

## Визначення глибини джерел сейсмічних подій з використанням даних цифрових каналів Головного центру спеціального контролю та зарубіжних сейсмічних станцій

*Ю. А. Андрущенко, В. І. Осадчий, О. І. Лящук, В. В. Грабченко, 2018*

Головний центр спеціального контролю НЦУВКЗ ДКА України,  
смт Городок, Україна  
Надійшла 10 квітня 2018 р.

Среди основных параметров очага сейсмического события наибольший интерес представляет глубина гипоцентра, которая, как правило, определяется с наименьшей точностью. Знание точного пространственного положения очагов землетрясений позволяет выявлять их связь с особенностями строения земной коры, в первую очередь с активными разломами. Решение этих задач обеспечивается прежде всего использованием материалов наблюдений, полученных с помощью локальных, региональных или глобальных сетей цифровых сейсмических станций, а также путем совершенствования компьютерных технологий и методов обработки цифровых сейсмических данных. Для определения параметров низкоэнергетических сейсмических событий, эпицентры которых находятся в пределах платформенной части территории Украины целесообразно использовать данные инструментальных наблюдений, полученных с помощью региональной сети цифровых сейсмических станций Главного центра специального контроля (ГЦСК) Государственного космического агентства (ГКА) Украины. Для повышения точности локализации очагов сейсмических событий необходимо, с одной стороны, существенное расширение сети сейсмических наблюдений, а с другой — совершенствование методов определения основных параметров землетрясений. Проанализированы основные методы определения глубин гипоцентров сейсмических событий. Рассмотрено программно-математическое обеспечение, что дает возможность уточнять глубины очагов землетрясений по записям отраженных волн и по данным макросейсмических наблюдений. Для оценки глубины сейсмических источников по данным цифровых сейсмических каналов ГЦСК и зарубежных сейсмических станций, амплитудно-частотные характеристики которых есть в ПМЗ «Geotool», разработана специализированная программа «Оценка глубины». Определены зарубежные и отечественные сейсмические станции, наиболее подходящие для уточнения глубин размещения гипоцентров землетрясений из района гор Вранча. Предложен способ определения глубины источника землетрясения из района гор Вранча с использованием данных цифровых сейсмических станций, расположенных на расстоянии 20—40 км от центра сейсмически активной зоны.

**Ключевые слова:** сейсмическая станция, землетрясение, глубина, очаг, годограф, сейсмическая волна, макросейсмические наблюдения.

**Вступ.** Одним з головних завдань при обробці даних сейсмологічних спостережень є максимальне підвищення точності визначення просторового положення і механізмів вогнищ землетрусів. Серед основних параметрів вогнища землетрусу найбільший інтерес становить глибина

гіпоцентру, яку, як правило, визначають з найменшою точністю. Знання точного просторового положення вогнищ сейсмічних подій передусім дає змогу виявляти їх зв'язок з особливостями глибинної будови земної кори, в першу чергу з активними розломами. Для підвищення точності ло-

калізації сейсмічних подій у просторі потрібні, з одного боку, істотне розширення мережі сейсмічних спостережень, а з іншого — розробка і застосування новітніх методів визначення основних параметрів землетрусів. На сучасному етапі розвитку інструментальної сейсмології вирішення цих завдань ґрунтується насамперед на використанні матеріалів спостережень, отриманих за допомогою локальних, регіональних або глобальних мереж цифрових сейсмічних станцій, а також на застосуванні все досконаліших комп'ютерних технологій і методів обробки цифрових даних.

У межах платформної частини території України розташована регіональна мережа цифрових сейсмічних станцій Головного центру спеціального контролю (ГЦСК) Державного космічного агентства України. Дані, отримані за допомогою цієї мережі, використовують, зокрема, для розрахунку енергетичних і просторових параметрів джерел зареєстрованих сейсмічних подій. При цьому виникла нагальна потреба у розробці програмно-математичного забезпечення для визначення глибин сейсмічних джерел.

Водночас були поставлені супутні завдання, а саме: вибір та уточнення глибинних годографів; визначення інтенсивності сейсмічних джерел; розробка рекомендацій щодо оцінювання глибини розміщення джерела з використанням даних цифрових сейсмічних станцій ГЦСК; розробка програмно-математичного забезпечення для розрахунку параметрів джерел за даними цифрових сейсмічних станцій ГЦСК.

**Оцінювання глибини.** Нині у світовій практиці застосовують такі основні методи оцінювання розміщення глибини джерел сейсмічних подій: 1) за першими вступами  $P$ -хвиль; 2) за поверхневими хвилями; 3) за хвилями  $pP$ ,  $sP$ ,  $pS$ ,  $sS$ ; 4) за результатами макросейсмічних спостережень.

**Оцінювання глибини за часами перших вступів  $P$ -хвиль.** За рутинного оцінювання параметрів вогнищ сейсмічних подій у центрах обробки за часами перших вступів  $P$ -хвиль глибину мілкофокусних землетрусів визначають з великими помилками.

Роздільна здатність цього методу, зокрема, не дає змоги оцінювати глибину корових землетрусів [Кедров, 2005].

Метод уточнення оцінки параметрів вогнищ мілкофокусних явищ запропоновано у публікаціях [Auroga, Manekar, 1969; Auroga et al., 1983]. Згідно з цим методом, глибину спочатку оцінюють приблизно, порівнюючи значення дисперсії  $\sigma^2$  при визначенні параметрів вогнища методом ітерацій з кроком 50 км за глибиною. Потім в околі знайденої наближеної оцінки шукають найімовірнішу оцінку глибини при ітераціях з кроком у 5 км, і навіть в 1 км, якщо наближена оцінка відповідає  $h=0$  км. Отримані в ході ітерацій значення  $\sigma^2$  нормують за мінімальним значенням  $(\sigma^2)_{\min}$ ; найімовірніше значення глибини може бути знайдено за інтерполяцією функції  $h=f(\sigma^2)_{\text{норм}}$ . Однак слід зауважити таке: якщо глибина землетрусу менша за 10 км, точність цього методу значно знижується. Тому зазначену процедуру можна розглядати лише як допоміжну.

**Оцінювання глибини за поверхневими хвилями.** Основою для визначення глибин джерел віддалених землетрусів за поверхневими хвилями є залежність від неї динамічних характеристик поля поверхневих хвиль Релея основного тону і обертона. За записом землетрусу на вертикальній складовій слід визначити найбільшу амплітуду в максимальній фазі основного тону хвиль Релея —  $A_R$  і найбільшу амплітуду в обертоні хвилі Релея —  $A_0$ .

Основний тон хвилі Релея на сейсмограмах спостерігають після хвиль групи  $S$  у вигляді неправильних диспергуючих коливань великого періоду, які переходять у правильні коливання з головною максимальною фазою, яку позначають  $M_R$ . Виділення фази  $M_R$  неглибокого землетрусу не викликає труднощів. У разі глибокого землетрусу, коли амплітуда зміщення у фазі  $M_R$  різко падає, для надійнішого виділення фази потрібно використовувати її годограф  $M_R$ .

Перед основним тоном хвиль Релея на сейсмограмі спостерігаються обертони, вступ яких позначають через  $R_{xi}$ . Ці коливання порівняно короткого періоду

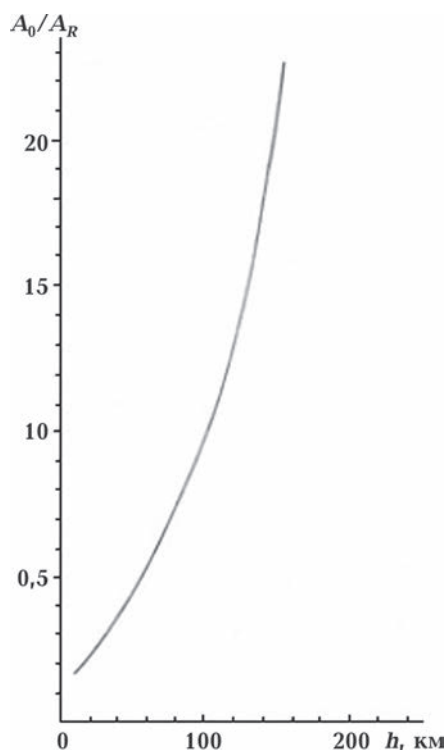


Рис. 1. Визначення глибини джерела землетрусу щодо максимальних амплітуд обертона  $A_0$  і основного тону  $A_R$  у хвилі Релея.

близькі до синусоїдальних, вони створюють диспергуючі групи, подібно до хвилі Релея основного тону. Обертони мають періоди від 5 до 13 с.

Відносна інтенсивність зміщення в обертонах порівняно з інтенсивністю зміщення основного тону значно зростає зі збільшенням глибини джерела землетрусу.

Найбільше з усіх максимальних значень амплітуд, заміряних для виділених груп  $R_{xi}$  (обертонів), відносять до  $A_0$ .

Для визначення глибини джерела за спостереженнями поверхневих хвиль Релея основного тону і обертона використовують графік залежності  $A_0/A_R=f(h)$  (рис. 1) [Інструкція, 1982].

Виділення поверхневих хвиль можливе на сейсмограмах, записаних на широко-смугових (довгоперіодних) сейсмічних каналах і від сигналів мілкофокусних землетрусів. Похибка визначення глибини становить 10 км.

Для визначення глибини розміщення джерела землетрусу ( $h$ ) необхідно провести такі етапи обробки: якісний аналіз запису; виділення та ідентифікацію хвиль, відбитих поблизу епіцентру ( $pP$ ,  $sP$ ,  $pS$ ,  $sS$ ); обробка поверхневих хвиль.

Характерною ознакою запису глибокофокусного землетрусу є чіткі та інтенсивні вступу об'ємних хвиль  $P$  і  $S$  і, як правило, порівняно малі амплітуди поверхневих хвиль. Хвиля  $S$  із збільшенням глибини землетрусу стає чіткішою.

Наступною особливістю запису глибокофокусного землетрусу є наявність чітких, відбитих поблизу джерела хвиль ( $pP$ ,  $sP$ ,  $pS$ ,  $sS$ ), які вступають після хвиль  $P$  і  $S$  відповідно в інтервалі 1—4 хв. Для мілкофокусного землетрусу характерні чітко виражені поверхневі хвилі. Перші вступу переважно менш чіткі (рис. 2).

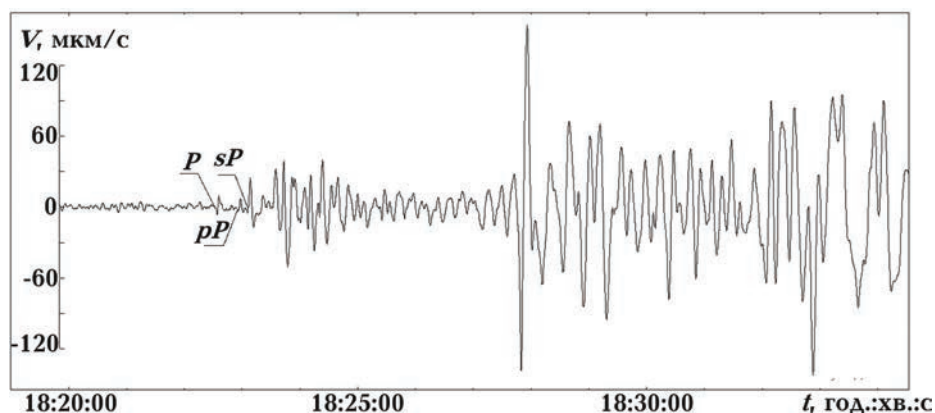


Рис. 2. Запис (велосиграма) землетрусу на території Афганістану 22.11.2015 р. ( $h=100$  км), отриманий з використанням вертикальної компоненти трикомпонентного сейсмоприймача Української сейсмічної групи.

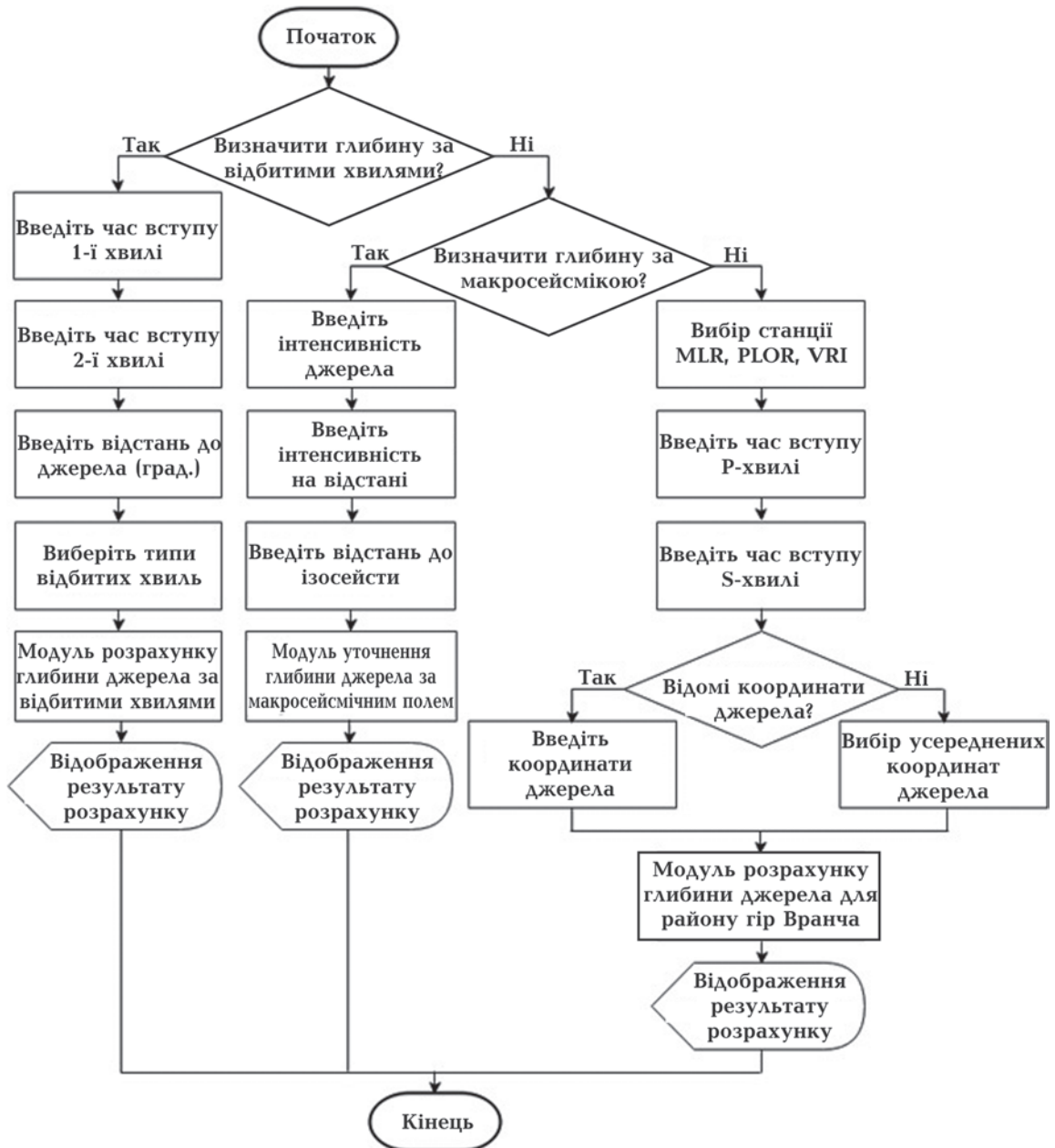


Рис. 3. Блок-схема алгоритму програми «Оцінка глибини».

### Оцінювання глибини за хвилями $pP$ , $sP$ .

Відбиті поблизу епіцентру явища хвилі  $pP$  та  $sP$  використовують у сейсмологічній практиці для уточнення глибини вогнища землетрусу. Часовий зсув  $\Delta t$  між вступами хвиль  $pP$  визначають із співвідношення

$$\Delta t = 2h/v_p,$$

де  $v_p$  — швидкість поширення  $P$ -хвилі.

Значення  $\Delta t$  для хвиль  $pP$  та  $sP$  зале-

жать від глибини джерела і практично не пов'язані з епіцентральною відстанню.

Для слабких мілкофокусних землетрусів процедура виділення приджерельних відбитих хвиль суттєво ускладнюється. Для покращання умови виявлення хвиль  $pP$  і  $sP$  використовують методи, які ґрунтуються на детальнішому аналізі запису  $P$ -хвиль:

1) поляризаційний метод — застосування гостроспрямованої фільтрації триком-

понентного запису цуга поздовжніх хвиль на джерело;

2) метод деконволюції — врахування амплітудно-частотної характеристики сейсмометра і усунення впливу поглинання на високочастотні складові сигналу на шляху від джерела до станції з використанням імпульсного фільтра;

3) спектральний метод — оцінювання різниці хвиль  $pP$ — $P$  за мінімумом у спектрі початкової ділянки запису телесеїсмічних поздовжніх хвиль [Cohen, 1970; Kulhanek, 1971];

4) кепстральний метод — обернене перетворення Фур'є логарифма енергетичного спектра сигналу [Ulrych, 1971; Канаевич, 1985].

**Оцінювання глибини за результатами макросейсмічних спостережень.** Макросейсмічно глибину оцінюють, як правило, за допомогою двох незалежних способів:

- за спадом бальності;
- за відношенням бальності в епіцентрі і магнітуди.

Для визначення глибини використовують ізосейсти [Новий..., 1977].

Глибини для трьох ізосейст ( $i$ -ї,  $k$ -ї,  $l$ -ї) визначають за формулами:

$$\begin{aligned} 1/v &= \log(\Delta_l^2 - \Delta_k^2) / (\Delta_k^2 - \Delta_i^2), \\ I_i > I_k > I_l, \quad I_i - I_k &= I_k - I_l = 1, \\ 2/v &= \log(\Delta_l^2 - \Delta_k^2) / (\Delta_k^2 - \Delta_i^2), \\ I_l, I_i - I_k &= I_k - I_l = 1, \\ h &= \sqrt{(\Delta_k^4 - \Delta_l^2 \Delta_i^2) / (\Delta_l^2 + \Delta_i^2 - 2\Delta_k^2)}. \end{aligned}$$

Для чотирьох ізосейст ( $i$ -ї,  $k$ -ї,  $m$ -ї,  $l$ -ї) маємо:

$$\begin{aligned} 1/v &= \log(\Delta_l^2 - \Delta_k^2) / (\Delta_m^2 - \Delta_i^2), \\ I_i > I_k > I_m > I_l, \quad I_i - I_k &= I_m - I_l = 0,5, \\ 2/v &= \log(\Delta_l^2 - \Delta_k^2) / (\Delta_m^2 - \Delta_i^2), \\ I_l, I_i - I_k &= I_m - I_l = 1, \\ h &= \sqrt{(\Delta_k^2 \Delta_m^2 - \Delta_l^2 \Delta_i^2) / ((\Delta_l^2 + \Delta_i^2) - (\Delta_k^2 + \Delta_m^2))}. \end{aligned}$$

Для оцінювання глибини сейсмічних джерел за даними цифрових сейсмічних

каналів ГЦСК і зарубіжних сейсмічних станцій, амплітудно-частотні характеристики яких є в ПМЗ «GEOTOOL», розроблено спеціалізовану програму «Оцінка глибини» (рис. 3).

Програма складається із окремих блоків: – визначення глибини джерела за реєстрацією відбитих хвиль;

– оцінювання глибини джерел з території Румунії за даними станцій MLR, VRI та PLOR;

– уточнення глибини з використанням рівняння макросейсмічного поля.

Хвиля  $pP$  виділяється на епіцентральноїх відстанях  $\Delta \geq 2^\circ$ , на вертикальній складовій сейсмічного запису. За формою та періодом вона подібна до  $P$ -хвилі, але, як правило, має меншу амплітуду [Інструкція..., 1982]. Хвилю  $sP$  можна виділити на епіцентральноїх відстані  $\Delta \geq 2^\circ$ . Краще вона буває помітна на вертикальній складовій сейсмічного запису. Особливості виникнення хвилі  $sP$  приводять до того, що амплітуда цієї хвилі може перевищувати амплітуду хвилі  $P$ , що передує їй. Важливою ознакою хвилі  $sP$  є те, що її період завжди помітно більший за період хвилі  $P$ . Хвиля  $sS$  виділяється на епіцентральноїх відстанях  $\Delta \geq 2^\circ$ . Достатньо чітко вона проявляється на горизонтальній складовій сейсмічного запису. Періоди хвиль  $sS$  співрозмірні з періодами хвиль  $S$ . Хвилю  $pS$  виділяють на епіцентральноїх відстанях  $\Delta > 20^\circ$  [Інструкція..., 1982].

Для виділення глибинних хвиль на запису залежно від епіцентральноїх відстані до джерела рекомендовано використання таких смуг частот:

1) для сейсмічних хвиль  $pP$  на вертикальних сейсмічних каналах: 0,5—1,5 Гц для епіцентральноїх відстані 1—5°; 0,1—1,5 Гц для епіцентральноїх відстані 5—10°; 0,05—0,13 Гц для епіцентральноїх відстані 10—35°; 0,01—0,1 Гц для епіцентральноїх відстані  $\geq 35^\circ$ ;

2) для сейсмічних хвиль  $sP$  на горизонтальних каналах 0,01—0,1 Гц.

Запропоновано також спосіб визначення глибини джерела землетрусу гір Вранча (Румунія) з використанням даних цифро-

вих станцій MLR, VRI та PLOR, які знаходяться на відстані від центра сейсмічно активної зони гір Вранча 40 і 20 км відповідно, а діапазон глибин джерела варіює в інтервалі 50—160 км. Сутність способу полягає в тому, що за допомогою ПМЗ «Geotool» визначають час вступу сейсмічних хвиль  $P$  і  $S$  ( $t_P$  і  $t_S$ ), а також різницю вступів:  $\Delta t(c) = t_S - t_P$ . Далі визначають відстань від джерела до станції за формулою

$$\Delta(\text{км}) = \Delta t V_P V_S / (V_P - V_S),$$

де  $v_P$  — швидкість поширення хвилі  $P$  (км/с);  $v_S$  — швидкість поширення хвилі  $S$  (км/с).

Швидкість поширення хвиль  $P$  і  $S$  від джерел землетрусів з району гір Вранча становить  $V_P \approx 7,2254$  км/с,  $V_S \approx 4,1391$  км/с. Тоді формула розрахунку відстані до джерела набуває вигляду

$$\Delta(\text{км}) = \Delta t / 0,1032.$$

Визначивши координати джерела та епіцентральною відстань до станцій MLR, VRI та PLOR (відповідно  $\Delta_1$  та  $\Delta_2$ ), глибину джерела отримуємо за формулою

$$h(\text{км}) \approx \sqrt{\Delta_1^2 - \Delta_2^2}.$$

Цей спосіб реалізований як окремий блок у програмі «Оцінка глибини».

Окремим блоком у програмі «Оцінка глибини» реалізовано уточнення глибини з використанням рівняння макросейсмічного поля.

Використавши загальне рівняння макросейсмічного поля (рівняння Шебаліна), що пов'язує бальність у деякій точці  $I_i$  з магнітудою  $M$ , відстанню до  $i$ -ї ізосейсти  $\Delta_i$ , глибиною джерела  $h$ , запишемо

$$I_i = bM - v \log \sqrt{\Delta^2 + h^2} + c.$$

Інтенсивність в епіцентрі:

$$I_0 = bM - v \log h + c,$$

де  $b$ ,  $v$ ,  $c$  — константи (у середньому  $b=1,5$ ,  $v=3,5$ ,  $c=3,0$ ).

$$I_0 - I_i = v \log \sqrt{1 + \Delta^2 / h^2}.$$

Наведемо модифіковане рівняння макросейсмічного поля Блейка—Шебаліна:

$$I_0 = I_i + 0,5v \log \left( 1 + \Delta^2 / h^2 \right),$$

$$h = \Delta / \sqrt{10^{2(I_0 - I_i)/v} - 1}.$$

При  $b=1,5$ ,  $v=3,5$ ,  $c=3,0$  формула для оцінювання глибини має вигляд

$$h = \Delta / \sqrt{10^{(I_0 - I_i)0,57} - 1}.$$

Глибину вогнища землетрусу в районі Вранча,  $b=1,9$ ,  $v=4,8$ ,  $c=5,0$  розраховуємо за формулою

$$h = \Delta / \sqrt{10^{(I_0 - I_i)0,47} - 1}.$$

**Висновки.** Точність визначення глибини джерела за інструментальними даними при використанні різних методів, які застосовують для локації епіцентру, залежить від місцезположення станції або станцій відносно джерела.

При локалізації епіцентру точність визначення глибини залежить від ступеня оточення епіцентру сейсмостанціями і від наявності хоча б однієї станції на відстані, співрозмірній з глибиною джерела.

Глибина, визначена за інструментальними даними, має лінійну похибку, за макросейсмічними даними — логарифмічну. Таким чином, визначивши глибину за макросейсмічними даними, отримуємо лише орієнтовні результати.

Досвід визначення глибини розміщення вогнищ землетрусів за результатами обробки інструментальних даних у ГЦСК показав, що спосіб визначення глибини джерела землетрусу за різницею вступів хвиль  $pP$  і  $P$ ,  $sP$  і  $P$  є найефективнішим.

Одним з основних напрямів розвитку прикладних досліджень у сфері визначення параметрів землетрусів має бути вдосконалення алгоритмів визначення глибин землетрусів.

## Список літератури

- Инструкция о порядке производства и наблюдений на сейсмических станциях единой системы сейсмических наблюдений СССР. Москва: Изд. ИФЗ АН СРСР, 1982. 135 с.
- Канасевич Э. Р. Анализ временных последовательностей в геофизике. Москва: Недра, 1985. 399 с.
- Кедров О. К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. Москва, Саранск: Изд. Института физики Земли РАН, 2005. С. 112, 161—172.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. Ред. Н. В. Кондорская, Н. В. Шебалин. Москва: Наука, 1977. С. 20, 24, 32, 33.
- Arora, S. K., & Manekar, A. M., (1969). Precise determination of epicenters of surface focus seismic events. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 59(2), 777—788.
- Arora, S. K., Basu, T. K., & Krishnan, C. A., (1983). Source depth as a useful parameter in the discrimination of earthquakes and underground explosions. *Tectonophysics*, 91(1-2), 29 — 52.
- Cohen, T. J., (1970). Source-depth determination using spectral, pseudo-auto correlation and cepstral analysis. *Geophysical journal of the Royal Astronomical Society*, 20, 223—231.
- Kulhanek, O., (1971). P-wave amplitude spectra of Nevada underground nuclear explosions. *Pure and Applied Geophysics*, 88(1), 121—136.
- Ulrych, T. J., (1971). Application of homomorphic deconvolution to seismology. *Geophysics*, 36(4), 650—660. <https://doi.org/10.1190/1.1440202>.

## Definition of the depth of seismic events by using digital channel data of the Main center of special control and foreign seismic stations

**Yu. A. Andrushchenko, V. I. Osadchy, A. I. Lyashchuk, V. V. Grabchenko, 2018**

Among the main parameters of the source of the seismic event, the depth of the hypocentre is of greatest interest, which, as a rule, is determined with the least accuracy. The knowledge of the exact spatial position of the earthquake foci makes it possible to reveal their connection with the features of the structure of the earth's crust, primarily with active faults. The solution of these problems is primarily ensured by the use of observational data obtained with the help of local, regional or global networks of digital seismic stations, as well as by improving computer technologies and methods of processing digital seismic data. To determine the parameters of low-energy seismic events, the epicenters of which are located within the platform part of the territory of Ukraine, it is expedient to use the data of instrumental observations obtained with the help of the regional network of digital seismic stations of the Main Center for Special Control (MCSK) of the State Space Agency of Ukraine. To increase the accuracy of localization of seismic events, it is necessary, on the one hand, to significantly expand the network of seismic observations, and on the other, to improve the methods for determining the basic parameters of earthquakes. The article analyzes the basic methods for determining the depths of the hypocenters of seismic events. The program-mathematical support allowing to make the depths of the earthquake foci by records of reflected waves and from the data of macroseismic observations is considered. To estimate the depth of seismic sources from the data of digital seismic channels of the MCSK and foreign seismic stations, the amplitude-frequency characteristics of which are available in the «Geotool», a specialized program «Assessment of depth» has been developed. A number of foreign and domestic seismic stations, most suitable for clarifying the depths of hypocenters of earthquakes from the area of the Vrancea Mountains, has been determined. A method for determining the depth of an earthquake source from the area

of the Vranč Mountains using data from digital seismic stations located at distances of 20—40 km from the center of a seismically active zone is proposed.

**Keywords:** seismic station, earthquake, depth, focus, hodograph, seismic wave, macroseismic observation.

### References

- Instruction on the order of production and supervision of seismic stations of the USSR's seismic survey system. Moscow: Publ. house. Institute of Earth Physics, USSR Academy of Sciences (in Russian).
- Kanasevich, E. R., (1985). *Analysis of time sequences in geophysics*. Moscow: Nedra (in Russian).
- Kedrov, O. K., (2005). *Seismic control methods for nuclear testing* (pp. 112, 161—172). Moscow, Saransk: Ed. Institute of Physics of the Earth RAS (in Russian).
- Kondorskaya, N. V., & Shebalin, N. V. (Eds.). (1977). *New catalog of strong earthquakes on the territory of the USSR* (pp. 20, 24, 32, 33). Moscow: Nauka (in Russian).
- Arora, S. K., & Manekar, A. M., (1969). Precise determination of epicenters of surface focus seismic events. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 59(2), 777—788.
- Arora, S. K. Basu, T. K., & Krishnan, C. A., (1983). Source depth as a useful parameter in the discrimination of earthquakes and underground explosions. *Tectonophysics*, 91(1-2), 29 — 52.
- Cohen, T. J., (1970). Source-depth determination using spectral, pseudo-auto correlation and cepstral analysis. *Geophysical journal of the Royal Astronomical Society*, 20, 223—231.
- Kulhanek, O., (1971). P-wave amplitude spectra of Nevada underground nuclear explosions. *Pure and Applied Geophysics*, 88(1), 121—136.
- Ulrych, T. J., (1971). Application of homomorphic deconvolution to seismology. *Geophysics*, 36(4), 650—660. <https://doi.org/10.1190/1.1440202>.