

Відгук

офіційного опонента про дисертаційну роботу Буртієва Рашида Зетовича «Методологія оцінки сейсмічної небезпеки на основі ймовірнісних моделей сейсмічності», представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22-геофізика.

Оцінка сейсмічної небезпеки та її прогноз тісно пов'язані з вивченням сейсмічності. Представлена робота присвячена актуальній і важливій проблемі, яка пов'язана з вивченням сейсмічності та прогнозу сейсмічної небезпеки, а також методам оцінки сейсмічної небезпеки на основі ймовірнісних моделей. Слід відзначити, що вивчення сейсмічності пов'язане з розробленням нових методів математичного моделювання для задач сейсмології, удосконаленню системи спостережень. Тому стратегія сейсмостійкого будівництва, зменшення сейсмічного ризику, проектування сейсмостійких споруд, складання інформативних нормативних прогнозних карт сейсмічної небезпеки тобто, в загальному, методологія оцінки сейсмічної небезпеки потребує комплексного підходу.

У дисертаційній роботі розглянуто виділення сейсмічних зон, розроблення ймовірнісної моделі сейсмічного режиму, дослідження макросейсмічного поля землетрусів, оцінки сейсмічної небезпеки, а також розроблення алгоритмів та програм для оцінки і картування сейсмічної небезпеки. У роботі розглянуто комплекс методів статистичного аналізу.

Практична значимість дисертаційної роботи полягає у розробленні методології для розрахунку сейсмічної небезпеки і побудові карт сейсмічного районування великих територій. Запропонована методологія дозволяє застосовувати обчислювальні засоби на всіх етапах розрахунку сейсмічної небезпеки: статистичного аналізу макросейсмічних даних, виділення сейсмічних зон, побудові ймовірнісних моделей сейсмічного режиму, визначенню функції загасання інтенсивності сейсмічних впливів та розрахунок і картування сейсмічної небезпеки. Дана методологія знайшла своє застосування при вивченні сейсмічності Республіки Молдова, Туреччини, Румунії та Болгарії.

Таким чином, представлена робота є актуальною з точки зору математичного моделювання, статистичного аналізу сейсмічних даних, побудовах ймовірнісних моделей сейсмічного режиму та карт сейсмічного районування територій, а також для практичного використання результатів для народного господарства.

Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел, а також проілюстрована рисунками і таблицями.

У вступі приведено загальну характеристику роботи: розкрито сутність і стан вивчення наукової проблеми, показано актуальність дисертації, сформовано її мету та обґрунтовано задачі, які необхідно розв'язати. Крім того, представлено

наукову новизну отриманих результатів, показано їх зв'язок із науковими програмами, планами і темами, приведено дані для практичного використання результатів роботи, а також дані про апробацію результатів дисертації, вказано на особистий внесок здобувача та обсяг публікацій за темою роботи.

У першому розділі проаналізовано основні результати робіт в галузі оцінки сейсмічної небезпеки, виходячи із літературних джерел. Підкреслено, що оцінка сейсмічної небезпеки - перший крок до сейсмічного районування та оцінки сейсмічного ризику; 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 явищами, що супроводжують землетруси (поверхневі розриви, зсуви, обвали, цунамі і т.ін.), що впливають на нормальну життєдіяльність населення. У розділі відзначено, що оцінка сейсмічної небезпеки залежить від визначення параметрів вогнища землетрусу, а також від географічних координат епіцентру, глибини залягання джерела та функції загасання інтенсивності сейсмічного ефекту з відстанню. Використовуючи ймовірнісний підхід до аналізу сейсмічної небезпеки автор вважає, що всі параметри землетрусу є випадковими величинами, для визначення ймовірнісної структури яких використовуються відомості з каталогів землетрусів.

Другий розділ присвячено визначенню сейсмічних зон. Показано, що сейсмічна зона, в якій відбуваються землетруси, характеризується геолого-геофізичними ознаками, особливостями геологічного розвитку регіону, геодезичними даними про сучасні рухи земної кори, даними, що описують глибинну будову регіону і розподілом фізичних властивостей гірських порід на різних глибинах. Для оцінки сейсмічної небезпеки необхідно зібрати вихідну інформацію про історичні сейсмічні події за період інструментальних спостережень у формі каталогів землетрусів. Підкреслено, що для вирішення задачі сейсмічного районування, слід виділити зони вогнищ землетрусів і використати відповідний каталог сейсмічних подій. Так як просторовий розподіл землетрусів не є рівномірним, то можна виділити зони з різними особливостями сейсмічного режиму: сейсмічно активні, менш сейсмічно активні і асейсмічні зони. У багатьох каталогах землетрусів містяться необхідні, для аналізу сейсмічної небезпеки, дані з виділеними сейсмічними зонами. Але у багатьох випадках, каталоги складені за територіальною ознакою без сейсмічних зон. У такому випадку, для виділення сейсмічних зон дисертант вказує на застосування таких методів: діаграма Вороного та кластерний аналіз. Автор показує, що для виділення компактних груп вогнищ землетрусів слід використовувати кластерний аналіз. У роботі дано опис кластерного аналізу для побудови множин досліджуваних об'єктів (епіцентрів землетрусів) на однорідні групи (кластери). На прикладі румунських землетрусів, в каталогах яких не міститься інформація про сейсмічні зони, дисертант показує, що оптимальним кластерним рішенням для сукупності румунських землетрусів є 13 кластерів, хоча румунські сейсмологи виділяють від 4 до 13 сейсмогенних зон. Тому для пробної вибірки дисертант використав дані з каталогу землетрусів на Балканах за період 1900-

1990рр. У даному каталозі містяться відомості про 18 сейсмічних зон. На основі порівняльного аналізу можна скласти уявлення про потенціал кластерного аналізу для вирішення завдання сейсмічного районування. У роботі дисертант представив 97% збіг щодо виділених сейсмічних зон, що є показником ефективності методу. Крім того, у розділі для використання кластерного аналізу представлено застосування низки методів: метод Варда для визначення відстані між кластерами, алгоритм k-середніх, який використано для побудови k кластерів, розташованих на максимально можливих віддальх один від одного та інші методи і критерії.

Третій розділ присвячено статистичному аналізу каталогів землетрусів. Дисертант показує, що каталог землетрусів є важливим джерелом, що містить необхідну і достатню для аналізу сейсмічної небезпеки інформацію про сейсмічні події. Таким чином, другим кроком для аналізу сейсмічної небезпеки, після виділення сейсмічних зон, є база даних у формі каталогів землетрусів у сейсмічних зонах. Дисертант використовує теорію ймовірностей і статистичний аналіз для сейсмічних параметрів, які представлено у каталогах. У роботі правильно відзначено, що результати сейсмічних спостережень містять випадкові і систематичні похибки. Тому створення адекватних моделей висуває вимоги до якості даних.

Сейсмічний режим є потоком сейсмічних подій, які реєструються в порядку їх виникнення і утворюють часовий ряд. Теоретичною базою для аналізу часових рядів є теорія випадкових процесів. У роботі, для аналізу сейсмічної небезпеки, автор визначає землетрус такими параметрами: час виникнення події, координати епіцентру, глибина вогнища і магнітуда події. Таким чином, отримано багатовимірний часовий ряд, компонентами якого є ряди, впорядковані у часі вищенаведених значень параметрів землетрусів. Основні припущення, що лежать в основі аналізу часових рядів, полягають в стаціонарності процесу і можливості його адекватного опису за допомогою теорії ймовірностей. Крім стаціонарності при аналізі часових рядів, використовуються припущення щодо ергодичності до ймовірнісних характеристик, тобто, коли характеристики, обчислені по реалізації і за часом, збігаються. Наприклад, ергодичність до математичного сподівання означає, що середнє по множині реалізацій дорівнює середньому по часу. У роботі відзначено, що для застосування закону загасання (рівняння макросейсмічного поля), яке пов'язує інтенсивність події з магнітудою, глибиною вогнища та епіцентральною відстанню необхідно привести значення магнітуд до єдиного типу, так як у багатьох каталогах, в тому числі міжнародних, наведені різні типи магніту: m_b , M_W , M_S , M_L , M_D , M_LH , M_J , M_E , M_{PV} , M_LH . Автором підкреслено, що приведення магнітуд до однієї з них за допомогою різних формул дає негативні результати для інших сейсмічних параметрів. Тому у роботі представлено використання регресійного аналізу на здійснення перетворення всіх типів магнітуд в магнітуду шкали m_b . Як результат, у даному розділі приведено статистичний аналіз між магнітудами m_b і M_W , m_b і M_S , m_b і M_D , m_b і M_L , використовуючи лінійні рівняння регресії. Визначено коефіцієнти регресії та довірчі інтервали для них, а також відносні похибки. За критерієм Стюдента виявлено значимість регресії і кореляції між магнітудами. Показано достатньо

високий статистичний зв'язок між магнітудами. Зокрема, коефіцієнт кореляції між m_b та M_W дорівнює $r = 0.9006$, відносна похибка $\delta = 6.98\%$. У розділі приведено багатовимірну лінійну модель регресії: між магнітудою m_b та глибиною h і магнітудою MS . За критерієм Стюдента виявлено значимість регресії і кореляції між магнітудою m_b та глибиною h і магнітудою MS . Розглянуто нелінійне рівняння регресії між магнітудою m_b та глибиною h і магнітудою MS . Показано на значущість коефіцієнта множинної кореляції між магнітудою m_b і регресорами. Крім того у таблиці 3.3 представлено, що регресори MS , MS^2 , MS^3 є колінеарні між собою, а глибина вогнища землетрусів не корелює з регресорами: MS ; MS^2 ; MS^3 . Таким чином, проведений статистичний аналіз показав, що взаємозв'язок між магнітудою і глибиною землетрусів зони Вранча в межах земної кори практично відсутній.

У четвертому розділі для аналізу сейсмічної небезпеки, після виділення сейсмічних зон і створення каталогів їх землетрусів, визначено розподіл параметрів землетрусів. Це завдання вирішується на основі ймовірнісних моделей сейсмічного режиму зони вогнищ землетрусів. Багато задач сейсмології пов'язані з умінням обчислювати ймовірності певних подій, пов'язаних з процесом і визначенням його ймовірнісної структури. В основі розв'язання задачі щодо обчислення ймовірності того, що подія відбудеться лежить теорія випадкових процесів. Зону джерел землетрусів можна розглянути як фізичну систему, яка змінює свої стани у випадкові моменти часу. Моменти часів появи 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. Автор підкреслює, що найбільш часто зустрічаються в літературі ймовірнісні моделі в часовій послідовності землетрусів засновані на припущенні про те, що події відбуваються в часі згідно пуассонівського процесу, і що магнітуди рівномірно розподілені. При цьому передбачається, що вогнища землетрусів також розподілені рівномірно в фізичному просторі (x, y, h) . Для моделювання потоку землетрусів багато дослідників намагалися застосувати різні методи для аналізу часових рядів. Розраховувався пуассонівський показник розсіювання, будувалися статистичні розподіли інтервалів часу між землетрусами і кількістю сейсмічних подій, автокореляційні функції, функції ризику і т.д. Дисертант пропонує використання моделі, на відміну від пуассонівської, яка повинна враховувати, що очікувана тривалість часу до наступної сейсмічної події зменшується з часом і залежить від магнітуди землетрусу. Це є характерно для малої кількості сейсмогенних зон, для яких спостерігаються певні відхилення тимчасового ходу сейсмічності від пуассонівського процесу. Існують моделі альтернативні до пуассонівських моделей - це моделі тригерного типу. У такій моделі магнітуди утворюють дискретний марковський ланцюг, а інтервали часу між землетрусами мають розподіл $F(t)$, який є відмінним від експоненціального закону. Така модель знайшла своє застосування для опису потоку сильних тихоокеанських землетрусів. У роботі запропоновано марковську модель потоку землетрусів, показано її дієвість, стверджується, що марковський процес підходить для опису

подій, зміни яких відбуваються в будь-який момент часу. Алгоритм побудови марковської моделі демонструється на прикладі 705 землетрусів зони Вранча. Марковська модель сейсмічних зон може допомогти виявити міграцію вогнищ землетрусів уздовж сейсмічних поясів і наявності зв'язку між сейсмічними регіонами.

У п'ятому розділі проводиться статистичний аналіз макросейсмічного поля. Таким чином, наступним кроком у дисертації є визначення закону загасання інтенсивності сейсмічних впливів із відстанню. Аналіз макросейсмічного поля проводився для обґрунтування апроксимації еліпсом зон однакової бальності. Для дослідження використано макросейсмічні дані землетрусів, що відбулися 10.11.1940; 7.04.1977; 31.08.1986; 30.05.1990 і 31.05.1990 рр. Дослідження підтвердили, що прийнятною згладжуючою лінією макросейсмічного поля є еліпс. Визначено параметри еліпсів, що апроксимують різні зони рівної бальності макросейсмічного поля. Показано, що для румунських землетрусів (кілька сотень подій) із використанням регресійного аналізу залежність інтенсивності I_0 від магнітуди M_w і глибини h цих землетрусів виражається формулою лінійної регресії. Макросейсмічне поле досліджуваних землетрусів мають витягнуту конфігурацію, що нагадує форму еліпса. Показано, що 5, 6 і 7 бальні зони витягнуті в напрямку північ-південь. Інші зони витягнуті уздовж паралелі, що свідчить про неоднорідність геологічного середовища.

У шостому розділі для дослідження стаціонарності сейсмічного режиму використовується теорія часових рядів. Спостереження за активністю сейсмічних зон показують, що характеристики сейсмічності не є стаціонарними. Періоди варіацій кількості землетрусів (місяці, роки) розкидані хаотично. Автором показано, що для щомісячної кількості землетрусів зони Вранча, не можна впевнено говорити про закономірності в тривалості періодів варіацій числа землетрусів і в чергуванні періодів сейсмічного затишшя з періодами високої сейсмічної активності. Дисертантом проведено дослідження для пошуку статистичної закономірності у варіаціях параметрів сейсмічності, зокрема частоти землетрусів, статистичним розподілом магнітуди, просторовим розподілом вогнищ землетрусів у часі. Проводився аналіз часового ряду щомісячної кількості землетрусів, які відбулися за період із 1978 по 2011 рр. в зоні Вранча. Графічним аналізом визначено компоненти часових рядів, а також структуру і характер сезонних коливань ряду. Аналіз рядів показав, що оптимальними є проста сезонна і мультиплікативна модель Уінтерса. Для прогнозу застосовувалися також лінійні моделі авторегресії. Параметри моделей рядів визначалися із поведінки автокореляційної функції.

Сьомий розділ присвячено ймовірнісному аналізу сейсмічної небезпеки (ЙАСН), який включає в себе чотири основні етапи:

На першому етапі визначаються сейсмічні зони, і передбачається, що вогнища землетрусів розподілені з певною ймовірністю в геофізичному просторі, який займає зона вогнищ землетрусів. 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. Третім кроком є визначення параметрів загасання сейсмічного ефекту. В даному випадку, аналіз сейсмічної небезпеки проводиться на основі бальності макросейсмічної шкали МСК-64 і в прискореннях зміщення ґрунту по рекомендованим будівельним нормам Європейського Союзу "EUROCOD 8".

На четвертому етапі для конкретної території, яка знаходиться в радіусі дії групи сейсмічних зон, обчислюється сумарна міра сейсмічної небезпеки, яка описується ймовірністю, згідно якої в географічній точці $Q(\varphi, \psi)$ за час t трапиться n сейсмічних поштовхів, m з яких матимуть інтенсивність I^k . Така міра є універсальною: всі відомі оцінки є її окремими випадками. На основі розробленої автором методології запропонований метод ймовірнісного аналізу сейсмічної небезпеки був випробуваний для територій Молдови, Румунії та Туреччини. Як результат, побудовано карти сейсмічної небезпеки на основі відомостей про румунські землетруси з каталогу ROMPLUS, території Молдови, Румунії, Болгарії. Обчислено характеристики сейсмічної небезпеки в Кишиневі. Запропонований метод аналізу сейсмічної небезпеки дозволяє враховувати власний закон загасання інтенсивності струшувань для кожної сейсмічної зони і територій. Автором розроблено алгоритм обчислення сейсмічного ризику.

Враження від роботи: дисертаційна робота Буртієва Рашида Зетовича виконана на високому науковому рівні. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій можна вважати прийнятною. Вірогідність та достовірність основних наукових положень та отриманих результатів забезпечені коректністю постановок розглянутих задач, строгістю використання математичних методів, проведенням обчислювальних експериментів із достатнім ступенем точності, який контролювався за допомогою теоретичних співвідношень, а також порівняльним аналізом із результатами, які отримано іншими методами.

До недоліків роботи можна віднести:

- редакційні помилки. Наприклад, підписи на графіку в розділі 6 (рис.6.1, 6.2, 6.3) є на російській та англійській мовах. У тексті роботи є присутні помилки редакційного характеру;

- у розділі 3 у підрозділі 3.4 приведено лінійне регресійне рівняння (3.3), яке використовується для визначення коефіцієнтів регресії. Як визначається із цього рівняння ε_i , є не зрозумілим. Аналогічно, початкове нелінійне рівняння регресії (3.20) містить ε_i , а кінцеві рівняння із визначеними коефіцієнтами регресії не містять значення для ε_i ;

- у другому розділі стверджується, що механізм вогнища землетрусу є одним з головних факторів, що характеризують сейсмічну подію, що визначає конфігурацію макросейсмічного поля і відображає геолого-геофізичні умови формування вогнища, просторову орієнтацію осей головних напружень, можливих площинних розломів і зрушень в епіцентрі землетрусу. Стверджується, що існує ряд робіт, присвячених дослідженню механізмів вогнищ землетрусів зони Вранча. Але у роботі не приведено жодного механізму вогнища. Крім того,

на мою думку потрібно додатково пояснити твердження щодо орієнтації площини розлому для подій зони Вранча.

Як рекомендацію, пропоную для аналізу сейсмічної небезпеки використати сейсмічний момент замість магнітуди, який однозначно визначається для кожної події. Наведені недоліки, редакційні помилки та рекомендації не зменшують цінність роботи.

Основні результати Буртієва Рашида Зетовича опубліковано в 26 публікаціях і доповідалися на міжнародних наукових конференціях. Вважаю, що робота Буртієва Р.З. являється хорошою докторською дисертацією, що відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22-геофізика.

Доктор фізико-математичних наук,
професор, завідувач відділу Карпатського відділення
Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України

Д.В.Малицький

Підпис Д.В.Малицького засвідчую:

Вчений секретар Карпатського відділення
Інституту геофізики ім. С.І.Субботіна НАН України
к.ф.-м.н, с.н.с.



О.Я.Сапужак