

## УТОЧНЕННЯ ВЗАЄМНОГО РОЗТАШУВАННЯ ПОВТОРНИХ ЗЕМЛЕТРУСІВ У ЗАКАРПАТТІ ЗА ДАНИМИ ОДНІЄЇ СЕЙСМІЧНОЇ СТАНЦІЇ

За допомогою алгоритму, створеного на основі припущення про те, що ступінь взаємної кореляції між записами повторних подій на одній і тій самій станції зменшується експоненціально із збільшенням відстані між їхніми джерелами, було визначено взаємне розташування вогнищ двох груп повторних землетрусів мукачівської серії 2005–2006 рр., які у кожній із цих груп утворили майже плоску поверхню. У результаті застосування алгоритму до сукупного набору коефіцієнтів кореляції цих груп виявилось, що їхні вогнища теж належать до єдиної площини, а взаємне розташування вогнищ дуже схоже на визначене раніше в [Гнип, 2010] із використанням уточнених відносних вступів фаз і станційних поправок.

**Ключові слова:** повторні землетруси; коефіцієнт кореляції; відносний вступ; релокація; механізм вогнища.

Найчастіше схожість хвильових форм повторних землетрусів використовують з метою визначення дуже точних відносних вступів фаз, що при подальшій релокації часто дає вражаючі результати – початкові дифузні хмарки гіпоцентрів перетворюються на чіткі обриси місцевих тектонічних структур [Shearer, 2005]. Утім, як зазначають [Menke *et al.*, 1999], коефіцієнти кореляції між записами повторних землетрусів на одній і тій самій станції, які є кількісною мірою їхньої схожості, є водночас і мірою відстані між їхніми вогнищами і спадають експоненціально із її збільшенням – за наборами коефіцієнтів кореляції між записами групи повторних подій лише на одній сейсмічній станції можна таким чином відновити і взаємне розташування їхніх вогнищ.

У результаті релокації вогнищ трьох груп, А, В і С, повторних землетрусів мукачівської серії 2005–2006 років [Сейсмологический..., 2006, 2007] з використанням уточнених відносних вступів і станційних поправок в [Гнип, 2009, 2010] вони розташувалися у майже вертикальній площині вздовж азимута  $\sim 120^\circ$ , яка майже збіглася з площиною скиду, визначеного для них механізму вогнища. Однак, оскільки механізм був обмежений лише мінімальною кількістю полярностей перших вступів імовірність випадкового характеру розташування релокованих вогнищ в єдиній площині залишалася остаточно не виключеною. Утім, таблиці коефіцієнтів кореляції між записами землетрусів, за якими визначалися відносні вступу в [Гнип, 2009, 2010], можна було використати і для прямого визначення відносного розташування їхніх вогнищ на основі припущення [Menke *et al.*, 1999]. З цією метою було розроблено алгоритм і програму, випробування якої на тестових прикладах, коли замість коефіцієнтів кореляції між справжніми записами використовувалися коефіцієнти, обчислені за залежністю [Menke *et al.*, 1999] для різних варіантів взаємного розташування вогнищ у просторі, довело здатність програми точно відновлювати їх з будь-яких випадковим чином заданих початкових координат.

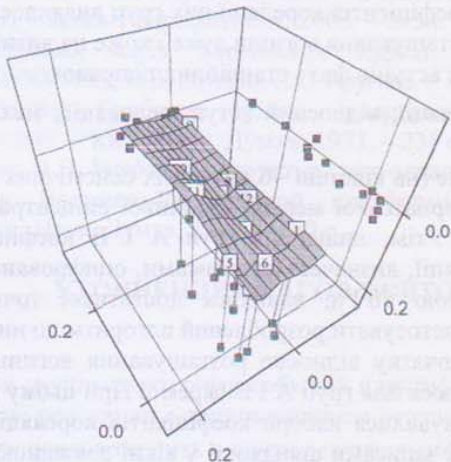
Найповніші набори коефіцієнтів кореляції між записами мукачівських землетрусів були наявні на самій же станції Мукачеве, розташованій най-

ближче (на відстані  $\sim 6$  км) з усіх сейсмічних станцій Карпатської мережі від їхньої епіцентральної зони. Утім, лише для груп А і В коефіцієнти кореляції, визначені за записами, оцифрованими з частотою 50 Гц, виявилися достатньої точності, щоб застосувати розроблений алгоритм до них.

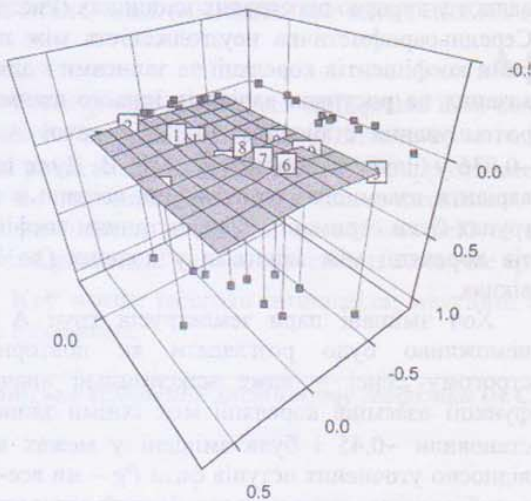
Спочатку відносне розташування вогнищ визначалося для груп А і В окремо. При цьому використовувалися набори коефіцієнтів кореляції між їхніми записами швидкості у вікні довжиною 3 с і з початком за 1 с до уточненого вступу фази  $Pg$ , обчислені раніше в [Гнип, 2010]. Варіанти взаємного розташування вогнищ, визначені для різних випадковим чином заданих початкових координат, виявили стійку тенденцію до збіжності і практично не відрізнялися між собою в кожній із груп. Мало того, в обох групах вогнища розташувалися у виразно окреслених площинах (Рис. 1, 2). Середньоарифметична неузгодженість між наборами коефіцієнтів кореляції за записами і для показаних на рисунках варіантів їхнього взаємного розташування становила  $\sim 0,018$  в групі А і  $\sim 0,036$  у більш різноманітній групі В. Дуже схожі варіанти взаємного розташування вогнищ в обох групах були отримані з використанням коефіцієнтів кореляції між записами у довгих (до 20 с) вікнах.

Хоч змішані пари землетрусів груп А і В неможливо було розглядати як повторні у строгому сенсі – адже максимальні значення функції взаємної кореляції між їхніми записами становили  $\sim 0,45$  і були зміщені у межах вікна відносно уточнених вступів фази  $Pg$  – ми все-таки спробували застосувати розроблений алгоритм до набору коефіцієнтів кореляції між записами обох груп. Середньоарифметична неузгодженість між коефіцієнтами кореляції за записами і для визначеного із застосуванням алгоритму взаємного розташування вогнищ обох груп, показаного на Рис. 3, становила  $\sim 0,024$  і була меншою ніж окремо в групі В. І цього разу варіанти взаємного розташування, визначені для різних початкових координат, виявили стійку тенденцію до збіжності і практично не відрізнялися між собою. Вогнища обох груп знову розташувалися у майже плоскій поверхні, яка до того ж виявилася дуже схожою на

ту, що була визначена в [Gnur, 2010] шляхом релокації із використанням уточнених відносних вступів і станційних поправок (Рис. 3). Варто також зазначити, що відносне розташування вогнищ всередині груп залишилося майже таким самим, як і визначене раніше в кожній із груп зокрема.



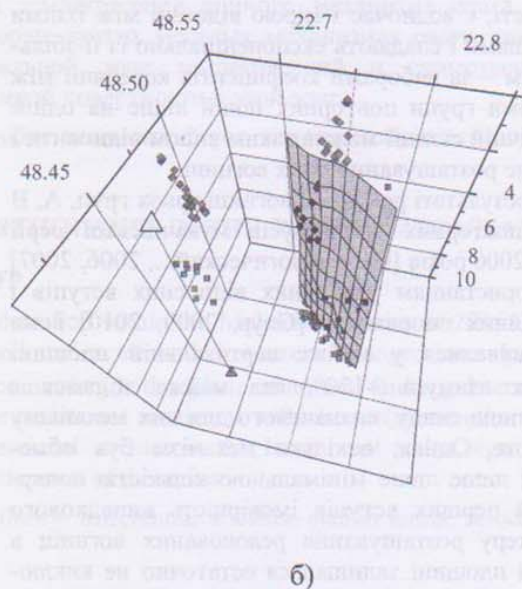
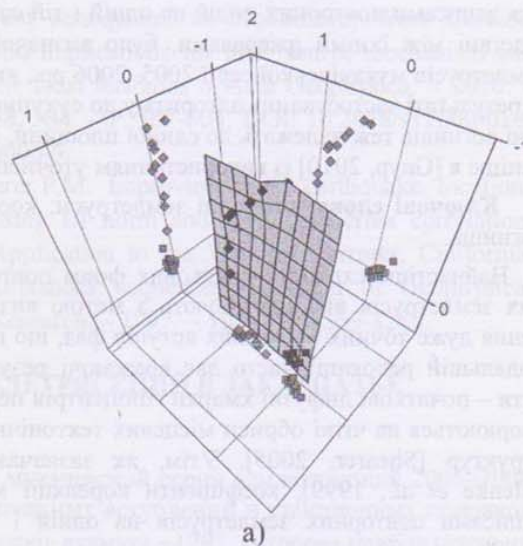
**Рис. 1.** Взаємне розташування вогнищ землетрусів групи А, визначене за коефіцієнтами кореляції між їхніми записами на сейсмічній станції Мукачеве, апроксимоване поверхнею, побудованою за методом кореляційних сіток [Davis, 1986]



**Рис. 2.** Взаємне розташування вогнищ землетрусів групи В, визначене за коефіцієнтами кореляції між їхніми записами на сейсмічній станції Мукачеве

Результат, який полягає у тому, що вогнища повторних землетрусів виявляють тенденцію до розташування в єдиній площині, можна вважати доволі тривіальним (Рис. 1, 2). Дійсно, якби площина розриву у цих землетрусах не збігалася, навряд чи вони були повторними. З іншого боку, цей результат можна вважати підтвердженням – хоч і непрямым – припущення про те, що коефіці-

єнти кореляції між записами повторних землетрусів є мірою відстані між їхніми вогнищами [Menke *et al.*, 1999], а також ефективності побудованого на цій основі алгоритму визначення їхнього взаємного розташування.



**Рис. 3.** Взаємне розташування вогнищ землетрусів груп А+В, визначене: а) за величиною коефіцієнтів кореляції між їхніми записами на станції Мукачеве; б) шляхом релокації в [Gnur, 2010]; трикутник – сейсмічна станція Мукачеве (MUKU), вертикальний масштаб – кілометри, горизонтальний – градуси північної широти і східної довготи. Квадратики – вогнища групи А, ромбики – В.

менш тривіально виглядає результат, отриманий при застосуванні алгоритму до сукупного набору коефіцієнтів кореляції між записами груп А+В. Вогнища цих груп – хоч і не становлять єдиної групи повторних подій – теж розташувалися в єдиній площині. Мало того, взаємне розташування вогнищ виявилось дуже схожим на

визначене в [Gnyp, 2010] шляхом релокації вогнищ обох груп із використанням уточнених відносних вступів і станційних поправок (Рис. 3). Утім, цього найімовірніше б не було, якби механізм вогнища в групах був різний [Gnyp, 2010].

Можливості розробленого в роботі алгоритму можуть виявитися особливо корисними при аналізі форшокових та афтершокових послідовностей, зокрема у тому, що стосується виявлення їхньої просторово-часової структури. Як зрештою зазначають автори [Menke *et al.*, 1999] більшої точності визначення взаємного розташування вогнищ повторних землетрусів можна досягти шляхом врахування ступеня взаємної кореляції між їхніми записами в традиційному алгоритмі визначення розташування вогнищ за вступами фаз на сейсмічних станціях.

### Література

Сейсмологический бюллетень Украины за 2005 год. / Ред. Б.Г. Пустовитенко. – Севастополь: НПЦ «Экоси-Гидрофизика», 2007. – 205 с.

Сейсмологический бюллетень Украины за 2006 год. / Ред. Б.Г. Пустовитенко. – Севастополь: НПЦ «Экоси-Гидрофизика», 2008. – 295 с.

Davis J.C. Statistics and Data Analysis in Geology. – John Wiley & Sons, Inc., Second edition, 1986. – 383 p.

Gnyp A. Refining locations of the 2005 Mukacheve, West Ukraine, earthquakes based on similarity of their waveforms // Acta Geophysica. – 2009. – 57, №2. – P. 330-345, DOI: 10.2478/s11600-008-0071-5.

Gnyp A. Refining locations of the 2005-2006 recurrent earthquakes in Mukacheve, West Ukraine, and implications for their source mechanism and the local tectonics // Acta Geophysica. – 2010. – 58, №4. – P. 587-603, DOI: 10.2478/s11600-010-0006-9.

Shearer P., Hauksson E., Lin G. Southern California hypocenter relocation with waveform cross-correlation, Part 2: Results using source-specific station terms and cluster analysis // Bull. Seismol. Soc. Am. – 2005. – 95, №3. – P. 904-915, DOI: 10.1785/0120040168.

## УТОЧНЕНИЕ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОВТОРНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗАКАРПАТЬЕ ПО ДАННЫМ ОДНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

А.Р. Гнып

С использованием алгоритма, созданного на основе предположения о том, что степень взаимной корреляции между записями повторных событий на одной и той же станции уменьшается экспоненциально с увеличением расстояния между их очагами, определено взаимное расположение очагов двух групп повторных землетрясений мукачевской серии 2005–2006 гг., которые в каждой из групп образовали почти плоскую поверхность. В результате применения алгоритма к совокупному набору коэффициентов корреляции этих групп оказалось, что их очаги тоже принадлежат к единой плоскости, а взаимное расположение их очагов очень похоже на определенное ранее в [Gnyp, 2010] с применением уточненных относительных вступлений фаз и станционных поправок.

**Ключевые слова:** повторные землетрясения; коэффициент корреляции; относительное вступление; релокация, механизм очага.

## REFINING RELATIVE LOCATIONS OF RECURRENT EARTHQUAKES IN THE TRANSCARPATHIANS USING THE DATA FROM A SINGLE SEISMIC STATION

A. Gnyp

Relative locations of the two groups of 2005–2006 Mukacheve series of recurrent earthquakes were determined using an algorithm designed based on an assumption that a grade of cross-correlation between the records of recurrent events at the same station decays exponentially with separation between their sources, the locations turning out to arrange into almost a flat surface in each of the groups. After application of the algorithm to a combined set of cross-correlation coefficients of the two groups their sources just the same appeared to belong to the same plane, their relative locations very similar to ones determined in [Gnyp, 2010] with application of differential travel times and source specific station terms.

**Key words:** recurrent earthquakes; cross-correlation coefficient; differential travel time; relocation; source mechanism.

Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України