

УДК 550.34

Ю.О. Гордієнко, інж.

Головний центр спеціального контролю НКАУ

ВИЯВЛЕННЯ ПЕРЕХОДУ ПРОЦЕСІВ ПІДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРУСУ В АКТИВНУ ФАЗУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ СЕЙСМІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ*(Представлено д.т.н., проф. Грабаром І.Г.)*

У статті розглянуто можливість моніторингу сейсмонебезпечних районів у ближній зоні Системою сейсмічного групування ГЦСК з метою виділення зміни сейсмічного режиму, пов'язаного з процесами підготовки землетрусу.

Постановка проблеми. Катастрофічні землетруси останніх років – Туреччина 1999 р., Іран 2003 р., Індонезія 2004 р. – черговий раз вказали на важливість рішення завдань короткострокового і оперативного прогнозу сейсмічних явищ. Проблема своєчасного прогнозу землетрусів є не менш актуальною і для України.

У рамках створення підсистеми контролю і прогнозу сейсмічного стану в ближній зоні (КПСО БЗ) на інформаційній базі Головного центру спеціального контролю (ГЦСК) Національного космічного агентства України (НКАУ) проводиться оцінка можливостей методів спостереження спеціального контролю (СК) і системи контролю в цілому, по виділенню етапів активізації процесів підготовки землетрусів в ближній зоні [1], [2], [3], [4], [5], [6].

Одним з основних методів спостереження при виконанні завдань спеціального контролю є сейсмічний метод. Е даний час сейсмічний моніторинг в ГЦСК проводиться з використанням стандартних каналів, а також із застосуванням Системи сейсмічного групування (ССГ), зокрема Українською сейсмічною групою (УСГ), яка увійшла до міжнародної системи моніторингу як станція PS45 [7], [8], [9], [10], [11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У даний час основним підходом до проблеми прогнозу землетрусів, на основі результатів сейсмічних спостережень, є аналіз каталогів землетрусів з метою виділень зміни сейсмічних режимів, пов'язаних з процесами підготовки землетрусу [12], [13], [14], [15]. Проте прогноз землетрусів з використанням такого підходу, по-перше, належать до середньострокового, а по-друге, – точність визначення місцеположення сейсмічного осередку обмежена розмірами сейсмонебезпечного району (СНР). Так, наприклад, для алгоритму КОЗ [13] розмір небезпечної ділянки 600×600 км², інтервали тривоги діляться від одного року до п'яти.

Безумовно, досягнення навіть такого рівня точності прогнозу є вагомим, оскільки він дає можливість провести підготовчі заходи – зосередження аварійно-рятувальних ресурсів, підвезення медикаментів, підготовки до можливого припинення технологічних процесів на техногеннонебезпечних виробництвах й ін. Проте проблема короткострокового прогнозу землетрусів з належним рівнем достовірності залишається невирішеною.

У цьому випадку особливі надії пов'язані з реалізацією безперервного моніторингу СНР з метою виділення зміни сейсмічного режиму, викликаного переходом процесів підготовки землетрусу в активну фазу. Під активною фазою розуміється етап прихованого розвитку генерального розлому [16]. Виділення цього етапу дозволить проводити оцінку місцезнаходження осередку майбутнього землетрусу і оцінити параметри події.

У роботах [7], [8], [9], [10] розглянуті методологічні підходи, що дозволяють реалізувати моніторинг СНР з використанням ССГ, а також проведена оцінка характеристик вибіркової Української сейсмічної групи, при проведенні моніторингу СНР в ближній зоні – Карпати¹, зона Вранча² (Румунська частина Карпат), Крим³ (рис. 1).

Метою статті є аналіз можливостей системи сейсмічного групування Головного центру спеціального контролю НКАУ, на прикладі УСГ, з виділення переходу процесів підготовки сейсмічної події в активну фазу.

Матеріали статті засновані на аналізі землетрусів, зареєстрованих у ближній зоні протягом вересня-листопаду 2004 року.

1. Етапи підготовки землетрусу та можливість їх виділення Системою сейсмічного моніторингу ГЦСК

В основі проведення прогностичних спостережень лежить можливість виділення системою моніторингу етапів підготовки землетрусу. Для цього розглянемо процеси підготовки сейсмічного явища і оцінимо можливості їх виявлення сейсмічним сегментом Системи геофізичного моніторингу ГЦСК.



Рис. 1. Сейсмоактивні райони в ближній зоні: 1 – Карпати; 2 – зона Вранча; 3 – Крим

Фізичні процеси, що відбуваються в осередковій області в ході процесів підготовки землетрусу, розглядаються в роботах [12], [13], [16]. Розділяють три об'єми підготовки сейсмічної події (рис. 2).

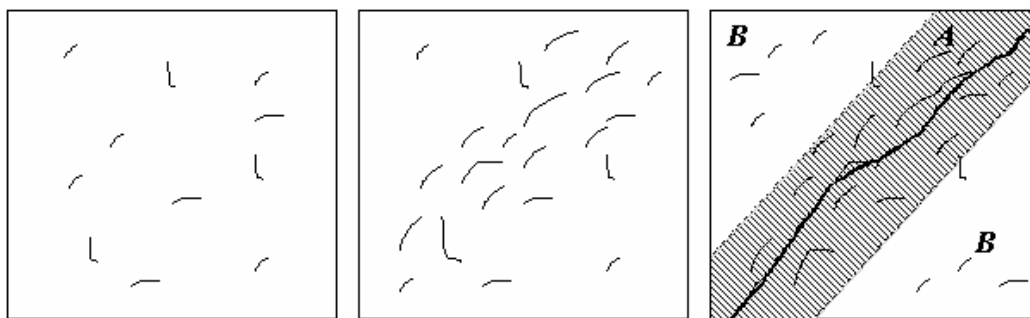


Рис. 2. Етапи розвитку сейсмічного осередку

На першій стадії, під дією поволі зростаючих тектонічних напруг, відбувається поступове накопичення кількості тріщин і збільшення їх розмірів у даному об'ємі порід – в осередковій області. Фізичні властивості порід на стадії *I* змінюються слабо, тому провісники майбутнього макророзриву майже відсутні. Одним з підходів до виділення цього етапу є аналіз результатів сейсмічних спостережень, з метою виділення зміни сейсмічного режиму, а саме етапу так званого сейсмічного затишся. Сейсмічне затишся позначає явище, що полягає в зменшенні порівняно з деяким початковим (фонівим) рівнем сейсмічної активності в часі, у СНР, включеному в систему моніторингу [16].

З накопиченням критичної для даної гірської породи концентрації тріщин середовище вступає в стадію *II* – взаємодії тріщин. На цій стадії відбувається різке збільшення ступеня тріщинуватості порід за рахунок руйнування перемичок між тріщинами. При цьому швидкість загальної деформації в даному об'ємі зростає з причини внесення в деформацію переміщень по берегах тріщин [15]. Це призводить до зміни властивостей об'єму порід осередкової області. До основних провісникових ефектів, щодо системи геофізичного моніторингу ГЦСК, належить зміна відношення швидкостей подовжніх і поперечних сейсмічних хвиль [16].

На стадії *III* починає розвиватися нестійка деформація, що локалізується у вузькій зоні майбутнього макророзриву. На даному етапі осередкова зона за своїми властивостями розділяється на дві області. В зоні нестійкої деформації (зона *A*, рис. 2. *III*), що локалізується, продовжується прискорене тріщиноутворення. В навколишньому об'ємі (зона *B*, рис. 2, *III*) тріщини як наслідок часткового розвантаження перестають розвиватися, стають неактивними і їх присутність не позначається так сильно на фізичні властивості гірських порід.

Таким чином, у ході третього етапу відбувається локалізація осередкової області в осередкову зону, в якій безпосередньо формується генеральний розлом.

Таке розділення третього етапу є умовним, оскільки локалізація осередкової області в осередкову зону, в якій продовжуються процеси прискореного тріщиноутворення, а потім осередкової зони в розлом, є продовженням одного і того ж процесу (рис. 3). Проте таке розділення III етапу дозволяє виділити провідникові ефекти двох типів, які пов'язані з формуванням осередкової зони – *форшокова активність*, і з формуванням генерального розлому – *сейсмоакустична емісія в осередковій зоні*.

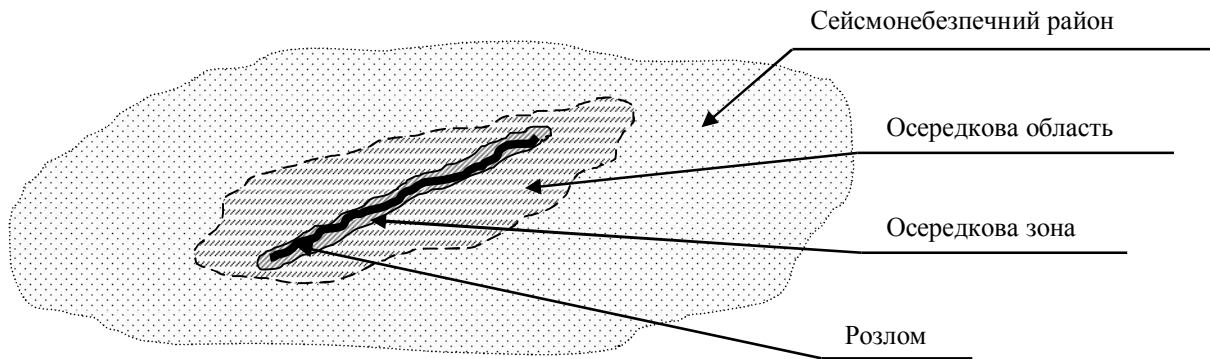


Рис. 3. Локалізація осередкової області в осередкову зону, в якій формується генеральний розлом

Провідники, які засновані на аналізі сейсмічності, форшокової активізації і варіаціях швидкостей сейсмічних хвиль, належать до середньострокових прогнозів і в межах даної роботи не розглядаються. Проте необхідно відзначити, що їх виділення може служити апріорною інформацією для подальшого проведення моніторингу в підконтрольному районі.

Сейсмоакустична емісія, що відбувається у вузькій зоні (зона А, рис. 2 III), є єдиною випромінюючою системою, джерело якої можна локалізувати, у тому числі й засобами сейсмічного сегменту системи геофізичних спостережень ГЦСК.

У рамках підсистеми КПСО в БЗ основна мета сейсмічного моніторингу полягає у виділенні прихованого етапу розвитку макророзриву. В цьому випадку основним є виділення засобами виявлення ГЦСК початку етапу формування генерального розлому.

Очікуваний характер поведінки підконтрольного параметру, викликаного активізацією процесів підготовки землетрусу, отриманого в результаті безперервного моніторингу СНР, буде мати вигляд, представлений на рис. 4, і складатиметься з двох частин.

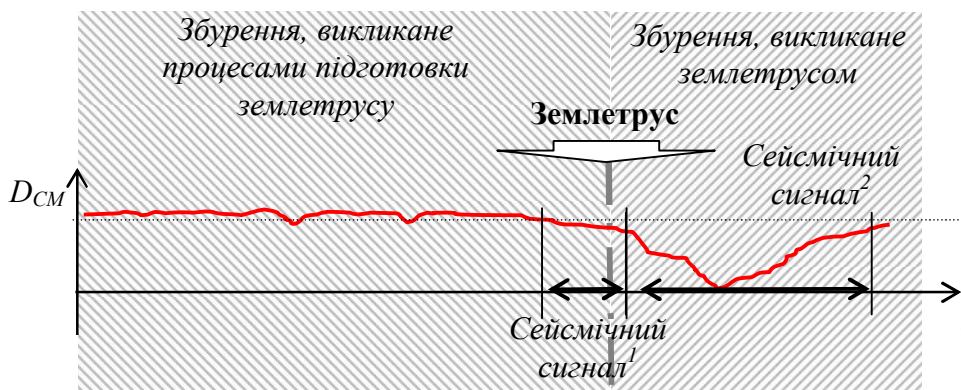


Рис. 4. Характер варіацій сейсмічних полів, викликаних процесами підготовки землетрусу. Як інформаційний параметр використовується значення розмірності хвильових форм

1 етап (сейсмічний сигнал¹) – викликаний процесами прихованого розвитку сейсмічного осередку (ефектом сейсмоакустичної емісії);

2 етап (сейсмічний сигнал²) – викликаний безпосередньо самим землетрусом.

2. Методологія проведення спостережень

Існуюча система сейсмічного моніторингу Головного центру спеціального контролю дозволяє проводити безперервні цілодобові спостереження стану СНР у ближній зоні.

Основна ідея – реалізація безперервного моніторингу СНР БЗ з використанням систем сейсмічного групування ГЦСК з метою виділення переходу процесів підготовки землетрусу в активну фазу.

Для аналізу були вибрані наступні СНР, розташовані в ближній зоні (рис.1):

R_1 – Карпати (координати умовного центра $48^\circ 40'$ пн.ш., 23° сх.д.);

R_2 – зона Вранча (Румунська частина Карпат, координати умовного центра 46° пн.ш., 26° сх.д.);

R_3 – Крим (координати умовного центра $44^\circ 50'$ пн.ш., $34^\circ 30'$ сх.д.).

Інформація про СНР, включених в систему моніторингу, а також про характеристики вибірковості (ХВ) ССГ при моніторингу цих СНР розглянуті в роботах [9], [10].

Загальна схема експерименту представлена на рис. 5.

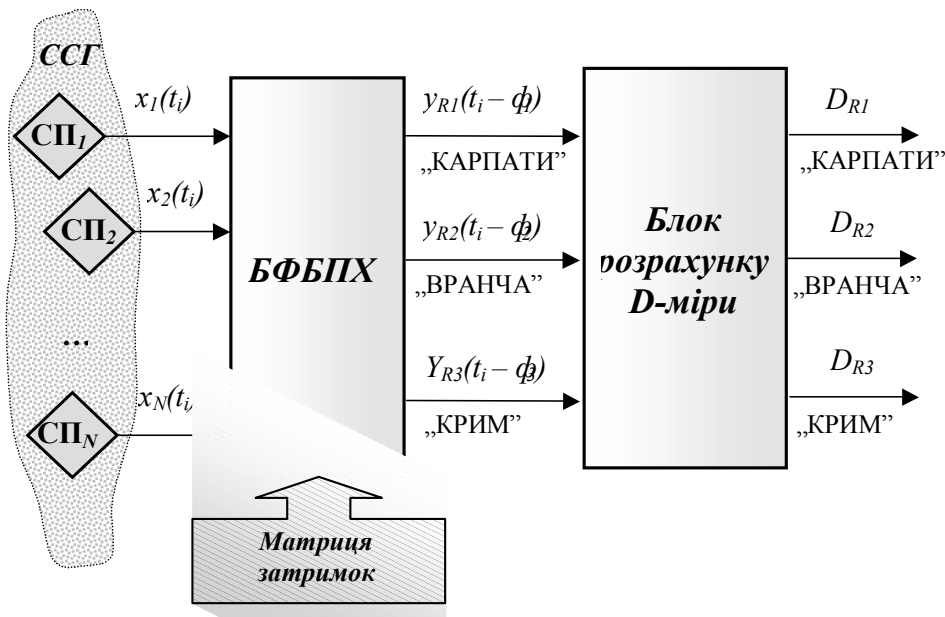


Рис. 5. Схема експерименту

У ході спостережень моніторинг потенційно небезпечних СНР в БЗ було організовано шляхом формування багатопроменевої характеристики вибірковості ССГ з максимумами ХВ, направлені на вказані СНР [9]. При цьому як методологічний підхід формування багатопроменевої ХВ ССГ використовувався метод підсумовування із затримкою (або метод формування променя) [9], [10], [18], [19].

Інформація про стан СНР, включеного в систему моніторингу, формувалася наступним чином.

Вимірювальна інформація, отримана з сейсмоприймачів групи (СПі), поступає на блок формування багатопроменевої характеристики (БФБПХ), в якому формувалися максимуми ХВ ССГ на СНР, включені у систему моніторингу (рис. 6). Матриця затримок елементів системи для формування максимумів ХВ на відповідні СНР розраховувалася наперед.

У результаті на виході блоку була отримана вимірювальна сейсмічна інформація з СНР включених в моніторинг $y_{Rj}(t_i - \tau_j)$, де j – номер СНР, i – поточне значення.

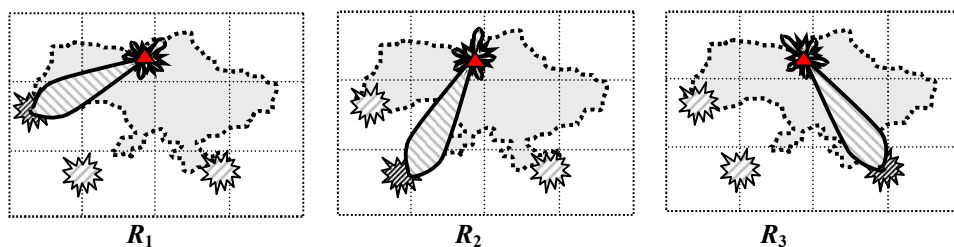


Рис. 6. Характеристики вибіркості ССГ при моніторингу СНР БЗ

Необхідно зазначити, що інформація на виході БФБПХ має затримку щодо інформації на вході, рівну максимальному значенню інтервалу затримки для формування ХВ з максимумом на відповідні СНР. Проте вона буде незначна у порівнянні з очікуваною тривалістю процесу активізації сейсмічного осередку передування основному поштовху. В даному випадку, для СНР, включених в експериментальну систему моніторингу, вона складає:

$$\tau_1 = 3,175 \text{ с} - \text{для } R_1, \tau_2 = 2,35 \text{ с} - \text{для } R_2, \tau_3 = 4,05 \text{ с} - \text{для } R_3.$$

Як апарат обробки вимірювальної інформації на виході БФБПХ використовувався апарат фрактальної розмірності (АФР), можливість застосування якого для аналізу геофізичної інформації, у тому числі й сейсмічної, розглянута в роботі [20]. Зокрема було показано, що аналіз зміни розмірності зручний для обробки геофізичної інформації, оскільки оцінка розмірності дозволяє відрізнити шум від корисного сигналу, а також виділити зміну фону в пунктах спостереження.

Таким чином, запропонований підхід аналізу вимірювальної інформації з СНР дає можливість перейти від аналізу фонових змін у пункті спостережень, як це проводиться для стандартних комплектів, до аналізу фонових змін безпосередньо в СНР, включеним у систему моніторингу.

3. Результати експерименту

Експеримент проводився в період з 1.09.2004 р. по 1.12.2004 р., у режимі постоперативної обробки і аналізу вимірювальної інформації Української сейсмічної групи (станції PS45).

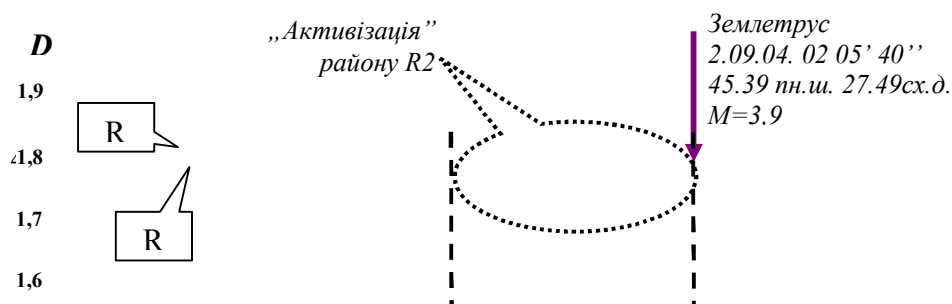
За час експериментальних спостережень у ближній зоні (у вказаних СНР) було зареєстровано 10 землетрусів різної магнітуди (рис. 1). Загальна інформація про параметри сейсмічних подій представлена у таблиці 1.

Таблиця 1

Інформація про зареєстровані землетруси в БЗ під час експерименту
(<http://www.neic.usgs.gov>)

Рік	Місяць	День	Час землетрусу за Грінвічем	Широта	Довгота	Глибина	Магнітуда	Примітка
2004	9	2	02 05' 40''	45.39	27.49	20	3.9	Рис. 7
2004	9	12	04 26' 09''	45.47	26.37	139	3.8	Рис. 8
2004	9	27	09 16' 20''	45.88	26.69	105	5.2	Рис. 9
2004	10	24	19 56' 15''	45.62	26.35	155	4.1	Рис. 10
2004	10	27	20 34' 36''	45.79	26.63	95	5.9	Рис. 11
2004	11	16	16 34' 03''	45.15	28.89			Інформація відсутня
2004	11	16	21 25' 57''	46.31	27.27			- // -
2004	11	17	11 31' 02''	45.73	26.74	130	4.2	Рис. 12
2004	11	17	23 56' 31''	45.60	26.51	135	3.6	Рис. 13
2004	11	23	18 33' 27''	45.68	26.75	115	3.7	Рис. 14

Далі представлені результати обробки сейсмічної інформації ССГ за вищевикладеною методикою для кожної сейсмічної події, зареєстрованої у ході експерименту. Оскільки за час експерименту були зареєстровані землетруси у зоні Вранча, то далі наводяться результати для двох СНР – Карпати (R1) і зона Вранча (R2).



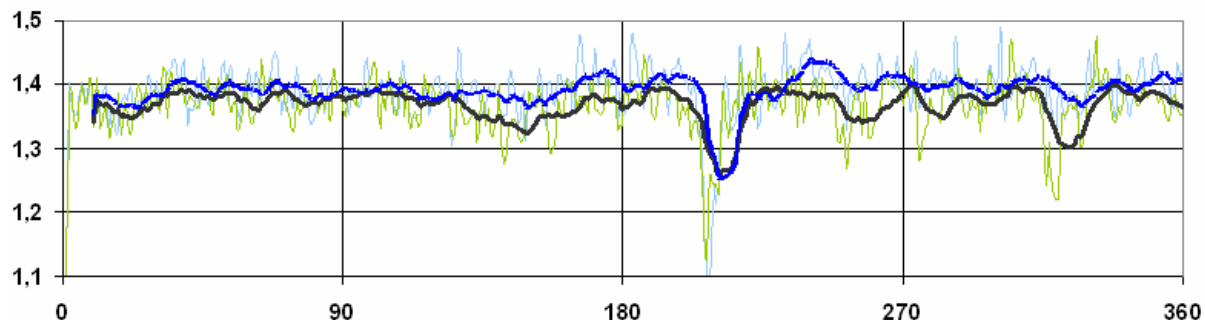


Рис. 7. Варіації комплексних параметрів і відповідні лінії тренда для районів R1 і R2

На рис. 7 представлені варіації комплексних параметрів стану підконтрольних районів R1 і R2 при землетрусі в зоні Вранча 2.09.2004 року, з магнітудою.

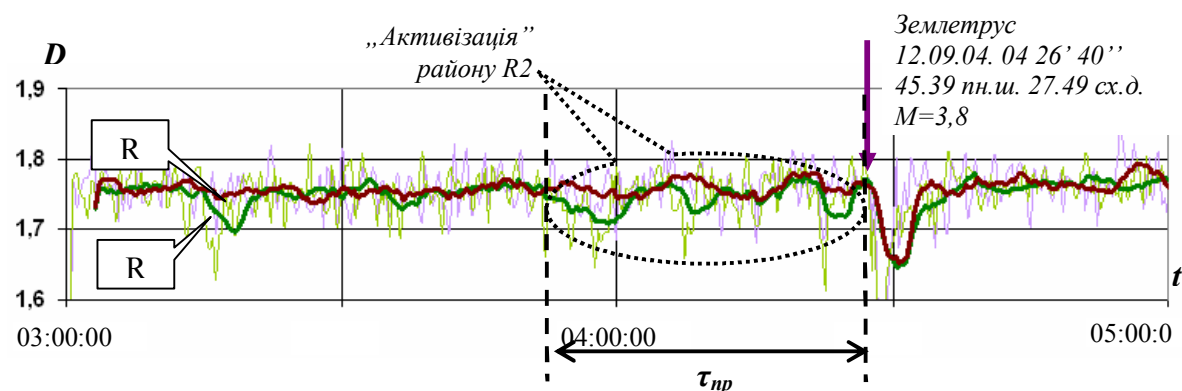


Рис. 8. Варіації комплексних параметрів і відповідні лінії тренда для районів R1 і R2

На рис. 8 представлені варіації комплексних параметрів стану підконтрольних районів R1 і R2 при землетрусі в зоні Вранча 12.09.2004 року, з магнітудою.

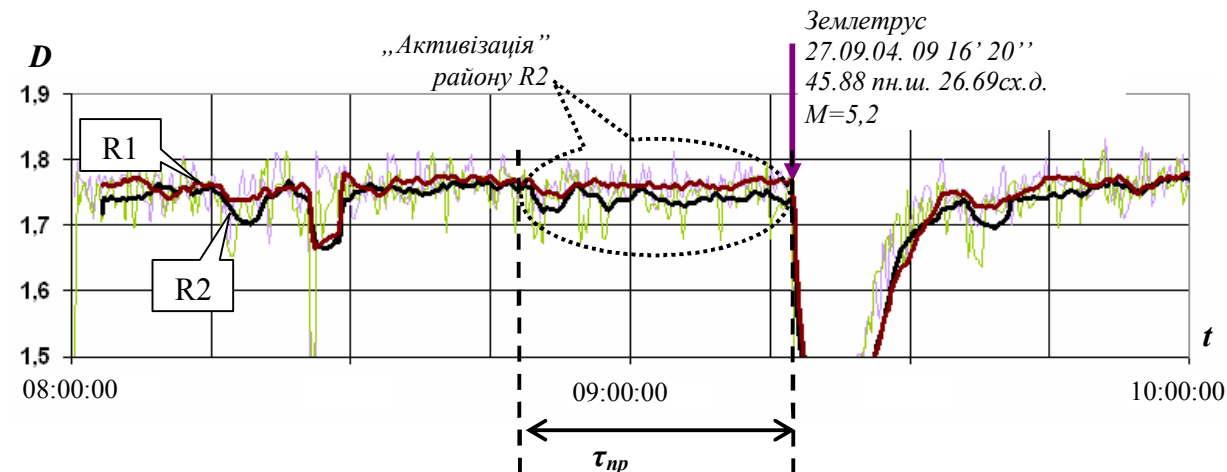


Рис. 9. Варіації комплексних параметрів і відповідні лінії тренда для районів R1 і R2

На рис. 9 представлені варіації комплексних параметрів стану підконтрольних районів R1 і R2 при землетрусі в зоні Вранча 27.09.2004 року, з магнітудою $M = 5,2$.

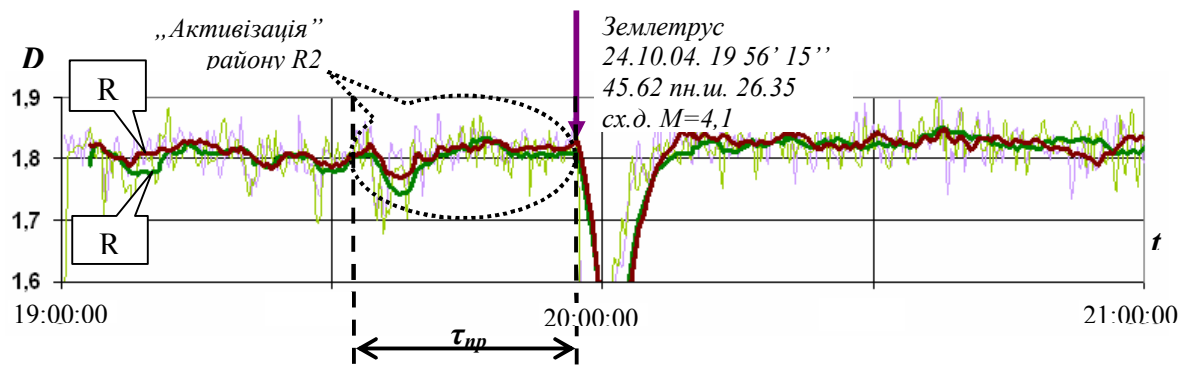


Рис. 10 Варіації комплексних параметрів і відповідні лінії тренда для районів R1 і R2

На рис. 10 представлені варіації комплексних параметрів стану підконтрольних районів R1 і R2 при землетрусі в зоні Вранча 24.10.2004 року, з магнітудою $M = 4,1$.

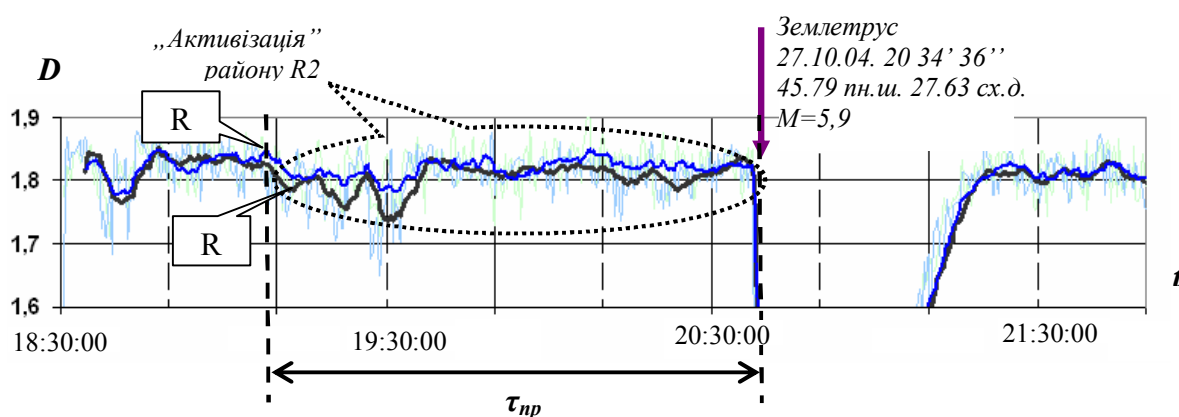
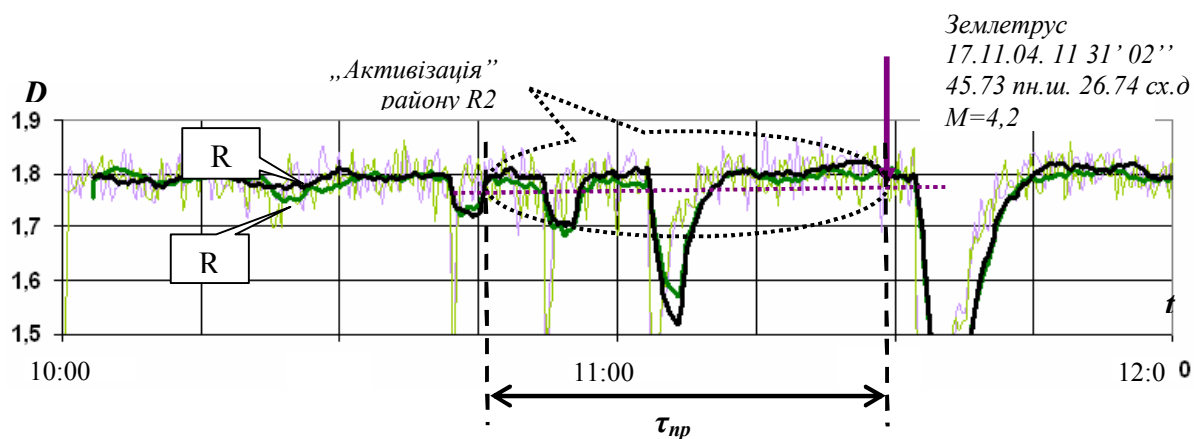


Рис. 11. Варіації комплексних параметрів і відповідні лінії тренда для районів R1 і R2

На рис. 11. представлені варіації комплексних параметрів стану підконтрольних районів R1 і R2 при землетрусі в зоні Вранча 27.10.2004 року, з магнітудою $M = 5,9$. Наслідки цього землетрусу були відчутні на всій території України.



Мал. 12. Варіації комплексних параметрів і відповідні лінії тренда для районів R1 і R2

На рис. 12 представлені варіації комплексних параметрів стану підконтрольних районів R1 і R2 при землетрусі в зоні Вранча 17.11.2004 року, з магнітудою $M = 4,2$. Землетрусу в зоні Вранча передують складна хвильова картина, викликана наслідками землетрусу в західних Карпатах (територія Польщі) та кар'єрними вибухами. Проте тренд комплексного параметра для району R2 вказує на присутність активності в підконтрольному районі.

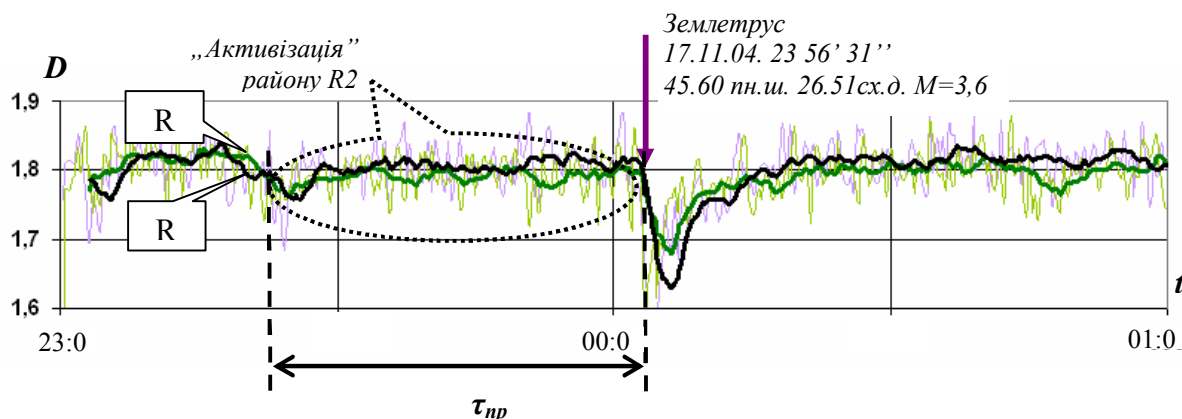


Рис. 13. Варіації комплексних параметрів і відповідні лінії тренда для районів R1 і R2

На рис. 13 представлені варіації комплексних параметрів стану підконтрольних районів R1 і R2 при землетрусі в зоні Вранча 17.11.2004 року, з магнітудою $M = 3,6$.

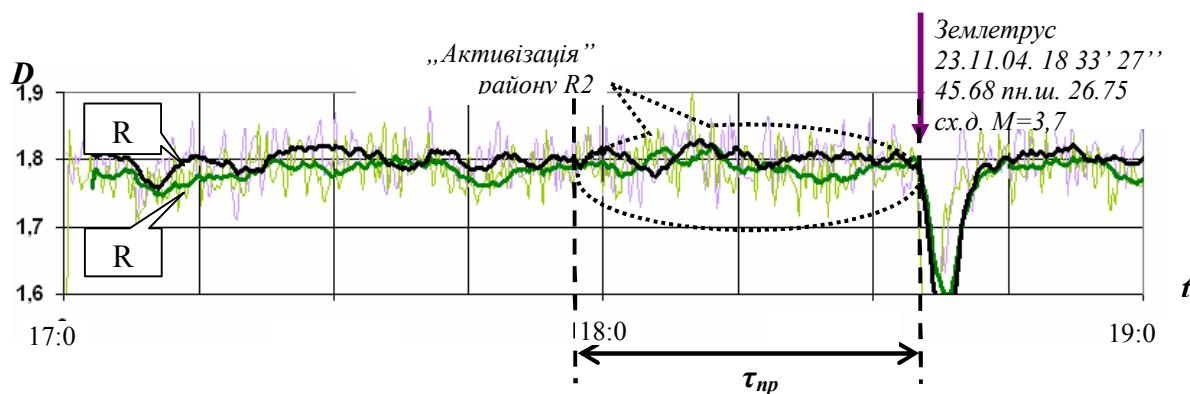


Рис. 14. Варіації комплексних параметрів і відповідні лінії тренда для районів R1 і R2

На рис. 14 представлені варіації комплексних параметрів стану підконтрольних районів R1 і R2 при землетрусі в зоні Вранча 23.11.2004 року, з магнітудою $M = 3,7$.

Аналіз варіацій комплексного сейсмічного параметру стану підконтрольних СНР дозволяє зробити наступні висновки.

1. Безпосередньо землетрусу як ефекту скидання тектонічної напруги передують складний підготовчий процес, що призводить до різних геофізичних аномалій, у тому числі і до сейсмічних, які можуть бути зареєстровані засобами сейсмічних спостережень ГЦСК НКАУ. При цьому основним інформаційним сегментом є ССГ.

2. Застосування ССГ для реалізації безперервного моніторингу СНР дозволяє перейти від аналізу інформації про фонові зміни в пункті реєстрації до аналізу фонових варіацій, безпосередньо в сейсмонебезпечному районі.

3. Виходячи з процесів підготовки землетрусів, запропоновано характер відгуку стану підконтрольних сейсмічних параметрів (рис. 4), який був підтверджений у ході проведення експерименту (рис. 7–14).

4. Незважаючи на загальні риси поведінки фонові сейсмічності безпосередньо перед основним поштовхом, спостерігаються характерні особливості індивідуального характеру, пов'язані з особливостями тектонічних процесів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Гордиенко Ю.А., Грабар И.Г., Шапка В.Н. Возможный вариант создания контрольно-диагностической системы мониторинга сейсмической обстановки в ближней зоне // ЗНП ЖВІРЕ. – Вип. № 7. – 2004. – С. 88–95.
2. Гордиенко Ю.А. Применение средств геофизического мониторинга ГЦСК для создания модели прогноза землетрясений в ближней зоне // Тези доповідей IV Міжнародної наукової конференції “Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища.” – Київ, 2003. – С. 41.

3. *Гордієнко Ю.А.* Направление создания системы контроля и диагностики сейсмической обстановки на базе геофизического измерительного комплекса // Тези доповідей XIV науково-технічної конференції “Наукові проблеми розробки, модернізації та застосування інформаційних систем космічного і наземного базування.” – Житомир: ЖВІРЕ, 2004. – С. 43–44.
4. *Гордієнко Ю.А.* Частная модель предвестника землетрясений для системы наблюдений ГЦСК НКАУ // Тези доповідей V Міжнародної наукової конференції “Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища.” – Київ, 2004. – С. 47–48.
5. *Гордієнко Ю.А.* Оперативный контроль, диагностика и прогноз сейсмической обстановки на территории Украины и сопредельных государств на основе комплексного многодисциплинарного мониторинга геофизических полей средствами наблюдения Главного центра специального контроля // Тези доповідей наукового семінару “Розробка та удосконалення космічних інформаційних систем”. – Х.: ХВУ, 2003. – 35 с.
6. *Гордієнко Ю.О.* Методика контролю та прогнозу сейсмічної обстановки у ближній зоні системою спостережень ГЦСК НКАУ // Вісник ЖДТУ.
7. *Гордієнко Ю.О., Пастушенко М.С., Солонець О.І.* Моніторинг сейсмонезбезпечних районів за допомогою Української сейсмічної групи // Тези доповідей XIV науково-технічної конференції “Наукові проблеми розробки, модернізації та застосування інформаційних систем космічного і наземного базування.” – Житомир: ЖВІРЕ, 2004. – С. 49.
8. *Гордієнко Ю.О., Солонець О.І.* Контроль сейсмонезбезпечних районів України з використанням спрямованих властивостей систем сейсмічного групування // Тези доповідей III наукової конференції молодих вчених ХВУ.: – Х.: ХВУ, 2003. – 123 с.
9. *Гордієнко Ю.А., Солонець А.И., Сащук И.Н., Шапка В.Н.* Избирательные характеристики Украинской сейсмической группы при мониторинге сейсмоопасных районов в ближней зоне // ЗНП ЖВІРЕ. – № 8. – 2005. – С. 130–141.
10. *Бутенко О.С., Голкін Д.В., Гордієнко Ю.О., Солонець О.І.* Моніторинг сейсмонезбезпечних районів засобами сейсмічного групування // ЗНП Харківського військового університету. – № 8 (36). – 2004. – С. 67–70.
11. *Гуков В.М., Дядюра В.А., Качалин И.Г.* Украинская сейсмическая группа. Специализированная цифровая система сбора сейсмической информации // Геофизический журнал. – 2000. – Т. 22. – № 3 – С. 37–41.
12. *Габриэлов А.М.* и др. Долгосрочный прогноз землетрясений. М.:ИФЗ АН СССР, 1986. – 125 с.
13. *Завьялов А.Д., Соболев Г.А., Чилидзе Т.Л., и др.* Карты ожидаемых землетрясений основанные на комплексе сейсмологических признаков. // Изв. АН СССР. Физика земли. – 1990. – № 11. – С. 45–56.
14. *Kossobokov V.G., Keilis-Borok V.I.* Localization of intermediate-term earthquake prediction // J.Geophys. Res.B. – 1990. – Vol. 95, 312. – P. 763–772.
15. *Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С.* Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 1996. – № 4. – С. 64–74.
16. *Рикитаке Рикитаке Т.* Предсказание землетрясений. – М.: Мир, 1979. – 390 с.
17. *Даджон Д.Э.* Основы цифровой обработки сигналов в решетках // ТИИЭР. – 1977. – Т. 65. – № 6. – С. 99–107.
18. *Seismic Array Desing Hanbok.* IBM. – 1970.
19. *Гордієнко Ю.О.* Аналіз геофізичної інформації методами фрактальної розмірності // Вісник ЖДТУ. – № 2 (29). – 2004. – С. 170–175.

ГОРДІЄНКО Юрій Олексійович – інженер відділу науково-дослідницького випробувального Головного центру спеціального контролю Національного космічного агентства України.

Наукові інтереси:

- обробка геофізичної інформації;
- фрактальний аналіз;
- детермінований хаос.

Подано 10.02.2005

Гордієнко Ю.О. Виявлення переходу процесів підготовки землетрусу в активну фазу за результатами сейсмічних спостережень

Гордиенко Ю.А. Обнаружение перехода процессов подготовки землетрясения в активную фазу по результатам сейсмических наблюдений

Гордієнко Ю.О. Discovery of transition processes preparation of earthquake in an active phase on results of the seismic supervisions

УДК 550.34

Виявлення переходу процесів підготовки землетрусу в активну фазу за результатами сейсмічних спостережень./ Ю.О. Гордієнко

В статті розглянута можливість моніторингу сейсмонебезпечних районів в ближній зоні Системою сейсмічного групування ГЦСК, з метою виділення зміни сейсмічного режиму, пов'язаного з процесами підготовки землетрусу.

УДК 550.34

Обнаружение перехода процессов подготовки землетрясения в активную фазу по результатам сейсмических наблюдений / Ю.А. Гордиенко

В статье рассмотрена возможность мониторинга сейсмоопасных районов в ближней зоне Системой сейсмического группирования ГЦСК, с целью выделения изменения сейсмического режима, связанного с процессами подготовки землетрясения.

УДК 550.34

Discovery of transition processes preparation of earthquake in an active phase on results of the seismic supervisions / Ю.О. Гордієнко

In the article present the possibility of monitoring of seismic source with the use of the seismic group of MCSM for the selection of change of the seismic regime caused by the processes of preparation of earthquake.