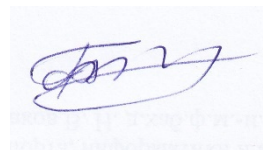


**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ГЕОФІЗИКИ ім. С. І. СУББОТІНА**

БУРТІЄВ РАШІД ЗЕТОВИЧ



УДК 550.830

**МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНКИ СЕЙСМІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ
НА ОСНОВІ ЙМОВІРНІСНИХ МОДЕЛЕЙ СЕЙСМІЧНОСТІ**

04.00.22 – геофізика

**Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук**

Київ-2017

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Лабораторії сейсмології Інституту геології і сейсмології Академії наук Республіки Молдова

Науковий консультант доктор фізико-математичних наук, заслужений діяч науки Республіки Молдова: АЛКАЗ Василь Георгійович

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, **ВИЖВА Зоя Олександрівна**, професор кафедри загальної математики механіко-математичного факультету КНУ Тараса Шевченка

доктор фізико-математичних наук, **Ісмаїл-Заде Алі Тофік огли**, старший науковий співробітник Інституту прикладних геонаук Технологічного Інституту Карлсруе, Німеччина

доктор фізико-математичних наук, професор **МАЛИЦЬКИЙ Дмитро Васильович**, Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, завідувач відділу методів сеймотектонічних досліджень

Захист відбудеться 27 грудня 2017 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.200.01 при Інституті геофізики ім. С.І. Суботіна НАН України за адресою:

03680, м. Київ-142, проспект Палладіна, 32

Fax: +380(44)450-25-20, e-mail: rada-igph@igph.kiev.ua

З дисертацією і авторефератом можна ознайомитися в бібліотеці Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України за адресою:

03680, м. Київ-142, пр-т Палладіна, 32 та на електронному ресурсі

<http://www.igph.kiev.ua>

Автореферат розісланий «27» листопада 2017 р.

Вчений секретар

Спеціалізованої вченої ради Д 26.200.01,

доктор геологічних наук



Бурахович Т.К.

Загальна характеристика роботи.

Актуальність теми. Сейсмічну небезпеку неможливо зменшити, можна зменшити прийнятний сейсмічний ризик, забезпечуючи інженерів-будівельників, проєктувальників та інших фахівців, які приймають рішення, достатньою для цього інформацією. Прийнятний сейсмічний ризик — це певний компроміс між рівнем сейсмічної безпеки і спроможністю суспільства забезпечити її в даний момент часу. Актуальність розвитку методів оцінки сейсмічної небезпеки зростає у зв'язку із зростанням народонаселення, будівництвом висотних і надвисотних будівель, збільшенням кількості об'єктів стратегічної важливості і розвитком міст.

Фундаментальні дослідження сейсмічності і прогнозу сейсмічної небезпеки носять неперервний характер, оскільки удосконалюються системи спостережень, надходить якісно нова інформація, розробляються нові математичні та обчислювальні моделі сейсмічності і проєктування сейсмостійких споруд. Стратегія сейсмостійкого будівництва і зменшення сейсмічного ризику потребує постійного вдосконалення методів розрахунку і складання все більш інформативних нормативних прогнозних карт сейсмічної небезпеки.

У 80-ті роки в Інституті геофізики і геології АН Молдови під керівництвом Н.І. Онофраша були розпочаті дослідження з розвитку кількісних методів оцінки сейсмічної небезпеки. Передбачалося описати вогнище землетрусів у вигляді лінійної інтерференційної системи елементарних випромінювачів, що дозволило б описати механізм вогнища землетрусів, обчислити функцію розподілу параметрів такого випромінювача і висловити сейсмічну небезпеку в інженерних параметрах впливу сейсмічних хвиль, що і потрібно для проєктування сейсмостійких об'єктів. В ході виконання роботи початкові плани зазнали деякі змін, і придбали форму, що викладена в даній роботі.

У визначенні параметрів сейсмічності випадковість відіграє велику роль. Тому детерміноване прогнозування сейсмічної небезпеки має істотні обмеження. Параметри сейсмічності не є невідомими, їх значення, як випадкові величини, можна задавати конкретною функцією розподілу, список яких широкий. Завдяки цьому багато емпіричних розподілів вдається апроксимувати адекватними теоретичними функціями розподілів.

Оцінка сейсмічної небезпеки, яка носить прогнозний характер, залежить від декількох параметрів вогнища землетрусу. Це географічні координати епіцентру, глибина джерела, магнітуда та функція загасання інтенсивності сейсмічного ефекту з відстанню. В ймовірнісному підході до аналізу сейсмічної небезпеки всі параметри землетрусу вважаються випадковими величинами, для визначення ймовірнісної структури яких використовуються відомості з каталогів землетрусів. У деяких випадках інтервал часу, охоплюваний каталогом, є коротшим від періоду повторення землетрусу з найбільшою силою. Функція загасання визначається на основі макросейсмічних даних — містять похибки спостережень, пов'язані з неврахованими факторами і невизначеностями. Все сказане є переконливим аргументом на користь розвитку методів оцінки сейсмічної небезпеки на принципово новій основі.

Територія Республіки Молдова знаходиться переважно в радіусі дії землетрусів Карпатської зони, домінуючим джерелом землетрусу якої є вогнище Вранча. Зона Вранча — сейсмоактивна зона на Європейському континенті, розташована на стику Південних та Східних Карпат у повіті Вранча (Румунія). Епіцентри землетрусів сконцентровані на території $60 \times 80 \text{ км}^2$, а їх вогнища — в межах кори, а також у верхній мантії на глибинах до 200 км. Найбільшу небезпеку становлять землетруси, що виникають на значних глибинах і здатні викликати на території Молдови сейсмічні коливання до 8 балів (за шкалою MSK-64) та горизонтальне прискорення близьке або, що перевищує $0,2 \text{ g}$.

Пропонований метод імовірнісного аналізу сейсмічної небезпеки (ЙАСН) включає в себе чотири основні етапи:

На першому етапі, як і в ДАСН, визначаються сейсмічні зони, і передбачається, що вогнища землетрусів розподілені з певною ймовірністю в геофізичному просторі, який займає зона вогнищ землетрусів. У цьому полягає основна відмінність від ДАСН, де фіксується найближчий до об'єкту активний розлом, тобто розлом, в якому з ймовірністю, що дорівнює одиниці може виникнути осередок землетрусу.

На другому етапі будується марковська модель сейсмічного режиму. На основі ергодичного неперервного марковського ланцюга можна передбачити магнітуду і їх середнє число за фіксований період часу. У ДАСН цьому відповідає закон повторюваності Гутенберга-Ріхтера.

Третім кроком є визначення параметрів загасання сейсмічного ефекту. В даному випадку, аналіз сейсмічної небезпеки проводиться на основі бальності макросейсмічної шкали MSK-64 і в прискореннях зміщення ґрунту по рекомендованим будівельним нормам Європейського Союзу "EUROCODE 8".

На четвертому етапі для конкретної території, яка знаходиться в радіусі дії групи сейсмічних зон, обчислюється сумарна міра сейсмічної небезпеки. Міра сейсмічної небезпеки описується ймовірністю:

$$P_{(\varphi, \psi)}(t, n, m, I^k), \quad (1)$$

згідно якої в географічній точці $Q(\varphi, \psi)$ за час t трапляється n сейсмічних поштовхів, m з яких матимуть інтенсивність I^k . Така міра є універсальною: всі відомі оцінки є її окремими випадками. Потенціал пропонованого методу демонструється на прикладі імовірнісного аналізу сейсмічної небезпеки території Молдови, Румунії та Туреччини.

Територія Республіки Молдова знаходиться в радіусі впливу землетрусів Карпатської зони Вранча. Зона Вранча є унікальною сейсмоактивною зоною на Європейському континенті, розташованою на стику Південних і Східних Карпат в районі Вранча, Румунія. Джерела землетрусів в зоні сконцентровані на території $60 \times 80 \text{ км}^2$ в межах кори, а також у верхній мантії на глибинах $80\text{—}200 \text{ км}$. Найбільшу небезпеку становлять землетруси, що виникають на великих глибинах. Вони здатні викликати на території Молдови сейсмічні струси до 8 балів (за шкалою MSK-64), і горизонтальні прискорення коливань, що перевищують або є близькими до $0,2 \text{ g}$.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Робота виконана в 2007—2015 рр. в лабораторії сейсмології Інституту геології і сейсмології Академії Наук Молдови в рамках науково-дослідних тем: характеристика сейсмічності території Республіки Молдова; ймовірнісний метод оцінки сейсмічної небезпеки; дослідження процесів, що визначають сейсмічність зони Вранча і факторів сейсмічного ризику на території РМ (2001—2005); геодинамічні процеси в зоні Вранча і розвиток методів розрахунку сейсмічної небезпеки і ризику (2006—2010), ІГС-АН РМ; розробка методів кількісної оцінки сейсмічної небезпеки і ризику відповідно до будівельних норм “EUROCODE-8” ІГС-АН РМ; характеристика сейсмічності території Республіки Молдова; ймовірнісний аналіз сейсмічної небезпеки територій Республіки Молдова в рамках міжнародного проекту Італія-Молдова 11.820.08.03/itf "Characterization of seismicity of Moldova Republic territory. Contribution to seismic hazard assessment "; сейсмічне районування території Туреччини.

Мета і завдання дослідження: Розробка методології оцінки сейсмічної небезпеки на основі ймовірнісних моделей сейсмічності; розробка алгоритму і обчислювальної програми оцінки і картування сейсмічної небезпеки.

Для досягнення поставленої мети було вирішено ряд задач:

- застосування кластерного аналізу для виділення зон землетрусів, що становлять загрозу для населеного пункту в певній точці Q з координатами (φ, ψ) ;
- створення ймовірнісної моделі сейсмічного режиму зон джерел землетрусів — потоку параметрів землетрусів: магнітуди, глибини, географічних широти і довготи епіцентрів землетрусів і частоти виникнення сейсмічних подій;
- ймовірнісне визначення місця виникнення і магнітуди майбутніх землетрусів в сейсмічних зонах;
- статистичний аналіз макросейсмічного поля. Алгоритм розрахунку загасання інтенсивності сейсмічних впливів з відстанню;
- дослідження статистичного зв'язку між параметрами землетрусів і сейсмічними зонами на прикладі балканських сейсмічних зон;
- застосування теорії часових рядів для дослідження стаціонарності сейсмічності;
- розробка алгоритму та обчислювальної програми розрахунку і картування сейсмічної небезпеки.

В рамках вирішення основного завдання розглядалися також такі питання як: застосування статистики Гумбеля для оцінки максимальної магнітуди землетрусів; застосування методу моделювання Монте-Карло для створення стохастичного каталогу землетрусів, статистичний аналіз каталогу регіональних землетрусів *ROMPLUS* та ін.

Об'єктом дослідження є сейсмоактивна зона Вранча і сейсмічна небезпека території Молдови і Румунії.

Предметом дослідження є розробка найбільш інформативної, загальної оцінки сейсмічної небезпеки на основі ймовірнісних моделей сейсмічності.

Методи дослідження:

- кластерний аналіз каталогів землетрусів для виявлення сейсмічних зон;
- визначення мінімальної магнітуди комплектності;

- регресійний аналіз для перетворення магніту;
- метод найменших квадратів для обчислення коефіцієнтів рівняння макросейсмічного поля;
- метод Фітцгіббона для апроксимації поля еліпсом;
- оптимізаційні методи для обчислення оптимальних значень коефіцієнтів рівняння загасання;
- теорія марковських процесів для визначення розподілу параметрів землетрусу;
- теорія часових рядів для дослідження стаціонарності потоку сейсмічних подій;
- лемма Неймана-Пірсона для перевірки гіпотези про відповідність стандартного нормального розподілу відхилень реальних значень в балах макросейсмічною інтенсивності в населених пунктах від їх теоретичних значень.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблена принципово нова методологія розрахунку сейсмічної небезпеки, яка дозволяє розрахувати сейсмічну небезпеку в населених пунктах, розташованих в радіусі впливу групи сейсмічних зон і побудувати карту сейсмічного районування великих територій;
- застосовано кластерний аналіз для виявлення сейсмічних зон;
- розроблена марковська модель сейсмічності, яка дозволяє передбачити місце виникнення і магнітуду можливих землетрусів в сейсмічних зонах;
- досліджено статистичний зв'язок між балканськими сейсмічними зонами;
- застосовані математичні методи для апроксимації макросейсмічного поля кривими другого порядку і виявлення еліптичності макросейсмічного поля на прикладі підкорових вранчівських землетрусів;
- здійснено статистичний аналіз макросейсмічного поля, складена модель загасання інтенсивності струшувань та визначені регіональні значення коефіцієнтів рівняння загасання на прикладі вранчівських землетрусів;
- розроблено алгоритм розрахунку і картування сейсмічної небезпеки на основі найбільш інформативної міри потенційної сейсмічної загрози, як ймовірності того, що в географічній точці $Q(\varphi, \psi)$ за час t трапиться n сейсмічних поштовхів, m з інтенсивністю I^k ;
- здійснено ймовірнісний аналіз сейсмічної небезпеки і побудована загальна карта сейсмічної небезпеки територій Молдови, Румунії, Болгарії та території Туреччини.

Положення, що захищаються.

1. Розроблено метод ймовірнісного аналізу сейсмічної небезпеки, який базується на ймовірнісних моделях сейсмічності. Складено алгоритм побудови карти сейсмічного районування на основі найбільш інформативної, на даний момент, розрахованої оцінки потенційної сейсмічної загрози.
2. Застосовано кластерний аналіз для оперативного виділення сейсмічних зон.
3. Побудована ймовірнісна модель сейсмічного режиму (на основі марковської моделі).
4. Досліджено статистичний зв'язок між балканськими сейсмічними зонами.

5. Здійснено статистичний аналіз макросейсмічного поля, складена модель загасання інтенсивності сейсмічних струшувань та визначено регіональні значення коефіцієнтів рівняння загасання.
6. Застосовано методи прикладної математики для апроксимації макросейсмічного поля кривими другого порядку.

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів забезпечується добре розробленими тестовими критеріями перевірки правдоподібності гіпотез з арсеналу математичної статистики. Сучасні моделі будови Землі і теорії, що пояснюють виникнення землетрусів, базуються на непрямих даних, в основному на сейсмічних спостереженнях. Основною метою геофізичних досліджень є вирішення оберненої задачі, тобто визначення будови середовища за параметрами спостережених фізичних полів. По суті, задачі сейсмології — це також зворотні задачі, такі, наприклад, як задача визначення коефіцієнтів рівняння макросейсмічного поля.

Теоретична і практична цінність роботи:

- теоретична значимість роботи визначається тим, що в ній застосовано принципово новий підхід до аналізу сейсмічної небезпеки, а саме: запропонована універсальна, найбільш повна імовірнісна міра сейсмічної небезпеки. Розроблено метод розрахунку сейсмічної небезпеки для територій, розташованих в радіусі впливу групи сейсмічних зон, та методика побудови карти сейсмічного районування великих територій, наприклад для території всієї Європи;
- усі існуючі оцінки сейсмічної небезпеки є окремими випадками запропонованої міри. На цій основі розроблена методика вирішення задачі сейсмічного районування, яка надає найбільш повну інформацію про сейсмічну небезпеку.

Практичне значення отриманих результатів:

Розроблено методологію, яка дозволяє розрахувати сейсмічну небезпеку в населених пунктах, розташованих в радіусі впливу групи сейсмічних зон, і побудувати карту сейсмічного районування великих територій, наприклад, для всієї території Європи.

Даний підхід дозволяє застосувати обчислювальні засоби на всіх етапах розрахунку сейсмічної небезпеки: статистичний аналіз макросейсмічних даних, виділення сейсмічних зон, побудова ймовірнісних моделей сейсмічного режиму, визначення функції загасання інтенсивності сейсмічних впливів, розрахунок і картування сейсмічної небезпеки.

На прикладі вранчівських землетрусів здійснений статистичний аналіз макросейсмічних даних, визначені регіональні закономірності загасання сейсмічного ефекту, розроблено алгоритм і обчислювальна програма для оцінки сейсмічної небезпеки і побудовані карти сейсмічного районування території Республіки Молдова, Туреччини та загальної території Молдови, Румунії та Болгарії. Обчислювальна програма «A Fortran code for the seismic hazard assessment and mapping based on a Markovian model of seismic regime» зареєстрована в фонді програм Інституту методів екологічного аналізу в місті Тіто-Скала, Італія (Istituto di metodologie di analisi ambientale. Tito Scalo, Italy).

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідалися: на Генеральній Асамблеї Європейської сейсмологічної комісії (ЕСК XIX, Москва, 1984),

Всесоюзних нарадах (Агверан, Кишинів, Чорноголовка, період 1983-1988), міжнародних конференціях: ECBR WORKSHOP- 2011, The National Symposium "75 Years from November 10th 1940 Vrancea Earthquake "- 2015 (Бухарест); ESNET (Стамбул, 2012; Варна, 2013, Констанца, 2014 року); International Conference on Moldavian Risks-from Global to local scale (Бакеу 2012, 2014 року); INCERCOM - 2014 року, Conferinta stiintifica consacrata aniversarii de 110 ani de la nasterea geologului basarabean I.M. Suhov - 2015 (Кишинів), Georisks in the mediterranean and their mitigation (Валлетта, 2015).

Особистий внесок автора. В основу дисертації покладені результати роботи здобувача в Інституті геофізики і геології (геології і сейсмології, з 2005 р.) АН Молдови. Наведені результати отримані автором самостійно.

Публікації. Результати роботи викладені в 28 статтях у фахових журналах, в одній монографії та 4 тезах доповідей конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація, загальним обсягом 317 сторінок, складається з вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел, що включає 342 найменування. Робота проілюстрована рисунками і таблицями.

Автор зберігає вдячну пам'ять про перших наставників Г.А. Алібекова, Н.І. Онофраша і викладачів механіко-математичного факультету Київського Національного Університету ім. Т.Г. Шевченко. Висловлює щирю подяку колегам по роботі: В.Г. Алказу, І.Е. Вербицькому, В.Ю. Карданцю, Н.Л. Тропіну, В.І. Чорному, В.І. Шумілі.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. У вступі викладено актуальність роботи, мета і завдання дослідження, наукова новизна, теоретична і практична значущість отриманих результатів, наводяться відомості про їх апробацію та практичну реалізацію.

У першому розділі проаналізовано основні результати робіт в галузі оцінки сейсмічної небезпеки і обґрунтована актуальність напрямків, які розвиваються в даній роботі.

Перші дослідження сейсмічної небезпеки були виконані ще в кінці ХІХ століття у Великобританії [Musson, Sargeant, 2007]. Метою цих робіт було бажання ранжувати простим способом території, які в різному ступені постраждали від впливу землетрусів. На цьому етапі не ставилося завдання кількісних оцінок очікуваних сейсмічних впливів, достатньо було показати сейсмічний ефект історичних землетрусів. Наступним кроком став перехід від методів спостереження до детерміністських (ДАСН) та ймовірнісних (ЙАСН) методів аналізу сейсмічної небезпеки. Оцінка сейсмічної небезпеки — перший крок до сейсмічного районування та оцінки сейсмічного ризику. В загальному вигляді, сейсмічна небезпека визначається як максимальні сейсмічні впливи, очікувані з певною ймовірністю на заданій території в заданому інтервалі часу і зумовлені повторюваністю землетрусів. Сейсмічна небезпека доповнюється також вторинними явищами, що супроводжують землетруси (поверхневі розриви, зсуви, обвали, цунамі та ін.), що впливають на нормальну життєдіяльність.

Сейсмічне районування в США і в деяких інших країнах, почало проводитися в 20-ті роки минулого століття інженерами-будівельниками, за участю сейсмологів і геологів, з метою забезпечення сейсмостійкого будівництва. Картування сейсмічної небезпеки проводилося в параметрах руху ґрунту (прискорення, швидкість і зміщення) [Musson, Sargeant, 2007].

Детерміністський метод передбачає виконання таких кроків:

- виявлення та характеристика всіх потенційних джерел землетрусів, здатних викликати; значні зміщення ґрунту в заданій точці. Характеристика джерел землетрусів означає визначення геометрії джерела і обчислення максимально можливої магнітуди землетрусу;
- обчислення найменшої відстані між точкою спостереження і джерелом землетрусів;
- вибір землетрусу, здатного викликати найбільші зміщення ґрунту на досліджуваній місцевості (домінуючий землетрус). Вибір відбувається порівнянням значень зміщень ґрунту, викликаних всіма землетрусами. Розрахунки проводяться на основі теорії поширення сейсмічних хвиль з урахуванням їх загасання по мірі віддалення від джерела землетрусів і впливу місцевих ґрунтів, які зазвичай подаються у вигляді горизонтально шаруватого середовища. При цьому розглядаються плоскі фронти сейсмічних хвиль, які викликають сейсмічні впливи на вільній земній поверхні, не навантаженій будь-якою спорудою;
- визначення за законом загасання значення руху ґрунту на епіцентральної відстані R , викликаного землетрусом з магнітудою M .

Сейсмічна небезпека на досліджуваній території визначається найбільшими зміщеннями ґрунту. Ідеєю ДАСН, яка найчастіше практикується, є визначення найгіршого сценарію розвитку сейсмічної ситуації на деякій площадці при виникненні землетрусу.

Перевагами даного методу є:

- відносна простота і швидкість отримання оцінок;
- висока точність результатів;
- придатність адекватності моделі сейсмічності як тестового критерію.

Метод ДАСН корисний при розрахунку сейсмічної небезпеки територій, окремих міст і стратегічно важливих об'єктів.

Недоліки методу:

- не враховує важливі характеристики сейсмічного режиму сейсмоактивних територій, такі як похибки в оцінці параметрів землетрусів, невизначеності при створенні математичних моделей геофізичних процесів, особливості сейсмічного режиму досліджуваних територій. Крім того, не завжди вдається однозначно виявити найближчий сейсмоактивний розлом і визначити його геометрію. Не виявлені (приховані) розломи не розглядатимуться як сейсмоактивні і не будуть враховані в оцінці небезпеки. Кількісне вираження найбільшої можливої сейсмічної події пов'язане із значними невизначеностями. В такому випадку, рекомендується оцінити найбільший землетрус за період експлуатації об'єкта;

- детерміністські методи, які засновані на минулих сейсмічних спостереженнях, виявляють більшу частку випадковості в результатах аналізу сейсмічної небезпеки. Похибки в оцінці параметрів землетрусів та невизначеності при створенні математичних моделей геофізичних процесів обмежують застосування детерміністського підходу до сейсмічного районування.

Перша в світі офіційна карта сейсмічного районування (СР) була складена Г.П. Горшковим в 1937 р. для всієї території СРСР. Пізніше ці карти регулярно оновлювалися, приблизно кожні 10 років, з урахуванням відомостей про землетруси, які відбулися і в зв'язку з удосконаленням методів розрахунку сейсмічної небезпеки. Необхідність поновлення карти сейсмічного районування була пов'язана з тим, що в зонах, які вважалися раніше асейсмічними або зовсім несейсмічними, відбувалися сильні землетруси. Оцінка сейсмічної небезпеки зводилася до реєстрації макросейсмічного ефекту, вираженого в цілочисельних балах, що охоплюють при сильних землетрусах великий діапазон інтенсивності сейсмічних впливів. Це призводило до завищення або заниження оцінок можливого сейсмічного ефекту, що впливало на якість і вартість сейсмостійкого будівництва. Методи аналізу сейсмічної небезпеки залишалися детерміністськими: максимальна магнітуда, графік повторюваності, карта активності, сейсмічне струшування (середнє число сейсмічних поштовхів деякої бальності) не є статистичними величинами. У 60-ті роки минулого століття Ю.В.Різниченко в Інституті фізики Землі АН СРСР розробив алгоритми і програми розрахунку сейсмічного «струшування», поклавши початок кількісним методам вивчення сейсмічності і оцінки сейсмічної небезпеки в СРСР.

На відміну від карт СР зразка 1937, 1957, 1968 і 1978 рр., карти ЗСР-97 [Уломов, Шумилина, 1999] складаються з трьох карт, де в вузлах географічної сітки, яка покриває досліджувану територію з деяким кроком дискретності, розрахована імовірність не перевищення значень відповідної бальності. Метод ЗСР-97 і його вдосконалений варіант ЗСР-2012 використовують в повній мірі геометрію джерела, особливості геофізичного середовища і сейсмічних процесів в ній, уявлення про граничну величину максимально можливої магнітуди землетрусів, і являються значним просуванням на шляху інформаційного збагачення оцінки сейсмічної небезпеки. ЗСР-2012 передбачає збільшення періодів повторюваності і введення дробових балів, проте дані методи, по суті, залишаються гібридними, так як присутність фактора ймовірності не перевищення деякого порога не надає їм характеру імовірнісного методу і характеризується тими ж недоліками, властивими ДАСН.

Концепції ДАСН і ЙАСН не повинні протиставлятися, їх потенціал повинен бути використаний для вирішення загального завдання: удосконалення методів розрахунку сейсмічної небезпеки і підвищення якості карт СР. Адже зведення сучасних, надійних конструкцій, де застосовуються нові технології сейсмостійкого будівництва, пред'являє високі вимоги до якості та інформаційної наповненості оцінки сейсмічної небезпеки. Недоліки і невизначеності, що існують в ДАСН, сприяли розвитку методології оцінки сейсмічної небезпеки на ймовірнісній основі.

Сейсмічний процес пов'язаний зі складними геологічними, фізико-хімічними процесами, що відбуваються в Землі, з сумарним впливом фізичних полів Землі і гравітаційних сил небесних тіл та їх впливом на глобальну тектоніку. Ці процеси характеризуються великою кількістю ознак, як і сейсмічні процеси.

Зв'язок між сейсмічністю і перерахованими вище впливовими процесами має чотири форми [Malachow, 1981]:

- закону, коли залежність між ознаками встановлена, невідворотна, однозначна і поява землетрусу повторюється кожного разу, коли спостерігаються впливові процеси;
- статистичного закону, коли сейсмічна подія може трапитися, а може і ні, хоча частина або всі ознаки впливів спостерігаються;
- теорії або принципи, коли немає певної закономірності між перерахованими вище процесами і сейсмічністю;
- гіпотези, коли немає достатньо підстав для теорії, то для пояснення феномена виникнення землетрусів при спостереженні процесів впливу висувається гіпотеза.

В ЙАСН беруть участь всі чотири форми залежності.

Епоха ймовірного аналізу сейсмічної небезпеки, почалася з публікації статті Корнелла [Cornell, 1968], де пропонувався метод аналізу сейсмічної небезпеки на основі ймовірності перевищення інтенсивністю сейсмічних впливів деякого порога в задані інтервали часу. Ця ймовірність, була більш інформативною мірою для обґрунтування проектних і конструктивних рішень, в порівнянні з оцінками ДАСН, і швидко набула широкого поширення в більшості країн світу.

В СРСР технологія ЙАСН була розпочата під керівництвом Ю.В.Різніченко і отримала подальший розвиток в роботах Н. І. Онофраша [Онофраш, 1981], В.І. Шуміли [Шумила, 1985] А.А. Гусева, В. Уломова [Гусев, Шумилина, 1995; Уломов, Шумилина, 1999] та ін.

Загалом, метод, який з виникненням деякої сейсмічної події пов'язує ймовірнісну міру, називається ймовірнісним. Ймовірнісний аналіз сейсмічної небезпеки ґрунтується на випадковому характері самих сейсмічних подій, що виражається в розподілі їх параметрів. На відміну від детерміністських методів, ймовірнісний підхід дозволяє враховувати великий обсяг даних.

Загальноприйнятої оцінки сейсмічної небезпеки не існує. Багато країн прийняли за основу американські стандарти, пристосовавши їх до регіональних особливостей сеймотектонічних умов і до місцевих норм будівництва. Ряд сейсмологів [Algermissen, Perkins, 1976; Sägerser, Mayer-Rosa, 1978; Karnik et al., 1981; Schenk et al., 1983; Frankel, 1995; Cramer et al., 2000; Baker, 2008; Golbs, 2008] вдосконалили запропонований Корнеллом ймовірнісний аналіз сейсмічної небезпеки на основі моделей сейсмічності. Активні розлами (лінійні і точкові джерела) і поверхні розриву розглядаються в якості потенційних джерел землетрусів. Метод Вороного і кластерний аналіз застосовується для ідентифікації сейсмічних зон. При нестачі сейсмостатистики, для заповнення бази сейсмічних даних стали застосовувати метод Монте-Карло.

Сейсмологія є здебільшого емпіричною наукою, так як її твердження і моделі ґрунтуються на фактах і спостереженнях. Результати спостережень містять

випадкові і систематичні похибки. Типові джерела випадкових похибок в сейсмології — це незначні помилки реєстрації сейсмічних даних, перешкоди і неточності параметрів самої сейсмічної апаратури. Помилки, невраховані фактори та існуючі, на даному етапі розвитку наук про Землю, невизначеності в геофізиці впливають на якість геофізичних моделей. Згідно теорії, помилки, які носять випадковий характер, розподіляються за нормальним законом і піддаються обробці за допомогою апарату математичної статистики.

Визначення сейсмічності пов'язано з безліччю невизначеностей, через які параметри сейсмічності визначаються з похибками. Неможливо прямими спостереженнями за сейсмічністю змодельовати розподіл інтенсивності майбутніх сейсмічних поштовхів, так-як період повторюваності великих землетрусів іноді становить десятки і сотні років, тоді як основний продукт спостережної сейсмології — каталоги землетрусів охоплюють надто короткий, для збору достатньої кількості спостережень за землетрусами, інтервал часу. Імовірнісний підхід щодо оцінки сейсмічної небезпеки, в умовах існуючих невизначеностей в параметрах сейсмічності і похибок в їх оцінках, використовує добре розроблені методи теорії ймовірностей і математичної статистики. У своїй основі ЙАСН є кількісним методом оцінки сейсмічної небезпеки, який дозволяє об'єднати всі доступні відомості про сейсмічність: розташування джерел, частота виникнення сейсмічних подій, магнітуда землетрусів, а також модель поширення сейсмічних коливань тощо.

Сейсмічна зона характеризується: геолого-геофізичними ознаками, особливостями геологічного розвитку регіону (інтенсивність рухів і будова тектонічних блоків), геодезичними даними про сучасні рухи земної кори, геофізичними даними, що описують глибинну будову регіону і розподіл фізичних властивостей гірських порід на різних глибинах.

На даний момент часу алгоритм ЙАСН складається з 5 основних етапів [Baker, 2008].

1. На відміну від ДАСН, де розглядається тільки найбільша сейсмічна подія, враховуються всі джерела землетрусів, здатні викликати небезпечні для цілісності інфраструктури зміщення ґрунту на досліджуваній площі. Це можуть бути розломи, які, зазвичай, мають форму плоскої поверхні, виявленої за спостереженнями над розташуванням джерел історичних землетрусів та з аналізу геологічних даних. Не розпізнаний розлом, як джерело землетрусів, представляється в формі лінії або кола, де в будь-якій точці може виявитися джерело землетрусу. Джерело в формі кола, часто використовується для врахування фонові сейсмічності або ж для землетрусів, які не пов'язані ні з яким розломом. Лінійне джерело підходить для моделювання розломів, які існують на границі двох тектонічних плит. Не охоплена каталогом територія, на якій за історичними відомостями спостерігалися землетруси, за допомогою діаграми Вороного з використанням принципу рівної щільності епіцентрів, розбивається на потенційно небезпечні географічні сейсмічні зони не пов'язані з реальною сейсмічністю.

В авторському варіанті перевага віддається реальним сейсмічним зонам, а, при їх відсутності в каталозі землетрусів, розпізнавання сейсмічних зон проводиться за допомогою кластерного аналізу.

2. На тектонічних розломах можуть відбуватися землетруси різної магнітуди. Розподіл магнітуд визначається на основі закону повторюваності Гутенберга-Ріхтера.

Для обчислення максимальної величини магнітуди автор пропонує застосувати статистику екстремальних значень.

3. Визначається розподіл відстані між географічною точкою і всіма джерелами землетрусів. Передбачається, що землетруси з однаковою ймовірністю можуть відбутися в будь-якій точці сейсмічної зони.

Автор пропонує розбити чотиривимірний простір, який є декартовим добутком діапазонів можливих значень широти, довготи, глибини і магнітуди (параметри землетрусів) на елементарні джерела землетрусів (ЕДЗ). Спостережувані в ЕДЗ землетруси, утворюють потік сейсмічних подій, який є реалізацією ергодичного неперервного 4-вимірного марковського ланцюга. Застосування марківської моделі дозволяє визначити спільний кінцевомірний розподіл землетрусів по ЕДЗ і обчислити необхідні для ЙАСН параметри сейсмічного режиму. Залежно від віддалення географічної точки від ЕДЗ обчислюється епіцентральна відстань, або відстань Джойнера-Бура.

4. Наступним кроком є побудова моделі зміщень ґрунту, яка допомагає визначити розподіл ймовірностей інтенсивності коливань ґрунту в залежності від магнітуди, відстані, механізму землетрусу, геологічних особливостей в приповерхневих шарах, наявності ефекту спрямованості тощо. Оскільки число факторів – велике, розглядається спрощена модель загасання сейсмічного ефекту в залежності від магнітуди і відстані.

Проведений автором статистичний аналіз макросейсмічних даних проміжних вранцівських землетрусів показує, що макросейсмічне поле апроксимується еліпсом, а відхилення спостережуваних значень інтенсивності від теоретичних значень відповідає нормальному розподілу

5. На останньому етапі обчислюється 10%-на ймовірність перевищення інтенсивністю сейсмічного впливу заданого порогу a_k , (зазвичай, в прискореннях зміщення ґрунту) і знаходиться річна частота цих перевищень для землетрусів з деякого джерела. Якщо ж джерел декілька, то сумарна частота складається з суми частот усіх джерел. Далі обчислюється ймовірність перевищення деякого порогу інтенсивності сейсмічних впливів за 50 років.

Однак, оцінка, виражена в ймовірності перевищення, із заданою ймовірністю значущості, деякої величини інтенсивності сейсмічного ефекту за 50 років, не є достатньо інформативною і являється окремим випадком ймовірності (1), запропонованої автором в якості універсальної оцінки сейсмічної небезпеки. Якщо ж джерел землетрусів є декілька, то внесок кожного джерела в сумарну оцінку сейсмічної небезпеки враховується додаванням ймовірності перевищення для кожного ЕДЗ за допомогою формули повної ймовірності.

Пропонований автором метод аналізу сейсмічної небезпеки є продовженням досліджень по ЙАСН і містить нові підходи до моделювання сейсмічного режиму, дослідженню макросейсмічних даних, визначення розподілу магнітуд, інтенсивності сейсмічних впливів і розрахунку сейсмічної небезпеки. Імовірнісний фактор бере участь на всіх етапах аналізу сейсмічної небезпеки: розташування джерела землетрусу; імовірнісна модель сейсмічного режиму; розподіл числа землетрусів; визначення максимальної магнітуди; розподіл інтенсивності сейсмічних впливів і обчислення вкладу сейсмічних зон в сумарну сейсмічну небезпеку.

Для ілюстрації можливостей методу проводився ЙАСН Молдови. Сейсмічна небезпека для території республіки Молдова головним чином визначається сейсмічною зоною Вранча. Перша карта сейсмічної небезпеки Молдови, заснована на сейсмологічних і геологічних даних, була складена Інститутом Фізики Землі Академії наук СРСР в 1957 р. Південно-західна частина Молдови була віднесена до зони сейсмічної інтенсивності VIII балів, решта території знаходилася в VII бальній зоні. Згідно з картою СР-69 були зроблені поправки до попередньої карти сейсмічного районування — для північної і північно-східної території Молдови, де рівень потенційних сейсмічних впливів був знижений до 6 балів [Друмя та ін., 1980]. Оновлена в 2009 р. [Алказ та ін., 2009], з урахуванням нових даних, карта сейсмічного районування території республіки Молдови СР-78, яка включає ізолінії сейсмічної інтенсивності 6, 7 і 8 балів, відповідно до шкали MSK-64, на якій 8-бальна зона є меншою, у порівнянні з попередньою картою, все ще є нормативним документом в Республіці Молдова.

Імовірнісні карти сейсмічної небезпеки виявилися корисні при сейсмостійкому будівництві. Вирішенню цієї проблеми присвячено багато робіт і були запропоновані різні оцінки сейсмічної небезпеки: сейсмічна збуреність; ймовірність перевищення порога інтенсивності, відповідно деякої ймовірності; і т.д. Методи оцінки сейсмічної небезпеки постійно вдосконалювалися, оновлювалися карти СР, які ставали все якіснішими. Однак існуючі оцінки сейсмічної небезпеки і карти СР все ж таки не досить універсальні і інформативні для оптимального планування, управління ризиком і будівництва в сейсмонебезпечних областях.

Оцінка сейсмічної небезпеки, яка носить прогнозний характер, залежить від декількох параметрів джерел землетрусів. Це географічні координати епіцентру, глибина джерела, магнітуда і функція загасання інтенсивності сейсмічного ефекту з відстанню. В імовірнісному підході до аналізу сейсмічної небезпеки всі параметри землетрусу представляються випадковими величинами, для визначення ймовірнісної структури яких використовуються відомості з каталогів землетрусів. У деяких випадках інтервал часу, охоплюється каталогом, коротше періоду повторення землетрусу з найбільшою магнітудою. Тому, для обчислення максимальної величини магнітуди застосовувалася статистика екстремальних значень Гумбеля. Функція загасання визначається на основі макросейсмічних даних, що містять похибки спостережень, пов'язані з неврахованими факторами і невизначеностями. Все сказане є переконливим аргументом на користь розвитку методів оцінки сейсмічної небезпеки на принципово новій основі.

У другому розділі здійснюється виділення сейсмічних зон. Спостереження показують, що джерела землетрусів розподілені нерівномірно, мають тенденцію групуватися, утворюючи сейсмічні зони. Сейсмічні зони є відображенням географічного поділу областей з різними геолого-структурними, тектонічними і сейсмічними особливостями. Істотним кроком в дослідженні сейсмічності країн або територій являється розпізнавання сейсмічних зон, які зазвичай ідентифікуються в результаті комплексних сейсмотектонічних досліджень.

Просторовий розподіл землетрусів не є рівномірним, отже, на земній кулі можна виділити зони з різними особливостями сейсмічного режиму: сейсмічно активні, менш активні і асейсмічні зони. У каталогах землетрусів містяться необхідні для аналізу сейсмічної небезпеки відомості, і часто вказується ідентифікатор сейсмічної зони. Проте, у багатьох випадках, каталоги складені за територіальною ознакою без вказівки сейсмічних зон, або ж зовсім не наводиться географічна приуроченість землетрусу (*ROMPLUS*, *PDE*). В такому випадку, для оперативного виділення сейсмічних зон можна застосувати формальні методи: діаграма Вороного, кластерний аналіз. Діаграму Вороного можна застосувати для виявлення областей рівної щільності епіцентрів. Та обставина, що джерела землетрусів групуються в просторі, наштовхнуло на думку про застосування кластерного аналізу для виділення компактних груп джерел землетрусів. Кластерний аналіз знаходить застосування в сейсмології, наприклад для підрозділу джерел землетрусів на структуровані і розсіяні використовувалися методи кластерного аналізу на основі «індексу Морішіти», або методу найближчого сусіда [Шебалин, 1997; Арефьев, 2003; Golbs, 2008, Gvishiani et al., 2012].

Кластерний аналіз дозволяє скорочувати розмірність даних, роблячи їх класифікацію. У кластерному аналізі об'єкти (землетруси) деякої множини розбиваються на кластери за принципом схожості. Об'єкти, що належать одному кластеру, повинні бути максимально подібними, а об'єкти, що належать різним кластерам різнорідними. В даному випадку об'єктами є епіцентри землетрусів. Кластерний аналіз включає в себе більше 100 різних алгоритмів, дозволяє аналізувати показники різного типу даних, скорочувати розмірність простору даних, робити їх структуру наочною. Єдине обмеження: шкали, в яких вимірюються дані, повинні бути порівняні.

В цьому розділі вирішувалися наступні завдання:

- кластеризація епіцентрів румунських і турецьких землетрусів. Перевірка якості кластерного рішення на прикладі каталогу землетрусів Балкан;
- застосування дискримінантного аналізу для класифікації епіцентрів наступних землетрусів за сейсмічними зонами – доповнення каталогу.

З урахуванням особливості розв'язуваної задачі застосовувалися такі методи для кластеризації: обчислення середньої відстані між кластерами, метод Варда, обчислення відстані Евкліда між об'єктами, в якості оцінки їх схожості. Об'єктами є епіцентри, які задаються географічними широтою і довготою джерел землетрусів. Відстані між цими об'єктами визначаються обраною мірою схожості. Оцінки схожості залежать від типу змінної і шкали, до якої вона відноситься. Для даних, що відносяться до інтервальної шкали, існує безліч мір подібності об'єктів.

Найпоширенішою мірою визначення відстані між двома точками на площині $Z_1(x_1, y_1)$, $Z_2(x_2, y_2)$, утвореної координатними осями, є міра Евкліда ($r = 2$):

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2)$$

При застосуванні кластерного аналізу необхідно визначитися з мірою подібності епіцентрів землетрусів і подібності кластерів. Відстань між парою кластерів, для чого застосовується метод, оснований на обчисленні середньої відстані між кластерами - середня відстань між групами (Between-groupslinkage):

$$d(C_r, C_h) = \frac{1}{n_r n_h} \sum_{x_r \in C_r} \sum_{x_h \in C_h} d(x_r, x_h) = \frac{1}{n_r n_h} \sum_{i=1}^{n_r} \sum_{j=1}^{n_h} \sqrt{(x_{ri} - x_{hj})^2 + (y_{ri} - y_{hj})^2} \quad (3)$$

де n_r , n_h — число точок в кластерах C_r , C_h , відповідно.

Існують різні способи розбиття заданої сукупності спостережень на кластери (сейсмічні зони). Представляє практичний інтерес завдання порівняльного аналізу якості кластерних рішень, які визначаються на множині всіх можливих розбиттів вибірки епіцентрів землетрусів, що спостерігаються на групи кластерів. Тобто, в процесі кластеризації виходять групи, що складаються з різного числа кластерів, і потрібно визначити групу з оптимальним числом кластерів. Під найкращою розбивкою на кластери мається на увазі таке число розбиття сукупності епіцентрів, при якому досягається екстремум обраного функціоналу якості. Для пошуку найкращого кластерного рішення проводиться кластеризація при різних числах кластерів групах G і вибирається те рішення G_0 , при якому досягається поліпшення функціоналу якості – ступеня схожості об'єктів всередині кластерів. При виборі числа кластерів потрібно керуватися компромісом між однорідністю кластерів і бажанням скоротити обсяг даних. У даній роботі використовувалися деякі критерії оптимізації кластерного рішення з існуючої множини методів: мінімум сумарної дисперсії, Галинського-Харабаша, критерій внутрішньо-кластерного індексу, статистика силуетів, метод Кржанівського-Лая, непараметричний метод Сюгера-Джеймса, інформаційний критерій Акайке в двокроковому кластерному аналізі, критерії однорідності кластерів.

Існує безліч мір схожості об'єктів, алгоритмів обробки кластерів і способів визначення оптимального кластерного рішення — групи з оптимальним числом кластерів. Проте не існує загального критерію визначення числа кластерів. Для порівняння альтернативних кластерних рішень можна використовувати однорідність виділених кластерів. Найкращим вважається кластерне рішення, де однорідність вища. Поряд з однорідністю кластерів, ще потрібно враховувати відповідність кластерних рішень структури даних і перевірити адекватність виділених кластерів. При прийнятті рішень потрібно звернути увагу на стійкість і доцільність кластерних рішень. Стійкість кластеризації визначає, наскільки різними є групи кластерів виділені при багаторазовому застосуванні кластерного аналізу на одній і тій же множині епіцентрів. Оптимальне кластерне рішення визначається кількістю кластерів в тій групі, в якій для всіх кластерів досягається найкраща стійкість.

В якості навчальної і пробної вибірки для демонстрації ефективності кластерного аналізу використовувався каталог землетрусів Південного сходу

Європи [Shebalin et al., 1990], який містить відомості про 3003 землетруси, які відбулися в 18 сейсмічних зонах за період 1900—1990 рр. При порівнянні епіцентрів в існуючих сейсмічних зонах і виділених алгоритмом k -середніх спостережено 97%-ний збіг. Висока частка збігів є показником ефективності методу. Однак кластерний аналіз, будучи формальним методом, не може враховувати геолого-геофізичні характеристики зони джерел землетрусів, але цілком придатний для оперативного сейсмічного зонування (групування джерел землетрусів). За допомогою дискримінантного аналізу можна поповнити каталог відомостями про подальші землетруси.

У третьому розділі проводиться статистичний аналіз каталогів землетрусів. Одним із значущих чинників, що визначає якість аналізу сейсмічної небезпеки є модель сейсмічності (сейсмічний режим) зони джерел. Сейсмічність — схильність Землі або окремих її територій до впливу землетрусів. Сейсмічність характеризується:

- частотою виникнення землетрусів;
- статистичним розподілом сили поштовхів (магнітуди);
- просторовим розподілом джерел;
- макросейсмічними спостереженнями над сильними сейсмічними подіями (інтенсивність сейсмічних впливів, картина завданих збитків).

Каталог землетрусів є важливим джерелом, що містить необхідну і достатню для аналізу сейсмічної небезпеки інформацію про сейсмічні події. Отже, другим кроком для аналізу сейсмічної небезпеки, після виділення сейсмічних зон, є створення бази даних у формі робочих каталогів спостережуваних в сейсмічних зонах землетрусів. У геолого-геофізичних процесах присутній елемент невизначеності і складності, властиві випадковим подіям. Для дослідження таких явищ застосовуються методи теорії ймовірностей і математичної статистики.

Зв'язок між реальним світом даних і світом теоретичних моделей досліджується за допомогою математичної статистики, яка базується на методах теорії ймовірностей, і в якійсь мірі вирішує зворотні задачі. Сейсмічні процеси є незапланованими експериментами, які ставить природа. Палеосейсмологічні дослідження показують, що тектонічні процеси, що призводять до виникнення джерел землетрусів, тривають мільйони років, тоді як період інструментальних спостережень почався тільки в кінці XIX століття.

Таким чином, у розпорядженні дослідників є одна єдина вибірка — частина генеральної сукупності — і по ній доведеться судити про властивості генеральної сукупності. На відміну від звичайної статистичної вибірки порядок послідовності (моменти часу настання землетрусів t_1, t_2, \dots, t_N) має тут істотне значення.

Результати спостережень містять випадкові і систематичні помилки. Помилки, невраховані фактори і невизначеності в геофізиці, існуючі на даному етапі розвитку наук про Землю, впливають на якість геофізичних моделей, і у нас немає можливості повторити спостереження, і вибрати моменти його виникнення. Отже, створення адекватних моделей висуває вимоги до якості вибірових даних і способам їх підготовки. Сейсмічні процеси відбуваються і розвиваються в часі і просторі під дією внутрішнього детермінізму глобальної тектоніки. Невизначеності,

пов'язані з переплетенням внутрішніх фізичних полів Землі і гравітаційної сили небесних тіл, їх впливом на глобальну тектоніку, вносять елемент випадковості в моделях сейсмічності. Тривалість періоду інструментальних спостережень є лише миттю в геологічній історії зони джерел землетрусів, і тому, на відносно короткому відрізку часу сейсмічність зони не може зазнавати значних змін, тобто повинна залишатися стаціонарною.

Для дослідження сейсмічного режиму і аналізу сейсмічної небезпеки будуть достатні послідовності значень параметрів землетрусів. Сейсмічний режим є потоком сейсмічних подій, які реєструються в порядку їх виникнення і утворюють часовий ряд. Основні припущення, що лежать в основі аналізу часових рядів, полягають в стаціонарності процесу і можливості його адекватного опису за допомогою нижчих моментів розподілу ймовірностей.

Крім стаціонарності при аналізі часових рядів зазвичай використовується припущення від ергодичності до ймовірнісних характеристик, тобто, коли характеристики, обчислені по реалізації і за часом збігаються. Наприклад, ергодичність до математичного сподівання означає, що середнє по безлічі реалізацій дорівнює середньому по часу.

Однією з основних задач математичної статистики є оцінювання тісноти лінійного зв'язку між двома випадковими величинами. Регресійний аналіз застосовується тоді, коли всі фактори є кількісними. Якщо фактори є якісними, то застосовується дисперсійний аналіз. При змішаній моделі, коли одні фактори є кількісними, а інші якісними застосовується коваріаційний аналіз. У сейсмології знаходять застосування всі три методи аналізу статистичного зв'язку.

Для застосування закону загасання необхідно привести значення магнітуд до єдиного типу, ніж визначати коефіцієнти рівняння загасання для кожного типу магнітуди. В каталогах *ISC*, *PDE*, *NEIC*, *USGS*, *ROMPLUS* і т.д., наведені значення різних типів магнітуд: *mb*, *MW*, *MS*, *ML*, *MD*, *MLH*, *MJ*, *ME*, *MPV*, *MLH* і т.д. Існує безліч формул перетворення шкал магнітуд, які прив'язані до сейсмічних регіонів [Onicescu et al., 1997; Grunthal, Wahlstrom, 2003]. При застосуванні регресійної формули перерахунку магнітуд для румунських землетрусів до магнітуд землетрусів з *PDE* вийшла статистично значуща сума квадратів відхилень спостережуваних величин від розрахункових значень. Це спонукало на здійснення перетворення типів магнітуд в магнітуду шкали *mb*, за допомогою регресійного аналізу.

Регресія магнітуди *mb* на *MW*.

Коефіцієнти: регресії $\alpha = 0.660$, $\beta = 0.8339$, кореляції $r = 0.9006$. Відносна похибка виявилася незначною $\delta = 6,98$ %. Передбачені значення магнітуди *mb* пояснює 77,89 % коливань оцінок магнітуди *MW*. 95%-ні довірчі інтервали для коефіцієнтів регресії α , β рівні: [0.287; 1.0326] і [0.760; 0.9075] відповідно. За критерієм Стьюдента виявлена значимість регресії і кореляції між магнітудами *mb* і *MW*. Регресія значень магнітуд *mb* на *MW*, *MD*, *ML* має вигляд:

$$mb = 0.660 + 0.8339MW, \quad mb = 0.599 + 0.8585MD, \quad mb = 0.665 + 0.8788ML.$$

Сейсмічність Карпатського регіону умовно складається з корової і підкорової сейсмічностей. Головним генератором землетрусів даного регіону є зона "Вранча",

сейсмічний режим якого детально досліджений. Каталог землетрусів зони *ROMPLUS* містить дані про землетруси, починаючи з кінця X століття.

Інше досліджене в цьому розділі питання — мінімальна магнітуда комплектності каталогу, яка є важливим чинником в дослідженні сейсмічності. За відомостями з каталогів землетрусів будуються моделі сейсмічного режиму зони джерел землетрусів і проводиться аналіз сейсмічної небезпеки. Якість результатів залежить від показності каталогу, тобто від мінімальної магнітуди комплектності M_c . Магнітуда M_c — це нижній поріг значень магнітуди, починаючи з якого всі землетруси реєструються без пропусків.

Методи оцінки M_c ґрунтуються на припущенні про самоподібність сейсмічного процесу. В даному випадку, з безлічі методів обчислення M_c використовується:

1) метод максимальної кривизни (*MAXC*);

2) метод, оснований на стійкості M_c при оцінці коефіцієнта b — похила графіка повторюваності (*MBS*).

MAXC метод визначає точку найбільшої кривизни, як мінімальну магнітуду комплектності при обчисленні максимальної величини першої похідної магнітудно-частотної кривої. Метод *MAXC* — швидкий і достовірний спосіб оцінки M_c , полягає в знаходженні інтервалу магнітуди з найбільшим значенням щільності магнітудно-частотного розподілу. Досліджено сукупність румунських землетрусів за період 1978—2013 рр. з каталогу "*ROMPLUS*".

Значення мінімальної магнітуди комплектності, оцінене по обом методам, збігається і становить $M_c = 2.3$.

Мовою статистики досліджувані властивості об'єктів (подій) називаються ознаками. Для аналізу ступеня можливого взаємозв'язку будь-яких двох ознак складається кореляційна таблиця спостережуваних частот цих ознак - таблиця спряженості ознак. Число рядків (r) і стовпців (s) даної таблиці дорівнюють відповідно числу градацій першої і другої ознаки. У кожній комірці на перетині i -го рядка і j -го стовпця вказано число об'єктів n_{ij} (подій), що відносяться до i -ї градації за першою ознакою і до k -ї градації за другою. Перш ніж досліджувати можливу залежність ознак, повинна бути перевірена нульова гіпотеза — припущення про попарну незалежність самих ознак. Нехай нульова гіпотеза H_0 стверджує, що x і y є взаємно незалежними випадковими величинами. Для перевірки гіпотези H_0 вираховується статистика критерію:

$$\chi^2 = N \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \frac{(n_{ij} - \frac{n_{i.} n_{.j}}{N})^2}{n_{i.} n_{.j}}, \quad n_{i.} = \sum_{j=1}^s n_{ij}, \quad n_{.j} = \sum_{i=1}^r n_{ij} \quad (4)$$

χ^2 — розподілена випадкова величина з $(r-1)(s-1)$ ступенями свободи.

За величиною статистики критерія χ^2 приймається рішення про наявність значущого зв'язку між двома змінними за допомогою таблиць спряженості. Якщо гіпотеза H_0 відкидається, це означає, що існує статистично значущий зв'язок між двома змінними. Однак статистично значущий зв'язок не визначає тісноту зв'язку. В якості оцінки взаємозалежності застосовуються коефіцієнти: спряженості, Крамера, кореляції, кореляційні відносини. Для оцінки тісноти зв'язку в таблицях будь-якого розміру використовується коефіцієнт спряженості ознак.

Після 1978 р. в зоні Вранча сталося 5031 землетрус з магнітудою, яка перевищує мінімальну магнітуду комплектності $M_c=2.3$. Вибіркова статистика критерію χ^2 , свідчить про правдоподібність гіпотези про статистично значущий зв'язок між магнітудою і глибиною землетрусів. На значиму взаємозалежність між магнітудою і глибиною вказують також наступні значення зв'язку: кореляція Спірмена $R_s = 0.535$, вибіркове значення кореляційного відношення $\mu=0.56$, коефіцієнт спряженості ознак $C=0.56$.

Проведений статистичний аналіз показав, що взаємозв'язок між магнітудою і глибиною землетрусів джерела Вранча в межах земної кори практично відсутній, а для проміжних землетрусів зв'язок має середню силу.

Вибіркові значення тестових критеріїв указують на слабкий, але статистично значущий взаємозв'язок між річним числом землетрусів в межах земної кори і нижче границі Мохо.

У четвертому розділі будується імовірнісна модель сейсмічного режиму. Для аналізу сейсмічної небезпеки, після розпізнавання сейсмічних зон та створення робочих каталогів їх землетрусів, необхідно визначити розподіл параметрів землетрусів. Це завдання вирішується на основі ймовірнісних моделей сейсмічного режиму зони джерел землетрусів — частотою виникнення землетрусів різних магнітуд в сейсмічній зоні. При дослідженні сейсмічності ми маємо справу з сейсмічним процесом, який змінюється з часом. Багато задач сейсмології пов'язані з умінням обчислювати ймовірності якихось подій, пов'язаних з сейсмічним процесом і визначенням його ймовірнісної структури. В основі вирішення цих та багатьох інших завдань сейсмології лежить теорія випадкових процесів.

Землетрус з параметрами (φ, ψ, h, m) : φ, ψ — координати епіцентру; h — глибина; m — магнітуда, може викликати в географічних точках $Q_i(\varphi_i, \psi_i)$ сейсмічний ефект інтенсивності I , який визначається за рівнянням макросейсмічного поля. Таким чином, для передбачення інтенсивності сейсмічного впливу в точках земної поверхні достатньо передбачити значення параметрів (місце виникнення, магнітуда) і частоту виникнення землетрусів. Сейсмічна зона Z_s охоплює деякий простір геофізичного середовища. Землетрус представляється точкою в чотиривимірному просторі $\Xi_s=[\Phi \times \Psi \times H \times M]$, яка складається з декартового добутку діапазонів можливих значень параметрів землетрусів φ, ψ, h, m . Якщо цей простір розбити на непересічні підпростори, то параметри кожного землетрусу будуть належати одному, і тільки одному півпростору.

Зону джерел землетрусів можна розглянути як фізичну систему, яка змінює свої стани в випадкові моменти часу. Під станами системи маються на увазі 4-мірні інтервали $[\Phi_i \times \Psi_j \times H_k \times M_n]$, $i = 1, \dots, R_\varphi$; $j = 1, \dots, R_\psi$; $k = 1, \dots, R_h$; $n = 1, \dots, R_m$, які утворюються розбивкою діапазонів можливих значень параметрів землетрусів на $R_\varphi, R_\psi, R_h, R_m$ частин відповідно. На інтервалі часу між зміною станів траєкторія функціонування системи є постійною і рівною значенням параметрів землетрусу, що відбувся. У такому випадку положення системи, в будь-який момент часу, визначиться завданням чотиривимірного випадкового процесу.

$$\Omega(t) = \{\xi_\varphi(t), \xi_\psi(t), \xi_h(t), \xi_m(t)\} \quad (5)$$

де $\xi_\varphi(t)$, $\xi_\psi(t)$, $\xi_h(t)$, $\xi_m(t)$ — одномірні стрибкоподібні випадкові процеси, що описують відповідні траєкторії параметрів землетрусів.

Землетрус, який стався в момент часу t_n , на осі часу зображується точкою чотиривимірного простору Ξ_s . На сучасному рівні розвитку сейсмології, моменти часу виникнення землетрусів, і значення їх параметрів розглядаються, як випадкові величини. Це означає, що спостережувана сукупність N землетрусів: $\{\varphi_n, \psi_n, h_n, m_n\}$, $n = 1, \dots, N$ є реалізацією випадкового процесу.

Вичерпним способом визначення випадкового процесу є завдання його спільної скінченновимірної функції розподілу. Однак визначення скінченновимірної функції розподілу, за винятком деяких тривіальних випадків, є завданням практично нездійсненним. Але існує клас марковських процесів, де спільні скінченновимірні функції розподілу виражаються через одно і двовимірні розподіли.

У багатьох тимчасових послідовностях випадкових подій існує залежність від минулого. Моделі, які охоплюють всі можливі форми залежності між подіями, є реальним відображенням дійсності, хоча це призводить до великих труднощів при вивченні їх імовірнісної структури і статистичного аналізу. Тому приймається компромісне рішення — вибирається модель, яка враховує достатні для адекватності моделі залежності і піддається статистичному аналізу. Найкраща відповідність зазначеним вимогам проявляє клас марковських процесів, в яких моделюється залежність від результату спостереження в останній момент часу. Така модель є прийнятним компромісом між залежністю від всієї передісторії процесу і повною незалежністю випадкових подій в послідовності.

Позначимо через Σ_r стан $[\Phi_i \times \Psi_j \times H_k \times M_n]$, що рівносильно згортанню індексів елементів матриці. Загальна кількість інтервалів складе: $R_s = R_\varphi R_\psi R_h R_m$.

З огляду на лексикографічний порядок індексів, при якому зростає останній індекс, потім передостанній і так далі, можна перетворити 4-мірні індекси $ijkl$ в зручні для практичного застосування одномірні індекси r :

$$r = (i-1)R_\psi R_h R_m + (j-1)R_h R_m + (k-1)R_m + n \quad (6)$$

Назвемо Σ_r елементарним джерелом землетрусів (ЕДЗ). В такому випадку, простором станів марківського ланцюга є об'єднання всіх елементарних джерел землетрусів $\Xi_s = \{\Sigma_r\}$, $r = 1, \dots, R_s$, де R_s — число станів (ЕДЗ). Якщо на n -му кроці, тобто в момент часу t_n , стався землетрус в ЕДЗ Σ_i , то це буде означати, що на n -му кроці спостережено випадкову подію Σ_i .

Алгоритм побудови марковської моделі апробовано на прикладі 705 вранчівських землетрусів, з магнітудою понад 4, де простір станів Ξ_s складається з об'єднання 11 ЕДЗ.

Дослідження показують, що послідовність яка відбулася в моменти часу t_1, t_2, \dots, t_N землетрусів є реалізацією однорідного чотиривимірного безперервного ергодичного марковського ланцюга. Ергодичні марковські ланцюги володіють чудовою для практичних застосувань властивістю: стаціонарний граничний розподіл такого ланцюга з будь-яким ступенем точності можна визначити з однієї досить довгої її реалізації:

$$P\left\{\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{v^j}{N} = \pi_j\right\} = 1 \quad (7)$$

де N — загальне число землетрусів, v^j — число землетрусів, що трапилися в ЕДЗ Σ_j . Це означає, що з ймовірністю π_j можна передбачити елементарну сейсмічну зону, де може статися землетрус. Оцінка ймовірностей (8) є головною метою побудови марковської моделі потоку землетрусів. Наявність ймовірностей π_j , $j=1, \dots, R_s$ і функції загасання інтенсивності сейсмічних впливів з відстанню дозволяє здійснити ЙАСН території, що знаходиться в зоні впливу сейсмічної зони Z_s . Якщо відбувається землетрус, то його параметри з ймовірністю π_v , $v = 1, 2, \dots, R_s$ належать деякому стану Σ_v . Тоді, умовний розподіл n землетрусів по R_s станам (елементарним сейсмічним джерелам) відповідає поліноміальній схемі:

$$P\{N_1(t) = n_1, N_2(t) = n_2, \dots, N_{R_s}(t) = n_{R_s} / N(t) = n\} = \frac{n!}{n_1! \dots n_{R_s}!} \pi_1^{n_1} \pi_2^{n_2} \dots \pi_{R_s}^{n_{R_s}}. \quad (8)$$

Безперервні марковські ланцюги є математичними моделями фізичних систем, де переходи між станами Σ_i і Σ_j — відбуваються під дією потоку подій з інтенсивністю λ_{ij} , рівній відповідній щільності ймовірності (інтенсивності) переходу із стану Σ_i в стан Σ_j . Переходи між станами, без урахування часу очікування переходу, утворюють вкладений марковський ланцюг. Таким чином, функціонування системи з R_s станами, складається з $(R_s)^2$ потоків подій. Якщо всі потоки подій є пуассонівськими, то процес в системі буде марковським. Правдоподібність припущення про те, що потік вранчівських землетрусів є реалізацією безперервного марковського ланцюга, залежить від значення тестового критерію:

$$\chi_q^2 = \sum_{i=1}^{R_s} \frac{(n_i(t) - \gamma_i(t))^2}{\gamma_i(t)}, \quad (9)$$

де $n_i(t)$ і $\gamma_i(t)$ спостережувана і теоретична частоти виникнення землетрусів в ЕДЗ Σ_i , $i=1, \dots, R_s$. Наприклад, застосовуючи формулу (9) для моделі джерела Вранча отримано значення $\chi_q = 8.69$, яке менше порогового значення $\chi_{0.05;11} = 19.7$, відповідного ймовірності значущості $\alpha=0.05$ с 11 ступенями свободи, що підтверджує гіпотезу про те, що безперервний марковський ланцюг може розглядатися як імовірнісна модель потоку вранчівських землетрусів.

Безперервний марковський ланцюг, наприклад з L станами є суперпозицією L^2 пуассонівських процесів.

У п'ятому розділі проводиться статистичний аналіз макросейсмічного поля. Якби геофізичне середовище було б ізотропне, то поширення сейсмічної енергії відбувалося б рівномірно і ізосейсти мали б форму кола. Однак в реальності від епіцентру землетрусів ізосейсти розходяться у вигляді овалів або вигнутих ліній довільної форми. На форму цих ізоліній впливають фактори: як загальні — геометрія і механізм джерела, так і регіональні та локальні — склад і потужність порід, відмінність швидкості в корінних породах і в вище розташованих шарах, фізичні властивості середовища, і т.д.

У ближній зоні: $r \sim h$, (r — епіцентральна відстань, h — глибина джерела землетрусу) геометрія джерела землетрусів має визначальний вплив на конфігурацію макросейсмічного поля. Наприклад, при дослідженні сейсмічності Киргизстану виявлено, що макросейсмічний ефект протяжності джерела зникає для землетрусів з $M = 6$ на відстанях 25—35 км, для землетрусів з $M = 7$ на відстанях 80—110 км [Джанузаков, 2013].

Розрахункова міра сейсмічної небезпеки в значній мірі залежить від функції загасання інтенсивності сейсмічного ефекту. Крім того, еліптичність форми загасання інтенсивності сейсмічного ефекту декларується, але, наскільки відомо автору, не проводилися математичні дослідження відповідності форми ліній, що розмежовують зони однакової бальності, кривої другого порядку. Ізосейста — це лінія, що з'єднує точки рівної бальності, тому не коректна фраза — спостережувана ізосейста, так як зони рівної бальності мають ширину десятки, а іноді і сотні кілометрів. Тобто мова може йти про апроксимацію еліпсом поля точок рівної інтенсивності.

Макросейсмічне поле характеризується зонами однакової інтенсивності та лініями, які розділяють зони зміни бальності і бувають досить звивисті. Аналіз макросейсмічного поля проводився для обґрунтування апроксимації еліпсом зон однакової бальності, яка, хоча і є спрощеною моделлю реальної картини, проте, являється прийнятним підходом для імовірнісного аналізу сейсмічної небезпеки. У ближній зоні вони мають форму близьку до еліпса, що визначається в основному геометрією джерела, наприклад його горизонтальною протяжністю. У міру збільшення епіцентральної відстані форма ізолейн змінюється відповідно до особливостей геологічної будови середовища.

У даній роботі проведено статистичний аналіз макросейсмічних даних вранчівських землетрусів, що відбулися 10.11.1940, 7.04.1977, 31.08.1986, 30.05.1990 та 31.05.1990 рр. Дослідження показують, що прийнятною згладжуючою лінією макросейсмічного поля даних землетрусів є еліпс. З канонічного рівняння еліпса слідує, що фокальна вісь еліпса, апроксимуючі 5, 6 і 7 бальні зони всіх досліджуваних землетрусів, спрямована по меридіану. Це означає, що 5, 6 і 7 бальні зони витягнуті в напрямку північ-південь, тоді як, інші зони витягнуті уздовж паралелі, що свідчить про неоднорідність геологічного середовища, де поширювалися сейсмічні хвилі від досліджуваних землетрусів. Апроксимація еліпсом більшості точок однакової інтенсивності проведена за методом Фітцгіббона [Fitzgibbon, 1999]. Визначені параметри еліпсів апроксимуючих зони однакової бальності макросейсмічного поля. Коефіцієнт лінійної регресії епіцентральної інтенсивності I_0 на магнітуду, для вранчівських землетрусів, вийшов рівним $b=1.5$. Оптимальними значеннями коефіцієнтів рівняння макросейсмічного поля виявилися: $a=1.6$; $c=7.2$; найбільшого $b_{\max}=5.6$ і найменшого $b_{\min}=4.9$ значення осей еліпса загасання інтенсивності струсів; а кут між великою віссю еліпса загасання і позитивним напрямком осі абсцис складає $\gamma_0=51^\circ$. Через відсутність макросейсмічних даних корових румунських землетрусів загасання інтенсивності для досліджуваної території оцінювалася за середніми для Балкан значеннями коефіцієнтів рівняння макросейсмічного поля Шебаліна: $a=1.5$; $b=3.5$; $c=3.0$.

У шостому розділі для дослідження стаціонарності сейсмічного режиму використовується теорія часових рядів. Спостереження за активністю сейсмічних зон показують, що тимчасові характеристики сейсмічності не є стаціонарними. Проводився аналіз ряду щомісячного числа землетрусів, що сталися за період часу з 1978 по 2011 р. в джерелі Вранча. Рівнями ряду є щомісячне число землетрусів. Періоди варіацій кількості землетрусів (місяці, роки) розкидані хаотично на осі часу. За графіком щомісячного числа землетрусів джерела Вранча, не можна впевнено говорити про наявність закономірності в тривалості періодів варіацій числа землетрусів і в чергуванні періодів сейсмічного затишшя періодом високої сейсмічної активності. Стимулом для проведення даного дослідження служило бажання аналізувати структуру ряду формальними методами для пошуку статистичної закономірності в варіаціях параметрів сейсмічності в часі.

Перше уявлення про природу часового ряду можна скласти за його графіком. Наприклад, іноді можна визначити характер сезонних коливань: адитивний або мультиплікативний. Мультиплікативні моделі відрізняються від адитивних моделей тим, що в адитивній моделі сезонні коливання не залежать від рівня ряду, а в мультиплікативній моделі амплітуда сезонних флуктуацій змінюється в залежності від значень ряду. Графічним аналізом можна визначити компоненти часових рядів, а також з'ясувати структуру і характер сезонних коливань ряду. Якщо присутність тренда в часовому ряду не простежується, то спочатку потрібно з'ясувати існування тенденції в досліджуваному процесі. На стаціонарність в широкому сенсі може вказати незалежність параметрів ряду від початку відліку часу. Для цього ряд розбивається на дві групи, складаються ряди даних за періоди 1978—1994 і 1995—2011 рр., і перевіряється гіпотеза про рівність середніх значень і дисперсій груп, використовуючи досить стійкий до відхилень від нормальності (робастний) критерій Лівіня. За цим критерієм припущення про стаціонарність ряду за середнім значенням і дисперсії відкидається.

Багато статистичних тестів передбачають, що порядок, в якому були зібрані дані, не має значення. Якщо це не так, то вибірка не є випадковою, і дані спостережень не є незалежними. Для перевірки гіпотези про випадковість вибірки застосовуються методи: інверсій, Манна-Уїтні, Мозеса, Колмогорова-Смірнова і критерії серій, за якими гіпотеза про випадковий характер ряду була відкинута.

Для дослідження сейсмічності можна застосувати просторові моделі та моделі часових рядів. Просторова модель описує сукупність параметрів сейсмічності в даний момент часу. Теорія часових рядів може бути корисною в дослідженні тимчасового режиму сейсмічності, вказувати на періоди сейсмічного затишшя, також на періоди помірної і підвищеної активності землетрусів.

Метою аналізу часових рядів є визначення моделі реалізації ряду. Кореляційний аналіз дозволяє виявити структуру ряду, тобто визначити присутність в ряді тієї чи іншої періодичної компоненти заздалегідь не відомої частоти. Автокореляційна функція ряду виявила значимий пік на лаге 1, який є і максимальним $\rho(1)=0.7$. Тобто ряд містить тільки тренд. Значення F -критерію вказує на статистично значущий регресивний зв'язок рівнів ряду з часом по всім моделям тренда. Тобто в ряді місячного числа землетрусів існує тенденція зростання рівнів

ряду з часом, що і слідувало б чекати. За значеннями вибіркового статистик гіпотеза про випадковий ряд відкидається.

Лінійні коефіцієнти автокореляції характеризують тісноту тільки лінійного зв'язку поточного і попередніх рівнів ряду. Тому за коефіцієнтами автокореляції можна судити тільки про наявність чи відсутність лінійної залежності. Для перевірки ряду на наявність нелінійної тенденції обчислювалися лінійні коефіцієнти автокореляції для тимчасового ряду, що складається з логарифмів вихідних рівнів. Відмінні від нуля значення коефіцієнтів автокореляції свідчать про наявність нелінійної тенденції. Форма корелограми показала, що рівні ряду пов'язані також нелінійною залежністю. Для моделювання тенденції часового ряду будується аналітична функція, що характеризує залежність рівнів ряду від часу, який називається аналітичним вирівнюванням тимчасового ряду. Дослідження показали, що в ряді місячного числа землетрусів існує тенденція зростання рівнів ряду з часом.

Теорія часових рядів представлена великою кількістю методів передбачення рядів, які реалізують схему екстраполяції. Тобто досліджується ряд, і передбачається, що властивості його не змінюватися в майбутньому. Одним з поширених є метод простого експоненціального згладжування. Для ряду місячного числа землетрусів були випробувані моделі несезонні: проста; Холта і Брауна; сезонні: проста сезонна; адитивна Уінтерса; мультиплікативна Уінтерса.

Аналіз рядів показав, що оптимальними є проста сезонна і мультиплікативна модель Уінтерса.

Нестационарні часові ряди можуть моделюватися як *ARIMA*-моделі, засновані на 3-складових процесу: авторегресії порядку p ; дотичного середнього порядку q ; "випадкового блукання" $\xi_t \sim N(0, \sigma^2)$. Математична форма моделі має вигляд:

$$\Delta^d x_t = \alpha_0 + \sum_{j=1}^p \alpha_j \Delta^d x_{t-j} - \sum_{n=1}^q \beta_n \varepsilon_{t-n} + \xi_t \quad (10)$$

ARIMA модель застосовується для стаціонарних рядів, тому на першому етапі, за допомогою автокореляційної і приватної автокореляційної функцій ряду залишків, перевіряється гіпотеза про стаціонарність ряду в широкому сенсі. Залишки представляють собою різниці вихідного часового ряду і модельних значень.

Якщо ряд нестационарний, то він зводиться до слабостационарного ряду взяттям послідовних різниць деякого порядку:

$$\Delta x_j = x_j - x_{j-1}, \Delta^2 x_k = \Delta x_k - \Delta x_{k-1}, \dots, \Delta^d x_l = \Delta^{d-1} x_l - \Delta^{d-1} x_{l-1}. \quad (11)$$

Зворотна дія — відновлення вихідного ряду — здійснюється d -кратним підсумовуванням проінтегрованого ряду. Діагностична перевірка адекватності моделей заснована на аналізі ряду залишків. Якщо модель є адекватною, то залишки є "білим шумом". Це означає, що коефіцієнти кореляції між рівнями ряду залишків дорівнюють нулю і нормована кумулятивна періодограма мало відхиляється від прямої лінії, що з'єднує точки $(0; 0)$ і $(0.5; 1)$. У конструкторі моделей часових рядів розглядалися $(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$ моделі при різних значеннях звичайних і сезонних параметрів. Для часового ряду щомісячного числа землетрусів в конструкторі моделей пакета SPSS визначилися *ARIMA*(0,1,2) \times (1,0,1)_s модель. Якщо модель адекватна, то ряд залишків є "білим шумом". Найкращі моделі рядів визначалися по

максимуму коефіцієнта детермінації і за оптимальними значеннями числових характеристик ряду залишків: $RMSE$; $MAPE$; MAE ; $MaxAPE$; $MaxAE$; BIC ; за значенням критерію Льюнга-Бокса; по автокореляційній і приватної автокореляційній функціям залишків.

Таким чином, оптимальними по всьому набору тестових критеріїв виявилися моделі: проста сезонна; мультиплікативна Уінтерса і $ARIMA(0,1,2) \times (1,0,1)_s$.

У сьомому розділі складається алгоритм імовірнісного аналізу сейсмічної небезпеки (ЙАСН), який включає в себе чотири основні етапи. На першому етапі, як і в ДАСН, визначаються сейсмічні зони, і передбачається, що джерела землетрусів розподілені з певною ймовірністю в геофізичному просторі, яке займає зона джерел землетрусів. У цьому полягає основна відмінність від ДАСН, де фіксується найближчий до об'єкту активний розлом, тобто розлом, в якому з імовірністю рівною одиниці може виникати джерело землетрусу.

На другому етапі створюються елементарні джерела землетрусів (ЕДЗ) і будується марковська модель потоку спостережених в них сейсмічних подій. На основі ергодичного безперервного марковського ланцюга визначається простір часового розподілу землетрусів по ЕДЗ. В ДАСН цьому відповідає закон повторюваності Гутенберга-Ріхтера.

Третім кроком є визначення параметрів загасання сейсмічного ефекту. У даній роботі аналіз сейсмічної небезпеки проводиться на основі бала макросейсмічної шкали і по нормам проектування "EUROCODE 8". Передбачається, що відхилення (помилка вимірювань) спостережуваних макросейсмічних значень інтенсивності сейсмічних впливів від їх теоретичних значень є випадковою величиною. На величину помилок вимірювань впливає безліч неврахованих незалежних факторів, і жоден з них не домінує – кожен вносить незначний по величині внесок в загальну помилку і носить випадковий характер. Подібні помилки, відповідно до теорії помилок, розподілені за нормальним законом і піддаються обробці за допомогою апарату математичної статистики.

На четвертому етапі на конкретній ділянці, яка знаходиться в радіусі дії групи сейсмічних зон, обчислюється сумарна міра сейсмічної небезпеки. Для сейсмічного районування територія, що знаходиться в зоні впливу сейсмічних зон покривається географічною мережею з деяким кроком дискретності. У вузлах мережі визначається міра сейсмічної небезпеки по прийнятим нормам. Фактор випадковості присутній на всіх етапах проведення ЙАСН.

Припустимо, що точка $Q(\varphi, \psi)$ знаходиться в радіусі впливу групи з S сейсмічних зон $Z_s, s=1, \dots, S$. Число станів в зоні з номером s позначимо через R_s .

Метод аналізу сейсмічної небезпеки ілюструється на прикладі сейсмічного регіону Вранча. Подію, де відбувається землетрус з параметрами зі станом Σ_j , позначимо тим же ідентифікатором.

Так як параметри землетрусів можуть належати тільки одному стану (землетрус може статися тільки в одному з елементарних джерел землетрусів), маємо повну групу несумісних подій, які в об'єднанні дають весь простір можливих розподілів параметрів землетрусів:

$$\{\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_{R_s}\}, (\Sigma_i \cap \Sigma_j = 0, i \neq j), \Xi^s = \sum_{i=1}^{R_s} \Sigma_i. \quad (12)$$

Подія $B^k = \{I^k - 0.5 \leq I < I^k + 0.5\}$, що означає виникнення сейсмічних поштовхів з інтенсивністю I^k в деякій точці земної поверхні, може статися спільно з однією із R_s взаємно виключаючих подій $\Sigma_r, r=1, \dots, R_s$. У цьому випадку, має місце вираз:

$$B^k = \sum_{r=1}^{R_s} B^k \Sigma_r, \quad (13)$$

де події $B^k \Sigma_i$ і $B^k \Sigma_j$ з різними індексами i та j є несумісними. Подія B^k і повна група подій $\{\Sigma_r, r=1, \dots, R_s\}$ пов'язані формулою повної ймовірності:

$$P(B^k) = \sum_{j=1}^{R_s} P\left(\frac{B^k}{\Sigma_j}\right) P(\Sigma_j). \quad (14)$$

Інтенсивність сейсмічних впливів в точці $Q(\varphi, \psi)$, в балах шкали *MSK-64* оцінюється за формулою:

$$\bar{I} = 1.6 M_W - \frac{b_{\max} b_{\min}}{\sqrt{b_{\min}^2 \cos^2(\gamma - \gamma_0) + b_{\max}^2 \sin^2(\gamma - \gamma_0)}} \lg \sqrt{h^2 + r^2} + 7.2, \quad (15)$$

де $b_{\max}=5.6$, $b_{\min}=4.9$, γ — поточне значення кута, який утворює радіус-вектор точки (φ, ψ) , з позитивною напіввіссю абсцис, h — глибина джерела, r — епіцентральна відстань, M_W — моментна магнітуда, $\gamma_0=51^\circ$ — кут між великою віссю еліпса загасання і позитивним напрямом осі абсцис. Ймовірності (7) складають вектор розподілів землетрусів за елементарними зонами:

$$\vec{\pi} = (\pi_r), r \in (1, R_s), \quad (16)$$

а умовні ймовірності:

$$p_r^k = P(B^k / \Sigma_r) = P\{(I^k - 0.5 \leq I < I^k + 0.5) / \Sigma_r\} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{I^k - 0.5}^{I^k + 0.5} e^{-\frac{(I - \bar{I})^2}{2\sigma^2}} dI \quad (17)$$

є елементами матриці умовних ймовірностей:

$$P_s = \begin{pmatrix} p_1^1 & p_1^2 & \cdot & \cdot & p_1^{12} \\ p_2^1 & p_2^2 & \cdot & \cdot & p_2^{12} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{R_s}^1 & p_{R_s}^2 & \cdot & \cdot & p_{R_s}^{12} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

У цьому випадку, множенням зліва вектора (16) на матрицю (18) визначається вектор розподілів інтенсивності сейсмічних впливів, викликаних землетрусами з сейсмічної зони Z_s :

$$\vec{p}_s = \vec{\pi}_s P_s = \left(\sum_{j=1}^{R_s} \pi_j p_j^1, \sum_{j=1}^{R_s} \pi_j p_j^2, \dots, \sum_{j=1}^{R_s} \pi_j p_j^{12} \right). \quad (19)$$

Землетрус, з імовірністю γ_s , може статися в одній з S сейсмічних зон $Z_s, s = 1, \dots, S$. Якщо точка $Q(\varphi, \psi)$ знаходиться в радіусі сейсмічного впливу зони Z_s , то сумарна ймовірність інтенсивності струсів може бути оцінена формулою:

$$\beta_k = \sum_{s=1}^S p_k^s \gamma_s, \quad \vec{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_{12}). \quad (20)$$

Нехай в пункті спостереження $Q(\varphi, \psi)$ за час t з імовірністю $p(t, n)$ відбуваються n сейсмічних поштовхів. Умовна ймовірність появи m_k сейсмічних поштовхів з інтенсивністю I^k , за їх загальної кількості n , буде відповідати біноміальній схемі:

$$p_n(m) = \frac{n!}{m!(n-m)!} \beta_k^m (1-\beta_k)^{n-m}. \quad (21)$$

Множенням ймовірності (13) на $p(t, n)$ прийдемо до виразу для безумовної ймовірності:

$$p_{\varphi, \psi}(t, n, m, I^k) = p(t, n) \frac{n!}{m!(n-m)!} \beta_k^m (1-\beta_k)^{n-m} \quad (22)$$

того, що в географічній точці $Q(\varphi, \psi)$ за час t , трапляється n сейсмічних поштовхів, m з них з інтенсивністю I^k .

За аналогією з будівельними нормами "EUROCODE 8", аналіз сейсмічної небезпеки проводиться на основі розрахункової оцінки:

$$P(50, n \geq 1) = 1 - P(50, 0) = 1 - e^{-\lambda_k 50}, \quad (23)$$

де λ_k — річна інтенсивність перевищень порога інтенсивності I^k в балах шкали MSK-64, або ж рівня параметрів зміщень ґрунту a_k . Із марковської моделі послідовності землетрусів, слідує, що виникнення сейсмічних поштовхів з інтенсивністю, що перевищує деякий поріг I^k , або ж a_k , відповідає пуасонівському процесу з параметром λ_k . В Європейському стандарті ЙАСН використовується поріг максимальних прискорень, який буде перевищено з імовірністю $\alpha = 0.1$, хоча б один раз в 50 років. Відповідний період повторень перевищення в пункті $Q(\varphi, \psi)$ складе 475 років.

Умовна ймовірність перевищення порога інтенсивності I^k в балах макросейсмічної шкали MSK-64 визначиться формулою:

$$p_r^k = P(I \geq I^k / E_r) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{I_k}^{12} e^{-\frac{(I-I)^2}{2\sigma^2}} dI. \quad (24)$$

Функція загасання пікового прискорення має вигляд:

$$\hat{a}_h = \ln pga_h = c_1 + c_2 M_{GR} + c_3 \ln \sqrt{r^2 + h^2} + c_4 h + \varepsilon, \quad (25)$$

де M_{GR} — магнітуда Гутенберга-Ріхтера; r — епіцентральна відстань; h — глибина джерела; c_1, c_2, c_3, c_4 — шукані коефіцієнти; ε — випадкова величина з нульовим середнім і стандартним відхиленням $\sigma_\varepsilon = \sigma_{\ln PGA}$ (стандартне відхилення змінної $u_{\ln PGA}$). Параметри моделі загасання були оцінені з використанням різних наборів даних, які представляють сектори, розташованих в трьох напрямках із зони Вранча: Молдова (азимут $< 90^\circ$, північний сектор); Чорновода (азимут 90 — 180° , південно-східний сектор); Бухарест (азимут 180 — 270° , південно-західний сектор) [Sokolov et al., 2007].

ВИСНОВКИ

Запропоновано новий метод імовірнісної оцінки сейсмічної небезпеки, як ймовірність того, що в географічній точці $Q(\varphi, \psi)$, за час t трапиться n сейсмічних поштовхів, m з яких матимуть інтенсивність I^k в балах шкали *MSK-64*, або ж в параметрах зміщень ґрунту a_k , на основі найбільш інформативної для сейсмічного захисту оцінки сейсмічної небезпеки. Складені алгоритм і обчислювальна програма на мові ФОРТРАН для реалізації методу на основі ймовірнісних моделей сейсмічності.

Для виділення компактних груп джерел землетрусів і складання їх каталогів застосований кластерний аналіз. В якості пробної вибірки використовувався каталог землетрусів Південного Сходу Європи, що охоплює період 1900—1990 рр. У цьому каталозі містяться відомості про землетруси в 18 сейсмічних зонах, виявлених експертами. При порівнянні координат епіцентрів в сейсмічних зонах, виділених алгоритмом k -середніх, з координатами епіцентрів 18 сейсмічних зон наведених в каталозі Південного Сходу Європи спостережено 97% збігу, що є показником ефективності методу. Хоча кластерний аналіз, будучи формальним методом, не враховує фізичну природу джерел, але цілком придатний для оперативного сейсмічного зонування (групування джерел землетрусів). Методом кластерного аналізу на території Румунії, на основі каталогу *ROMPLUS* виділено 13 сейсмічних зон.

Зона джерел землетрусів розглядається як фізична система в випадкові моменти часу, що змінює свій стан. Джерела землетрусів розподілені в деякому обсязі геофізичного середовища. Передбачається, що положення кожного джерела залежить від того, де розташовувалося джерело всіх попередніх землетрусів. Останнє припущення, означає, що ряд сейсмічних подій володіє довготривалою пам'яттю. Гіпотеза про те, що послідовність параметрів землетрусів є реалізацією ергодичного марковського ланцюга, виявилася правдоподібною. Ергодичні марковські ланцюги володіють чудовою для практичних застосувань властивістю: стаціонарні граничні розподіли станів такого ланцюга з будь-яким ступенем точності можна визначити з однієї досить довгої її реалізації. Це означає, що ми зможемо передбачити розподіл координат епіцентру, глибини і магнітуди майбутнього землетрусу. У класі марковських процесів спільний розподіл параметрів землетрусів виражається через одно- і двовимірні функції розподілу.

Марковська модель сейсмічних зон може допомогти виявити міграцію джерел землетрусів уздовж сейсмічних поясів і наявності зв'язку між сейсмічними регіонами. Виявлено статистично значущий зв'язок між активністю деяких сейсмічних регіонів Балкан. Динаміка сейсмічної активності балканського регіону - чергування джерел землетрусів в регіонах – відображається елементами матриці ймовірностей переходу. Виявлено, що землетруси мають тенденцію статися там, де вони вже відбувалися. Наприклад, по матриці ймовірностей переходу, видно, що після землетрусу в Румунії, наступний землетрус, швидше за все, трапиться теж в Румунії, так як ймовірність переходу зі стану "*ROM*" в "*ROM*" найбільша. Другою за величиною є ймовірність переходу зі стану "*ROM*" в "*BUL*", тобто, наступний після Румунії землетрус може статися в Болгарії. Імовірність переходу зі стану "*ROM*" в

"*POL*" рівна нулю, що означає відсутність взаємозв'язку між сейсмічними зонами Румунії і Польщі. З вектора граничних розподілів сейсмічних зон можна визначити зону, де і з якою ймовірністю може відбутися очікуваний землетрус.

Критерії таблиці спряженості ознак також вказують на наявність середньої тісноти взаємозв'язку сейсмічної активності деяких зон.

Для застосування рівняння макросейсмічного поля, при оцінці сейсмічної небезпеки, необхідно привести значення різних типів магнітуд до єдиного типу. Перетворення магнітуд здійснюється за допомогою лінійної багатовимірної регресії, і виконуються умови теореми Гаусса-Маркова. Дослідження явища гомоскедастичності ґрунтуються на значеннях: тесту рангової кореляції Спірмена, тесту Парка, методу Глейзера.

У рівняння залежності магнітудних шкал включалися додаткові регресори, проте це не привело до істотного поліпшення якості регресії.

Мінімальна магнітуда комплектності $M_c = 2.3$, для землетрусів, що сталися після 1978 року, оцінена по методам *MAXC* і *MBS* збігається.

Між магнітудою і глибиною вранчівських землетрусів виявлено слабкий статистичний зв'язок. Для землетрусів в межах земної кори зв'язок значно слабший, ніж для проміжних землетрусів. Поясненням цього факту є те, що в межах земної кори відбуваються слабкі землетруси з магнітудою до $M_w=5.5$, а в проміжному шарі з магнітудою до $M_w=7.7$, і область підготовки більш сильних землетрусів охоплює більший обсяг геофізичного середовища.

Імовірнісний зв'язок між магнітудою і інтервалами часу між землетрусами Вранча виявився статистично незначним, а магнітуда і інтервали часу між землетрусами, в межах земної кори, пов'язані слабким лінійним зв'язком. Для землетрусів нижче границі M , статистичні характеристики взаємозв'язку свідчать про незалежність магнітуди від інтервалів часу. За допомогою статистичних методів виявлена взаємозалежність числа землетрусів в межах земної кори і нижче границі Мохо, тобто між короною і проміжною сейсмічністю існує слабкий, але статистично значущий зв'язок. Статистична залежність між короною і підкороною сейсмічною активністю для землетрусів з магнітудою $M \geq 2.6$ практично відсутня.

Між щомісячним числом корових і проміжних землетрусів також існує слабкий статистичний зв'язок. В рядах річного та щомісячного числа землетрусів в межах кори існує тренд, а в проміжній сейсмічності припущення про відсутність тренда підтвердилося.

Проведено статистичний аналіз макросейсмічних даних вранчівських землетрусів, що відбулися 10.11.1940, 7.04.1977, 31.08.1986, 30.05.1990 та 31.05.1990 рр. Дослідження показують, що прийнятною згладжуючою лінією макросейсмічного поля є еліпс. З канонічного рівняння еліпса слідує, що фокальна вісь 5, 6 і 7 бальних зон, всіх досліджуваних землетрусів, спрямована по меридіану. Це означає, що 5, 6 і 7 бальні зони витягнуті в напрямку північ-південь, тоді як, інші зони витягнуті уздовж паралелі. Проведена апроксимація еліпсом зони точок однакової інтенсивності. Визначено параметри еліпсів, апроксимуючих зони однакової бальності макросейсмічного поля. Коефіцієнт лінійної регресії епіцентральної інтенсивності I_0 на магнітуду, для румунських землетрусів, вийшов рівним $b=1.5$.

Оптимальними значеннями коефіцієнтів рівняння макросейсмічного поля виявилися: $a=1.6$; $c=7.2$; найбільшого $b_{\max} = 5.6$ і найменшого $b_{\min}=4.9$ загасання інтенсивності струсів; а кут між великою віссю еліпса загасання і позитивним напрямком осі абсцис рівним $\gamma_0=51^\circ$.

Теорія часових рядів застосовувалася для дослідження послідовності місячного числа румунських землетрусів. Як і очікувалося, в ряді щомісячного числа землетрусів присутня довгострокова систематична складова. Припущення про стаціонарність за середнім значенням і по дисперсії відкидається. Для прогнозування ряду застосовувався метод експоненціального згладжування.

Найкращими, за вибірковими значеннями статистики критеріїв перевірки якості моделі, виявилися адитивна модель Уінтерса і проста сезонна модель для прологарифмованого ряду. Для прогнозу застосовувалися також лінійні моделі авторегресії, параметри яких визначалися за поведінкою автокореляційної і приватної автокореляційної функцій. Авторегресійні методи (модель *ARIMA*) застосовуються для аналізу і прогнозу однорідних нестационарних часових рядів з нелінійним трендом, типу полінома невисокого ступеня, яким є досліджуваний ряд. Найкращою моделлю для прогнозу часових рядів виявилася $ARIMA(0,1,2)\times(1,0,1)_s$ модель, підібрана конструктором моделей пакета SPSS. Сейсмічний процес — це циклічний процес. Результати досліджень були б більш достовірними, якби довжина ряду перевищувала хоча б період одного сейсмічного циклу, і була б достатнього обсягу сейсмостатистика.

Для подолання труднощів, пов'язаних з нестачею відомостей про сейсмічні спостереження, можна використовувати Монте-Карло моделювання для створення штучних каталогів землетрусів. В межах елементарних джерел землетрусів просторово-часовий розподіл джерел землетрусів стає більш однорідним. Отже, можливе якісне моделювання стохастичних каталогів землетрусів.

Проведено статистичний аналіз помилок – різниці спостережених і обчислених за рівнянням макросейсмічного поля значень інтенсивності сейсмічних впливів вранчівських землетрусів. Чималий обсяг макросейсмічних даних землетрусів 10.11.1940, 7.04.1977, 31.08.1986, 30.05.1990 та 31.05.1990 рр. джерела Вранча, дозволив проводити детальний статистичний аналіз.

Складено алгоритм оцінки сейсмічної небезпеки, як ймовірності того, що в точці земної поверхні $Q(\varphi, \psi)$, з географічними координатами (φ, ψ) , за час t трапиться n сейсмічних струсів, m з яких інтенсивністю не менше I^k балів. Здійснено імовірнісний аналіз сейсмічної небезпеки територій Болгарії, Румунії, Молдови та Туреччини, як в балах макросейсмічної шкали, так і за нормами EUROCODE-8.

За допомогою кластерного аналізу на території Румунії виділено 13 і 50 сейсмічних зон на території Туреччини. Побудована марковська модель сейсмічного режиму виділених зон і карта сейсмічної небезпеки території Молдови, Румунії, Болгарії та Туреччини. Розроблений метод аналізу сейсмічної небезпеки дозволяє враховувати власний закон загасання інтенсивності струсів для кожної сейсмічної зони і території.

Побудована карта найгіршого сценарію розвитку сейсмічної обстановки на території Молдови і Румунії на основі максимально можливої магнітуди землетрусів у джерелі Вранча.

При розрахунку сейсмічної небезпеки загасання впливу проміжних землетрусів оцінювалося по виведеному автором рівнянню макросейсмічного поля проміжних вранчівських землетрусів. Через відсутність макросейсмічних даних корових румунських землетрусів загасання інтенсивності оцінювалося за середніми для Балкан значеннями коефіцієнтів рівняння макросейсмічного поля Шебаліна. Тому результати здійсненого аналізу сейсмічної небезпеки носять попередній характер і покликані в першу чергу продемонструвати можливість методу.

Запропонований метод дозволяє розрахувати сейсмічну небезпеку в населених пунктах, розташованих в радіусі впливу групи сейсмічних зон та побудувати карту сейсмічного районування великих територій, наприклад усієї Європи.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. Буртиев Рашид, *Методология оценки сейсмической опасности*, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017, 281 с.

Статті у наукових виданнях

2. Буртиев Р.З., Онофраш Н.И. О статистическом подходе к определению параметров сейсмичности. *Вопросы инженерной сейсмологии. Задание сейсмических воздействий*, Москва, 1993, 68–71.
3. Буртиев Р.З. Оценка максимальной магнитуды землетрясений очага Вранча по статистике экстремальных значений, *Analele ATIC, Chisinau*, 2003, Vol. I(II), 110–117.
4. Буртиев Р.З. Оценка параметров марковских моделей сейсмического режима, *Analele, Chisinau*, 2003, Vol. I (IV), 117–128.
5. Буртиев Рашид, О применении статистики Гумбеля к оценке максимальной магнитуды, *Buletinul Institutului de Geologie si Seismologie al ASM*. 2007, Nr. 2, 5–7.
6. Буртиев Р.З., Чобану Я.И., О применении оптимизационных методов в оценке параметров III распределения Гумбеля, *Analele ATIC, Chisinau*, 2007, Vol. I(II), 415-417.
7. Буртиев Рашид, Статистическая связь между сейсмическими зонами Балкан, *Buletinul Institutului de Geologie ei Seismologie al ASM*. 2008, Nr.1. 31–34.
8. Буртиев Рашид, О статистическом подходе к картированию сейсмической опасности больших территорий. *Buletinul Institutului de Geologie ei Seismologie al ASM*. 2008, Nr. 2, 57–61.
9. Буртиев Рашид, Применение линейной регрессии для преобразования разных магнитуд в шкалу магнитуды mb. *Buletinul Institutului de Geologie ei Seismologie al ASM*, 2009, Nr. 1, 62–71.

10. Буртиев Рашид, О возможности применения многомерной линейной регрессии с коллинеарными факторами для преобразования магнитуд. *Buletinul Institutului de Geologie și Seismologie al ASM*, 2009, Nr. 2, 35–44.
11. Буртиев Рашид, О применении регрессии в условиях гетероскедастичности сейсмических данных. *Analele ATIC, Chisinau*, 2010, Vol. I (IV), 177–180.
12. Буртиев Рашид, О статистической связи сейсмической активности Балканских сейсмических зон, *Buletinul Institutului de Geologie și Seismologie al ASM*, 2010, Nr. 1, 5–15.
13. Буртиев Рашид, Применение кластерного анализа для сейсмического районирования Балканского региона. *Buletinul Institutului de Geologie și Seismologie al ASM*, 2010, Nr. 2, 55–62.
14. Буртиев Рашид, Статистическая связь между коровой и подкоровой сейсмическими активностями очага Вранча. *Buletinul Institutului de Geologie și Seismologie al ASM*, 2011, Nr. 2, 133–148.
15. Telesca Luciano, Burtiev Raacid, Alcaz Vasile, Sandu Ilie, Time-clustering analysis of the 978-2008 sub-crustal seismicity of Vrancea region. *Journal Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, pp. 2335–2340. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2335-2011>.
16. Буртиев Р.З. Применение кластерного анализа для выделения сейсмических зон Румынии. *Modelare matematică, optimare și tehnologii informaționale, Analele ATIC, Chisinau*, 2012, Vol. I (IV), 252–262.
17. Burtiev Rashid, Evaluation of seismic hazards from several seismic zones, *Environmental Engineering and Management Journal*, 2012, N12, 2141–2150.
18. Burtiev Rasid, Greenwell Fernanda, Kolivenko Vitalii, Statistical analysis time series of speed and temperature in Tiraspol, Moldova, *Environmental Engineering and Management Journal*, 2013, N1, 23–33.
19. Буртиев Рашид, Вероятностный метод оценки сейсмической опасности, *Buletinul INCERCOM*, 2013, Nr. 4, 41–47.
20. Буртиев Рашид, Павлов Петр, Исследование азимутальной неоднородности геологической среды по макросейсмическим данным, *Buletinul Institutului de Geologie și Seismologie al ASM*, 2013, Nr.2, 38–46.
21. Буртиев Рашид, Определение расстояния от точки наблюдения до элементарного источника землетрясений, *Buletinul Institutului de Geologie și Seismologie al ASM*, 2014, Nr.1, 23–29.
22. Burtiev Rashid, Fitting an Ellipse to the set of intensity data points of Vrancea earthquakes. *Journal of Engineering Studies and Research*. 2014, Vol. 20, No, 4, Baceu, Romania, 2014, 15–24.
23. Burtiev Rashid, Time Series in the Study of Seismic Regime of Vrancea (Romania) Seismic Zone, *The Global Environmental Engineers*, 2014, Vol. 1, N2, Karachi, Pakistan, 54–63.
24. Буртиев Рашид, Вероятностный анализ экстремальной сейсмической опасности в Молдове и Румынии. *Buletinul INCERCOM*, 2015, Nr. 4, 41–47.

25. Буртиев Рашид, Вероятностный анализ сейсмической опасности территории Молдовы и сопредельных районов, Геофизический журнал, 2015, № 6, Т. 37, Киев, 124–130. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i6.2015.111179>.
26. Буртиев Р.З., Павлов П.П. Вероятностная модель сейсмичности. Buletinul Institutului de Geologie si Seismologie al ASM, 2015, Nr.2, 97–104.
27. Burtiev Rashid, Alcaz Vasile, Cardanets Vladlen, Probabilistic Seismic Hazard Analysis on the Base of the Stochastic Models of Seismicity, Indian Journal of Applied Research, 2016, Vol. 6, Issue 8, 454–466.
28. Буртиев Рашид, Методы расчета сейсмического риска и составления синтетического каталога землетрясений с использованием Монте-Карло моделирования, Buletinul Institutului de Geologie si Seismologie al ASM, 2016, Nr. 2. 87–96.
29. Burtiev Rashid, Seismic Hazard Assessment Method Based on the Stochastic Models of Seismicity, Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, 2017, Vol. 51, Tsukuba, Japan, 22–38.

Тези конференцій

30. Burtiev Rashid, Cluster Analysis to Select the Seismic Zones of Romania. First International Conference on Moldavian Risks—from Global to local scale. Book of Abstracts, 2012, Bacau, Romania. p. 25.
31. Burtiev Rashid, Probabilistic Seismic Hazard Analysis for the Territory of Moldova and Romania. Second International Conference on Moldavian Risks—from Global to local scale, Book of Abstracts, 2014, Bacau, Romania, p. 24.
32. Burtiev Rashid, A New Approach to Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Georisks in the Mediterranean and Their Mitigation. University of Malta, 2015, p. 154.
33. Burtiev Rashid, Evaluation of Seismic Hazard on Base of Probabilistic Models of Vrancea Zones, The National Symposium “75 Years from November 10th 1940 Vrancea Earthquake”, Book of Abstracts, Bucarest, 2015, p. 14.

АНОТАЦІЇ

Буртієв Р. З. Методологія оцінки сейсмічної небезпеки на основі ймовірнісних моделей сейсмічності. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика. – Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, 2017.

Дисертація присвячена розробці нової міри сейсмічної небезпеки та методології її оцінки. Це означає, що в географічній точці $Q(\varphi, \psi)$ за час t , трапляється n сейсмічних поштовхів, m з них з інтенсивністю I^k . Розроблено марківська модель сейсмічності, яка дозволяє прогнозувати інтервальні значення широти, довготи, глибини гіпоцентрів та величини землетрусів. Конфігурація, яка має форму еліпса, а кут між великою віссю еліпса загасання і позитивним напрямком осі абсцис складає $\gamma_0=51^\circ$. Коефіцієнти загасання інтенсивності струсів для Молдови між інтенсивністю

сейсмічних поштовхів I та характеристиками землетрусу: величини M_W , епіцентральної відстань c , глибина h для землетрусів в зоні Вранча представлені емпіричним, залежним від азимута, рівнянням загасання. Їх значення було визначено наступним чином: $a=1,6$; $c=7.2$, найбільша вісь еліпсу $b_{\max}=5.6$ і найменша $b_{\min}=4.9$. Був проведений ймовірнісний аналіз сейсмічної небезпеки та розроблено карту сейсмічної небезпеки Молдови та території сусідніх країн.

Ключові слова: ЙАСН, макросейсмічні дати, загасання інтенсивності, марківська модель, кластерний аналіз.

Буртиев Р. З. Методология оценки сейсмической опасности на основе вероятностных моделей сейсмичности. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 04.00.22 – геофизика. – Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Київ, 2017.

Диссертация посвящена развитию методов оценки сейсмической опасности на основе вероятностных моделей сейсмичности. Рассмотрен ряд вопросов выделения сейсмических зон, разработки вероятностной модели сейсмического режима, определения места возникновения и магнитуды будущих землетрясений, исследования макросейсмического поля землетрясений, оценки сейсмической опасности, разработке алгоритма и вычислительной программы оценки и картирования сейсмической опасности. При осуществлении исследований применен комплекс методов статистического анализа и построения вероятностных моделей сейсмичности.

Выделение сейсмических зон проводилось с помощью кластерного анализа. При оптимизации числа кластеров доминирующим оказалось решение в 13 кластеров. В качестве пробной выборки использовался каталог землетрясений юго-востока Европы охватывающий период 1900—1990 гг. В этом каталоге содержится сведения о землетрясениях в 18 сейсмических зонах. При сравнении координат эпицентров в сейсмических зонах, выделенных алгоритмом k -средних, с координатами эпицентров, приведенных, в каталоге наблюдается 97%-ное совпадение.

Методы оценки минимальной магнитуды комплектности M_c основываются на предположении о само подобии сейсмического процесса. В данном случае, из множества методов вычисления M_c используются: метод максимальной кривизны; метод, основанный на устойчивости M_c при оценке коэффициента b — наклона графика повторяемости. Значение минимальной магнитуды комплектности для каталога *ROMPLUS* охватывающий период 1978—2013 гг., оцененное по обоим методам, совпадает и составляет $M_c=2.3$.

Между магнитудой и глубиной землетрясений выявлена слабая статистическая связь. Для землетрясений в пределах земной коры связь значительно слабее, чем для промежуточных землетрясений. Объяснением этого факта является то, что в пределах земной коры происходят слабые землетрясения, с магнитудой до $M_W=5.5$, а в промежуточном слое с магнитудой до $M_W=7.7$, и область подготовки охватывает больший объем геофизической среды. Выявлена слабая

связь между годовым числом землетрясений в пределах земной коры и ниже границы Мохо. Статистическая зависимость между коровой и подкоровой сейсмической активностью для землетрясений с магнитудой $M \geq 2.6$ практически отсутствует. Между ежемесячным числом коровых и промежуточных землетрясений также существует слабая статистическая связь. В рядах годового и ежемесячного числа землетрясений в пределах коры существует тренд, в промежуточной сейсмичности предположение об отсутствии тренда подтвердилось.

Непрерывная Марковская цепь является адекватной моделью потока землетрясений. Данная модель подходит для описания траектории функционирования систем, которые имеют тенденцию оставаться в том состоянии, в котором уже находятся. Четырехмерная модель Маркова является наиболее полной моделью сейсмического режима и позволяет предсказать место возникновения и частотную структуру землетрясений. Была исследована статистическая связь между сейсмическими зонами на Балканах. Марковская модель последовательности сейсмических событий указывает на наличие взаимосвязи между сейсмичностью балканских сейсмических зон. Наличие средней тесноты связи между сейсмической активностью сейсмических зон указывают и значения элементов таблицы сопряженности признаков.

В ряде ежемесячного числа землетрясений присутствует долговременная систематическая составляющая. Предположение о стационарности временного ряда месячного числа землетрясений по среднему значению и по дисперсии отвергается. Наилучшими, по выборочным значениям статистических критериев проверки качества модели, оказались простая сезонная, для прологарифмированного ряда, и аддитивная модель Уинтерса. Наилучшей моделью для прогноза временных рядов оказалась $ARIMA(0,1,2) \times (1,0,1)_s$ модель, подобранная конструктором моделей пакета SPSS.

В данной работе проведен статистический анализ макросейсмических данных землетрясений, произошедших 10.11.1940, 7.04.1977, 31.08.1986, 30.05.1990 и 31.05.1990 гг. Исследования показывают, что приемлемой сглаживающей линией макросейсмического поля является эллипс. Проведена аппроксимация эллипсом множества точек равной интенсивности. Определены параметры эллипсов, аппроксимирующих зоны равной балльности макросейсмического поля. Коэффициент линейной регрессии эпицентральной интенсивности I_0 на магнитуду, для Румынских землетрясений, получился равным $b=1.5$. Оптимальными значениями коэффициентов уравнения макросейсмического поля оказались: $a=1.6$; $c=7.2$; наибольшего $b_{\max}=5.6$ и наименьшего $b_{\min}=4.9$ значения осей эллипса затухания интенсивности сотрясений; а угол между большой осью эллипса затухания и положительным направлением оси абсцисс равным $\gamma_0=51^\circ$.

Построена карта сейсмической опасности территории Молдовы, Румынии и Болгарии. Для точек в ближней зоне вычислялось расстояние Джойнера-Бура, а в остальных точках гипоцентральное расстояние. Карта сейсмической опасности отражает интенсивность сейсмического эффекта в баллах шкалы *MSK-64*, и состоит из точек, в которых соответствующая вероятность положительна, а карта,

построенная по нормам “EUROCODE 8” состоит из точек, в которых вероятность равна 0.1.

Основные положения диссертации изложены в 28 статьях, в одной монографии и в 4 тезисах докладов конференций. Диссертация написана на украинском языке, содержит 310 страниц, рисунки, таблицы и ссылки из 342 наименований.

Ключевые слова: вероятностный анализ сейсмической опасности, макросейсмика, затухание интенсивности, марковская модель, кластерный анализ.

Burtiev R. Z. Methodology for seismic hazard assessment based on probabilistic models of seismicity. – Manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences, specialty 04.00.22 – geophysics. – S. I. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2017.

The thesis focuses on the development of the new measure of seismic hazard and methodology of its assessment. It means that in a location of the Earth's surface during the time of t , ground shaking will occur n times and n_k of them with intensity of I^k . The Markov model of seismicity is elaborated, which allows to forecasting of the interval values of latitudes, longitudes, depth of the hypocenters and magnitudes of earthquakes. A configuration, having the shape of an ellipse which major axis is turned on angle $\gamma_0=51^\circ$ concerning the positive direction of abscissa axis. The coefficients of the attenuation relationships for Moldova between seismic intensity I and earthquake's characteristics: magnitudes M_W , epicentral distance c , depth h in the Vrancea zone are represented by empirical azimuth-dependent attenuation equation. Their value was determined as follows: $a=1.6$; $c=7.2$, the biggest axis of the ellipse being $b_{\max}=5.6$ and the smallest $b_{\min}=4.9$. Probabilistic seismic hazard analysis has been performed and the map of seismic hazard of Moldova and adjacent territory is elaborated.

Key words: PSHA, macroseismic dates, attenuation law, Markov model, cluster analysis.