрів сейсмосигналів вибухового походження у заданій точці спостереження виникає потреба в розрахунку характеристик однорідної групи сигналів, що описують відповідну категорію вибухового впливу [15]. Визначення цих параметрів здійснюється в умовах присутності адитивного шуму $n(t)$, а також за умов накладання сукупності вибухових сигналів, що належать до інших категорій. Для опису структури вибухового поля $y(t,\zeta)$ в місці прийому ζ пропонується застосовувати таку математичну модель процесу:

$$y(t,\zeta)=\sum_{k=0}^{N}\sum_{i=1}^{q_k}\theta_{ki}(\zeta)U_k(t,\tau_{ki}(\zeta))+n(t,\zeta) \quad (10)$$

де $U_k(t,\tau_{ki}(\zeta))$ – одиночний сигнал k-го потоку, який є фізично здійсненною нормованою функцією (11), $n(t)$ – адитивна перешкода, N – число потоків, що формують (10).

Фізично здійсненна нормована функція задовольняє умовам причинності та стабільності:

$$U_k(t,\tau_{ki}(\zeta))=\begin{cases}U_k(t,\tau_{ki}(\zeta)), t\ge\tau_{ki}(\zeta)\\ 0, t<\tau_{ki}(\zeta)\end{cases} \quad (11)$$

$$\int_{\tau_{ki}}^{\infty}U_k^2(t,\tau_{ki}(\zeta))dt=1$$

Надалі зупинимося на фіксації поля в окремо взятій точці ζ, тому під час подальших обчислень координата приймача не береться до уваги.

Під потоком однотипних сигналів розуміють множину імпульсів із тотожною формою, що надходять у довільні моменти часу τ_{ki}. Згідно з виразом (11), конфігурація сигналу визначається моментом його виникнення. Припускається, що вибухові імпульси зазнають амплітудних флуктуацій, де коефіцієнти θ_{ki} є взаємно незалежними випадковими величинами з функцією розподілу $H_k(x)$, щільністю $h_k(x)$ та відповідною їм характеристичною функцією $\psi_k(\varpi)$. Будемо вважати відомими одновимірну щільність та відповідну характеристичну функцію $\beta(t,\varpi)$ адитивної завади $n(t)$. Під час оцінювання параметрів елементів конкретного потоку (наприклад, нульового) роль випадкової завади в моделі (10) виконуватиме функція:

$$W(t)=\sum_{k=1}^{N}W_k(t)=\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{q_k}\theta_{ki}U_k(t,\tau_{ki})+n(t) \quad (12)$$

Далі будується характеристична функція розподілу значень процесу (12) у довільній точці за умови, що хвильові потоки кожного типу є пуассонівськими з відповідними параметрами інтенсивності λ_k. Це означає, що результуюча модель формується як суперпозиція N окремих незалежних класів сигналів, кожен з яких являє собою послідовність імпульсів, які надходять у випадкові моменти часу τ_{ki} та утворюють потік з відповідною інтенсивністю. Якщо протягом проміжку часу $(0,t)$ зафіксовано подій одного типу q_k, то випадкові моменти $\tau_{k1},\dots,\tau_{kq_k}$ їх виникнення розподіляються подібна до порядкових статистик, отриманих з рівномірного розподілу на відрізку $(0,t)$.

Унаслідок взаємної незалежності потоків, розподіл величини процесу $W(t)$ у точці t визначається через розподіли кожної з його складових компонент $W_k(t)$ та фонової завади $n(t)$. У зв'язку з цим достатньо обчислити розподіл складової $W_k(t)$, $k=I,\dots,N$.

Нехай $\xi_{k1},\dots,\xi_{kq_k}$ є послідовністю випадкових величин із рівномірним розподілом $\tau_{k1}=\min\{\xi_{k1},\dots,\xi_{kq_k}\}$ на інтервалі $(0,t)$, розташованих у порядку зростання: $\tau_{ë2}$ – наступний за величиною елемент даної множини і так далі. За таких умов вихідний процес подається у формі:

$$W_k(t)=\sum_{i=1}^{q_k}\theta_{ki}U_k(t,\tau_{ki})=\sum_{i=1}^{q_k}\theta_{ki}U_k(t,\xi_{ki}) \quad (13)$$

де ξ_{ki} – значення амплітуди сигналу, що вступив у момент τ.

Якщо позначити $\theta_{ki}U_k(t,\xi_{ki})$ через $\alpha_{ki}(t)$, то через прийняті припущення $\alpha_{ki}(t)$, незалежні випадкові величини при фіксованому t. Нехай $f(x,t)$ – щільність розподілу $\alpha_{ki}(t)$, та $\varphi_t(\varpi)$ відповідна характеристична функція:

$$P\{\alpha_{ki}(t)\le x\}=\frac{1}{t}\int_0^t P\{\alpha_{ki}(t)\le x\,|\,\zeta_{ki}=\tau\}d\tau=\frac{1}{t}\int_0^t P\{\zeta_{ki}xU_k^{-1}(t,\zeta_{ki})=\tau\}d\tau=\frac{1}{t}H_k(xU_k^{-1}(t,\tau))d\tau \quad (14)$$

З іншого боку, за визначенням щільності:

$$P\{\alpha(t) \le x\} = f(z,t)dz \tag{15}$$

Тоді з результатів (14) та (15) випливає:

$$f(z,t)dz = \frac{1}{t} H(xU(t,\tau))d\tau \tag{16}$$

$$f_i(x,i) = \frac{1}{t}\int_0^t \frac{\partial}{\partial x} H_k(xU_k^{-1}(t,\tau))d\tau = \frac{1}{t}\int_0^t h_k(xU_k^{-1}(t,\tau))\,|U_k^{-1}(t,\tau)|\,d\tau$$

Характеристична функція для моделі (13) буде:

$$\frac{1}{t}\int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} h_k(xU_k^{-1}(t,\tau))\left|U_k^{-1}(t,\tau)\right| e^{-i\omega x} dx d\tau \tag{17}$$

де $\gamma_k(t,\varpi)$ – характеристична функція розподілу $W(t)$, тоді:

$$\gamma_k(t,\omega) = \sum_{n=0}^{\infty}\left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega x}\frac{\partial}{\partial x} P\{W_k(t) \le x \mid q_k = n\}\right) * e^{-\lambda_k t}\frac{(\lambda_k t)^n}{n!} =$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\lambda_k t}\frac{(\lambda_k t)^n}{n!}\left[\frac{1}{t}\int_0^t \psi_k(\omega U_k(t,\tau))d\tau\right]^n = \exp\left\{-\lambda_k \int_0^t [1 \pm \psi_k(\omega U_k(t,\tau))d\tau]\right\} \tag{18}$$

Оскільки $W_k(t)$, $k = I,\dots,N$ незалежні, то характеристична функція $\gamma(t,\varpi)$ розподілу $W(t)$ визначається як добуток характеристичних функцій $\gamma_k(t,\varpi)$:

$$\gamma(t,\omega) = \prod_{k=1}^{N}\gamma_k(t,\omega) = \exp\{-\sum_{k=1}^{N}\lambda_k\int_0^t\left[1 \pm \Psi(\omega U_k(t,\tau))\right]d\tau\} \tag{19}$$

З виразу (16) видно, що у разі стаціонарної перешкоди $n(t)$ шум $W(t)$ нестаціонарний, оскільки характеристична функція залежить від моменту t. Вираз (16) дозволяє обчислити моменти значень процесу у кожний момент t. Наведемо значення першого моменту $\mu_1[W(t)]$ та другого моменту $\mu_2[W^2(t)]$.

$$\mu_1(t) = \frac{\partial\gamma(\omega,t)}{\partial\omega}(-1)|_{\omega=0} = \mu_1[n(t)] + \sum_k \lambda_k\mu_1(\theta_k)\int_0^t U_k(t,\tau)d\tau. \tag{20}$$

$$\mu_2(t) = -\frac{\partial^2\gamma(\omega,t)}{\partial\omega^2}|_{\omega=0} = 2\mu_1[n(t)]\sum_k \lambda_k\mu_1(\theta_k)\int_0^t U_k(t,\tau)d\tau +$$

$$+\sum_k\sum_s \lambda_k\lambda_s\mu_1(\theta_k)\mu_1(\theta_s)\int_0^t U_k(t,\tau)d\tau\int_0^t U_s(t,\tau)d\tau +$$

$$+\mu_2(n(t)) + \sum_k \lambda_k\mu_2(\theta_k)\int_0^t U_k^2(t,\tau)d(\tau). \tag{21}$$

Аналіз виразів для першого та другого моментів свідчить про відсутність стаціонарності (навіть у широкому розумінні) для шумового фону у вибуховому полі. Це твердження залишається справедливим навіть за умови розгляду стаціонарного сценарію для сигналів, а саме у випадку, коли $U_k(t,\tau) = U_k(t-\tau)$. У такому разі тривалість інтервалу інтегрування перебуває у прямій залежності від часового проміжку. Якщо тривалість сигналу пропорційна цьому проміжку, виникає інтегральний ефект, який полягає в накопиченні сигналів від початку процесу $W(t)$.

Припущення щодо стаціонарності процесу $W(t)$ у широкому сенсі є коректним лише для короткотривалих сигналів, час існування яких значно менший за загальний інтервал спостереження. У цьому контексті доцільно зіставити здобутий результат із класичними формулами Кемпбелла для моделі дробового шуму, що були виведені для коротких, фізично здійснюваних сигналів, які формують пуассонівський потік. Термін "короткий" у даному разі вказує на те, що тривалість сигналу є меншою порівняно з інтенсивністю пуассонівського потоку. Своєю чергою, фізична здійсненність сигналів у зазначених формулах ґрунтується на першому пункті відповідного визначення (11), а саме на дотриманні умови причинності.

$$\mu_1(x(t)) = \lambda\mu_1(\theta)\int_{-\infty}^{\infty} U(t)dt \tag{22}$$

$$\mu_2(x(t)) = \mu_1^2(x(t)) + \lambda\mu_2(\theta)\int_{-\infty}^{\infty} U^2(t)dt. \tag{23}$$

Формули Кемпбелла показують, що для дробового ефекту ні перший, ні другий моменти не залежить від часу і це означає стаціонарність процесу у широкому сенсі.

Результати (20) і (21) отримано рандомізацією флуктуючих коефіцієнтів θ_{ki} та моментів вступу сигналів τ_{ki} у моделі (10).

Використовуємо цей прийом для обчислення моментів процесу (12) для потоку Бернуллі. Флуктуації вважатимемо, як і раніше, незалежними випадковими величинами з першим моментом $\mu_1(\theta)$ і другим $\mu_2(\theta)$

В цьому випадку перший момент $\mu_1(W(t))$ процесу $W(t)$ буде:

$$E\left(W(t)\right)=E\left(\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{K_k}\theta_{ki}\cdot U_k\left(t,\tau_{ki}\right)+n(t)\right)=\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{K_k}\mu_1\left(\theta_{ki}\right)\cdot\int_{(K_k)}^{t}U_k\left(t,\tau_{ki}\right)\cdot\pi_{K_k}\left(\vec{\tau}_{K_k},\Omega\right)\cdot d\vec{\tau}_{K_k}+$$

$$+\mu_1\left(n(t)\right)=\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{K_k}\mu_1\left(\theta_{ki}\right)\cdot\int_{(K_k)}^{t}U_k\left(t,\tau_{ki}\right)\cdot\prod_{i=1}^{K_k}e_{ki}\left(\tau_{ki}\right)\cdot d\vec{\tau}_{K_k}+\mu_1\left(n(t)\right)=$$

(24)

$$=\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{K_k}\mu_1\left(\theta_{ki}\right)\cdot\int_{(K-1)}^{t}\prod_{ij\neq i,i}^{K_k}e_{kj}\left(\tau_{kj}\right)\cdot d\vec{\tau}_{K_k-1}\cdot\int_{0}^{t}U_k\left(t,\tau_{ki}\right)\cdot e_{ki}\left(\tau_{ki}\right)\cdot d\tau_{ki}\cdot+\mu_1\left(n(t)\right)=$$

$$=\mu_1\left(n(t)\right)+\sum_{k=1}^{N}K_k!\cdot P_k\mu_1(\theta)\sum_{s=1}^{K_k}\frac{\overline{u}_{ks}(t)}{p_{ks}}$$

де p_k – ймовірність появи всіх сигналів k-ого потоку;

p_{ks} – ймовірність появи s-го сигналу в k-му потоці;

$\overline{U}_{ks}(t)$ – усереднений за моментами вступу s-ий сигнал k-го потоку;

K_k – кількість сигналів в k-му потоці.

Математичні моделі (22) і (23) це два перші моменти Пуассонівського потоку сигналів, а модель (24) дана для потоку Бернуллі.

Оцінка параметрів цих сигналів проводиться на тлі деякої адитивної перешкоди $n(t)$ та суперпозиції потоків вибухових сигналів інших класів, які у разі не оцінюються і не ідентифікуються і можуть розглядатися як перешкода. В цьому випадку випадковою функцією перешкоди буде суперпозиція потоків сигналів вибухових полів, що не класифікуються і фоновий шум.

Таким чином запропонований у статті математичний апарат (моделі 22, 23, 24) та чисельні методи (таблиця 1) вирішують дві принципово різні, але взаємодоповнюючі задачі: обчислювальну фізику поширення хвиль та статистичну обробку завадової обстановки.

Поєднання цих двох блоків дозволяє перейти від абстрактного чисельного моделювання хвильових полів до створення синтетичного генератора реалістичних сейсмоакустичних даних, необхідного для випробування алгоритмів дистанційної розвідки в умовах РЕБ та високого рівня інтенсивних завад. Враховуючи складність середовища, в якому необхідно приймати рішення доцільно використовувати автоматизовані сейсмоакустичні комплекси, які будуються на основі комбінованого способу виявлення об'єктів та корисних сигналів

Поєднання моментних моделей потоків сигналів з деталізованими розрахунками хвильового поля (FDTD/SEM) (рис. 1) відбувається за наступним алгоритмом:

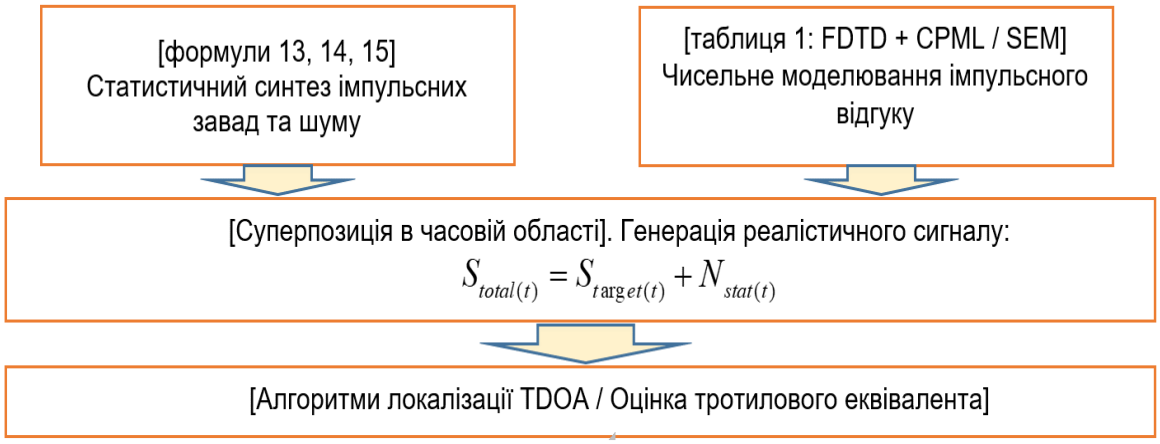

Рисунок 1 – Схема інтеграції математичних моделей у чисельний стек

Практичні сценарії використання поєднання методів

I. Генерація реалістичних завадових умов для тестування систем (Monte-Carlo Simulation)

Проблема: Чисельні методи (FDTD або SEM) обчислюють хвильове поле лише для одного фіксованого джерела вибуху в чистому середовищі. У реальності на сенсор діє суміш фонового шуму та серійних вибухів.

Рішення:

1. За допомогою FDTD (або SEM) розраховують одиничні імпульсні відгуки середовища h(t) від цілі та від джерел завад. За допомогою моделей (22), (23) для пуассонівського потоку генерують короткі інтенсивні завади (наприклад, поодинокі мінометні постріли чи дрібні вибухи), розраховуючи їхні моменти (середнє та дисперсію) для калібрування потужності шуму.

2. За допомогою моделі (24) для потоку Бернуллі синтезують завади від серійних касетних вибухів або регулярно повторюваних імпульсів із ймовірностями виникнення p_{ks}.

3. Модель (20) – (24) накладається на вихідні дані FDTD/SEM, утворюючи складну нестаціонарну завадову обстановку для перевірки стійкості алгоритмів локалізації TDOA.

II. Адаптивна порогова фільтрація та детектування сигналів (CFAR)

Проблема: Через доведену нестаціонарність шуму вибухового поля стаціонарні фільтри перестають працювати – виникають хибні спрацьовування.

Рішення:

У чисельному модулі (FDTD+GPU) паралельно з прийомом реальних даних розраховується теоретична матриця поширення сигналу.

Формули моментів (22), (23) та (24) застосовуються для розрахунку поточного математичного сподівання $M[N(t)]$ та дисперсії $D[N(t)]$ сукупного завадового поля на кожному часовому кроці.

Визначені моменти задають адаптивний поріг виявлення. Якщо амплітуда перевищує порогове значення, система фіксує корисний сигнал вибуху, відсікаючи масовані завади.

3. Оптимізація та калібрування чисельних методів за рельєфом (таблиця 2).

Таблиця 2

Оптимізація та калібрування чисельних методів за рельєфом

Метод	Математична модель (22, 23, 24)	Практичний результат поєднання
FDTD + CPML (для рівнини)	Пуассонівський потік (22, 23)	Швидке моделювання моніторингу відкритих територій при щільному часовому потоці коротких вибухових імпульсів. Використовується для контрбатарейної боротьби в степовій зоні.
SEM (для складного рельєфу)	Потік Бернуллі (24)	Високоточний розрахунок поширення хвиль у гірській/міській місцевості, де завади мають дискретний, ймовірнісний характер через відбиття від перешкод та складну структуру забудови.

Джерело: складено авторами.

Прикладний алгоритм роботи цифрового двійника системи розвідки

1. Крок 1 (FDTD/SEM): розрахувати часовий відгук $g(t)$ зв'язаної системи "земля–повітря" для цільового вибуху заданої потужності.
2. Крок 2 (моделі 22-24): сформувати статистичний вектор завад $N(t)$, де моменти першого та другого порядків відповідають параметрам реального поля завад за формулами (20-24).
3. Крок 3: Отримати підсумкову модель сигнальної обстановки $Y(t)] = g(t) + N(t)$.
4. Крок 4: Подати $Y(t)$ на вхід алгоритму локалізації. Оцінити похибку визначення координат (TDOA) та потужності (тротилового еквіваленту) залежно від інтенсивності завадового потоку.

Дискусія і висновки

Розроблена математична модель зробила вагомий внесок у теорію та практику дистанційного сейсмоакустичного моніторингу вибухових подій, вирішивши низку критичних проблем пасивної локалізації та аналізу.

Основні науково-практичні результати та переваги моделі:

Врахування ефектів зв'язаності середовищ ("земля–повітря"): на відміну від класичних підходів, де сейсмічний та акустичний канали розглядаються ізольовано, модель описує взаємопроникнення хвиль (повітряно-зв'язані сейсмічні хвилі та вторинне випромінювання звуку в атмосферу). Це усуває викривлення хвильових фронтів і суттєво підвищує точність визначення часу прибуття сигналів (TDOA).

Висока точність оцінки енергії та потужності: модель дозволяє адекватно розрахувати реальний розподіл енергії вибуху між атмосферою та ґрунтом. Це забезпечує точне визначення тротилового еквівалента вибухового пристрою та глибини його закладання/детонації.

Доведена нестаціонарність вибухового шумового фону: математично доведено (через вирази першого та другого моментів), що шумове поле вибухового походження є нестаціонарним процесом за наявності тривалих сигналів через інтегральний ефект накопичення. Це пояснює межі застосовності класичних формул Кемпбелла (які працюють лише для коротких пуассонівських імпульсів) та дозволяє коректно будувати алгоритми фільтрації.

Універсальність опису реальних потоків завад: завдяки суперпозиції пуассонівських та бернуллівських потоків сигналів з флуктуючими амплітудами, модель ефективно описує завадову обстановку – як фонові шуми, так і завади від сторонніх серійних вибухів або інших джерел, що не підлягають ідентифікації.

Адаптивність до складного рельєфу та роботи в реальному часі: обґрунтовано оптимальний обчислювальний стек для високоточного цифрового моделювання: використання методу FDTD+CPML (з паралелізацією на GPU) для оперативного моніторингу на рівнині та методу спектральних елементів (SEM) для гірської чи міської місцевості.

Практична цінність для розвідки: створено математичний фундамент для розробки прихованих, цілодобових та завадостійких систем контрбатарейної боротьби та оцінки уражень, які здатні видавати точні координати та характеристики цілей за секунди в умовах відсутності оптичної видимості та при інтенсивній дії засобів РЕБ.

Напрямки подальших досліджень.

На основі запропонованої математичної моделі та виявлених обмежень сформовано ключові напрямки подальших досліджень:

Врахування нелінійних та анізотропних ефектів середовища: моделювання поширення ударних і сейсмоакустичних хвиль у реальних, багатошарових, задеформованих та вологісно-залежних ґрунтах із нелінійними динамічними характеристиками.

Адаптація алгоритмів фільтрації до нестаціонарних завад: розробка нових математичних методів цифрової обробки сигналів (наприклад, на основі адаптивного вейвлет-перетворення або калманівської фільтрації), здатних ефективно виділяти корисний сигнал на тлі доведеного нестаціонарного шумового фону.

Інтеграція алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання: створення нейромережевих моделей (CNN, RNN, Transformers) для класифікації типів боєприпасів та автоматизованої оцінки тротилового еквівалента на основі комбінованих сейсмоакустичних спектрограм у режимі реального часу.

Синтез оптимальних просторових конфігурацій сенсорних мереж: розробка математичного апарату для оптимізації розстановки сейсмічних та акустичних датчиків на місцевості з метою мінімізації похибок локалізації TDOA в умовах складної топографії та міської забудови.

Експериментальна верифікація та калібрування моделей: проведення натурних випробувань із реєстрацією реальних вибухових подій для уточненого визначення параметрів зв'язаності середовищ "земля–повітря" та порівняльного аналізу швидкодії чисельних методів FDTD та SEM.

Внесок авторів: Толюпа Сергій – концептуалізація, формальний аналіз, написання (оригінальна чернетка); Ярмолай Ігор – методологія, написання (перегляд і редагування); Пампуха Ігор – концептуалізація, формальний аналіз; Грибок Олександр – методологія, написання (перегляд і редагування).

Джерела фінансування. Це дослідження не отримало жодного гранту від фінансової установи в державному, комерційному або некомерційному секторах.

Список використаних джерел

Мостовий, В., Мостовий, С., & Осадчук, А. (1996). Математична модель прогнозування сейсмічних подій. *Матеріали другого семінару «Застосування методів штучного інтелекту в сейсмології та інженерній сейсмології»* (Cahiers Européens de Géodynamique et de Séismologie, T. 12, с. 163–164). Conseil de l'Europe.

Ярмолай, І. (2025). Методика моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного аналізу. *Телекомунікаційні та інформаційні технології,* (4), 155–160.

Ярмолай, І., & Пампуха, І. (2024). Математична модель для автоматизованих систем сейсмоакустичного моніторингу класифікації міномётного вибуху для ведення дистанційної розвідки. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, *2*(26), 338–347.

Albert, D. G., Taherzadeh, S., Attenborough, K., Boulanger, P., & Decato, S. N. (2013). Ground vibrations produced by surface and near-surface explosions. *Applied Acoustics*, *74*(11), 1279–1296. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.03.006

Dando, B. D. E., Kværna, T., Goertz-Allmann, B. P., Köhler, A., Gibbons, S. J., & Roth, M. (2023). Identifying attacks in the Russia–Ukraine conflict using seismic array data. *Nature*, *621*(7980), 767–772. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06416-7

Grigoli, F., Cesca, S., Amoroso, O., Emolo, A., Zollo, A., & Dahm, T. (2014). Automated seismic event location by waveform coherence analysis. *Geophysical Journal International*, *196*(3), 1742–1753. https://doi.org/10.1093/gji/ggt477

Mikhailenko, A., Mikhailov, A., & Reshetova, G. (2015). Modeling the wind influence on acoustic-gravity propagation waves in a heterogeneous Earth-atmosphere model. In I. Dimov, I. Faragó, & L. Vulkov (Eds.), *Numerical Analysis and Its Applications* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9045, pp. 290–298). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19857-6_33

Mostovoi, V. M., Starostenko, V. I., & Kutas, R. I. (2001). Model and experimental studies of the identification of oil-gas deposits using dynamic parameters of active seismic monitoring. *Geophysical Journal*, *20*(6), 895–909.

Negraru, P. T. (2010). Application of seismo-acoustic signals to the study of local site effects. *Acta Geophysica*, *58*(6), 1021–1039. https://doi.org/10.2478/s11600-010-0025-6

Robinson, E. A. (1997). *Statistical communication and detection with special reference to digital data processing of radar and seismic signals*. Charles Griffin & Co. Ltd.

Stein, S., & Wysession, M. (2002). *An introduction to seismology, earthquakes, and the structure of the Earth*. Wiley-Blackwell.

Young, C. J., Chael, E. P., & Withers, M. M. (2002). Analysis of local seismo-acoustic events in the Korean Peninsula. *Geophysical Research Letters*, *29*(16), 29-1–29-4. https://doi.org/10.1029/2001GL014060

References:

Albert, D. G., Taherzadeh, S., Attenborough, K., Boulanger, P., & Decato, S. N. (2013). Ground vibrations produced by surface and near-surface explosions. *Applied Acoustics*, *74*(11), 1279–1296. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.03.006

Dando, B. D. E., Kværna, T., Goertz-Allmann, B. P., Köhler, A., Gibbons, S. J., & Roth, M. (2023). Identifying attacks in the Russia–Ukraine conflict using seismic array data. *Nature*, *621*(7980), 767–772. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06416-7

Grigoli, F., Cesca, S., Amoroso, O., Emolo, A., Zollo, A., & Dahm, T. (2014). Automated seismic event location by waveform coherence analysis. *Geophysical Journal International*, *196*(3), 1742–1753. https://doi.org/10.1093/gji/ggt477

Mikhailenko, B. G., Mikhailov, A. A., & Reshetova, G. V. (2015). Modeling the wind influence on acoustic-gravity propagation waves in a heterogeneous Earth-atmosphere model. In I. Dimov, I. Faragó, & L. Vulkov (Eds.), *Numerical Analysis and Its Applications* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9045, pp. 290–298). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19857-6_33

Mostovoi, V. M., Starostenko, V. I., & Kutas, R. I. (2001). Model and experimental studies of the identification of oil-gas deposits using dynamic parameters of active seismic monitoring. *Geophysical Journal*, *20*(6), 895–909.

Mostovyi, V., Mostovyi, S., & Osadchuk, A. (1996). Matematychna model prohnozuvannia seismichnykh podii [Mathematical model for predicting seismic events]. *Materialy druhoho seminaru "Zastosuvannia metodiv shtuchnoho intelektu v seismolohii ta inzhenernii seismolohii"* (Cahiers Européens de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 12, pp. 163–164). Conseil de l'Europe. [in Ukrainian]

Negraru, P. T. (2010). Application of seismo-acoustic signals to the study of local site effects. *Acta Geophysica*, *58*(6), 1021–1039. https://doi.org/10.2478/s11600-010-0025-6

Robinson, E. A. (1997). *Statistical communication and detection with special reference to digital data processing of radar and seismic signals*. Charles Griffin & Co. Ltd.

Stein, S., & Wysession, M. (2002). *An introduction to seismology, earthquakes, and the structure of the Earth*. Wiley-Blackwell.

Yarmolai, I. (2025). Metodyka monitorynhu vybukhovykh poliv dlia vedennia dystantsiinoi rozvidky na osnovi seismoakustychnoho analizu [Methodology of monitoring explosive fields for remote sensing based on seismo-acoustic analysis]. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii,* (4), 155–160. [in Ukrainian]

Yarmolai, I., & Pampukha, I. (2024). Matematychna model dlia avtomatyzovanykh system seismoakustychnoho monitorynhu klasyfikatsii minometnoho vybukhu dlia vedennia dystantsiinoi rozvidky [Mathematical model for automated seismo-acoustic monitoring systems of mortar explosion classification for remote intelligence]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, *2*(26), 338–347. [in Ukrainian]

Young, C. J., Chael, E. P., & Withers, M. M. (2002). Analysis of local seismo-acoustic events in the Korean Peninsula. *Geophysical Research Letters*, *29*(16), 29-1–29-4. https://doi.org/10.1029/2001GL014060

Отримано редакцією журналу / Received: 23.04.26
Прорецензовано / Revised: 15.05.26
Схвалено до друку / Accepted: 18.06.26
Опубліковано / Published: 30.06.26

Serhii TOLIUPA, DSc (Engin.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-1919-9174
e-mail: serhii.toliupa@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Igor YARMOLAY, PhD (Information Systems and Technologies)
ORCID ID: 0009-0001-7013-5790
e-mail: mazay0606@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Igor PAMPUKHA, PhD (Engin.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-4807-3984
e-mail: ihor.pampukha@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Oleksandr HRYBOK, PhD (Pedagogy), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0009-0005-8124-0560
e-mail: oleksandr.hrybok@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

MATHEMATICAL MODELING OF SEISMOACOUSTIC PROCESSES IN REMOTE SENSING SYSTEMS FOR EXPLOSIVE FIELDS

Background. ***In the context of modern armed conflicts and crisis situations, the remote detection of explosive events is an extremely important component of situational awareness. The detonation of munitions or explosive materials is accompanied by a rapid release of energy, which generates interrelated wave processes in two different media: elastic seismic waves in the ground and acoustic waves in the atmosphere. Comprehensive recording of these signals makes it possible to detect, identify, and locate the sources of explosions beyond the limits of direct optical or radar visibility. Mathematical models, combined with numerical methods, will contribute to the development of the theory and practice of remote seismoacoustic monitoring of explosive events by addressing a number of critical problems in the field of passive localization and analysis.***

The aim of the study is to develop a comprehensive mathematical model of the generation and propagation of coupled seismoacoustic fields in a two-layer "ground-air" system and a corresponding computational framework to improve the accuracy of passive localization (TDOA), determine the coordinates, detonation depth, and TNT equivalent of explosion sources in real time under conditions of no line of sight, complex topography, and intense interference.

Methods. ***The study is based on the integration of numerical methods of computational mathematics and the mathematical apparatus of probability theory and random processes (wave flow scattering model, Poisson and Bernoulli impulse flows, moment analysis).***

Results. ***A two-layer mathematical model of the "ground–air" system has been developed, taking into account kinematic and dynamic boundary conditions, which ensures an accurate calculation of passive source localization. It has been analytically proven that the noise background in the blast field is non-stationary in the presence of long-duration signals due to the integral accumulation effect, and the limits of applicability of Campbell's formulas have been determined. An optimal numerical stack for real-time processing has been justified, and an algorithm has been developed for integrating moment models of interference with numerical calculations of wave fields.***

Conclusions. ***A comprehensive mathematical model of the generation and propagation of coupled seismoacoustic fields of explosive origin has been developed for remote sensing under conditions of complex interference, lack of optical visibility, and the influence of electronic warfare systems. Unlike classical approaches, which consider seismic and acoustic channels in isolation, a two-layer "ground-air" system is proposed that accounts for the effects of medium interaction (air-coupled seismic waves and secondary acoustic radiation).***

Keywords*: remote sensing, seismoacoustic waves, medium connectivity, non-stationary noise, Campbell's formulas, mathematical model, seismoacoustic monitoring.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

Ігор Пампуха є рецензентом видання, тому не брав участі у рецензуванні цієї статті.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

Igor Pampukha is a reviewer for this journal, therefore did not participate in the peer review of this article.