

Можливість використання даних інфразвукового моніторингу під час ідентифікації природи сейсмічних подій

© *О. І. Лящук, Ю. А. Андрущенко, Ю. О. Гордієнко, Є. В. Карягін, І. В. Корнієнко, 2015*

Головний центр спеціального контролю ГКА України, пгт. Городок, Україна
Надійшла 26 лютого 2015 р.

Представлено членом редколегії О. В. Кенгзерою

Рассматривается возможность использования инфразвуковых измерений, проводимых в Украине, для верификации зарегистрированных сейсмических событий и применения инфразвуковой информации как одного из критериев их идентификации. Регистрация сейсмических и инфразвуковых сигналов проводилась с помощью геофизической сети Главного центра специального контроля. Для регистрации инфразвука использовались малоапертурные акустические системы группирования, что позволяет проводить направленный мониторинг явлений. Получены сейсмические данные о параметрах 909 промышленных взрывов, выполненных в 2014 г. на территории Украины. Зарегистрированы 124 инфразвуковых отклика на указанные события. Определены пределы чувствительности и дальности применения инфразвукового метода по данному типу явлений. Предложенная технология регистрации сигналов от сейсмических событий сейсмоакустическим комплексом дает возможность регистрировать наземные промышленные взрывы на расстоянии до 200 км.

Ключевые слова: инфразвук, промышленный взрыв, идентификация, малоапертурная акустическая группа.

Вступ. Правобережна Україна, особливо її північно-західна частина, густо охоплена мережею гірничодобувних підприємств, що у процесі своєї діяльності активно генерують сейсмічні сигнали. Це створює проблему під час ідентифікації сигналів від землетрусів і промислових вибухів, яка є однією із ключових проблем сейсмічних спостережень. Можливість відрізнити сейсмічний запис хімічного вибуху від запису землетрусу ґрунтується на таких характеристиках цих джерел, як механізм, розміри плестосейстової зони, час дії та глибина. Існує низка критеріїв, за якими можна ідентифікувати джерело сейсмічного сигналу [Кедров, 2005; Андрущенко, Гордієнко, 2009а]. У Головному центрі спеціального контролю (ГЦСК) розроблено додаткові критерії, що показали свою ефективність [Андрущенко, Гордієнко, 2009б]. Проте й вони не мають абсолютного характеру, і для багатьох сейсмічних подій поки що неможливо достовірно встановити, чим була подія — землетрусом чи вибухом, ґрунтуючись лише на результатах аналізу сейсмічних даних.

Однак мережа ГЦСК крім сейсмічного методу спостережень оснащена іншими геофі-

зичними методами, зокрема інфразвуковим. Безперервний інфразвуковий моніторинг проводять технічними засобами, розміщеними на територіях Житомирської, Хмельницької, Одеської областей. Інфразвукові засоби встановлені також на українській антарктичній станції «Академік Вернадський». Для інфразвуку характерне мале поглинання в різних середовищах. Наслідком цього є можливість реєстрації атмосферних сигналів від подій, що відбулися на великому віддаленні від пункту спостереження. Спектр природних і техногенних явищ, що генерують інфразвук, достатньо широкий. Основними джерелами, які генерують інфразвук, є полярні сніва, запуск ракет, діяльність вулканів, падіння космічних тіл, шторми, урагани, землетруси, лавини, пожежі, ядерні та хімічні вибухи, та ін. Можливості ідентифікації промислових вибухів за допомогою інфразвукових даних активно досліджують у світі [Hagerty et al., 2002; Stump et al., 2002; Young et al., 2002; Виноградов, 2004; Gibbons et al., 2007; McKenna et al., 2007; Aggrowsmith et al., 2008; Асминг и др., 2009; Дубровин, 2011]. В Україні до недавнього часу таких досліджень не проводили, але в резуль-

таті модернізації технічних засобів у ГЦСК це стало можливим. Отже, питання визначення можливості застосування даних інфразвукового моніторингу ГЦСК для вирішення завдань ідентифікації природи сейсмічних подій є актуальним.

Методика. Інфразвукові сигнали у ГЦСК реєструють за допомогою систем малоапертурних акустичних груп (МАОГ). Кожна така інфразвукова група є комплексом з трьох і більше просторово рознесених незалежних мікробарографів (акустичних станцій К-304А), системи збору та передачі даних, їх обробки і збереження [Лящук и др., 2006; Гордиенко и др., 2006]. Діапазон робочих частот МАОГ нижчий за поріг чутливості людського слуху і становить 0,003—12 Гц. Режими чутливості станцій — 1, 10, 100 Па. Величина просторового рознесення точок приймання акустичного тиску залежить від характеру метеорологічних умов місцевості, де розташована група, її цільового призначення (орієнтування на певні види сигналів) і знаходиться в межах від десятків метрів до одиниць кілометрів.

На пунктах спостереження ГЦСК акустичні станції рознесені між собою на відстані 100—200 м одна від одної [Сащук и др., 2010]. Розмір апертури та її форма обмежені територією, що є у розпорядженні установи. Зазвичай, за наявності трьох елементів їх намагаються розмістити на вершинах уявного рівностороннього трикутника, четвертий елемент розміщують у центрі трикутника або змінюють конфігурацію на квадрат. Слід зазначити, що апертура групи визначає частоти реєстрації. Чим більша база, тим нижчі частоти, доступні для обробки, і тим більші відстані реєстрації.

На цей час до складу системи інфразвукового моніторингу ГЦСК входять дві малоапертурні акустичні групи.

- МАОГ-1 — триелементний масив мікробарографів, розміщений поблизу с. Ворсівка Малинського р-ну Житомирської обл. Характер місцевості — площина із загальним перепадом висот на всій площі апертури МАОГ-1 до 1,5 м. Два елементи МАОГ-1 знаходяться на межі лісової зони, один — на відкритій місцевості в полі. Конфігурація елементів МАОГ-1 має форму рівностороннього трикутника.
- МАОГ-2 — чотириелементний масив мікробарографів, розміщений поблизу с. Ластівці Кам'янець-Подільського р-ну Хмельницької обл. Характер місцевості горбистий із загальним перепадом висот

на всій площі апертури МАОГ-2 до 5 м. Усі елементи МАОГ-2 знаходяться на відкритій місцевості в полі. Конфігурація елементів має форму рівностороннього трикутника із четвертим елементом у центрі.

До входів кожного з мікробарографів через об'єм усереднення підключено завадозахисний пристрій (ЗЗП) типу «Павук» для покращення відношення сигнал-шум [Гордієнко и др., 2006; Сащук и др., 2010]. ЗЗП відіграє основну роль у процесі зниження завад від приземного вітру та турбулентності. Із виходів мікробарографів електричні сигнали по кабелях передають до аналого-цифрового перетворювача (АЦП) і далі до робочої станції (ПК), де здійснюються накопичення інформації у визначеному форматі, її первинна обробка, синхронізація часу по GPS і передача даних до обчислювального центру ГЦСК. У центрі даних проводять повну обробку інформації, що включає оцінки часових, частотних і просторових характеристик сигналів [Рибачук та ін., 2008]. На рис. 1 показано типову структурну схему МАОГ.

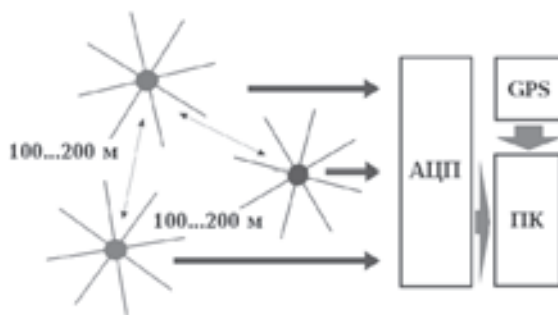


Рис. 1. Типова структурна схема малоапертурної акустичної групи (МАОГ).

Важливою характеристикою групи мікробарографів є відгук групи на сигнал залежно від кута його приходу. Ця реакція залежатиме від конфігурації групи (схеми розміщення датчиків на площині), лінійних розмірів групи і кількості датчиків. Унаслідок несиметричного розташування датчиків результат відгуку буде нерівномірним для різних кутів приходу фронту інфразвукової хвилі. Для плоского фронту хвилі розв'язок можна описати виразом [Наак, Evers, 2003; Машков та ін., 2005]

$$f(r, t) = e^{j(\omega t - kr)} = e^{j\omega(t - pr)}, \quad (1)$$

де ω — частота; p — повільність; k — хвильове число; r — позиційний вектор; t — різниця часу між r -датчиком і опорним датчиком.

Тоді для горизонтально розміщених датчиків групи знайдемо розв'язок вирівнювання диференціальних фаз. У разі вертикального падіння елементарної хвилі на групу отримаємо відсутність різниці часу приходу хвилі, тобто буде одночасний запис на всі елементи групи. Відгук для групи з N елементів такий:

$$R(\omega, p) = \frac{1}{N} \left| \sum_{j=1}^N e^{-j\omega(pr_j)} \right|^2. \quad (2)$$

Відгук групи в діапазоні інфразвукових частот моделюємо у деякому просторі повільностей. Частотний спектр потужності повільності можна визначити підсумовуванням сигнальних складових на певній багатоканальній послідовності даних. Згідно з [Haak, de Wilde, 1996; Le Pichon et al., 2009], запишемо

$$p(\omega, p) = \left| \sum_n^N [A_n(\omega) e^{ja_n(\omega)}] e^{-j\omega pr_n} \right|^2, \quad (3)$$

де N — кількість датчиків, розміщених відповідно до позиційного вектора \mathbf{r}_n ;

$$A_n(\omega) e^{ja_n(\omega)}$$

— результат перетворення Фур'є.

Цей вираз можливо інтерпретувати як відгук групи на ту інфразвукову хвилю, що проходить через групу та когерентну в кожній точці. У цьому випадку всі різниці часів вступу інфразвукової хвилі, які на конкретному датчику перетворені в частотний діапазон за допомогою перетворення Фур'є, підміняють фазовими зміщеннями.

Результат перетворення Фур'є $A_n(\omega) e^{ja_n(\omega)}$ несе таку інформацію:

$e^{ia_n(\omega)} = \Delta \sum_{j=0}^{M-1} e^{i\omega t_j}$ — про фазу M числа відліків за частоти дискретизації Δ ; $A_n(\omega) = \sum_{j=0}^{M-1} A(t_j)$ — про сигнальну амплітуду.

Частотний спектр потужності повільності оцінюємо для усього діапазону повільностей фронту інфразвукової хвилі та для усього частотного діапазону. Характерна (домінуюча) частота і вектор повільності відповідатимуть максимуму енергетичного спектра, що дає змогу ототожнювати джерело. Уявну швидкість визначаємо P -вектором, азимут на джерело — відносно напрямку на північ:

$$|P| = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} = \sqrt{\left(\frac{\cos \varphi}{c}\right)^2 + \left(\frac{\sin \varphi}{c}\right)^2} = \frac{1}{c}. \quad (4)$$

Це співвідношення визначає зв'язок між значенням повільності фронту інфразвукової

хвилі і відповідним їй азимутним напрямком [Le Pichon et al., 2009].

Методика визначення інфразвукових сигналів ґрунтується на тому принципі, що корисний сигнал записуємо певною послідовністю дискретних відліків на кожному із елементів групи, тоді як шум є випадковим і некогерентним для кожного елемента групи.

Окремі мікробарографи реєструють сигнал у різні моменти часу в міру поширення через групу. Припустивши, що сигнал є когерентним, за крос-кореляціями між парами датчиків можна визначити часові затримки між окремими датчиками, що, у свою чергу, залежать від геометрії масиву і характеристик фронту хвилі. Параметри — азимут і швидкість поширення сигналу отримують з аналізу часових затримок. Для детектування та розрахунку параметрів використовують методику [Cansi, 1995], що отримала назву *Progressive Multi Channel Correlation* (PMCC).

Основою алгоритму є міра узгодженості сигналу (r_{ijk}), яка розрахована в підмережі трьох найближчих елементів масиву (i, j, k), що визначається відношенням

$$r_{ijk} = \Delta t_{ij} + \Delta t_{jk} + \Delta t_{ki}, \quad (5)$$

де Δt_{ij} — час затримки між надходженням сигналу на датчики i та j , обчислений для кожної пари трас за допомогою функції крос-кореляції. Поріг максимальної узгодженості визначений для виявлення когерентності хвильових форм на всіх елементах масиву. Якщо узгодженість (r_{ijk}) менша за цей поріг, то подію вважають виявленою.

Після локації сейсмічного джерела, знаючи відстань від епіцентру сейсмічної події до пункту спостереження R , визначають інтервал часу $[t_1; t_2]$, через який може прийти інфразвукова хвиля:

$$t_1 = R/16,5; \quad t_2 = R/20,4 \text{ [с]}. \quad (6)$$

Якщо у визначеному інтервалі часу наявна інфразвукова хвиля, азимут її приходу збігається з визначеним напрямком і сигнал має характерну форму, то вважають, що вибухову природу джерела сигналу підтверджено.

За наявності інфразвукового сигналу одночасно на декількох групах можливі локація джерела сигналу кутомірним способом та зіставлення отриманих просторово-часових характеристик з даними сейсмічного методу.

Результати та обговорення. Під час обробки зареєстрованих акустичних сигналів передусім необхідно розрізнити корисний сигнал

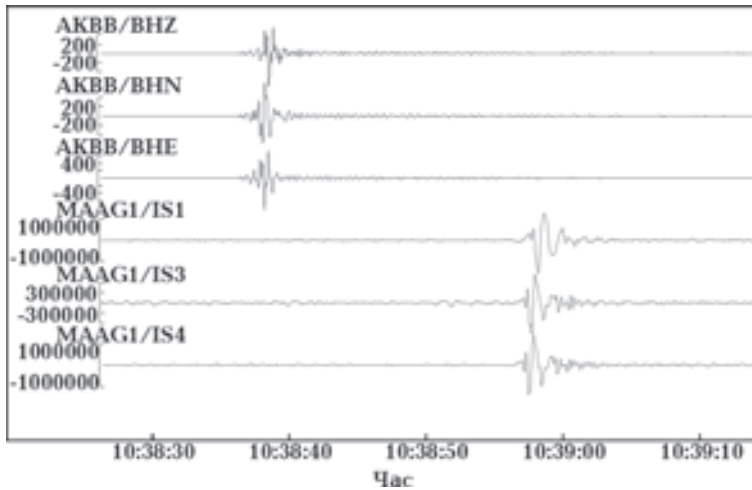


Рис. 2. Сейсмічний та акустичний записи промислового вибуху в с. Гранітне Малинського р-ну Житомирської обл. 06.02.2015 р. ($T_0=10:38:56$, $\varphi=50,81^\circ$ пн.ш., $\lambda=29,31^\circ$ сх.д.), зафіксованого центральним елементом АКВВ сейсмічної станції PS45 та системою МААГ-1.

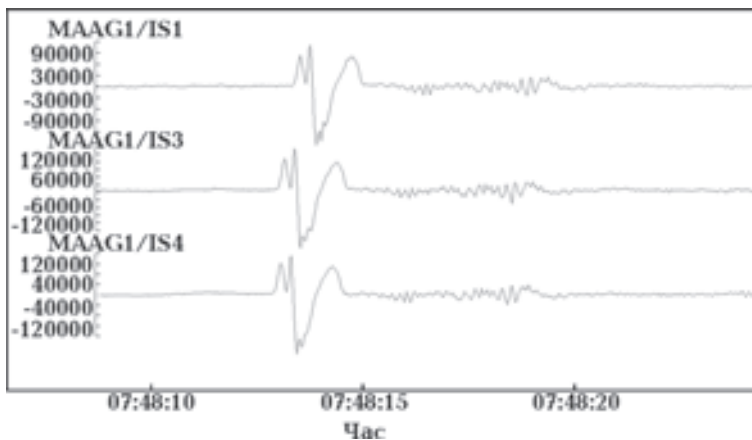


Рис. 3. Акустичний запис промислового вибуху в с. Гранітне Малинського р-ну Житомирської обл. 15.11.2012 р. ($T_0=07:48:13$, $\varphi=50,81^\circ$ пн.ш., $\lambda=29,31^\circ$ сх.д.), зафіксованого системою МААГ-1.

техногенного або природного походження від вітрових перешкод і завад.

Нижче наведено основні ознаки корисних сигналів та їх відмінність від вітрових перешкод.

- Корисний сигнал реєструють на всіх елементах групи майже одночасно. Різниця часового вступу на каналах МААГ-1 та МААГ-2 не може перевищувати 1—2 с. Сигнал від вітрової завади має значно більшу різницю у часі вступу між каналами.

- Корисні сигнали мають майже однакову обвідну, характер запису та заповнення обвідної. Це залежить від чіткості налаштування АЧХ-каналів. Вітрові завади істотно різняться за характером запису на різних каналах.

Якщо вибух здійснено на малих відстанях від МААГ (5—20 км), то хвилюва форма акустичного сигналу істотно не змінюється, а до його спектра не додаються додаткові гармоніки. На рис. 2 представлений акустичний запис промислового вибуху в с. Гранітне, Малинського р-ну, Житомирської обл. Акустичні групи впевнено реєструють такі сигнали. Міжканальна кореляція в межах усього частотного діапазону 0,5—10 Гц не нижча за 0,9.

Під час поширення інфразвуку необхідно враховувати будову атмосфери і той факт, що в ній існують декілька хвилеводів. Значна дальність поширення інфразвуку зумовлена концентрацією звукової енергії поблизу шару з мінімальною температурою повітря та відсутністю на шляху завад.

Вісь головного хвилеводу розташована на висоті 10—15 км, вісь другого хвилеводу — на висоті 75—80 км. Різні комбінації вертикальних змін температури та швидкості вітру можуть спричинити утворення в атмо-

Розраховані значення азимуту, частоти та висоти відбиття для складових інфразвукового сигналу

Параметр	Тип хвилі			
	N	1 відбиття	2 відбиття	3 відбиття
Час вступу	07:48:12	07:52:19	07:54:27	07:56:21
Азимут, град	48,8	39,6	39,5	50,2
Частота, Гц	4,04	6,1	5,78	6,56
$t_N - t_n$, с	0	234	375	489
Висота, км	—	36	57	74

фері додаткових хвилеводів, що ускладнює картину поширення інфразвуку в атмосфері.

Як приклад на рис. 3 показано акустичний запис промислового вибуху в Житомирській обл. 15.11.2012 р. Після вступу сигналу і проходження фази стиснення—розрідження з'являється ще декілька характерних амплітудних сплесків.

На рис. 4. показано результат процесу виявлення основного сигналу та перевідбиттів за допомогою програмного пакета WinPMCC (виробник DASE, Франція), що використовує метод РМСС. На рисунку знизу вгору показано три хвильові форми каналів реєстрації МААГ, діаграми швидкості, азимуту (Аз) та коефіцієнта міжканальної кореляції (К). Для кожної діаграми з правої частини показана шкала значень, з правої частини — частотна смуга, у якій проведено детектування. Видно, що максимум енергії припав на основний сигнал; крім того, виділено ще декілька ділянок із значеннями кореляції, більшими за 0,7. У таблиці наведено часи вступу та розраховані висоти, на яких відбулося відбиття сигналу.

У разі вибухів на відстанях від 20 до 100 км спостерігається одне відбиття з тропосферного шару на висоті до 20 км. Якщо фронт хвилі поширюється протилежно напрямку вітру, то можливе відбиття фронту від мезосферного

шару на висоті 60—80 км. Хвильова форма сигналу частково змінюється. У спектрі сигналу з'являються додаткові гармоніки. Фаза стиснення поступово зникає. Міжканальна кореляція зменшується до 0,75—0,8. Фаза розрідження стає більш значущою.

Здебільшого на цих відстанях починається зона нечутливості, де реєстрація стає малоюмовірною. Така зона пов'язана із заломленням у теплого шарі повітря, коли промінь інфразвуквої хвилі відхиляється вгору і не доходить до пункту спостереження. За охолодження приземного повітря у нічний час та цілодобово у холодну пору року така зона може не виникати [Арабаджи, 1973].

Під час реєстрації сигналів від вибухів на відстані 100—300 км спостерігається одне чи декілька відбиттів від тропосферного шару на висоті 16—20 км та одне чи декілька відбиттів від мезосферного шару на висоті 60—80 км. У спектрі сигналу з'являються додаткові гармоніки.

Згідно зі статистичними даними, акустичні системи протягом року реєструють близько тисячі корисних сигналів. Переважно це сигнали від вибухів на промислових кар'єрах. Крім того, досвід експлуатації системи МААГ показав можливість реєстрації сигналів від аварійних вибухів, зокрема на газопроводах та військових складах. Останній приклад — реєстрація сигналу від вибуху на газопроводі в районі с. Красне Лохвицького р-ну Полтавської обл. 17 червня 2014 р.

Для оцінювання роботи інфразвуквого комплексу за визначеним алгоритмом була проаналізована база даних зареєстрованих сейсмічних та інфразвуківих сигналів ГЦСК протягом 2014 р. За цей час сейсмічними засобами зареєстровано 909 промислових вибухів, що відбулися переважно на північно-західній території України (рис. 5). По 437 з них є підтверджена інформація про кількість закладеної вибухівки, яку використовують у ГЦСК для калібрування вимірювальної мережі. Потужність у

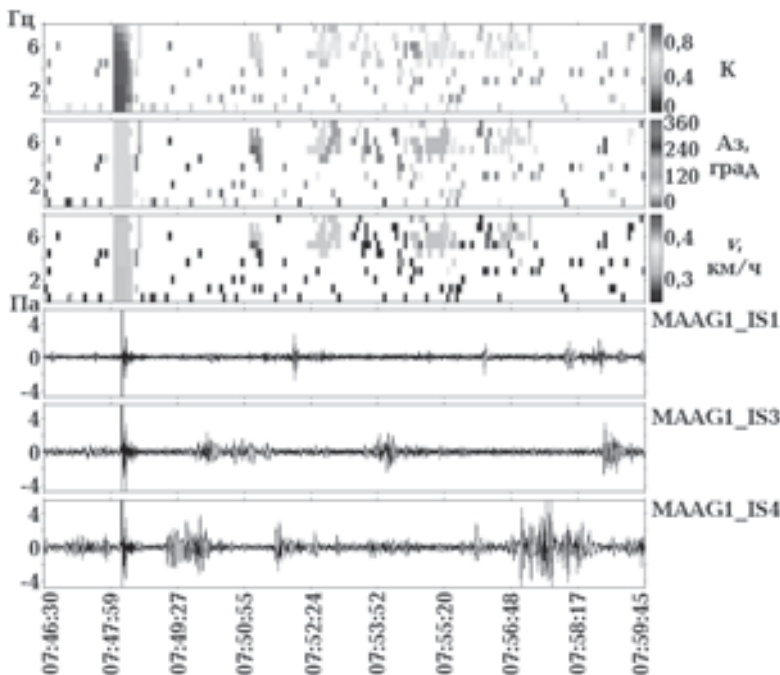


Рис. 4. Результат виявлення акустичного сигналу від промислового вибуху в с. Гранітне, Малинського р-ну Житомирської обл. 15.11.2012 р. ($T_0=07:48:13$, $\varphi=50,81^\circ$ пн.ш., $\lambda=29,31^\circ$ сх.д.), зафіксованого системою МААГ-1 за допомогою програмного пакета WinPMCC.

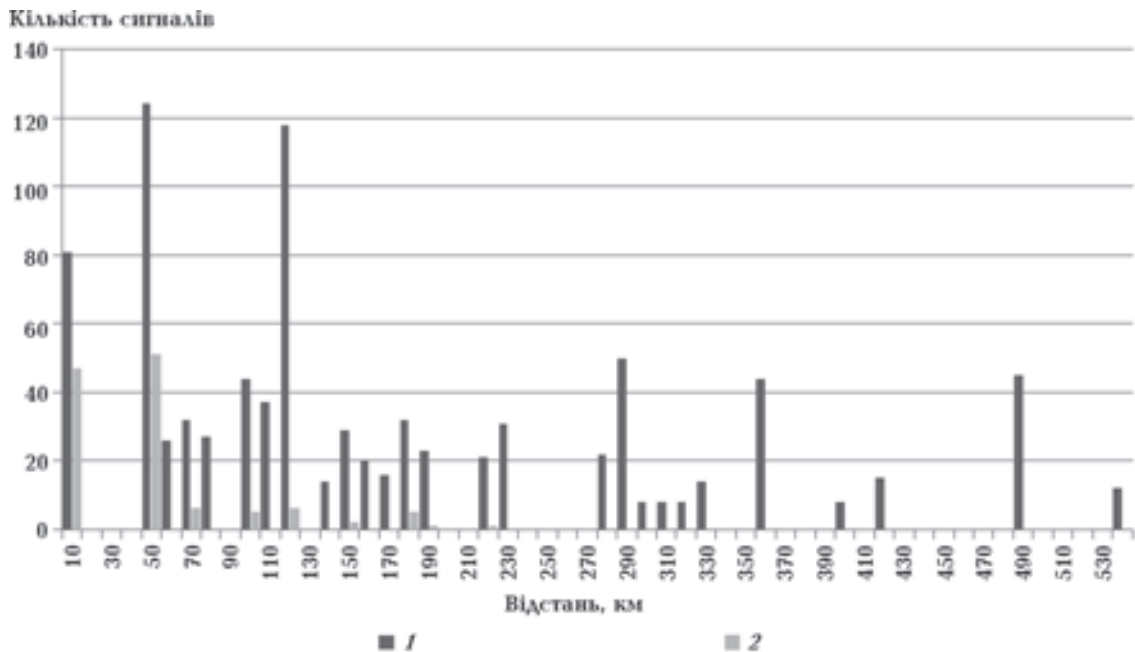


Рис. 5. Розподіл кількості промислових вибухів залежно від відстані до пункту спостереження: 1 — сейсмічний сигнал; 2 — інфразвуковий сигнал.

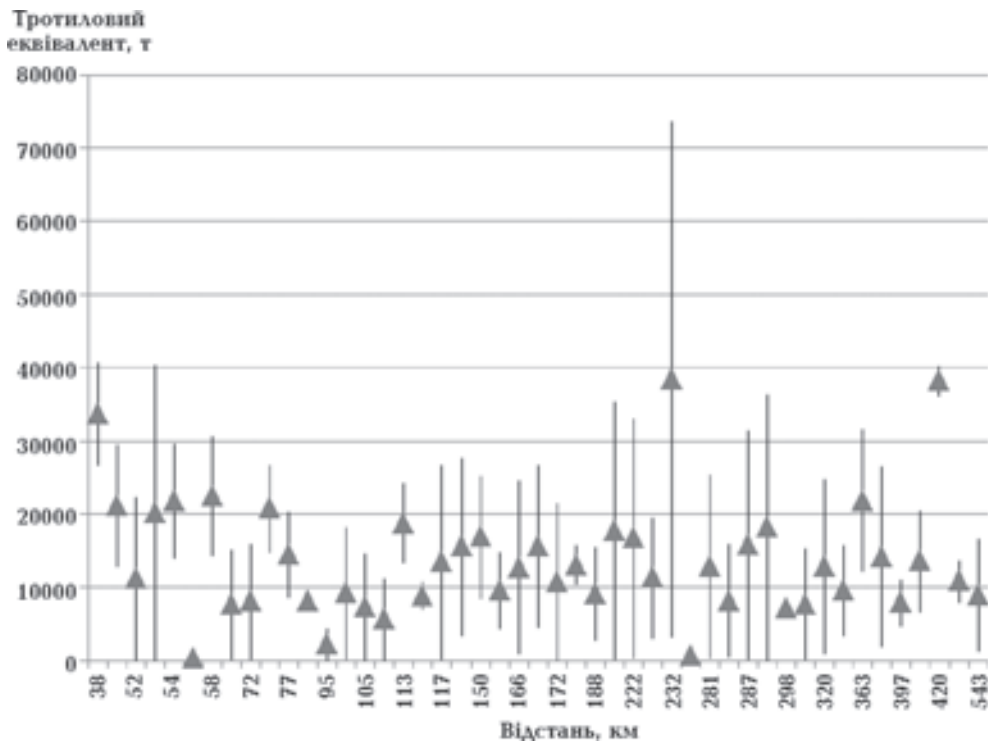


Рис. 6. Розподіл потужності вибухів з відстанню до пункту спостереження. Трикутниками позначено середні значення потужності, вертикальними лініями — мінімальні та максимальні оцінені значення.

тротиловому еквіваленті, яку оцінено за сейсмічними даними і підтверджено, становила від 0,5 до 60 т (рис. 6). За той самий час підтвер-

джено інфразвуковими засобами 124 вибухи. Азимути на джерело звуку визначено із похибкою від $0,1^\circ$ до $3,8^\circ$, що зумовлено відстанню до

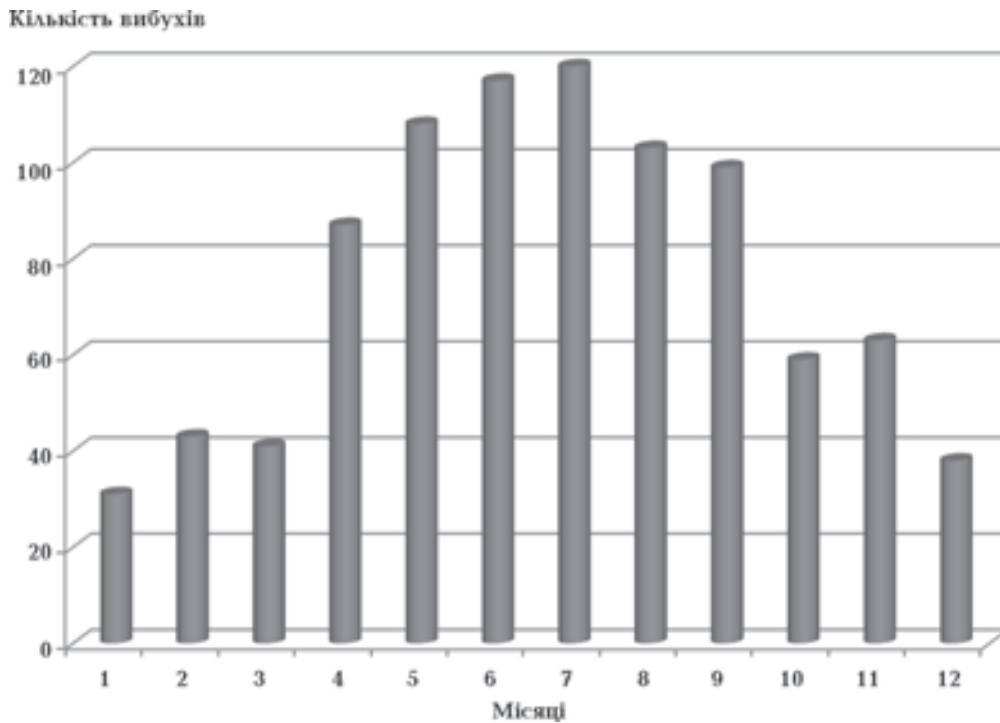


Рис. 7. Розподіл кількості вибухів залежно від сезону.

джерела і станом атмосфери на час проведення вимірювань.

Якість реєстрації покращується у зимові місяці та погіршується — у літні. Протягом доби якість реєстрації краща у нічний та вечірній часи і погіршується внаслідок нагрівання атмосфери близько полудня. Разом з тим основний видобуток корисних копалин відбувається саме літом (рис. 7), у денний час, що не сприяє виявленню частини інфразвукових сигналів від малопотужних вибухів.

Інфразвукові засоби реєстрували сигнали від промислових вибухів, що відбувались на відстанях 10—210 км від пункту спостереження. При цьому оцінено нижні межі чутливості потужності, що становили від 1 до 10 т тринітратолуолу (ТНТ) на відстанях до 50 км, від 15 до 30 т ТНТ — для відстаней до 130 км, до 60 т ТНТ — для відстаней до 200 км. Отримані результати постійно уточнюють у процесі подальшого набору статистичних даних.

Висновки. Встановлено, що основний тип зареєстрованих інфразвукових сигналів носить вибуховий характер і має вибухоподібну

форму обвідної. Це пов'язано передусім з особливістю розташування пунктів реєстрації в районах, де розвинена гірничодобувна промисловість і проводиться велика кількість вибухів.

Результати інфразвукових спостережень можна використовувати як додатковий критерій ідентифікації природи сейсмічних подій з певними обмеженнями, що стосуються потужності заряду, відстані до джерела сигналу. Впевнено реєструють інфразвук від промислових вибухів малоапертурними групами на відстанях до 200 км за умови достатньої потужності (не менше як 20 т ТНТ). Якість реєстрації інфразвукових сигналів також залежить від метеорологічних умов на шляху поширення.

Використання даних інфразвукових вимірювань у режимі, близькому до реального, дає змогу застосовувати метод для моніторингу навколишнього середовища, оперативного оцінювання події, що відбулася, надання інформації у разі надзвичайних подій (вибухів складів, газопроводів і т. п.) для служб швидкого реагування.

Список літератури

Андрущенко Ю. А., Гордієнко Ю. О. Аналіз ефективності застосування критеріїв ідентифікації вибухів та землетрусів для локальних та регіональних

подій в умовах платформної частини України. *Геофіз. журн.* 2009а. Т. 31. № 3. С. 121—129.

- Андрущенко Ю. А., Гордієнко Ю. О. Спосіб ідентифікації природи сейсмічних джерел на основі спектрально-часового аналізу коливань. *Геофіз. журн.* 2009б. Т. 31. № 6. С. 140—146.
- Арабаджи В. И. Загадки простой воды. Москва: Знание, 1973, 96 с.
- Асминг В. Э., Евтюгина З. А., Виноградов Ю. А., Федоров А. В. Анализ инфразвуковых сигналов, генерируемых техногенными источниками. *Вестник МГТУ.* 2009. Т. 12. № 2. С. 300—307.
- Виноградов Ю. А. Комплексное применение сейсмического и инфразвукового методов регистрации волновых полей для выделения сигналов от наземных взрывов в процессе мониторинга природной среды в Евро-Арктическом регионе: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2004, 26 с.
- Гордиенко Ю. А., Карягин Е. В., Лящук А. И., Солонец А. И. Построение систем акустического группирования для реализации инфразвукового мониторинга. *Системи обробки інформації.* 2006. Вип. 3 (52). С. 36—42.
- Дубровин В. И., Смирнов А. А. Совместное использование инфразвуковых и сейсмических данных для повышения точности локализации. *Вестник НАЦ РК.* 2011. Вып. 3. С. 140—144.
- Кегров О. К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. Москва; Саранск: Красный Октябрь, 2005. 420 с.
- Лящук А. И., Карягин Е. В. Использование систем группирования акустического метода для обнаружения техногенных звуковых источников. *Матеріали XV наук.-техн. конф. «Наукові проблеми розробки, модернізації та застосування інформаційно-вимірювальних систем космічного і наземного базування».* Житомир, 2006. 85 с.
- Машков О. А., Кирилюк В. А., Качалин І. Г., Карягин Є. В. Оцінка характеристик джерела инфразвуковых колебаний техногенного происхождения малоапертурной акустической группой. *Збірник наукових праць «Моделювання та інформаційні технології».* Київ: Вид. Ін-та проблем моделювання в енергетиці, 2005. Вип. 29. С. 80—87.
- Рибачук О. І., Кирилюк В. А., Стринага В. В., Лящук О. І., Клівець С. І. Методика розпізнавання джерел збурень в ближній зоні при використанні акустичної системи геофізичного моніторингу. *Системи обробки інформації.* 2008. Вип. 1(68). С. 73—78.
- Сащук И. Н., Стринага В. В., Качалин И. Г., Лящук А. И., Карягин Е. В. Использование малоапертурной акустической группы в составе Международной системы мониторинга. *Збірник наукових праць ЖВІ НАУ.* Житомир: 2010, Вип. 4. С. 115—122.
- Arrowsmith S. J., Arrowsmith M. D., Hedlin M. A. H., Stump B. W., 2008. Infrasonic Signals from Large Mining Explosions. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 98(2), 768—777.
- Cansi Y., 1995. An automated seismic event processing for detection and location: the P.M.C.C. method. *Geophys. Res. Lett.* 22, 1021—1024.
- Gibbons S. J., Ringdal F., Kvaerna T., 2007. Joint seismic-infrasonic processing of recordings from a repeating source of atmospheric explosions. *J. Acoust. Soc. Am.* 122 (5), 158—164. doi: 10.1121/1.2784533.
- Hagerty M. T., Kim W.-Y., Martysevich P., 2002. Infrasonic detection of large mining blasts in Kazakstan. *Pure Appl. Geophys.* 159, 1063—1079.
- Haak H., Evers L., 2003. Design of infrasound detection and parameter estimation systems. *KNMI, infrasound technology workshop*, US San Diego, October 2003.
- Haak H. W., de Wilde G. J., 1996. Microbarograph systems for the infrasonic detection of nuclear explosions. Scientific report: WR 96-06. De Bilt: *Royal Netherlands Meteorological Institute, Seismology Division.* 45 p.
- Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A., 2009. Infrasonic Monitoring for Atmospheric Studies. Springer editions, 739 p. doi 10.1007/978-1-4020-9508-5.
- McKenna M. H., Stump B. W., Hayek S., McKenna J. R., Stanton T. R., 2007. Tele-infrasonic studies of hard-rock mining explosions. *J. Acoust. Soc. Am.* 122, 97—106.
- Stump B. W., Hedlin M. A. H., Pearson D. C., Hsu V., 2002. Characterization of mining explosions at regional distances: implications with the international monitoring system. *Rev. Geophys.* 40, 1011. doi 10.1029/1998RG000048.
- Young C., Jun M.-S., Joen J.-S., Min K. D., 2002. Analysis of local seismo-acoustic events in the Korean Peninsula. *Geophys. Res. Lett.* 29, 29—1. doi 10.1029/2001GL014060.

Possibility of the use of data of infrasonic monitoring for identification of the nature of seismic events

© O. I. Lyashchuk, Yu. A. Andruschenko, Yu. O. Gordienko,
Ye. V. Karyagin, I. V. Kornienko, 2015

The paper considers the possibility of the use of infrasound measurements conducted in Ukraine to verify the recorded seismic events and the use of infrasound data as one of the criteria for their identification. Registration of seismic and infrasonic signals was carried out via a network of geophysical Main center of special monitoring (MCSM). To register infrasound small-aperture infrasound arrays were used, allowing directional monitoring of events. The data of 909 parameters of seismic events from industrial explosions that occurred during 2014 in Ukraine have been obtained. 124 infrasonic responses on these events have been registered. The limits of sensitivity and distance of the use of infrasound method have been found. The proposed technology of registering signals from seismic events by seismic-acoustic complex makes possible to register surface industrial explosions at a distance of 200 kilometers.

Key words: infrasound, industrial explosion, identification, small-aperture acoustic array.

References

- Andrushchenko Yu. A., Gordienko Yu. O., 2009a. Analysis of the effectiveness of the criteria for the identification of explosions and earthquakes to local and regional events in terms of platform Ukraine. *Geofizicheskiy zhurnal* 31(3), 121—129 (in Ukrainian).
- Andrushchenko Yu. A., Gordienko Yu. O., 2009b. The method of identifying the nature of seismic sources based on spectral-temporal analysis of vibrations. *Geofizicheskiy zhurnal* 31(6), 140—146 (in Ukrainian).
- Arabadzhi V. I., 1973. Mysteries of plain water. Moscow: Znanie, 96 p. (in Russian).
- Asming V. E., Yevtyugina Z. A., Vinogradov Yu. A., Fedorov A. V., 2009. Analysis of infrasound signals generated by anthropogenic sources. *Vestnik MGTU* 12(2), 300—307 (in Russian).
- Vinogradov Yu. A., 2004. Complex application of seismic and infrasound wave fields registration methods for the isolation of signals from the ground explosions in the process of monitoring the environment in the Euro-Arctic Region. Abstract dis. candidate of technical sciences. Moscow, 26 p. (in Russian).
- Gordienko Yu. A., Karyagin Ye. V., Lyashchuk A. I., Solonets A. I., 2006. Design and construction of acoustic grouping for the implementation of infrasound monitoring. *Sistemy obrobky informatsiy* (is. 3), 36—42 (in Russian).
- Dubrovin V. I., Smirnov A. A., 2011. Sharing infrasound and seismic data to improve the accuracy of localization. *Vestnik NNC RK* (is. 3), 140—144 (in Russian).
- Kedrov O. K., 2005. Seismic methods of monitoring nuclear tests. Moscow; Saransk: Krasnyy Oktyabr, 420 p. (in Russian).
- Lyashchuk A. I., Karyagin Ye. V., 2006. Using acoustic-array systems for the detection of anthropogenic sound sources. *Materials XV scientific and technical conference «Scientific problems of development, modernization and use of information computing space and ground-based»*, 85 p. (in Russian).
- Mashkov O. A., Kirilyuk V. A., Kachalin I. G., Karyagin Ye. V., 2005. Evaluation of the source of infrasonic waves technogenic small aperture acoustic group. Collection of scientific papers «Modeling and Information Technologies». Kiev: Publ. Institute of modeling problems in the energy sector, is. 29, P. 80—87 (in Ukrainian).
- Rybachuk O. I., Kirilyuk V. A., Strinada V. V., Lyashchuk O. I., Klivets S. I., 2008. Method of recognizing sources of disturbances in the near field using geophysical monitoring acoustic system. *Sistemy obrobky informatsiy* (is. 1), 73—77 (in Ukrainian).
- Sashchuk I. N., Strinada V. V., Kachalin I. G., Lyashchuk A. I., Karyagin Ye. V., 2010. Using a small aperture acoustic group of the International Monitoring System. Collection of scientific papers ZHVI NAU. Zhytomir, is. 4, P. 115—122 (in Russian).
- Arrowsmith S. J., Arrowsmith M. D., Hedlin M. A. H., Stump B. W., 2008. Infrasonic Signals from Large Mining Explosions. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 98(2), 768—777.
- Cansi Y., 1995. An automated seismic event processing for detection and location: the P.M.C.C. method. *Geophys. Res. Lett.* 22, 1021—1024.

- Gibbons S. J., Ringdal F., Kværna T., 2007. Joint seismic-infrasonic processing of recordings from a repeating source of atmospheric explosions. *J. Acoust. Soc. Am.* 122 (5), 158—164. doi: 10.1121/1.2784533.
- Hagerty M. T., Kim W.-Y., Martysevich P., 2002. Infrasound detection of large mining blasts in Kazakstan. *Pure Appl. Geophys.* 159, 1063—1079.
- Haak H., Evers L., 2003. Design of infrasound detection and parameter estimation systems. KNMI, infrasound technology workshop, US San Diego, October 2003.
- Haak H. W., de Wilde G. J., 1996. Microbarograph systems for the infrasonic detection of nuclear explosions. Scientific report: WR 96-06. De Bilt: Royal Netherlands Meteorological Institute, Seismology Division. 45 p.
- Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A., 2009. *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. Springer editions, 739 p. doi 10.1007/978-1-4020-9508-5.
- McKenna M. H., Stump B. W., Hayek S., McKenna J. R., Stanton T. R., 2007. Tele-infrasonic studies of hard-rock mining explosions. *J. Acoust. Soc. Am.* 122, 97—106.
- Stump B. W., Hedlin M. A. H., Pearson D. C., Hsu V., 2002. Characterization of mining explosions at regional distances: implications with the international monitoring system. *Rev. Geophys.* 40, 1011. doi 10.1029/1998RG000048.
- Young C., Jun M.-S., Joen J.-S., Min K. D., 2002. Analysis of local seismo-acoustic events in the Korean Peninsula. *Geophys. Res. Lett.* 29, 29—1. doi 10.1029/2001GL014060.