

УДК 519.7

DOI [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2023.43\(2\).155-162](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2023.43(2).155-162)Д. П. Сабов¹, М. М. Шаркаді², Т. Ш. Сабо³

¹ ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,
магістр,

szabodora20@outlook.hu

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0176-8211>

² ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,
доцент кафедри кібернетики і прикладної математики,
кандидат економічних наук, доцент

marianna.sharkadi@uzhnu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1850-996X>

³ ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,
аспірант,

szabotibor11@outlook.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2505-3728>

ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ У ДОСЛІДЖЕННЯХ СЕЙСМОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РЕГІОНУ

Землетруси здатні спричиняти масштабні руйнування та завдавати шкоди людському життю, тому це є предметом багатьох досліджень. Вчені та дослідники прагнуть покращити наше розуміння природи підземних поштовхів та пропонують різні методи передбачення їх початку та оцінки їх впливу.

Нечітке моделювання знаходить широке застосування в дослідженні землетрусів, охоплюючи передбачення землетрусів, оцінку небезпеки, аналіз ризику та розробку систем підтримки прийняття рішень. Нечіткі моделі здатні інтегрувати дані різного типу, такі як сейсмічні дані, геодезичні вимірювання та геологічні дані, щоб передбачити ймовірність і силу майбутніх землетрусів. Крім того, ці моделі можуть враховувати зміни в часі та просторі під час виникнення землетрусів, дозволяючи ідентифікувати регіони з високим ризиком і обчислювати потенційні збитки.

У статті запропоновано застосування підходу нечіткого моделювання в сейсмічних дослідженнях, а також використання нечіткої логіки в сейсмічному моделюванні для обробки неточних даних і врахування невизначеностей. Комбінації нечітких моделей з іншими обчислювальними методами та джерелами даних використані для підвищення точності та передбачуваності.

Ключові слова: нечітке моделювання, функція належності, землетрус, сейсмологічне явище.

1. Вступ. Понад 120 000 квадратних кілометрів, що еквівалентно приблизно 20% загальної території України, підпадають під класифікацію зон сейсмічного ризику. Ці території належать до зон, де можливі підземні поштовхи магнітудою від 6 до 9 балів за шкалою MSK-64. У цих сейсмічно небезпечних зонах проживає значна популяція – 10,9 мільйонів осіб, що становить приблизно 22% від загальної чисельності населення країни. [1] На Рис. 1 показано епіцентри землетрусів у Карпатському регіоні за період з 2019 по 2023 роки.

Закарпатська сейсмогенна зона вирізняється найвищою сейсмічністю в Карпатському регіоні [2], [3]. Тут зафіксовані локальні землетруси магнітудою до 7 балів за шкалою MSK.

2. Хімічні аспекти землетрусів та їхні впливи на екосистеми. Землетруси, властиві природні явища, відзначаються складною системою наслідків,

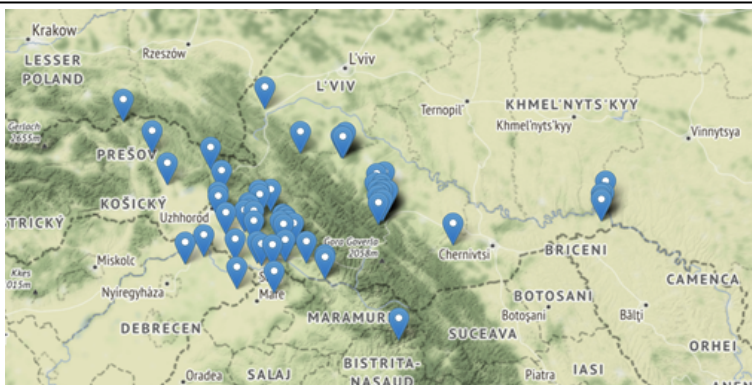


Рис. 1. Епіцентри землетрусів у Карпатському регіоні 2019-2023 рр.

які охоплюють не лише фізичні руйнування, але й ряд хімічних процесів, здатних істотно вплинути на навколишнє середовище та екосистеми. Під впливом землетрусів глибокі шари землі можуть вивільнювати різноманітні гази, включаючи метан та вуглекислий газ. Це може відбуватися через фізичний тиск та зміни температури, спричинені самим землетрусом. Вивільнення таких газів в атмосферу може призвести до змін у хімічному складі повітря в районі події. Зокрема, вуглекислий газ є одним з головних теплотримаючих парникових газів, і його велика кількість в атмосфері може сприяти глобальному потеплінню.

Підземні поштовхи також можуть викликати розчинення мінералів у ґрунті та воді під впливом тиску та змін температури. Це може призвести до змін у хімічному складі ґрунту та водних джерел. Ці зміни в хімічному складі можуть вплинути на рослинність та тваринний світ, оскільки деякі організми можуть бути чутливі до змін у концентрації різних хімічних речовин у навколишньому середовищі.

Ці хімічні аспекти землетрусів підкреслюють важливість вивчення і моніторингу хімічних процесів, які відбуваються під час сейсмічних подій, та розробки заходів для зменшення їхнього потенційного впливу на навколишнє середовище та екосистеми.

3. Постановка проблеми дослідження. Дослідження цього питання викликало необхідність первинної обробки сейсмічних даних. Спочатку було ретельно зібрано вичерпну копію даних про землетруси, що охоплюють період з 2019 року по поточний 2023 рік. Отриманий набір даних, що складається загалом із 71 рядка та 6 стовпців, точно документує важливі параметри, включаючи час початку, широту, довготу, магнітуду, глибину та місцезнаходження. Комплексний аналіз цієї інформації може дати кілька важливих висновків, таких як:

- Просторову дисперсію цих сейсмічних явищ можна визначити, вивчивши їх координати довготи та широти.
- Дослідження розподілу магнітуд дозволяє визначити частоту землетрусів для різних магнітуд.
- Ретельне дослідження розподілу по глибині може дати цінну інформацію про глибини, на яких відбуваються землетруси.
- Дослідження частоти землетрусів у часі дозволяє глибше зрозуміти часовий розподіл цих геологічних явищ.

На Рис. 2 показано розподіл землетрусів за глибиною та магнітудою.

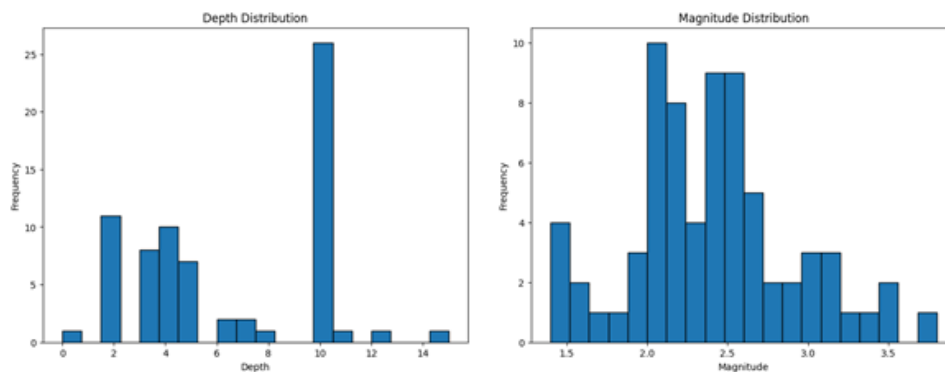


Рис. 2. а) розподіл землетрусів по глибині. б) розподіл магнітуди землетрусів.

Частота землетрусів у період 2019-2023 років наведена на Рис. 3.

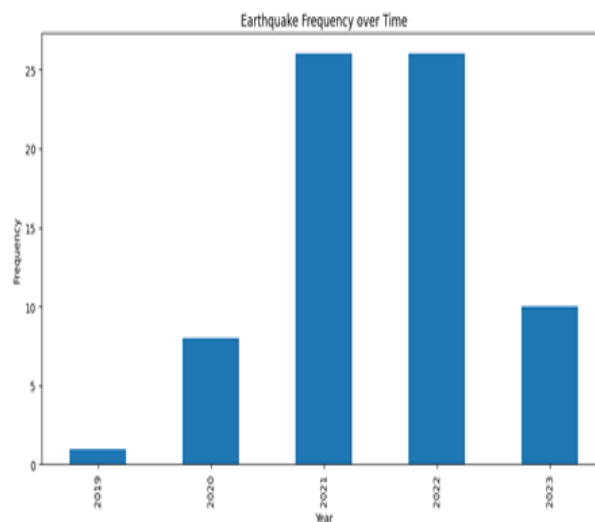


Рис. 3. Частота землетрусів з 2019 по 2023 червень.

Розробка моделей прийняття рішень для задач, що характеризуються низькою формалізацією та використанням експертної інформації, може бути досягнута шляхом використання теорії нечітких множин і створення нечітких логічних систем [4, 5, 6].

Це дослідження присвячене застосуванню нечіткої логіки як надійного підходу для оцінки пов'язаного ризику для кожної сейсмічної події, враховуючи як її величину, так і глибину. Фундаментальна концепція цього дослідження передбачає точне визначення функцій належності та правил, які базуються на експертних знаннях або заздалегідь визначених критеріях. Отриманий показник, який називається «Ризик», ретельно розраховується за допомогою складної системи нечіткого контролю. Крім того, для покращення розуміння розрахованих значень ризику використовується комплексний метод візуалізації з використанням діаграм розсіювання. Поєднання нечіткої логіки з візуалізацією сприяє

більш глибокому розумінню оцінки ризику землетрусів, роблячи суттєвий внесок у сферу сейсмологічних досліджень [7].

4. Результати дослідження. Нечітка логіка, розширення традиційної бінарної логіки, дозволяє обробляти та представляти дані, які є неоднозначними або невизначеними. Структура теорії нечітких множин використовує функції належності для класифікації лінгвістичних змінних на основі їхнього ступеня істинності, дозволяючи більш складний аналіз. Для формалізації знань, отриманих від експерта або групи експертів за допомогою нечітких множин, стає необхідною процедура створення відповідних функцій належності [8]. Ці процедури є ключовим етапом у проблемах прийняття рішень, оскільки якість прийнятих рішень залежить від того, наскільки точно сконструйована функція належності інкапсулює досвід експерта або експертів. Використання теорії нечітких множин для формалізації знань за своєю суттю представляє проблему вибору типу нечіткої множини для побудови функцій належності та відповідної нечіткої моделі, узгодженої з вибраним типом нечіткої множини [4, 5].

Запропоновано функції належності для глибини та магнітуди землетрусів для врахування внутрішньої невизначеності, пов'язаної з цими величинами.

Для змінної "магнітуда":

- Низька: трикутна функція належності з параметрами [0, 0, 4]

$$\mu_{low}(x) = \max \left(0, \min \left(\frac{x-0}{4-0}, \frac{4-x}{4-0} \right) \right);$$

- Середня: трикутна функція належності з параметрами [2, 5, 8]

$$\mu_{medium}(x) = \max \left(0, \min \left(\frac{x-2}{5-2}, \min \left(\frac{8-x}{8-5}, \frac{x-2}{8-2} \right) \right) \right);$$

- Висока: трикутна функція належності з параметрами [6, 10, 10]

$$\mu_{high}(x) = \max \left(0, \min \left(\frac{x-6}{10-6}, \frac{10-x}{10-6} \right) \right);$$

Для змінної "глибина":

- Неглибока: трикутна функція належності з параметрами [0, 0, 30]

$$\mu_{shallow}(x) = \max \left(0, \min \left(\frac{x-0}{30-0}, \frac{30-x}{30-0} \right) \right);$$

- Середня: трикутна функція належності з параметрами [20, 50, 80]

$$\mu_{medium}(x) = \max \left(0, \min \left(\frac{x-20}{50-20}, \min \left(\frac{80-x}{80-50}, \frac{x-20}{80-20} \right) \right) \right);$$

- Глибока: трикутна функція належності з параметрами [70, 100, 100]

$$\mu_{deep}(x) = \max \left(0, \min \left(\frac{x-70}{100-70}, \frac{100-x}{100-70} \right) \right);$$

Для змінної "ризик":

– Низький: трикутна функція належності з параметрами [0, 0, 5]

$$\mu_{low}(x) = \max \left(0, \min \left(\frac{x - 0}{5 - 0}, \frac{5 - x}{5 - 0} \right) \right);$$

– Середній: трикутна функція належності з параметрами [2, 5, 8]

$$\mu_{medium}(x) = \max \left(0, \min \left(\frac{x - 2}{5 - 2}, \frac{8 - x}{8 - 5}, \frac{x - 2}{8 - 2} \right) \right);$$

– Високий: трикутна функція належності з параметрами [6, 10, 10]

$$\mu_{high}(x) = \max \left(0, \min \left(\frac{x - 6}{10 - 6}, \frac{10 - x}{10 - 6} \right) \right);$$

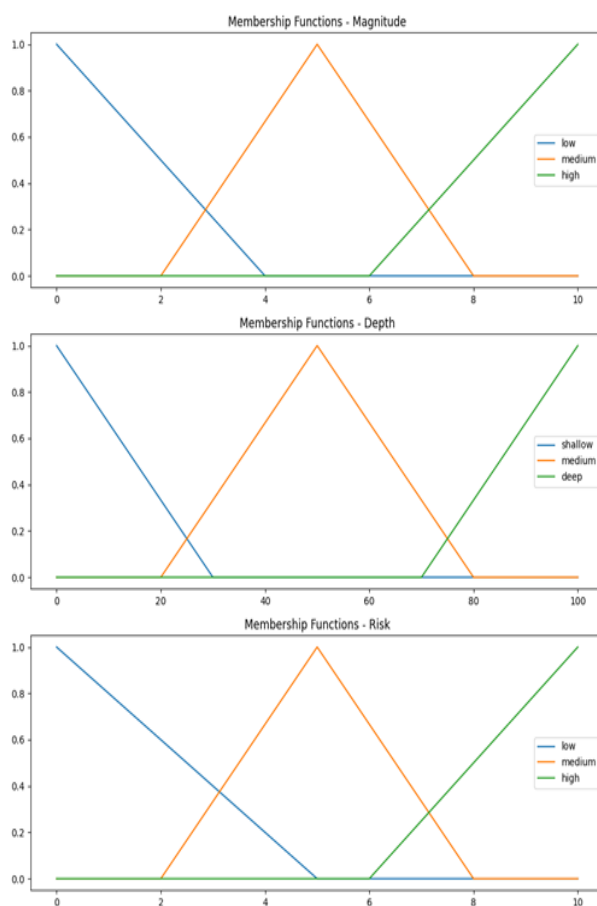


Рис. 4. Функції належності для а) магнітуди, б) глибини, в) ризику.

Для практичного застосування системи нечіткої логіки розроблено набір правил. Ці правила формалізують встановлені знання або заздалегідь визначені критерії, які регулюють зв'язок між глибиною землетрусу, магнітудою та ризиком. Процес оцінювання враховує нюанси та тонкощі, пов'язані з оцінкою ризику землетрусу шляхом застосування підходу, заснованого на нечітких правилах.

Виходом системи нечіткого керування є рівень ризику для кожного землетрусу позначений як «Ризик». Для підвищення зрозумілості та інтерпретації цих оцінок ризиків використовується техніка візуалізації діаграм розсіювання. Цей метод візуалізації, пропонуючи графічне представлення рівнів ризику, полегшує ідентифікацію закономірностей, тенденцій і областей, що викликають серйозне занепокоєння як для дослідників, так і для зацікавлених сторін.

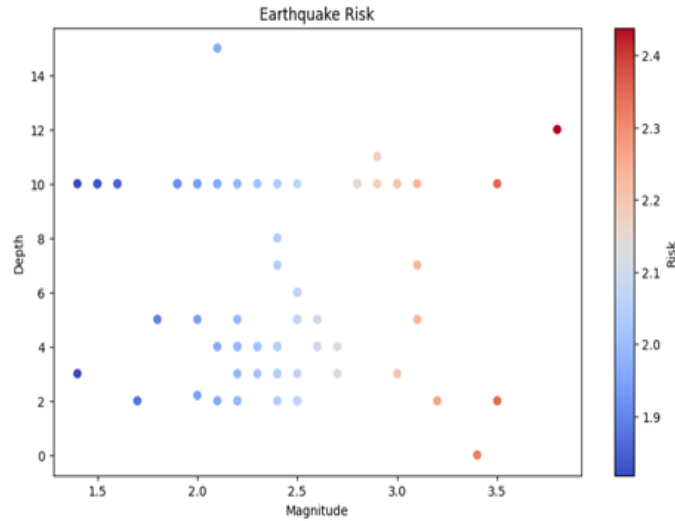


Рис. 5. Розрахунок ризику землетрусу.

Графік (рис. 8) представляє зв'язок між магнітудою, глибиною та рівнем ризику землетрусів у наборі даних за допомогою нечіткої логіки:

- Вісь X (магнітуда): Магнітуда — це міра енергії, вивільненої землетрусом, і зазвичай коливається від 0 до 10. Значення на осі X відповідають магнітуді кожного землетрусу в наборі даних.
- Вісь Y (глибина): вісь Y представляє глибину землетрусів. Глибина означає, наскільки глибоко відбувається землетрус у земній корі. Значення на осі ординат відповідають глибині кожного землетрусу в наборі даних.
- Колір (ризик): колір кожної точки на графіку відображає рівень ризику, пов'язаний із відповідною магнітудою та глибиною землетрусу. Кольорову шкалу вказує кольорова смуга в правій частині графіка. У цьому прикладі кольори варіюються від холодних (низький ризик) до теплих (високий ризик). Ви можете інтерпретувати рівень ризику на основі кольору кожної точки.

Після ретельного розгляду та вивчення стає зрозуміло, що сейсмічні події, які відбуваються на великих глибинах, неодмінно несуть вищий рівень ризику, особливо коли магнітуда перевищує 3,0. Нечітка логіка суттєво підтримує ідею про те, що землетруси з більш глибокими джерелами, як правило, мають більший потенціал для негативних результатів та небезпек [9].

Аналіз показує, що середньозважений рівень ризику становить 20,46231804428824. При більш детальному розгляді даних стає очевидним, що землетруси з найбільшим зваженим ризиком мають наступні атрибути: магнітуда 3,8, глибина 12,0, значення ризику 2,438034 і зважена міра ризику 24,380342.

Таблиця 1.

Рівень ризику землетрусів

Вид ризику	Сума землетрусів за ризиком	Відсоток землетрусів
<i>Низький</i>	29	59.15493
<i>Середній</i>	42	40.84507
<i>Високий</i>	0	0.00000

Ці результати підкреслюють важливість врахування цих сейсмічних явищ під час оцінки комплексної панорами ризику.

5. Висновки. Проведене дослідження покращує наше розуміння складної динаміки сейсмічних явищ і нашу здатність передбачати та усувати їх наслідки. Нечітке моделювання, що використовується в дослідженнях землетрусів, дозволяє точніше охопити притаманну складність цих подій шляхом включення елементів невизначеності та неточності. Це, у свою чергу, дозволяє покращити передбачення землетрусів, комплексну оцінку небезпеки та сформулювати ефективні стратегії для побудови стійких громад у сейсмонебезпечних регіонах. Цього можна досягти шляхом постійного вдосконалення методологій нечіткого моделювання та сприяння співпраці між експертами з різних галузей.

Майбутні шляхи розвитку цього дослідження охоплюють впровадження різноманітних форм функцій належності та дослідження того, як їхні параметри впливають на ефективність нечітких моделей у представленні невизначеностей, притаманних експериментальним даним.

Список використаної літератури

1. Chapman C. H. A new method for computing synthetic seismograms. *Geophysical Journal International*. 2004. Vol. 54, No. 3. P. 481–518.
2. Malytsky D. Seismicity of the Carpathian region. *International Journal of Physical Sciences*. 2006. Vol. 1, No. 2, P. 085–092.
3. Vahdat K., Smith N., Amiri G. Fuzzy multicriteria for developing a risk management system in seismically prone areas. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2014. Vol. 48. P. 235–248.
4. Мальяр М. Моделі і методи багатокритеріального обмежено-раціонального вибору: Монографія. Ужгород : ПА «АУТДОР-ШАРК», 2016. 222 с.
5. Zadeh L. A. Fuzzy sets as a basis for theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems 100 Supplements*. 1999. P. 9–34.
6. Mendel J. M., John R. I., Liu F. Interval type-2 fuzzy logic systems made simple. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 2006. Vol. 14, No. 6, P. 808–821.
7. Назаревич Л. Є., Назаревич А. В. Сейсмічність і деякі особливості сейсмотектоніки українських Карпат. *Геодинаміка*. 2006. Т. 14, № 6, С. 808–821.
8. Andalib A., Zare M., Atry F. A fuzzy expert system for earthquake prediction, case study : The Zagros range. In Proc. of the 3rd International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization. UAE, 2009. P. 1–4.
9. Кендзера О., Пронишин Р., Бень Я., Вербицький С. Сейсмічність і сейсмічна небезпека Карпатського регіону України. *Геодинаміка*. 1998. Т. 1/1998. С. 127–135.

Sabov D. P., Sharkadi M. M., Sabo T. S. Fuzzy models' use in the study of seismological processes in the region.

Due to the ability of earthquakes to cause large-scale destruction and damage to human life, earthquakes have always been the subject of research and concern. Scientists and

researchers are constantly striving to improve our understanding of earthquakes and offer pragmatic methods for predicting their onset and assessing their impact.

Fuzzy modeling is widely used in earthquake research, covering earthquake prediction, hazard assessment, risk analysis, and the design of decision support systems. Fuzzy models are able to integrate different data resources, such as seismic data, geodetic measurements, and geological data, to predict the probability and strength of future earthquakes. In addition, these models can take into account changes in time and space during the occurrence of earthquakes, allowing the identification of high-risk regions and the calculation of potential damage.

This paper proposes the application of the fuzzy modeling approach in seismic research, as well as the use of fuzzy sets and fuzzy logic in seismic modeling to process imprecise data and account for uncertainties. Combinations of fuzzy models with other computational methods and data sources are explored to improve their accuracy and predictability.

Keywords: fuzzy modeling, membership function, earthquake, seismological phenomenon.

References

1. Chapman, C. (2004). A new method for computing synthetic seismograms, *Geophysical Journal International*, 54, 481–518.
2. Malytsky, D. (2006). Seismicity of the Carpathian region. *International Journal of Physical Sciences*, 1(2), 085–092.
3. Vahdat, K., Smith, N., & Amiri, G. (2014). Fuzzy multicriteria for developing a risk management system in seismically prone areas. *Socio-Economic Planning Sciences*, 48, 235–248.
4. Malyar, M. (2016). *Modeli i metody bahatokryterialnoho obmezhenno-racionalnoho vyboru: Monohrafija* [Models and methods of multi-criteria bounded rational choice: Monograph]. Uzhhorod: RA "OUTDOOR-SHARK" [in Ukrainian].
5. Zadeh, L. (1999). Fuzzy sets as a basis for theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems 100 Supplements*, 9–34.
6. Mendel, J., John, R., & Liu, F. (2006). Interval type-2 fuzzy logic systems made simple. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 14(6), 808–821.
7. Nazarevych, L., Nazarevych, A. (2012). Seismicity and some features of seismotectonics of the Ukrainian Carpathians. *Geodynamics*, 12, 145–151 [in Ukrainian].
8. Andalib, A., Zare, M., & Atry, F. (2009). A fuzzy expert system for earthquake prediction, case study: The Zagros range. In *Proc. of the 3rd International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization*. UAE.
9. Kendzera, O., Pronyshyn, R. S., Ben, Y., & Verbytsky, S. (1998). Seysmichnist' i seysmichna nebezpeka Karpats'koho rehionu Ukrayiny [Seismicity and seismic hazard of the Carpathian region of Ukraine]. *Geodynamics*, 1/1998, 127–135 [in Ukrainian].

Одержано 15.09.2023