

ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ІНФРАЗВУКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ В УКРАЇНІ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВИБУХІВ ТА ЗЕМЛЕТРУСІВ

Мета. Метою досліджень є визначення можливості використання інфразвукових вимірювань, що проводяться в Україні для верифікації зареєстрованих сейсмічних подій, та застосування інфразвукового методу як одного з критеріїв їх ідентифікації. **Методика.** Реєстрація сейсмічних та інфразвукових сигналів проводилася за допомогою геофізичної мережі Головного центру спеціального контролю (ГЦСК). Для реєстрації інфразвуку використовувалися малоапертурні акустичні системи групування, що дозволяють проводити направлений моніторинг явищ. Обробка сейсмічних сигналів велася із застосуванням стандартних процедур, прийнятих у сейсмології для визначення параметрів джерела сигналу. Для оброблення інфразвукових сигналів використовувався метод прогресивної мультиканальної кореляції. Зарахування сейсмічного та інфразвукового сигналу до одного явища проводилося на основі розрахованих за допомогою сейсмічних даних параметрів джерела сигналу, часу поширення від нього інфразвукових хвиль, азимуту на джерело та форми інфразвукових сигналів. У разі реєстрації інфразвукових сигналів двома акустичними групами, порівнявши визначні координати та час в джерелі з даним сейсмічного моніторингу. **Результати.** Отримано дані про параметри 699 сейсмічних подій – промислових вибухів, що відбулися впродовж серпня 2014 – березня 2015 року на території України. Зареєстровано 124 інфразвукових відгуків на зазначені події. Виявлено межі чутливості та дальності застосування інфразвукового методу для такого типу подій. Показано можливість застосування двох і більше малоапертурних акустичних груп для локації джерела сигналу, коли сейсмічної інформації недостатньо для оцінки його параметрів. Визначено відмінності у формі інфразвукового сигналу від промислового вибуху та землетрусу. **Наукова новизна.** На базі наявних технічних засобів ГЦСК запропоновано нову технологію реєстрації сигналів від сейсмічних подій сейсмо-акустичним комплексом, що дає змогу реєструвати наземні промислові вибухи на відстані до 200 кілометрів, виявлено характеристики основних джерел збурень, що дають можливість класифікувати ці збурення. **Практична значущість.** Інфразвукові спостереження разом зі сейсмічними дають змогу ідентифікувати подію, а у низці випадків додатково визначити параметри джерела сигналу. Використання даних інфразвукових вимірювань у режимі, близькому до реального часу, дає змогу застосовувати метод для моніторингу навколишнього середовища, оперативної оцінки події, що відбулася, надання інформації у випадку надзвичайних подій (вибухів складів, газопроводів тощо) для служб швидкого реагування. Пізніше планують оцінити енергію події інфразвуковим методом, визначити особливості поширення інфразвуку, визначити амплітудно-частотні характеристики інфразвукових та сейсмічних сигналів.

Ключові слова: інфразвук; вибух; землетрус; ідентифікація; малоапертурна акустична група.

Вступ

Інфразвукові спостереження в світі свого часу отримали великий поштовх у зв'язку з розвитком ядерної зброї та її випробуванням. Роботи зі створення систем інфразвукового моніторингу найактивніше проводилися в США і СРСР [Zoltan A. Der et al., 2002; Le Pichon et al., 2009]. Нині, у межах Договору про всеосяжну заборону ядерних випробувань (ДВЗЯВ), низка інфразвукових станцій у світі об'єднані в мережу Міжнародної системи моніторингу (МСМ). Відповідно до Договору у складі МСМ має бути 60 інфразвукових станцій, більша частина з яких вже встановлена в різних куточках Земної кулі. Найпо-

тужнішою подією останнього часу, зареєстрованою мережею інфразвукових станцій МСМ, є вибух метеориту поблизу м. Челябінська 15.02.2013 року [Le Pichon et al., 2013].

В Україні завдання контролю дотримання ДВЗЯВ покладене на Головний центр спеціального контролю (ГЦСК), засоби інфразвукового моніторингу якого розташовані на території Житомирської, Хмельницької, Одеської областей. Інфразвукова апаратура встановлена також на українській антарктичній станції «Академік Вернадський».

Для інфразвуку характерне мале поглинання у різних середовищах. Наслідком цього є можливість реєстрації атмосферних сигналів від подій,

що відбулися на великій відстані від пункту спостережень. Від дуже потужних явищ інфразвукові хвилі можуть огинати Землю кілька разів і проявлятися у вигляді збурення атмосферного тиску декілька діб поспіль. Прикладами таких глобальних подій є виверження вулкану Кракатау 1883 року та вибух Тунгуського метеориту 1908 року [Whipple, 1930; Золотов, 1969; Self, 1981]. Спектр природних і техногенних явищ, що генерують інфразвук достатньо широкий – полярні сніга, запуски ракет, вулкани, падіння космічних тіл, шторми, урагани, землетруси, лавини, пожежі, ядерні та хімічні вибухи, інше.

Мета

Результати вивчення поширення інфразвуку в атмосфері дають можливість застосовувати акустичний метод для вирішення певних прикладних задач. Для завдань сейсмічного моніторингу території України, уточнення оцінки сейсмічної небезпеки її регіонів інфразвукові сигнали можуть слугувати як інформативні ознаки вибухової природи сейсмічної події. У зв'язку з цим стає актуальним питання визначення можливості застосування технічних засобів ГЦСК для вирішення таких завдань. Метою досліджень є визначення можливості використання інфразвукових вимірювань, що проводяться в Україні, для верифікації зареєстрованих сейсмічних подій, та

застосування інфразвукового методу як одного з критеріїв їхньої ідентифікації.

Вихідні дані

Сейсмічно найактивнішими територіями є захід, південний захід і південь України [Борисенко и др., 1992; Евсеев, 1969; Харитонов, 1996], де виділяються два основні сейсмічні регіони: Карпатський і Кримсько-Чорноморський. Разом з тим присутні локальні вогнищеві зони на південному заході Східно-Європейської платформи, пов'язані зокрема із змінами геодинамічної рівноваги середовища. Підвищення в останні десятиріччя сейсмічності у зоні Волино-Поділля, Українського щита, Дніпровсько-Донецької западини можна пов'язати із розробленнями корисних копалин у місцях, де існують тектонічні розломи у верхній частині земної кори.

Впродовж року, в середньому, реєструється більше ніж тисячу сейсмічних сигналів пов'язаних з гірничодобувною промисловістю. Свою частку вносять і сейсмічні сигнали від техногенних надзвичайних ситуацій, таких як вибухи на військових складах, газопроводах тощо. На рис. 1 наведено просторовий розподіл джерел сейсмічних сигналів за 2014 р. у ближній зоні після проведення їх автоматичної локалізації мережею ГЦСК за методиками, поданими в [Ляшук, 2011].

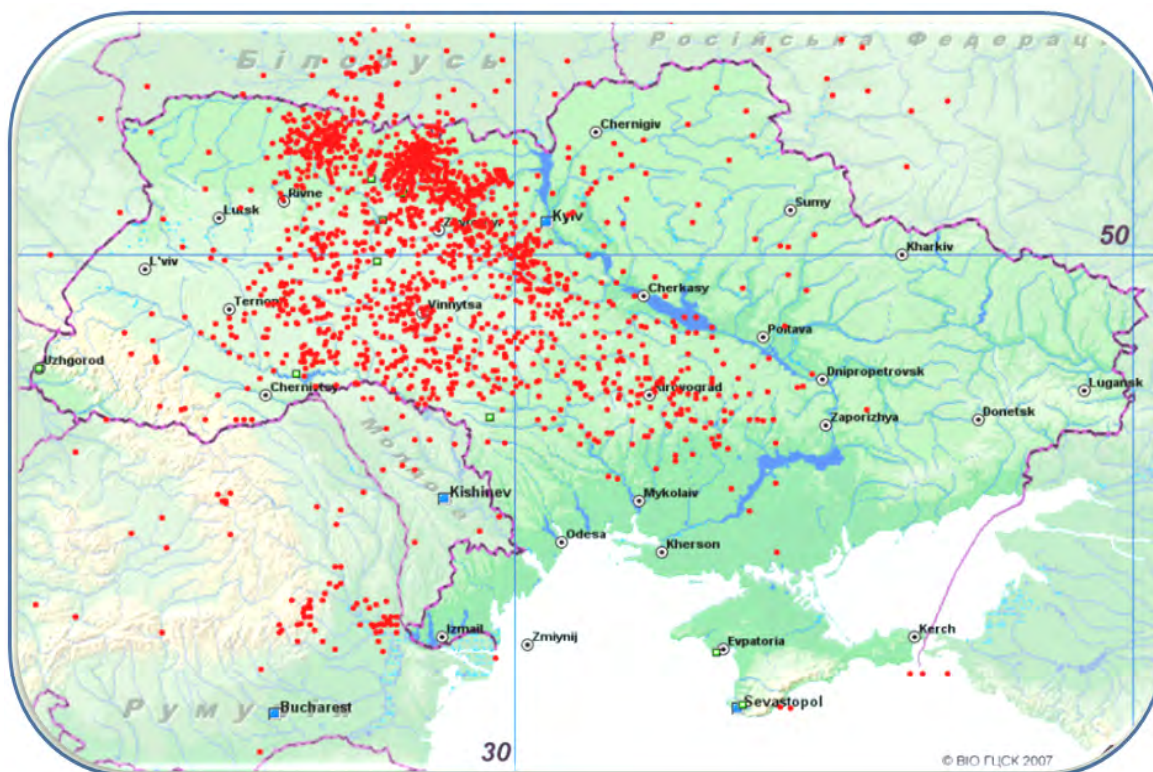


Рис. 1. Карта джерел сейсмічних сигналів, виявлених впродовж 2014 року сейсмічною мережею ГЦСК в автоматичному режимі (без уточнення локалізації)

Fig. 1. Map of seismic signals sources which automatically detected seismic network MCSM during the 2014

За статистичними даними, інфразвуковими системами впродовж року також реєструється близько тисячі корисних сигналів, велику частку яких становлять сигнали від вибухів у кар'єрах. У зв'язку з цим, отримана інфразвукова інформація може використовуватися для оцінки та ідентифікації явища, зареєстрованого сейсмічними засобами.

Роботи із вивчення можливості застосування інфразвукових досліджень для вирішення задач ідентифікації сейсмічного джерела набувають поширення у світі [Hagerty et al., 2002; Arrowsmith et al., 2008; McKenna et al., 1992; Gibbons et al., 2007; Stump et al., 2002; Виноградов, 2004; Асминг и др., 2009; Дубровин, 2011; Young et al., 2002]. Умови розміщення інфразвукових станцій і, відповідно, отримані результати є унікальними для кожного окремого випадку.

Якість реєстрації інфразвукових сигналів залежить від низки факторів, таких як географічні умови, кількість вибухівки та спосіб її закладення, відстані до пунктів реєстрації, стану атмосфери та метеорологічних умов.

Методика

Реєстрація інфразвукових сигналів у ГЦСК ведеться за допомогою акустичних станцій К-304А, які мають у своєму складі мікробарографи конденсаторного типу із частотною смугою 0.003–12 Гц. Режими чутливості станції – 1, 10, 100 Па [Ляшук и др., 2006а; Гордієнко и др., 2006]. Вимірювана інформація у цифровому вигляді реєструється на персональному комп'ютері для подальшого оброблення.

З метою виявлення сигналів використовується система групування (далі – малоапертурна акустична група, або МААГ), що дає змогу застосовувати методи групового оброблення. Для цього у кожному пункті спостереження встановлено 3 і більше акустичних станцій, що рознесені між собою на відстані 100–200 метрів одна від одної [Сашук и др., 2010]. Розмір апертури та її форма обмежується територією, що є у розпорядженні установи. Зазвичай, за наявності трьох елементів їх намагаються розмістити на вершинах уявного рівностороннього трикутника, четвертий елемент розташовують у центрі трикутника або змінюють конфігурацію на квадрат. За сприятливих умов систему можливо доповнювати акустичними станціями рознесеними на відстані до 1–3 кілометрів, дотримуючись прийнятих конфігурацій. Треба зазначити, що апертура групи визначає частоти реєстрації.

До входів кожного з мікробарографів, через об'єм усереднення, під'єднано завадо-захисний пристрій (ЗЗП) типу "Павук" для покращення відношення сигнал-шум [Гордієнко и др., 2006; Сашук и др., 2010]. ЗЗП відіграє основну роль під час зниження завад від приземного вітру та турбулентності. Із виходів мікробарографів елек-

тричні сигнали кабелями передаються до аналого-цифрового перетворювача (АЦП) і далі до робочої станції (ПК), де здійснюється нагромадження інформації у визначеному форматі, її первинна обробка, синхронізація часу по GPS та передача даних до обчислювального центру ГЦСК. У центрі даних проводиться повне оброблення інформації, що передбачає оцінки часових, частотних та просторових характеристик сигналів [Рибачук та ін., 2008]. На рис. 2. Показано типову структурну схему МААГ.

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

Окремі мікробарографи реєструють сигнал у різні моменти часу в міру поширення через групу. Припускаючи, що сигнал є когерентним, за крос-кореляціями між парами датчиків можливо визначити часові затримки між окремими датчиками, що, своєю чергою, залежать від геометрії групи і характеристик фронту хвилі. Параметри поширення – азимут і швидкість сигналу отримують з аналізу часових затримок.

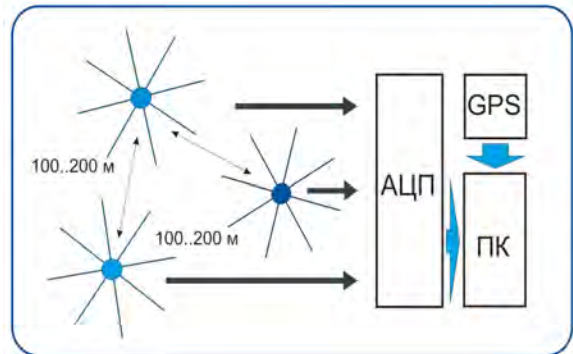


Рис. 2. Типова схема малоапертурної акустичної групи
Fig. 2. Typical scheme of small aperture acoustic group

Для детектування та розрахунку параметрів використовувалась методика [Cansi, 1995], що отримала назву *Progressive Multi Channel Correlation* (PMCC).

Основою алгоритму є міра узгодженості сигналу (r_{ijk}), розрахована в підмережі трьох найближчих елементів групи (у нашому випадку мікробарографів) (i, j, k), що визначається відношенням

$$r_{ijk} = \Delta t_{ij} + \Delta t_{jk} + \Delta t_{ki} \quad (1)$$

де Δt_{ij} є час затримки між надходженням сигналу на датчики i та j , обчислені 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}) менше, ніж цей поріг, подія вважається виявленою.

Формула (1) для трьох датчиків є простим і ефективним методом для перевірки узгодженості сигнальних детектувань на окремих датчиках. Під час виявлення сума часових затримок сигнальних послідовностей прагне до нуля.

$$\Delta t_{ij} + \Delta t_{jk} + \Delta t_{ki} = 0. \quad (2)$$

Цей аналіз виконується для кількох окремих частотних смуг і хвильових послідовностей з вікнами, що перекриваються в часі. Далі використовується метод пошуку найближчого сусіда для кластера елементарних виявлень у сімействах, що асоційовані з окремими подіями, визначаючи максимально допустимі варіації часу, частоти, азимута і швидкості для кожного сімейства.

Аналіз виявлення виконується в частотно-часовій області. Частотний інтервал ділиться на низку вузьких смуг, після чого в ковзаючі вікна заданої тривалості виконується процес детектування для кожного вікна та смуги частот. На базі алгоритму РМСС створене однойменне програмне забезпечення (розробник CEA DACE, Франція), що за наданою ліцензією використовується у роботі ГЦСК.

Виявлення сейсмічних сигналів проводиться із використанням трикомпонентних датчиків та систем сейсмічного групування. У разі використання сейсмічних груп, можливо застосувати методику детектування інфра звукових сигналів. Для детектування та оброблення сигналів у режимі реального часу використовувалось програмне забезпечення SeisComp3 (розробник GFZ, Німеччина).

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

$$t_1 = R/16.5, c; \quad t_2 = R/20.4, c. \quad (3)$$

Якщо у визначеному інтервалі часу інфра звукова хвиля присутня, азимут її приходу збігається з визначеним напрямком, це підтверджує вибухову природу джерела сигналу.

Результати

Для оцінювання роботи інфра звукового комплексу за визначеним алгоритмом проаналізовано базу даних зареєстрованих сейсмічних та інфра звукових сигналів. У роботі використано часовий інтервал від серпня 2014 року до березня 2015 року. За вказаний період сейсмічними засобами зареєстровано 699 промислових вибухів, що відбулися переважно на північному заході України. Оцінена кількість вибухівки становила від 1 до 60 тонн. Розподіл кількості вибухів по областях наведено у табл. 1. За той самий час підтверджено інфра звуковими засобами 124 вибухи.

Азимути на джерело звуку визначено з похибкою від $0,1^\circ$ до $3,6^\circ$, що зумовлено відстанню до джерела та станом атмосфери на час проведення

вимірювань. Зареєстровані сигнали мають характерну чітко окреслену форму, де виділяється зона стиску і розрідження, тривалість сигналу десятки секунд.

Інфра звукові засоби реєстрували сигнали від промислових вибухів, що знаходилися на відстанях 10–180 км від пункту спостережень. У такому разі оцінено нижні межі чутливості потужності, що складала від 1 до 10 тонн тринітротолуолу (ТНТ) на відстанях до 50 км, від 15 до 30 тонн ТНТ для відстаней до 130 км, та до 60 тонн ТНТ для відстаней до 180 км. Отримані результати постійно уточнюються під час набору статистичних даних.

Таблиця 1

Table 1

Територіальний розподіл кількості зареєстрованих промислових вибухів Territorial allocation of registered industrial explosions

№	Область	Зареєстровані сейсмічною апаратурою ГЦСК	Підтверджені додатково інфра звуковою апаратурою ГЦСК
1	Вінницька	82	6
2	Волинська	3	—
3	Житомирська	276	87
4	Івано-Франківська	2	—
5	Закарпатська	2	—
6	Київська	101	6
7	Кіровоградська	6	—
8	Львівська	1	—
9	Миколаївська	1	—
10	Одеська	1	—
11	Рівненська	105	9
12	Тернопільська	29	2
13	Хмельницька	72	14
14	Черкаська	16	—
15	Чернівецька	1	—
16	Чернігівська	1	—
	РАЗОМ:	699	124

Для землетрусів на території України інфра звукових сигналів не спостерігалось. Водночас під час землетрусу на прилеглій до України території Румунії (регіон Вранча) 22.11.2014 р. час у джерелі 19:14 UTC такі сигнали реєструвалися (рис. 3).

Причому зареєстровано дві групи сигналів – спричинені поверхневою сейсмічною хвилею (швидкість хвилі 3,4 км/с), та власне, самим сейсмічним джерелом (швидкість хвилі 334 м/с). Форма сигналу є бухтоподібною, тривалість 3 хвилини. Подібні ефекти спостерігались в Антарктиці [Лящук та ін., 2006b] та іншими інфра звуковими системами, наприклад [Mutschlecner and Whitaker, 2005].

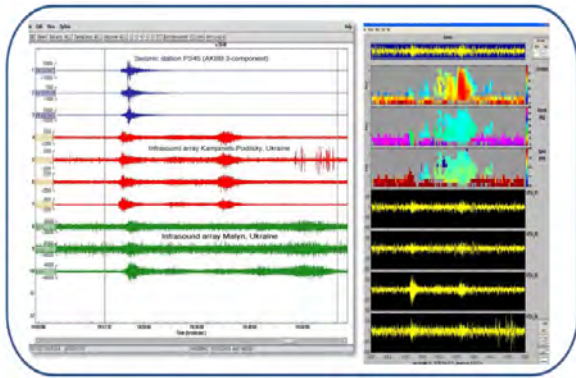


Рис. 3. Ліворуч: хвильові форми сигналів – подій, зареєстрованих сейсмічною трикомпонентною станцією (угорі) та двома інфразвуковими апаратурними групами (внизу) – інфразвуковими станціями Хмельницької (МАОГ-2) та Житомирської областей (МАОГ-1) Праворуч: результат детектувань ПМЗ WinPMCC

Fig. 3. Left. Wave form of registered signals from three-component seismic stations (top) and two infrasound groups (bottom) – infrasound stations Khmelnytsky (MAAG-2) and Zhytomyr (MAAG 1) region. Right. Result of detection by WinPMCC software

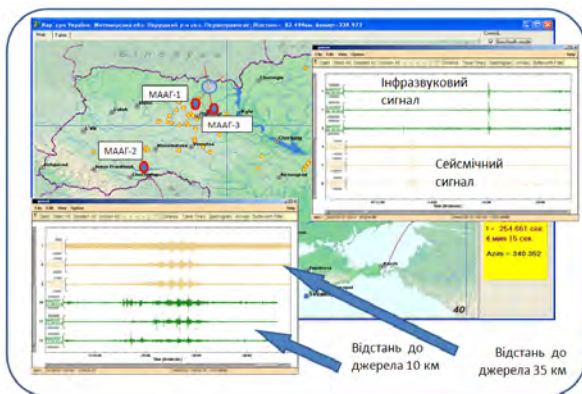


Рис. 4. Схема розміщення МАОГ, та результат локалізації подій за допомогою МАОГ-1 і МАОГ-3. Ліва нижня та права верхня вставки – зареєстровані хвильові форми (інфразвукові та сейсмічні)

Fig. 4. Scheme of MAAG placement and the result of event localization using MAAG-1 and MAAG-3. The left lower and right upper inserts – registered infrasonic and seismic waveforms

За допомогою інфразвукового методу, за наявності кількох просторово рознесених МАОГ, можливо визначити місце події, що продемонстрував експеримент, у якому інфразвукові детектори були розміщені на відстані 10 та 35 кілометрів від джерела звуку (рис. 4). Як таке джерело збурень виступав кар'єр у с. Гранітне, Малинського

району Житомирської області. За результатами оброблення сигналів двох станцій встановлені координати, що мають похибку відносно реального місця події у 6 км. Такий підхід є корисним у разі виникнення надзвичайних подій, що спричинили вибухи, коли сейсмічні ефекти відсутні або дуже малі, і не дають можливості локалізувати джерело.

Наукова новизна і практична значущість

На базі існуючих технічних засобів ГЦСК запропонована нова технологія реєстрації сигналів від сейсмічних подій сейсмо-акустичним комплексом. Як доповнення до сейсмічних датчиків запропоновані малоапертурні акустичні групи, що дають можливість проводити напрямлений моніторинг. Інфразвукові спостереження разом з сейсмічними дають змогу ідентифікувати подію, а у низці випадків додатково визначити параметри джерела сигналу.

Висновки

Встановлено, що за допомогою даних інфразвукових вимірювань можливо проводити верифікацію джерел сейсмічних збурень, а саме промислових вибухів у північно-західній частині України та землетрусів регіону Вранча. Виявлені характеристики (тривалість, форма) основних джерел збурень дозволяють провести класифікацію цих збурень.

Результати інфразвукових спостережень можливо використовувати як додатковий критерій ідентифікації природи сейсмічних подій з певними обмеженнями, що стосуються потужності заряду (магнітуди землетрусу), відстані до джерела сигналу. Впевнена реєстрація інфразвуку від промислових вибухів ведеться малоапертурними групами на відстанях до 200 кілометрів, за умови достатньої потужності (не менше ніж 20 т ТНТ).

У подальшому також необхідне врахування метеорологічної інформації на час проведення реєстрації, що може привести до зменшення похибок за локалізації джерела лише інфразвуковими засобами.

Використання даних інфразвукових вимірювань у режимі, близькому до реального часу, дає змогу застосовувати метод для моніторингу навколишнього середовища, оперативної оцінки події, що відбулася, надання інформації у разі надзвичайних подій (вибухів складів, газопроводів тощо) для служб швидкого реагування. У подальшому планується оцінити енергію події інфразвуковим методом, визначити особливості поширення інфразвуку, визначити амплітудно-частотні характеристики інфразвукових та сейсмічних сигналів.

Література

Асминг В. Э. Анализ инфразвуковых сигналов, генерируемых техногенными источниками /

- В. Э. Асминг, З. А. Евтюгина, Ю. А. Виноградов, Федоров А. В. // Вестник МГТУ. – 2009. – Т. 12, № 2. – С. 300–307.
- Борисенко Л. С. Сейсмогенные зоны платформенной части Украины и Азово-Черноморского региона / Л. С. Борисенко, О. Н. Сафронов, Б. Г. Пустовитенко // Геодинамика и сейсмопрогностические исследования на Украине. – К. : Наук.думка, 1992. – С. 31–41.
- 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. дисс. ... канд. техн. наук / Ю. А. Виноградов. – М. : Ин-т динамики геосфер РАН. – 2004. – 26 с.
- Гордиенко Ю. А. Построение систем акустического группирования для реализации инфразвукового мониторинга / Ю. А. Гордиенко, Е. В. Карягин, А. И. Ляшук, А. И. Солонец // Зб. наук. пр. “Системи обробки інформації”. – Харків : ХУПС. – 2006. – Вип. 3(52). – С. 36–42.
- Дубровин В. И. Совместное использование инфразвуковых и сейсмических данных для повышения точности локализации / В. И. Дубровин, А. А. Смирнов // Вестник НЯЦ РК. – 2011. – Вып. 3. – С. 140–144.
- Евсеев С. В. Интенсивность землетрясений Украины. Сейсмичность Украины / С. В. Евсеев. – К. : Наук. думка, 1969. – 120 с.
- Золотов А. В. Проблема Тунгусской катастрофы 1908 г. / А. В. Золотов. – Минск : Наука и техника, 1969. – 204 с.
- Ляшук А. И. Использование систем группирования акустического метода для обнаружения техногенных звуковых источников / А. И. Ляшук, Е. В. Карягин // Матеріали XV науково-технічної конференції “Наукові проблеми розробки, модернізації та застосування інформаційно-вимірювальних систем космічного і наземного базування”. – Житомир. – 2006а. – С. 85.
- Ляшук О. І. Результати досліджень інфразвукових явищ на українській антарктичній станції “Академік Вернадський” / О. І. Ляшук, Є. В. Карягин, І. Г. Качалін // Матеріали III Міжнародної наукової конференції “Наукові дослідження в Антарктиці”. – К., 2006. – С. 50.
- Ляшук А. И. Применение инфразвуковых и электромагнитных методов для мониторинга землетрясений региона Вранча / А. И. Ляшук // Геодинаміка. – 2011. – № 2(11) – С. 178–180.
- Рибачук О. І. Методика розпізнавання джерел збурень у ближній зоні при використанні акустичної системи геофізичного моніторингу / О. І. Рибачук, В. А. Кирилюк, В. В. Стрінада, О. І. Ляшук, С. І. Клівець // Зб. наук. пр. “Системи обробки інформації”. – Харків : ХУПС. – 2008. – Вип. 1(68).
- Сашук И. Н. Использование малоапертурной акустической группы в составе Международной системы мониторинга / И. Н. Сашук, В. В. Стрінада, И. Г. Качалін, А. И.Ляшук, Е. В. Карягин // Житомир : Зб. наук. пр. ЖВІ НАУ. – 2010. – Вип. 4. – С. 115–122.
- Харитонов О. М. Сейсмичность территории Украины / О. М. Харитонов // Геофиз. журн. – 1996. – Т. 18, № 1. – С. 3–15.
- Arrowsmith, S. J. Arrowsmith M. D., Hedlin M. A. H., and Stump B.W. Infrasonic Signals from Large Mining Explosions. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, Vol. 98, No. 2, pp. 768–777.
- Cansi, Y. An automated seismic event processing for detection and location : the P.M.C.C. method. Geophys. Res. Lett., 1995, 22, pp. 1021–1024.
- Gibbons S. J., Ringdal F. and Kverna T. Joint seismic-infrasonic processing of recordings from a repeating source of atmospheric explosions. J. Acoust. Soc. Am., 2007, 122 (5), DOI : 10.1121 / 1.2784533.
- Hagerty, M. T., Kim W.-Y. and Martysevich P. Infrasound detection of large mining blasts in Kazakhstan. Pure Appl. Geophys., 2002, 159, pp. 1063–1079.
- Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies. Springer editions, 2009, 739 p. DOI 10.1007/978-1-4020-9508-5.
- Le Pichon A., Ceranna L., Pilger C., Mialle P., Brown D., Herry P., Brachet N. The 2013 Russian Fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors. Geophys. Res. Lett., 2013, 40 (14) : 3732. DOI :10.1002/grl.50619.
- McKenna M. H., Stump B. W., Hayek S., McKenna J.R. and Stanton T.R Tele-infrasonic studies of hard-rock mining explosions. J. Acoust. Soc. Am., 2007, 122, pp. 97–106.
- Mutschlechner, J. P., Whitaker R. W. Infrasound from earthquakes. J. Geophys. Res. 2005, 110, D01108, doi 10.1029/2004JD005067.
- Self S. & Rampino M. R. The 1883 eruption of Krakatau. Nature, 1981, 294 (5843) : pp. 699–704. doi :10.1038/294699a0.
- Stump, B. W., Hedlin M. A. H., Pearson D. C. and Hsu V. Characterization of mining explosions at regional distances : implications with the international monitoring system. Rev. Geophys, 2002, 40, 1011, doi 10.1029/1998RG000048.
- Whipple F. J. W. The great Siberian meteor and the waves, seismic and arial, which it produced. Q J R Meteorol. Soc. 1930. 56 : pp. 287–304.
- Young C., Jun M.-S., Joen J.-S. and Min, K.D. Analysis of local seismo-acoustic events in the Korean Peninsula. Geophys. Res. Lett. 2002, 29, 29–1, 10.1029/2001GL014060.
- Zoltan A. D., Shumway R.H., Herrin E.T. Monitoring the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty : Data Processing and Infrasound. Springer, 2002, 278 p. DOI 10.1007/978-3-0348-8144-9.

А. И. ЛЯЩУК

Главный центр специального контроля НЦУИКС ГКА Украины. 1 ул. Космическая 1, пгт. Городок, Радомышльский р-н, Житомирская обл., 12265, Украина, тел. +38(067)5042920, эл. почта alex.liashchuk@lgmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ИНФРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В УКРАИНЕ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЗРЫВОВ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Цель. Целью исследований является определение возможности использования инфразвуковых измерений, проводимых в Украине, для верификации зарегистрированных сейсмических событий, и применение инфразвукового метода как одного из критериев их идентификации. **Методика.** Регистрация сейсмических и инфразвуковых сигналов проводилась с помощью геофизической сети Главного центра специального контроля (ГЦСК). Для регистрации инфразвука использовались малоапертурные акустические системы группирования, позволяющие проводить направленный мониторинг явлений. Обработка сейсмических сигналов велась с применением стандартных процедур, принятых в сейсмологии для определения параметров источника сигнала. Для обработки инфразвуковых сигналов использовался метод прогрессивной мультисканальной корреляции. Отнесение сейсмического и инфразвукового сигнала к одному явлению проводилось на основе рассчитанного с помощью сейсмических данных параметров источника сигнала, времени распространения от него инфразвуковых волн, азимута на источник и формы инфразвуковых сигналов. В случае регистрации инфразвуковых сигналов двумя акустическими группами, проводилось сравнение выдающихся координат и времени в источнике с данным сейсмического мониторинга. **Результаты.** Полученные данные о параметрах 699 сейсмических событий от промышленных взрывов, которые произошли в августе 2014 - марте 2015 года на территории Украины. Зарегистрировано 124 инфразвуковых отзвуки на указанные события. Обнаружены пределы чувствительности и дальности применения инфразвукового метода для такого типа событий. Показана возможность применения двух и более малоапертурных акустических групп для локализации источника сигнала, когда сейсмической информации недостаточно для оценки его параметров. Определенная разница в форме инфразвукового сигнала от промышленного взрыва и землетрясения. **Научная новизна.** На базе существующих технических средств ГЦСК предложена новая технология регистрации сигналов от сейсмических событий сейсмо-акустическим комплексом, что позволяет регистрировать наземные промышленные взрывы на расстоянии до 200 километров, обнаружены характеристики основных источников возмущений, позволяют провести классификацию возмущений. **Практическая значимость.** Инфразвуковые наблюдения вместе с сейсмическими позволяют идентифицировать событие, а в ряде случаев дополнительно определить параметры источника сигнала. Использование данных инфразвуковых измерений в режиме близком к реальному позволяет применять метод для мониторинга окружающей среды, оперативной оценки происшедшего события, предоставление информации в случае чрезвычайных событий (взрывов складов, газопроводов и т.п.) для служб быстрого реагирования. В дальнейшем планируется на оценить энергию события инфразвуковым методом, определить особенности распространения инфразвука, определить амплитудно-частотные характеристики инфразвуковых и сейсмических сигналов.

Ключевые слова: инфразвук; взрыв; землетрясение; идентификация; малоапертурная акустическая группа

O. I. LIASCHUK

Main Center of special Monitoring MCSM of the State Space Agency of Ukraine. 1 Kosmichna st., Gorodok tw. Radomyshlsky district, Zhytomyr region., 12265, Ukraine, Tel. +38 (067) 5042920, e-mail alex.liashchuk@lgmail.com

USING DATA OF INFRASOUND MEASUREMENTS IN UKRAINE FOR EXPLOSIONS AND EARTHQUAKES IDENTIFICATION

Purpose. The purpose of research is to determine the possibility of using of infrasound measurements that carried out in Ukraine for verification of registered seismic events and using of infrasound method as one of the criteria for their identification. **Methodology.** Registration of seismic and infrasonic signals carried out with using of geophysical networks of Main Center of Special Monitoring (MCSM). To register infrasound the small aperture acoustic group systems are used, allowing directional monitoring of events. Processing of seismic signals was carried out using standard procedures adopted in seismology to determine the parameters of the signal source. To handle infrasonic signals method of multi-progressive correlation is used. The assignment of seismic and infrasonic signals to one phenomenon was based on estimated by seismic data source parameters, propagation time of infrasonic waves from it, azimuth to the source and form of infrasonic signals. In case of registration of infrasonic signals by two acoustic groups, the coordinates and time at source compared with data

of seismic monitoring. **Results.** The data on the parameters of 699 seismic events from mining explosions that took place in August 2014 - March 2015 in Ukraine were received. 124 infrasonic response of these events were registered. The limits of sensitivity and range of using of infrasound method for this type of event were determined. The possibility of using of two or more acoustic groups for location of signal source where seismic data is not enough to evaluate its options was described. The difference in the form of infrasound signals from mining explosion and earthquake was determined. **Originality** On the basis of existing facilities MCSM propose new technology of registering signals from seismic events by seismic-acoustic complex that allows you to record ground industrial explosions at a distance of 200 kilometers, identified characteristics of the main sources of perturbations that allow classification of these disturbances. **Practical significance.** Infrasound observations together with seismic enable to identify the event, and in some cases further define the parameters of the source. Using these infrasonic measurements in near real mode allows you to use this method for environmental monitoring, rapid assessment of the events that took place, the provision of information in case of emergencies (explosive depots, pipelines, etc.) for rapid response services. In future it is planned to evaluate energy developments by infrasound method to define the features of infrasound propagation, determine the frequency response of seismic and infrasonic signals.

Keywords: infrasound; explosion; earthquake; identification; small aperture acoustic group

REFERENCES

- Asming V. E., Yevtyugina Z. A., Vinogradov YU. A., Fedorov A. V. *Analiz infrazvukovykh signalov, generiruyemykh tekhnogennymi istochnikami* [Analysis of infrasound signals generated by anthropogenic sources] // Vestnik MGTU [Bulletin of MSTU], 2009, T. 12, no. 2, pp. 300–307 (in Russian).
- Borisenko L. S., Safronov O. N., Pustovitenko B.G. *Seysmogennyye zony platformennoy chasti Ukrainy i Azovo-Chernomorskogo regiona* [Seismogenic zone of the platform part of Ukraine and Azov-Black Sea region]. *Geodinamika i seysmoprognozticheskiye issledovaniya na Ukraine* [Geodynamics and seismic prognostic studies in Ukraine]. Kyiv, Nauk.dumka [Scientific thought Publ.], 1992, pp. 31–41(in Russian).
- Dubrovina V. I., Smirnov A. A. *Sovmestnoye ispol'zovaniye infrazvukovykh i seysmicheskikh dannykh dlya povysheniya tochnosti lokalizatsii* [Sharing infrasound and seismic data to improve the accuracy of localization] / Bulletin NNC RK, 2011, issue 3, pp.140–144.
- Gordiyenko Y. A., Karyagin Y. V., Lyashchuk O. I., Solonets A. I. *Postroyeniye sistem akusticheskogo gruppировaniya dlya realizatsii infrazvukovogo monitoringa* [Design and construction of acoustic grouping for the implementation of infrasound monitoring] Kharkiv:KHUPS. *Sistemy obrobki informatsii* [Information processing system], 2006. issue 3 (52). pp. 36–42 (in Russian).
- Liashchuk O. I., Karyagin Ye. V. *Ispol'zovaniye sistem gruppировaniya akusticheskogo metoda dlya obnaruzheniya tekhnogennykh zvukovykh istochnikov*. [Using acoustic-array systems for the detection of anthropogenic sound sources] Zhitomir, Materiali XV naukovo-tekhnichnoi'konferentsii "Naukovi problemi rozrobki, modernizatsii ta zastosuvannya informatsiyno-vimiryuval'nikh sistem kosmichnogo i nazemnogo bazuvannya" [Materials XV scientific and technical conference "Scientific problems of development, modernization and use of information computing space and ground-based"], 2006a. p. 85 (in Russian).
- Liashchuk O. I. *Primeneniye infrazvukovykh i elektromagnitnykh metodov dlya monitoringa zemletryaseniy regiona Vrancea* [The use of infrasound and electromagnetic methods to monitor earthquakes in the Vrancea region] *Geodinamika* [Geodynamics], 2011, no. 2(11), pp. 178–180 (in Russian).
- Liashchuk O. I., Karyagin Ye. V., Kachalin I. H.. *Rezultaty doslidzhen infrazvukovykh yavlyshch na ukrayinskiy antarktychniy stantsiyi Akademik Vernadskiy* [The results of studies the effects of infrasound on Vernadsky Ukrainian Antarctic station]. Kyiv, *Materialy III Mizhnarodnoyi naukovoyi konferentsiyi „Naukovi doslidzhennya v Antarktytsi”* [Proceedings of III International Conference Research in Antarctica], 2006 b. p. 50 (in Ukrainian).
- Sashchuk I. N., Strinada V. V., Kachalin I. G., Lyashchuk O. I., Karyagin Ye. V. *Ispol'zovaniye maloaperturnoy akusticheskoy gruppy v sostave Mezhdunarodnoy sistemy monitoringa*. [Using a small aperture acoustic group of the International Monitoring System] Zhitomir, *Zbirnik naukovikh prats'* [Collection of scientific papers] ZHVI NAU. 2010, issue 4, pp.115–122 (in Russian).
- Rybachuk O. I., Kyrylyuk V. A., Strinada V. V., Lyashchuk O. I., Klivets S. I. *Metodyka rozpoznavannya dzhherel zburen v blyzhniiy zoni pry vykorystanni akusticheskoyi systemy heofizychnoho monitorynhu* [Method of recognizing sources of disturbances in the near field using geophysical monitoring acoustic system]. Kharkiv: KHUPS, *Sistemy Obrobky informatsiyi* [Information processing systems]. 2008, issue.1(68), pp. 73–77 (in Russian).
- Kharitonov O. M. *Seysmichnost' territorii Ukrainy* [Seismicity in Ukraine]. *Geophysical Journal*. 1996, no.1, vol. 18, pp. 3–15 (in Russian).
- Vinogradov Yu. A. *Kompleksnoye primeneniye seysmicheskogo i infrazvukovogo metodov registratsii volnovykh polei dlya vydeleniya signalov ot nazemnykh vzryvov v protsesse monitoringa prirodnoy sredy v Yevro-Arkticheskoy regione* [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] *avtoreferat dis. kandidata tekhnicheskikh nauk* [abstract dis. candidate of technical sciences]: 25.00.10. Moscow, 2004, *In-t dinamiki geosfer RAN* [Institute of geosphere dynamics RAS], 26 p. (in Russian).
- Yevseyev S. V. *Intensivnost' zemletryaseniy Ukrainy. Seysmichnost' Ukrainy* [The intensity of earthquakes Ukraine. Seismicity of Ukraine]. Kyiv: *Naukova dumka*, 1969, 120 p.. (in Russian).
- Zolotov A. V. *Problema Tungusskoy katastrofy 1908 g.* [The problem of the Tunguska catastrophe in 1908] Minsk, *Nauka i tekhnika* [Science and Technology], 1969, 204p. (in Russian).
- Arrowsmith, S. J., M. D. Arrowsmith, M. A. H. Hedlin, and B. W. Stump. *Infrasonic Signals from Large Mining Explosions*. 2008. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 98, No. 2, pp. 768–777.
- Cansi, Y. *An automated seismic event processing for detection and location: the P.M.C.C. method*. 1995. Geophys. Res. Lett. 22, pp.1021–1024.
- Hagerty, M. T., W.-Y. Kim, and P. Martysevich. *Infrasound detection of large mining blasts in Kazakhstan*. 2002, Pure Appl. Geophys. 159, pp. 1063–0179.
- Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A.. *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. 2009.Springer, 739 p. DOI 10.1007/978-1-4020-9508-5.
- Le Pichon, Alexis; Ceranna, L.; Pilger, C.; Mialle, P.; Brown, D.; Herry, P.; Brachet, N. *The 2013 Russian Fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors*. 2013. Geoph. Res.Let. 40 (14): 3732. DOI:10.1002/grl.50619ю
- McKenna, M. H., Stump, B. W., Hayek, S., McKenna, J. R., and Stanton, T. R. *Tele-infrasonic studies of hard-rock mining explosions*. 2007. J.Acoust. Soc.Am.122, pp. 97–106.
- Mutschlecner, J. P., and R. W. Whitaker. *Infrasound from earthquakes*. 2005. *J. Geophys. Res.* 110, D01108, doi 10.1029/2004JD005067.
- Self, Stephen & Rampino, Michael R. *The 1883 eruption of Krakatau*. 1981. *Nature* **294** (5843): pp. 699–704. doi:10.1038/294699a0.
- Steven J. Gibbons, Frode Ringdal, and Tormod Kværna. *Joint seismic-infrasonic processing of recordings from a repeating source of atmospheric explosions*. 2007. J. Acoust. Soc. Am. 122 (5), DOI: 10.1121/1.2784533.
- Stump, B. W., M. A. H. Hedlin, D. C. Pearson, and V. Hsu. *Characterization of mining explosions at regional distances: implications with the international monitoring system*. 2002. Rev. Geophys. 40, 1011, doi 10.1029/1998RG000048.
- Whipple FJW. *The great Siberian meteor and the waves, seismic and arial, which it produced*. 1930.Q J R Meteorol Soc 56:287–304.
- Young, C., Jun, M.-S., Joen, J.-S., and Min, K. D. *Analysis of local seismo-acoustic events in the Korean Peninsula* 2002. Geophys. Res. Lett.29, 29-1, 10.1029/2001GL014060.
- Zoltan A. Der, Robert H. Shumway, Eugene T. Herrin. *Monitoring the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty: Data Processing and Infrasound*. 2002. Springer, 278 p. DOI 10.1007/978-3-0348-8144-9.

Надійшла 07.04.2015 р.