

## Спосіб ідентифікації природи сейсмічних джерел на основі спектрально-часового аналізу коливань

© Ю. А. Андрущенко, Ю. А. Гордієнко, 2009

Головний центр спеціального контролю, Макарів, Україна

Надійшла 26 лютого 2009 р.

Представлено членом редколегії О. В. Кенззерю

Задача оперативного и своевременного оповещения о сейсмических событиях, которые несут опасность населению и промышленным объектам, требует создания метода автоматической обработки сигнала с целью проведения быстрой и точной идентификации природы сейсмического явления. Возникает необходимость создания способа, который давал бы возможность осуществлять идентификацию природы сейсмических явлений в автоматическом режиме при наличии минимального количества станций, зарегистрировавших сейсмическое событие. В основу такого способа положены различия в изменении амплитуд огибающих сигналов от землетрясений и взрывов в зависимости от частоты. Данный способ заключается в линейной фильтрации входного сигнала набором узкополосных частотных фильтров и вычислении амплитуд огибающих отфильтрованных сигналов. Способ позволяет избежать необходимости определения основных параметров сейсмического сигнала и чрезвычайно важен как еще один критерий идентификации, который можно использовать при комплексном анализе зарегистрированных сейсмических сигналов.

The task of operative and timely notification about seismic events which carry a danger for population and industrial objects requires creation of a method of automatic signal processing with the purpose of conducting quick and exact authentication of nature of the seismic phenomenon. Thus, there is a necessity of creating a method, which would allow carrying out authentication of nature of the seismic phenomena in the automatic mode in case of presence of minimal number of the stations which a seismic event was registered on. As the basis of such a method it is decided to put the differences in the change of amplitudes of by-pass signals from earthquakes and explosions depending on frequency. This method consists in linear filtration of entrance signal by the set of narrow-band frequency filters and calculation of amplitudes of by-pass of the filtered signals. A method makes possible to avoid the necessity of determination of basic parameters of seismic signal and it is extraordinarily important as another criterion of authentication which can be used for the complex analysis of the registered seismic signals.

**Вступ.** Ідентифікація землетрусів і сигналів від джерел будь-якого іншого походження, виявлених мережею сейсмічних станцій, є однією з ключових проблем сейсмічного моніторингу.

Починаючи з 1950-х років питання, пов'язані з ідентифікацією природи сейсмічних джерел, інтенсивно досліджували у багатьох країнах, що володіли достатнім потенціалом у галузі сейсмології та сейсмометрії, — Австралії, Німеччині, Італії, Канаді, Норвегії, Швеції, Швейцарії, Японії та ін.

Можливість відрізнити сейсмічний запис хімічного вибуху від запису землетрусу ґрун-

тується на таких характеристиках цих джерел, як механізм, розміри плейстосейстової зони, час дії та глибина.

Якби Земля була однорідним ізотропним тілом, тоді з урахуванням відмінностей джерел за зазначеними характеристиками, розпізнавання вибухів і землетрусів було б достатньо простим завданням.

Однак наявність у реальному середовищі численних меж поділу різнорідних блоків, тектонічних порушень і неоднорідностей призводить до того, що простий за формою сигнал, який збуджується в джерелі, сильно видозмінюється на шляху поширення до станції. В

результаті відмінності між сейсмічними записами вибухів і землетрусів стають менш чіткими, а сама процедура ідентифікації набуває ймовірнісного характеру [Кедров, 1989].

Однією з основних проблем під час ідентифікації природи сейсмічного джерела є наявність численних промислових хімічних вибухів, які проводять у багатьох країнах. Україна в цьому аспекті не є винятком. Потужність таких вибухів зазвичай становить від одиниць до сотень тонн, що дає змогу виявляти їх в усьому діапазоні регіональних відстаней. Крім того, динамічні характеристики записів сейсмічних вибухів дуже залежать від геолого-тектонічних умов у місті їх проведення, що теж ускладнює ідентифікацію.

Таким чином, для того щоб ефективно розпізнавати тип зареєстрованого сейсмічного явища, необхідно із деякого набору параметрів сейсмічних сигналів вибрати найінформативніші та на їх основі сформувані діагностичні параметри (дискримінанти), які б характеризували джерело і не залежали від сили явища та властивостей середовища на всьому шляху поширення сигналів від джерела до станції.

**Ідентифікація природи сейсмічних джерел.** У праці [Кедров, 2005] докладно розглянуті фізичні основи ідентифікації та основні критерії розділення вибухів і землетрусів.

У таблиці наведені найпоширеніші критерії ідентифікації сейсмічних джерел, їх переваги та недоліки.

В умовах платформної частини території України найефективнішими критеріями ідентифікації є відношення амплітуд хвиль  $S/P$ , зміна спектрів у часі та особливості хвильових форм сейсмічних сигналів. Проте і вони не мають абсолютного характеру, і для багатьох сейсмічних подій поки що неможливо достовірно встановити, чим була подія: вибухом чи землетрусом, ґрунтуючись лише на результатах аналізу сейсмічних записів. Крім того, всі вищезазначені критерії тою чи іншою мірою залежать від властивостей середовища на шляху поширення сигналів.

Отже, надійне розпізнавання землетрусів і вибухів в умовах платформної частини території України є можливим лише за умови виконання низки вимог. Насамперед це наявність достатньо щільної та оснащеної сучасною апаратурою мережі сейсмічних станцій.

Недостатня щільність сейсмічної мережі є однією з основних проблем проведення сейсмічного моніторингу території України націо-

нальними засобами спостереження. До недавнього часу основну увагу сейсмологи приділяли лише районам Закарпаття, гір Вранча та Криму. Це, у свою чергу, визначало специфіку побудови системи сейсмічних спостережень на території України.

На жаль, на сьогодні кількість сейсмічних станцій не дає змоги у повному обсязі та з необхідною якістю виконувати завдання моніторингу всієї території України та, відповідно, достатньо якісно проводити ідентифікацію сейсмічних джерел.

Землетрус відбувається в середовищі, підготованому в результаті дії напружень, накопичених у процесі тектонічної деформації. Чим більший об'єм середовища залучений до процесу підготовки землетрусу, тим вищою буде його магнітуда.

Під час вибухів середовище в місті проведення має, як правило, докритичний рівень напружень, і зі збільшенням потужності вибуху розмір джерела змінюється несуттєво.

Енергія хімічного вибуху передається навколишньому середовищу через хвилю стиску, яка витискає деякий об'єм, пропорційний енергії вибуху, в пружне середовище за межі зони руйнувань. Час радіального зміщення часточок ґрунту при вибуху в пружному середовищі, яке визначає частотну характеристику сигналу, приблизно дорівнює діаметру зони руйнувань, поділеному на швидкість поширення  $P$ -хвилі. В результаті час дії при вибуху потужністю 100 кг становить близько 0,5 с.

За землетрусу швидкість розвитку розлому дорівнює 2—3 км/с, і при  $m_b = 6$  вона на порядок більша, ніж за вибуху. При цьому час розвитку розлому становить 5 с. Тому  $P$ -хвилі за вибухів є більш високочастотними, ніж за землетрусів порівнянної магнітуди [Казахара, 1985].

Зазначені відмінності між землетрусами та вибухами використовують для ідентифікації природи сейсмічних явищ під час досліджень їх специфічної спектрально-часової картини [Землетрясения ..., 2007].

На рис. 1 показано спектрограми сейсмічних сигналів, зареєстрованих трикомпонентною сейсмічною станцією "Малин" від землетрусу в Вінницькій обл. 09.06.2007 р., та промислового вибуху в Вінницькій обл. 25.01.2008 р.

Спектр уджерелі вибуху порівняно із спектром землетрусу є більш високочастотним через відносно малу зміну розмірів вогнища за збільшення потужності вибуху. На рис. 1 видно, що у разі вибуху спектр сигналу знахо-

Критерії ідентифікації сейсмічних джерел

Переваги	Недоліки
Місцезнаходження джерела	
<p>Під час реєстрації сейсмічних хвиль визначають, де розташоване сейсмічне джерело — у сейсмічному або асейсмічному районі. Положення епіцентру явища в асейсмічному районі земної кулі свідчить на користь його техногенної природи</p>	<p>Виявлення слабкого сейсмічного явища у платформному регіоні, який раніше вважали асейсмічним, не дає змоги з необхідною надійністю ідентифікувати це явище як вибух і потребує проведення детальнішого аналізу даних мережі спостережень</p>
Глибина джерела	
<p>Якщо встановлена глибина вогнища — понад кілька кілометрів, однозначно вважають, що природа сейсмічного джерела — землетрус</p>	<p>Для сигналів з невеликою амплітудою визначення глибини вогнища ускладнено. Для ідентифікації вогнищ на малих глибинах слід використовувати додаткові критерії</p>
Напрямок першого руху	
<p>Полярність першого вступу хвилі <math>P</math> для землетрусу набирає одне з двох протилежних значень: зміщення спрямоване або до епіцентру, що відповідає хвилі стиснення, або від нього — хвилі розрідження. Для вибуху — тільки стиснення [Касахара, 1985]. Відмінність вибухів і землетрусів за характером першого вступу поздовжньої хвилі є ефективною за наявності достатньої кількості спостережень на різних азимутах від вогнища та за потужних вибухів</p>	<p>У випадку слабких вибухів перший вступ сигналу може бути не зареєстрований, а наступні хвилі помилково приймають за першу, що призводить до помилкової ідентифікації явища за цим критерієм. Для використання критерію необхідна наявність достатньо щільної та оснащеної сучасною апаратурою мережі сейсмічних станцій</p>
Відмінності у спектральному складі сейсмічного сигналу	
<p>Висока ефективність у разі розміщення спектра сигналу в діапазоні верхніх або нижніх частот, що відповідає вибуху та землетрусу</p>	<p>Для слабких сигналів достовірність ідентифікації істотно залежить від фонових умов</p>
Відношення амплітуд $P$ - і $S$ -хвиль	
<p>Під час вибухів спостерігаються інтенсивніші високочастотні поздовжні хвилі. Для землетрусу характерні низькочастотні поперечні та поверхневі хвилі</p>	<p>Для сигналів з незначною амплітудою використання критерію ускладнено. Для його застосування в автоматичному режимі необхідне вирішення додаткового завдання — автоматичного виявлення та ідентифікації основних типів сейсмічних хвиль</p>

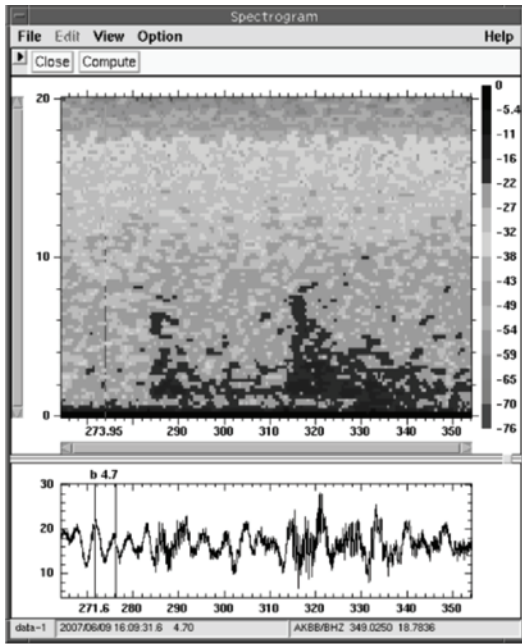
диться у смузі частот близько 18 Гц, а в разі землетрусу — значно нижче — близько 9 Гц.

Проте досить часто спектрограми сейсмічних сигналів від землетрусів і промислових вибухів не мають таких чітких відмінностей (рис. 2), а тому неможливо за їх аналізом однозначно встановити природу сейсмічного явища. Крім того, цей підхід передбачає участь оператора, що, у свою чергу, призводить до деякого суб'єктивізму в оцінці природи сейсмічного джерела, а також може суттєво впливати на час прийняття рішення, що дуже важ-

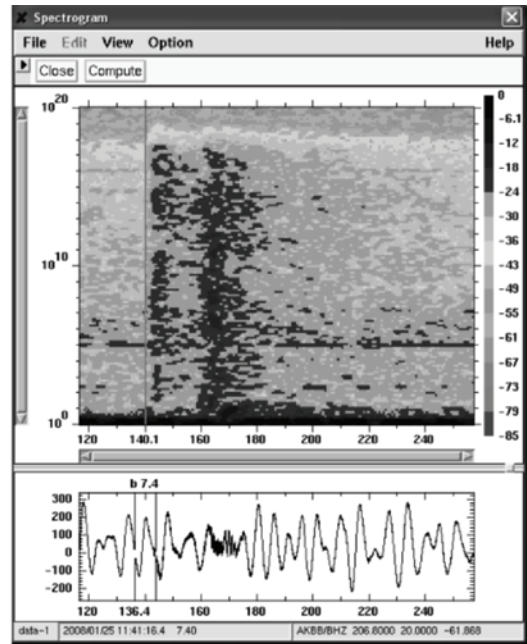
ливо для оперативної обробки матеріалів реєстрації.

Завдання оперативного та своєчасного оповіщення про сейсмічні події, що несуть небезпеку населенню та промисловим об'єктам, потребує створення методу автоматичної обробки сигналу з метою проведення швидкої та точної ідентифікації природи сейсмічного явища.

Під час алгоритмізації існуючих підходів ідентифікації сейсмічних явищ виникають труднощі, пов'язані з необхідністю розв'язан-

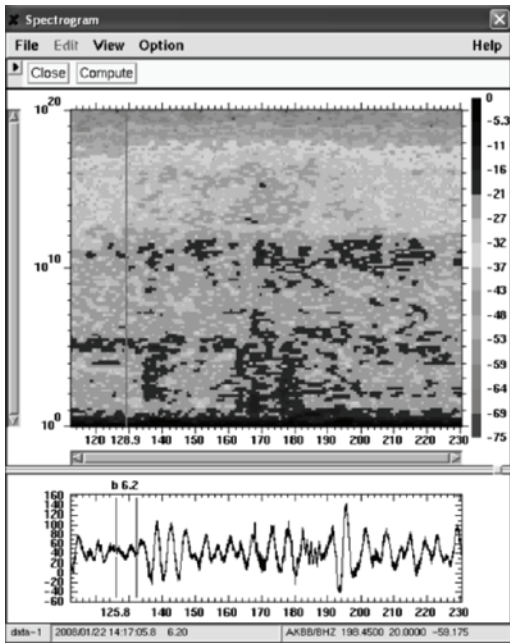


*a*

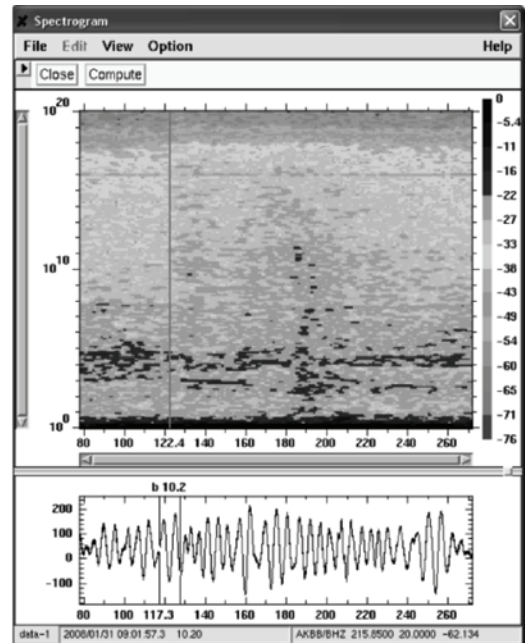


*б*

Рис. 1. Спектрограми сейсмічних сигналів, зареєстрованих трикомпонентною сейсмічною станцією "Малин": *a* — від землетрусу у Вінницькій обл. (09.06.2007 р., 16:09:06, 48,7° пн. ш., 27,6° сх. д.); *б* — від промислового вибуху у Вінницькій обл. 25.01.2008 р.



*a*



*б*

Рис. 2. Спектрограми сейсмічних сигналів, зареєстрованих трикомпонентною сейсмічною станцією "Малин": *a* — від землетрусу у Вінницькій обл. (22.01.2008 р., 14:16:15, 48,59° пн. ш., 29,3° сх. д.); *б* — від промислового вибуху в Кіровоградській обл. (31.01.2008 р., 09:01:39, 48,4° пн. ш., 31,5° сх. д.).

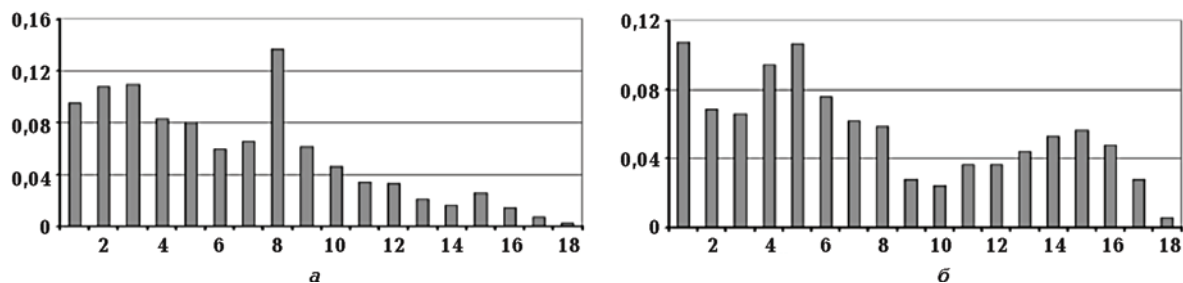


Рис. 3. Розподіл амплітуд обвідної сейсмічних сигналів, зареєстрованих трикомпонентною сейсмічною станцією “Малин”: *a* — від землетрусу у Вінницькій обл. (22.01.2008 р., 14:16:15, 48,59° пн. ш., 29,3° сх. д.); *б* — від промислового вибуху в Кіровоградській обл. (31.01.2008 р., 09:01:39, 48,4° пн. ш., 31,5° сх. д.).

ня додаткових задач — визначення напрямку першого вступу, ідентифікації типів хвиль тощо [Congress, 1988]. При цьому великі труднощі створюють недостатня щільність і неоднорідність мережі сейсмічних спостережень.

Отже, виникає необхідність створення способу, за допомогою якого була б можливість ідентифікувати природу сейсмічних явищ в автоматичному режимі за наявності мінімальної кількості станцій, на яких було зареєстровано сейсмічну подію. В основу такого способу покладено відмінності у зміні амплітуд обвідних сигналів від землетрусів і вибухів залежно від частоти. Цей спосіб полягає у лінійній фільтрації вхідного сигналу набором вузькосмугових частотних фільтрів та обчисленні амплітуди обвідної відфільтрованих сигналів. Спосіб дає змогу уникнути необхідності визначення основних параметрів сейсмічного сигналу.

На першому етапі застосування способу обчислюють нормовані значення  $F_i$  амплітуд обвідної сейсмічного сигналу в діапазоні частот від 1 до 18 Гц:

$$F_i = \frac{S_i}{S}$$

Тут  $F_i$  — нормоване значення амплітуди об-

відної хвильового фрагмента (сигналу або фону) для частоти  $i$ ;  $S_i$  — амплітуда обвідної хвильового фрагмента (сигналу або фону) для частоти  $i$ :

$$S_i = \sum_{k=1}^N G_k,$$

де  $N$  — тривалість сигнальної (фонові) вибірки. Оцінка повної енергії хвильового фрагмента (сигналу або ділянки фону) така:

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^{18} S_i.$$

На рис. 3 показано розподіл амплітуд обвідної сейсмічних сигналів від вибуху та землетрусу за частотою. Як приклад вибрано сейсмічні сигнали від землетрусу у Вінницькій обл. та промислового вибуху в Кіровоградській обл. (див. рис. 2).

Для врахування особливостей фонових умов у районі розташування сейсмічної станції на момент приходу сейсмічного сигналу у такий самий спосіб проводять оцінку розподілу амплітуд обвідної хвильового фрагмента для ділянки мікросейсмічного фону, який передає сейсмічному сигналу. Результати розрахунків наведено на рис. 4.

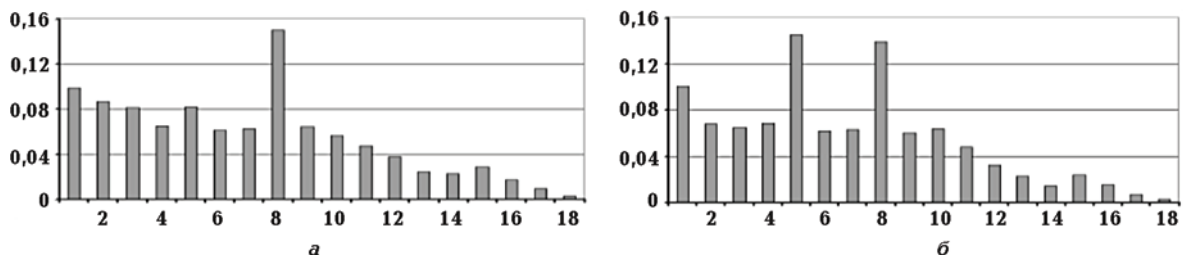


Рис. 4. Розподіл амплітуд обвідної хвильового фрагмента для ділянок мікросейсмічного фону, які передають відповідним сейсмічним сигналам: *a* — землетрус; *б* — вибух.



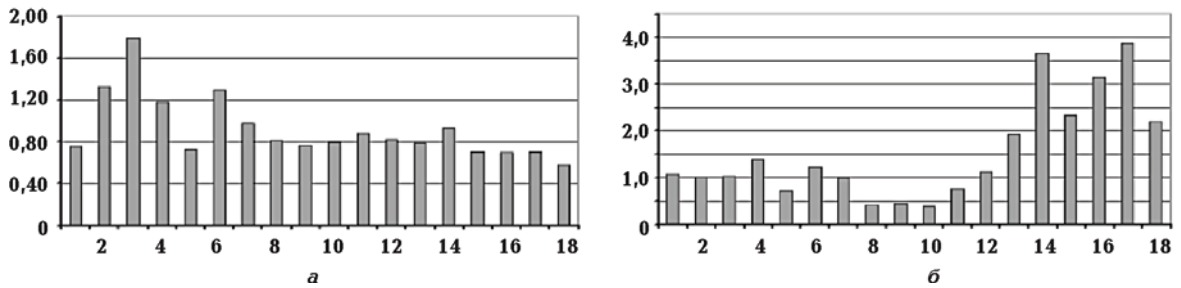


Рис. 5. Розподіл відношення амплітуд обвідних сейсмічних сигналів і ділянок фону, що передують їм, за частотою.

Наступний крок — визначення відношення амплітуд обвідних сейсмічних сигналів і ділянок фону, що передують їм, на відповідній частоті:

$$K_i = \frac{F_i^c}{F_i^{\Phi}},$$

де  $K_i$  — відношення амплітуд обвідних сейсмічних сигналів і ділянок фону, що передують їм, на частоті  $i$ ;  $F_i^c$  — нормоване значення амплітуди обвідної сейсмічного сигналу на частоті  $i$ ;  $F_i^{\Phi}$  — нормоване значення амплітуди обвідної для ділянки фону, що передує сейсмічному сигналу на частоті  $i$ .

На рис. 5 показано розподіл відношення амплітуд обвідних сейсмічних сигналів і ділянок макросейсмічного фону, що передують їм. Як видно з графіків, для землетрусів максимальні значення функції  $K_i$  спостерігаються в діапазоні нижніх частот, тоді як для вибухів функція  $K_i$  набуває своїх максимальних значень у діапазоні верхніх частот.

Для отримання числового коефіцієнта, який би однозначно характеризував природу сейсмічного джерела, знаходимо суму значень  $K_i$  для частот  $i$  в діапазоні 1—9 та 10—18 Гц, після чого обчислюємо їх відношення  $K$ :

$$K = \frac{\sum_{i=10}^{18} K_i}{\sum_{i=1}^9 K_i},$$

при  $K > 1,05$  — вибух;  $0,95 < K < 1,05$  — зона невизначеності;  $K < 0,95$  — землетрус.

**Висновок.** Стрімкий розвиток науки і техніки, а також великий експериментальний матеріал, отриманий в результаті проведення інструментальних сейсмологічних досліджень, дали можливість обґрунтовано стверджувати, що платформна частина території Украй-

ни не є тектонічно пасивною, достатньо рухома, особливо на її окраїнах. Це суттєво змінило підхід до методики та практики моніторингу платформних регіонів.

Для надійного визначення розмірів потенційно сейсмонебезпечних ділянок і реально-го енергетичного рівня землетрусів потрібно організувати систематичні інструментальні спостереження не лише в регіонах, які традиційно вважають сейсмонебезпечними, а й у платформних з метою накопичення статистичних даних щодо слабких місцевих землетрусів.

Особливу увагу слід приділити проведенню інструментальних сейсмічних досліджень у районах розміщення важливих народногосподарських об'єктів. Тут локальні землетруси з невисокою магнітудою у разі малої глибини вогнища на невеликих епіцентральных відстанях можуть створювати значні струси і становити не меншу небезпеку, ніж сильні, але віддаленіші сейсмічні події.

Для оцінки сейсмічності території України необхідно розглядати вплив землетрусів сейсмоактивних або потенційно сейсмоактивних місцевих вогнищевих зон. При цьому надзвичайно актуальною є проблема розрізнення сигналів від землетрусів і сейсмічних джерел іншого походження. Особливо гостро це питання постає під час дослідження сейсмічної активності регіонів, які характеризуються високим рівнем гірничодобувної та іншої антропогенної активності, що генерує сейсмічні хвилі.

У результаті багаторічних досліджень встановлено працездатні критерії, які використовують на практиці для дискримінації вибухів і землетрусів. Проте слід зауважити, що жоден з цих критеріїв не є абсолютним і для найефективнішої ідентифікації природи сейсмічних подій потрібно проводити комплексний аналіз зареєстрованих сигналів з вико-

ристанням усіх існуючих критеріїв. При цьому зі збільшенням кількості критеріїв підвищується ймовірність правильної ідентифікації природи сейсмічного джерела.

В основу розглянутого у статті способу ідентифікації природи сейсмічних подій покладено відмінності у зміні амплітуд обвідних сигналів від землетрусів і вибухів залежно від частоти. Цей спосіб має суттєві переваги порівняно з іншими критеріями ідентифікації:

- можливе використання способу для сейсмічних подій на епіцентральных відстанях  $\Delta < 500$  км за наявності мінімальної кількості станцій, на яких було зареєстровано сейсмічну подію;

- можливе використання способу для ідентифікації природи сейсмічного джерела в автоматичному режимі;

- немає потреби у визначенні типів сейсмічних хвиль та обчисленні основних параметрів, що, у свою чергу, значно зменшує час, необхідний для проведення ідентифікації природи сейсмічної події.

Поряд з цим існує і низка обмежень:

- спосіб може бути реалізований лише для вимірювальних даних з широкосмугових сейсмоприймачів;

- достовірність ідентифікації істотно залежить від фонових умов;

- через недостатню кількість статистичних даних не досліджено ефективність використання способу для сейсмічних подій на епіцентральных відстанях  $\Delta < 100$  км.

Таким чином, можна дійти висновку, що, незважаючи на низку суттєвих переваг, запропонований спосіб не є абсолютним. Проте він надзвичайно важливий як ще один критерій для комплексного аналізу зареєстрованих сейсмічних сигналів. Крім того, ефективність використання цього способу досліджено за результатами спостережень лише на одній сейсмічній станції. З розширенням мережі сейсмічних станцій та облаштуванням їх відповідною широкосмуговою апаратурою ефективність застосування способу істотно підвищиться.

### Список літератури

*Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / Под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Шукина. — Петрозаводск, 2007. — 36 с.*

*Касахара К. Механика землетрясений. — Москва: Мир, 1985. — 264 с.*

*Кегров О. К. Научные и технические основы мониторинга запрещения ядерных испытаний // Комплексные исследования по физи-*

*ке Земли. — Москва: Наука, 1989. — С. 189—203.*

*Кегров О. К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. — Москва; Саранск, 2005. — С. 142—147.*

*U. S. Congress. Seismic verification on nuclear testing treaties // Office of Technology Assessment, OTA-ISC-361. — Washington, 1988. — P. 139.*