

Система раннього оповіщення про потужні підкорові землетруси зони Вранча

© В.М. Шапка, О.І. Лящук, Ю.А. Андрущенко,
І.В. Корнієнко, В.В. Грабченко, 2016

Головний центр спеціального контролю НЦУВКЗ
ДКА України, смт Городок, Україна

Надійшла 23 березня 2016 р.

Представлено членом редколегії О.В. Кензєрою

Стаття посвячена вопросу проведения сейсмологического мониторинга и автоматического оповещения персонала потенциально опасных производств о приближении сейсмической угрозы и предупреждения об опасности населения с целью их заблаговременной подготовки и обеспечения минимизации негативных последствий. Дан анализ мирового опыта построения систем раннего оповещения о землетрясениях. Рассмотрены основные факторы, обуславливающие сейсмичность территории Украины. Предложена модель системы раннего оповещения о землетрясениях для объектов критической инфраструктуры Украины.

Ключевые слова: землетрясение, система раннего предупреждения, атомная электростанция, сейсмические волны.

Вступ. Аналіз досвіду ліквідації наслідків катастрофічних землетрусів у різних країнах за останні десятиліття показав, що рятувальні дії найефективнішими є у перші години після підземного поштовху. Тому до служб термінових донесень та оповіщення ставлять усе жорсткіші вимоги, оскільки від точності та оперативності їх повідомлень про "тривогу" багато в чому залежить ефективність дій рятувальних формувань. Велика частина негативних наслідків руйнівних землетрусів зумовлена дією факторів вторинної небезпеки (пожежі, аварії в спорудах енергопостачання, транспортних комунікацій, прориви дамб, зсуви, обвали та ін.). В останні роки спостерігаються бурхливий розвиток промислової, аграрної та будівельної індустрії, а також інтенсивне освоєння сейсмічно небезпечних територій. Ці процеси неминуче призводять до посилення техногенного навантаження на території та підвищення сейсмічного ризику. Тому створення системи раннього оповіщення є актуальним.

Сейсмічна небезпека території України. Згідно з Картою загального сейсмічного районування території України ЗСР-2004-С [Пус-

товитенко и др., 2006], яку використовують під час розробки генеральних планів раціонального землекористування та оптимального вибору місць розташування об'єктів особливо відповідальної категорії (АЕС, великих гідропруд, великих хімкомбінатів, різних екологічно небезпечних об'єктів), більша частина платформної території України належить до зон з прогнозованою інтенсивністю сейсмічних струшувань шість-сім балів (рис. 1).

Основний сейсмічний вплив на територію України спричинюють землетруси району гір Вранча. Потужна у сейсмічному відношенні підкорова вогнищева зона розміщується в Румунії під горами Вранча і пов'язана з вигином Карпатської дуги — зоною тектонічного з'єднання Східних і Південних Карпат. Особливістю прояву землетрусів у цьому районі є значна інтенсивність сейсмічних коливань на величезній за площею території, яка охоплює Румунію, Угорщину, Болгарію, Сербію, Молдову, Україну та європейську частину Росії, включно з Москвою і Санкт-Петербургом. При цьому спостерігається еліпсоподібна витягнутість ізосейст у північно-східному напрямку.

Протягом останнього тисячоліття, з 1091 по 1990 р., відбулось 30 сильних землетрусів, вогнища яких знаходились у зоні Вранча, значення магнітуд у деяких випадках досягало і перевищувало 7. За останні 200 років було сім сейсмічних подій з інтенсивністю струшувань в епіцентрі понад 8 балів ($I_0 = 8,5 \div 10$ балів) [Евсеев, 1961; Ризниченко и др., 1976, 1980].

Наявність на території України великої кількості об'єктів критичної інфраструктури потребує створення систем раннього оповіщення про потужні землетруси з метою мінімізації негативних впливів на потенційно небезпечні об'єкти.

Світовий досвід організації систем раннього оповіщення про землетруси. Система попередження про землетруси складається із сейсмічних датчиків, комунікаційного устаткування, обчислювальних засобів і програмного забезпечення для регіонального оповіщення про сильні землетруси.

Сигнали від землетрусів реєструються великою кількістю сейсмічних датчиків, інфор-

мація від яких по високошвидкісних комунікаційних каналах надходить в обробку для розрахунку ймовірної сили землетрусу і очікуваних наслідків. Якщо виявлено землетрус, що несе потенційну небезпеку для об'єктів критичної інфраструктури, негайно включаються системи оповіщення і тривоги. Серед країн, що мають такі системи, — Японія, Тайвань, Мексика, США, Румунія, Туреччина, Італія [Espinoso-Aranda et al., 1996; Lee et al., 1996; Wu et al., 1997; Erdik et al., 2003; Kanamori, 2005; Böse et al., 2007; Wu, Kanamori, 2008]. Перша автоматизована система, що з'явилася в США у 1990-х роках, має назву QuakeGuard [Allen, Kanamori, 2003]. Цю технологію нині використовують на 40 об'єктах у Каліфорнії. У 2007 р. в Японії Метеорологічне агентство впровадило в роботу систему раннього попередження, яку спочатку планували застосовувати для аварійної сигналізації і гальмування надшвидкісних залізничних експресів [Kamigaichi, 2004]. На цей час попередження передають по національному телебаченню і радіо, а також на



Рис. 1. Генеральна карта загального сейсмічного районування території України (ЗСР-2004-С для періоду повторюваності землетрусів 5000 років) [Пустовитенко и др., 2006].

мобільні телефони. Під час землетрусу 11 березня 2011 р. система спрацювала через 8,6 с після виникнення сигналу в джерелі.

Розробка моделі національної системи раннього оповіщення. Існує декілька підходів до створення систем раннього оповіщення про землетруси. На прикладі українських АЕС розглянемо переваги та недоліки цих підходів.

Робота переважної частини існуючих у світі систем раннього оповіщення про землетруси основана на різниці швидкостей поширення поздовжніх і поперечних сейсмічних хвиль. Швидкість *P*-хвилі — приблизно 7,33 км/с, тоді як хвиля *S*, яка несе основну руйнівну силу землетрусу, в 1,8 раза повільніша за хвилю *P*, її середня швидкість поширення — близько 4,14 км/с. Під час свого поширення від джерела до пункту реєстрації сейсмічні хвилі чітко розділяються, тому після приходу на сейсмічний датчик *P*-хвилі можна розрахувати прискорення та у разі перевищення визначеного порогу подати сигнал тривоги, перш ніж руйнівна хвиля *S* досягне того чи іншого об'єкта критичної інфраструктури.

Згідно з вимогами МАГАТЕ, атомні електростанції мають бути оснащені мережею сейсмічних датчиків. Основні функції цієї мережі такі:

- розрахунок акселерограм і визначення прискорень, що виникають у результаті сейсмічного впливу на елементи інженерних конструкцій;
- інструментальне дослідження сейсмічності території розташування АЕС;
- створення системи сигналізації та попередження про сейсмічну небезпеку.

У зв'язку з тим що сейсмічні датчики, які використовують у системі раннього оповіщення, розташовані в безпосередній близькості від потенційно небезпечних об'єктів, сигнал тривоги формується лише після впливу на об'єкт першої сейсмічної хвилі (*P*-хвилі). За такої системи можна виконати автоматичну аварійну зупинку реактора в разі сейсмічного впливу на ґрунт, що відповідає проектному землетрусу, але ця система не захищає персонал і не дає йому часу для підготовки до дій в умовах надзвичайної ситуації. Ще одним недоліком указаної системи є її прив'язка лише до одного конкретного сейсмонебезпечного об'єкта.

З метою усунення перелічених вище недоліків у системі раннього оповіщення потрібно використовувати сейсмічні датчики, що віддалені від території розміщення АЕС у напрямку сейсмічно небезпечної зони. Сигнал три-

воги отримують ще до приходу на АЕС першої сейсмічної хвилі, отже, збільшиться час між поданням сигналу тривоги та приходом на станцію руйнівної *S*-хвилі. Одним з варіантів є використання сейсмічних станцій, розташованих у безпосередній близькості від зони виникнення сейсмічних вогнищ — потенційної небезпеки для українських АЕС.

Прототип описаної системи був розроблений і впроваджений в дію спеціалістами Головного центру спеціального контролю Державного космічного агентства України (ГЦСК ДКА України). Ця система включає мережу сейсмічних датчиків, що розташовані у безпосередній близькості до сейсмонебезпечного регіону, систему збору, збереження та обробки сейсмічної інформації та систему оповіщення про небезпечне явище. ГЦСК має доступ до даних з румунських сейсмологічних станцій, розташованих безпосередньо в сейсмонебезпечній зоні Вранча (рис. 2). Включення вказаних станцій до системи раннього оповіщення дає змогу максимально зменшити час між виникненням сигналу в джерелі та формуванням відповідного сигналу тривоги. Використовуючи програмно-математичний комплекс SeisComp3, можна автоматично виявляти та обробляти сейсмічні сигнали.

У табл. 1 наведено відстані від сейсмоактивної зони Вранча до АЕС України, а також запаси часу на оповіщення до приходу руйнівної *S*-хвилі з урахуванням того, що швидкість спрацювання системи становить приблизно 40 с.

Для найближчої Южно-Української АЕС, яка знаходиться на відстані 435 км від джерела, оповіщення про небезпеку можна здійснити за 40 с до приходу хвилі *S*. До решти АЕС, які знаходяться на більшому віддаленні, запас часу до приходу *S*-хвилі дорівнює від 65 до 114 с.

Використання сейсмічних датчиків у безпосередній близькості до сейсмонебезпечної зони значно скорочує час на подання сигналу тривоги, але при цьому може призвести до похибок у визначенні енергетичних параметрів джерела і, як результат, до неправильного оцінювання можливих наслідків землетрусу на території України. Ще один недолік — така побудова системи оповіщення орієнтована лише на один сейсмонебезпечний регіон, для контролю іншого регіону вона потребує додаткового розміщення сейсмічних датчиків. Наприклад, відомо, що в межах території Румунії є ще вогнищеві зони, які розміщуються в районах міст Галац і Бузеу. Землетруси, що виникають у цих районах, менш потужні по-



Рис. 2. Розташування акселерометрів на території Румунії.

рівняно із землетрусами регіону Вранча, проте можуть створювати значні сейсмічні впливи на прикордонні райони України. Так, 3 жовтня 2013 р. відбувся землетрус з епіцентром в районі м. Галац з магнітудою 3,7, при цьому інтенсивність сейсмічних коливань у районах міст Ізмаїл та Рені Одеської обл. становила приблизно 3 бали за шкалою MSK-64. Крім того, у районі Вранча існують джерела з достатньо невеликими глибинами гіпоцентрів. Вплив цих джерел на територію України незначний, на-

віть за великих магнітуд. У свою чергу, реєстрація таких землетрусів може призвести до хибних спрацювань системи оповіщення.

З огляду на це логічним розвитком системи раннього оповіщення є створення мережі акселерометрів, установлені на сейсмонебезпечних напрямках поблизу кордону України, наприклад у містах Ізмаїл або Рені. При цьому система оповіщення забезпечить подачу сигналу тривоги в разі виникнення будь-якого високоенергетичного сейсмічного явища, що з ви-

Т а б л и ц я 1. Поширення сейсмічних хвиль до АЕС і запас часу на оповіщення

АЕС	Відстань від джерела, км	Час пробігу, с	
		S-хвилі	Запас часу
Южно-Українська	435	81	41
Хмельницька	522	105	65
Рівненська	637	130	90
Запорізька	664	130	90
Чорнобильська	695	164	114

сокою часткою ймовірності може становити загрозу для об'єктів критичної інфраструктури України. Вихідний сигнал акселерометра пропорційний вимірюваному прискоренню. У разі перевищення порогового рівня вихідного сигналу, за протоколом SeedLink, оптичними, провідними чи безпровідними каналами зв'язку до віддаленого сервера надсилається сигнал тривоги. При отриманні сервером сигналів тривоги з декількох датчиків формується загальний сигнал, який і надсилається в автоматичному режимі користувачам згідно із раніше створеним списком. Слід зауважити, що час спрацювання такої системи значно менший і за розрахунками дорівнює порядку 6 с.

У табл. 2 наведено відстані від пунктів спостереження (ПС) Ізмаїл та Рені до АЕС України, а також запаси часу на оповіщення до приходу *P*- та *S*-хвиль.

Оповіщення можна реалізувати, встановивши на об'єктах підвищеної небезпеки та місцях скупчення людей обладнання для отримання сигналу тривоги та його доведення до населення. На об'єкти підвищеної небезпеки сигнал тривоги можна передавати до автоматизованої системи безпеки підприємства з метою вживання подальших заходів щодо зменшення наслідків дії землетрусу на технологічні

процеси та приведення персоналу до підвищеної готовності.

Однією з основних переваг запропонованого способу є те, що в ньому в результаті застосування акселерометрів із завчасно запрограмованим порогом спрацювання максимально мінімізовані затримки на обробку інформації через відсутність необхідності обробки сейсмічних даних і проведення розрахунку енергетичних характеристик сейсмічного джерела. Час спрацювання системи максимально наближено до реального часу і становить усього декілька секунд, що зумовлено наявністю каналів передачі даних і часом реакції системи на подію.

Спосіб апробовано математичним і програмним моделюванням. Для розрахунків використано спеціалізоване програмне забезпечення SeisComp3 і PRESTo, мережу акселерометрів компанії Guralp Systems Ltd.

Згідно з розрахунками, мінімальний час на оповіщення про наближення сейсмічного сигналу до українських АЕС за розгортання мережі акселерометрів, розміщених поблизу кордону України, у разі виникнення землетрусу в районі гір Вранча дорівнює, с: Южно-Українська — 57; Хмельницька — 69; Запорізька — 105; Рівненська — 154; Чорнобильська АЕС — 95.

Т а б л и ц я 2. Поширення сейсмічних хвиль від пунктів спостереження до АЕС і запас часу на оповіщення

АЕС	Відстань від ПС, км	Запас часу на оповіщення, с	
		<i>P</i> -хвилі	<i>S</i> -хвилі
ПС «Ізмаїл»			
Южно-Українська	328	27	57
Запорізька	514	53	105
Хмельницька	574	67	129
Чорнобильська	677	80	154
Рівненська	698	81	155
ПС «Рені»			
Южно-Українська	342	39	81
Запорізька	544	53	105
Хмельницька	551	53	105
Чорнобильська	670	80	154
Рівненська	674	81	155

Отже, час між подачею сигналу тривоги та приходом руйнівної хвилі S значно збільшується і є достатнім для вживання необхідних заходів, прийняття рішення та проведення дій згідно з відповідними інструкціями та протоколами.

Висновки. Наявність на території України великої кількості об'єктів критичної інфраструктури вимагає створення систем раннього оповіщення про потужні землетруси з метою мінімізації негативних впливів на потенційно небезпечні об'єкти.

При побудові систем раннього оповіщення можна використовувати як сейсмічні станції, розташовані на території України, так й іноземні станції, що знаходяться в сейсмоне-

безпечних районах. Використання в системі раннього оповіщення даних станцій, розташованих у безпосередній близькості до епіцентру сейсмічної події, дає змогу максимально зменшити час між виникненням сигналу в джерелі та формуванням відповідного сигналу тривоги.

Необхідною умовою подальшого розвитку національної системи раннього оповіщення про землетруси є розширення сейсмологічної мережі та встановлення сейсмічних датчиків на основних сейсмонебезпечних напрямках поблизу кордону України, що забезпечить подачу сигналу тривоги в разі виникнення високоенергетичного сейсмічного явища, незалежно від місця розташування джерела.

Список літератури

- Евсеев С.В. Землетрясения Украины (Каталог землетрясений Украины с 1000 по 1940 гг.). Киев: Изд-во АН УССР, 1961. 75 с.
- Пустовитенко В.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А. Новые карты общего сейсмического районирования территории Украины. Особенности модели долговременной сейсмической опасности. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 3. С. 60—67.
- Ризниченко Ю.В., Друмя А.В., Степаненко Н.Я. Сейсмичность и сотрясаемость Карпато-Балканского региона. Кишинев: Штиинца, 1976. 118 с.
- Ризниченко Ю.В., Друмя А.В., Степаненко Н.Я., Симонова Н.А. Сейсмичность и сейсмоопасность Карпатского региона. В кн.: *Карпатское землетрясение 4 марта 1977г. и его последствия*. Москва: Наука, 1980. С. 46—85.
- Allen R.M., Kanamori H., 2003. The Potential for Earthquake Early Warning in Southern California. *Science* 300, 786—789. DOI:10.1126/science.1080912.
- Böse M., Ionescu C., Wenzel F., 2007. Earthquake early warning for Bucharest, Romania: Novel and revised scaling relations. *Geophys. Res. Lett.* 34, L07302.
- Erdik M., Fahjan Y., Ozel O., Alcik H., Mert A., Gul M., 2003. Istanbul Earthquake Rapid Response and the Early Warning System. *Bull. Earthq. Eng.* 1(is. 1), 157—163.
- Espinosa-Aranda J.M., Jimenez A., Ibarrola G., Alcantar F., Aguilar A., Inostroza M., Maldonado S., 1996. Result of Mexico City early warning system. Elsevier Science Ltd, Eleven World Conference on Earthquake Engineering, Paper № 2132.
- Kamigaichi O., 2004. JMA Earthquake Early Warning. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering* 4, 134—137.
- Kanamori H., 2005. Real-time seismology and earthquake damage mitigation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33, 195—214.
- Lee W.H.K., Shing T.C., Teng T.L., 1996. Design and implementation of earthquake early warning system in Taiwan. Elsevier Science Ltd, Eleven World Conference on Earthquake Engineering, Paper № 2133.
- Wu Y.M., Chen C.C., Shin T.C., Tsai Y.B., Lee W.H.K., Teng T.L., 1997. Taiwan Rapid Earthquake Information Release System. *Seism. Res. Lett.* 68, 931—943.
- Wu Y.-M., Kanamori H., 2008. Development of an Earthquake Early Warning System Using Real-Time Strong Motion Signals. *Sensors* 8(1), 1—9. DOI:10.3390/s8010001.

The system of early warning on strong sub-crustal earthquakes of the Vrancea zone

© V.M. Shapka, O.I. Lyashchuk, Yu.A. Andrushchenko,
I. V. Korniyenko, V. V. Grabchenko, 2016

The article is devoted to the issue of seismological monitoring and automatic warning of the personnel of potentially hazardous manufactures on the approaching of seismic threat and warning the population, in order to advance their preparation and minimize negative consequences. International experience of creating a system of early warning of earthquakes has been analyzed. The main factors, which determine the seismicity of the territory of Ukraine, have been considered. A model of the system of early earthquake warning for the objects of critical infrastructure of Ukraine has been proposed.

Key word: earthquake, early warning system, nuclear power plant, seismic waves.

References

- Evseyev S. V., 1961. Earthquakes Ukraine (Ukraine catalog of earthquakes from 1000 to 1940.). Kiev: Publ. House of the USSR Academy of Sciences, 75 p. (in Russian).
- Riznichenko Yu. V., Drumya A. V., Stepanenko N. Ya., 1976. Seismicity and seismic shaking Carpatho-Balkan region. Kishinev: Shtiintsa, 118 p. (in Russian).
- Riznichenko Yu. V., Drumya A. V., Stepanenko N. Ya., Simonova N. A., 1980. Seismicity and seismic danger of the Carpathian region. In: *Carpathian earthquake of March 4, 1977 and its aftermath*. Moscow: Nauka, 46—85 (in Russian).
- Pustovitenko V. G., Kulchitskiy V. E., Pustovitenko A. A., 2006. New maps of general seismic zoning of Ukraine. Features of the model of long-term seismic hazard. *Geofizicheskiy zhurnal* 28(3), 60—67 (in Russian).
- Allen R. M., Kanamori H., 2003. The Potential for Earthquake Early Warning in Southern California. *Science* 300, 786—789. DOI:10.1126/science.1080912.
- Böse M., Ionescu C., Wenzel F., 2007. Earthquake early warning for Bucharest, Romania: Novel and revised scaling relations. *Geophys. Res. Lett.* 34, L07302.
- Erdik M., Fahjan Y., Ozel O., Alcik H., Mert A., Gul M., 2003. Istanbul Earthquake Rapid Response and the Early Warning System. *Bull. Earthq. Eng.* 1(is. 1), 157—163.
- Espinosa-Aranda J. M., Jimenez A., Ibarrola G., Alcantar F., Aguilar A., Inostroza M., Maldonado S., 1996. Result of Mexico City early warning system. Elsevier Science Ltd, Eleven World Conference on Earthquake Engineering, Paper № 2132.
- Kamigaichi O., 2004. JMA Earthquake Early Warning. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering* 4, 134—137.
- Kanamori H., 2005. Real-time seismology and earthquake damage mitigation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33, 195—214.
- Lee W. H. K., Shing T. C., Teng T. L., 1996. Design and implementation of earthquake early warning system in Taiwan. Elsevier Science Ltd, Eleven World Conference on Earthquake Engineering, Paper № 2133.
- Wu Y. M., Chen C. C., Shin T. C., Tsai Y. B., Lee W. H. K., Teng T. L., 1997. Taiwan Rapid Earthquake Information Release System. *Seism. Res. Lett.* 68, 931—943.
- Wu Y. M., Kanamori H., 2008. Development of an Earthquake Early Warning System Using Real-Time Strong Motion Signals. *Sensors* 8(1), 1—9. DOI:10.3390/s8010001.