

<sup>1</sup>Т. М. Лебедєва, мол. наук. співроб.,

<sup>2</sup>М. К. Кременчуцька, канд. психол. наук, ст. наук. співроб.,

<sup>3</sup>Є. Г. Коніков, доктор геол. — мін. наук, проф.,

<sup>4</sup>В. В. Овчаренко, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.,

<sup>5</sup>О. Я. Шатагіна, канд. психол. наук, ст. наук. співроб.,

<sup>6</sup>О. В. Фесенко, канд. геол. — мін. наук, доц.

<sup>1-5</sup>Проблемна науково-дослідна лабораторія інженерної геології узбережжя моря, водосховищ та гірських схилів (ПНДЛ-1), <sup>6</sup>кафедра інженерної геології та гідрології, Одеський національний університет імені І. І. Мечникова;

<sup>1</sup>t\_th@ukr.net, <sup>2</sup>mkk@ukr.net, <sup>3</sup>konikov2006@mail.ru, <sup>4</sup>sytnikov@te.net.ua,

<sup>5</sup>yunta4@mail.ru <sup>6</sup>alexey\_vf@mail.ru

## ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ПРОВІЩЕННЯ СЕЙСМІЧНИХ ЯВИЩ НА ПІДСТАВІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ ТА МЕТОДОЛОГІЇ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ

Обговорюється можливість використання методу локального зменшення розмірності задачі нелінійної динаміки — методу русел та джокерів — для опису сейсмічних процесів. Розглянуто можливість зв'язати комбінацію динамічних та статистичних методів з методом сейсмічного мікрорайонування. Запропоновані методи являють собою подальший розвиток техніки дослідження геофізичних систем шляхом комбінації динамічних, статистичних та практичних методів сейсмічного мікрорайонування.

**Ключові слова:** землетруси, сейсмічне мікрорайонування, синергетика, аттрактор, моделювання

### Вступ

Вирішення проблеми прогнозування землетрусів вимагає новітніх підходів і методів сучасної науки. Традиційні підходи ґрунтуються на довгостроковому моніторингу всіляких геофізичних і геохімічних процесів, що відбуваються в досліджуваній області. Проводиться моніторинг пружних напружень і деформацій, геодезичних параметрів, різних характеристик електричного й магнітного поля, залучаються геохімічні й термодинамічні дані. Отримані ряди вимірювань інтерпретуються за допомогою моделей середовища, заснованих на рівняннях механіки.

Поряд з тим, розуміння процесів, що відбуваються в земній корі та їхній опис вимагає принципово інших підходів. Землетруси, що відбулися за останні декілька років, так само як і численні приклади землетрусів минулих років, показали, що проблема прогнозування землетрусів в даний час не має ефективного вирішення. Звичайні мережі сейсмічних станцій і геофізичних мереж функціонально розділені. Сейсмографи, деформометри, акселерографи постійно проводять необхідні виміри, але як і раніше неможливо передбачати де, якої сили, а головне, коли відбудеться черговий підземний удар.

В цей час ступінь передбачуваності довгострокового й середньострокового прогнозу має ймовірність 0,5 — 0,8. Гірше справа з короткостроковими прогнозами, для яких поки не встановлені значимі зв'язки із провісниками. Будь-який прогноз носить імовірнісний характер, і головна мета сейсмології ще не досягнута.

Перевагою синергетики та теорії динамічних систем як методології дослідження складних й різнорідних по характеру систем саме є те, що вона дозволяє простежити просторово — часові зміни таких систем і визначити їхню динаміку як сукупність взаємозалежних процесів [1]. Таким чином, вона дає можливість визначити процес формування вогнища землетрусу в рамках усього геологічного процесу, тобто фактично спрогнозувати землетрус у тому або іншому регіоні.

З ціллю створення системи сейсмопрогнозування та наслідків землетрусів та локальних тектонічних процесів за допомогою фізико-математичних методів провіщення були використані відповідні методики створення натурних геологічних моделей і інженерно-геологічного картографування, лабораторних експериментів, а також методів “русел” та “джокерів”, що дозволяють відтворювати сценарії впливу сейсмічних хвиль. Оскільки до цього часу не існує досить точних методів прогнозування землетрусів, найбільш актуальним стає якраз створення сценаріїв можливих наслідків цього катастрофічного процесу.

Задля досягнення цієї мети вирішувались наступні завдання.

1. Аналіз теоретичних джерел та практичних робіт з синергетики тектонічних процесів та створення математичної моделі сейсмічного процесу.

2. Використання моделі оцінки інженерно-геологічних умов та локальної сейсмонебезпеки, як підстави математичного моделювання втрати стійкості локальних ділянок та об'єктів при землетрусах.

3. Теоретичне обґрутування та апробація методології нелінійної динаміки (методів “русел” та “джокерів”) для створення сценаріїв можливих наслідків землетрусів на забудованих територіях на прикладі м. Одеси.

У результаті реалізації положень теорії катастроф свого часу була запропонована концепція синергетичного підходу та методологія тектонічних (сейсмічних, зокрема) процесів, об'єднаних у єдиний геосинергетичний комплекс провіщення наслідків цих процесів [5].

### **Скорочений огляд проблеми прогнозування сейсмічних подій**

В основу сейсмічного прогнозування покладено виявлення місцеположення сейсмоактивних, а значить сейсмонебезпечних, геологічних структур, ретельне вивчення сейсмогеодинамічного режиму і сейсмічного ефекту, що створюється ними на поверхні землі.

Прогноз землетрусу — це обґрунтований висновок про місце, час виникнення, силу (чи макросейсмічну бальність в певних пунктах) очікуваного землетрусу з вказівкою оцінки вірогідності здійснення такої події. Першим наближенням до прогнозу служить сейсмічне районування, що відповідає на питання, якої сили підземні поштовхи в принципі можуть очікуватися

в даній місцевості. Ми використовували схему сейсмічного мікрайонування м. Одеси, розроблену О. В. Фесенко [11].

Аналіз поточної сейсмічної обстановки включає вимірювання спектрального складу коливань, типовість або аномальність перших вступів поперечних і подовжніх хвиль, виявлення тенденції до групування (рій землетрусу), оцінку вірогідності активізації тих або інших тектонічно активних структур та ін. Найважливішим досягненням геофізики останніх десятиліть стало усвідомлення того, що землетруси не є раптовою подією, а є складним процесом, що готується в земних надрах тривалий час і що виявляється в аномаліях різних геофізичних і геохімічних полів. Такими аномаліями різної природи і є передвісники землетрусів, спостереження і вивчення яких грає величезну роль в розумінні і моделюванні процесу підготовки землетрусів, прогнозуванні сейсмічних подій [4, 9, 10].

Не менш цікавим та важливим є також вивчення особливостей прояву землетрусів у часі за даними довгострокових режимних спостережень.

Попередні результати аналізу часових рядів землетрусів зони Вранча за допомогою спектрального методу дають підстави для ствердження про періодичну природу землетрусів. Виявлені наступні значущі періоди прояву сильних землетрусів (більше 4 балів), в порядку значущості: 20, 11, 4, 6 років (рис. 1).

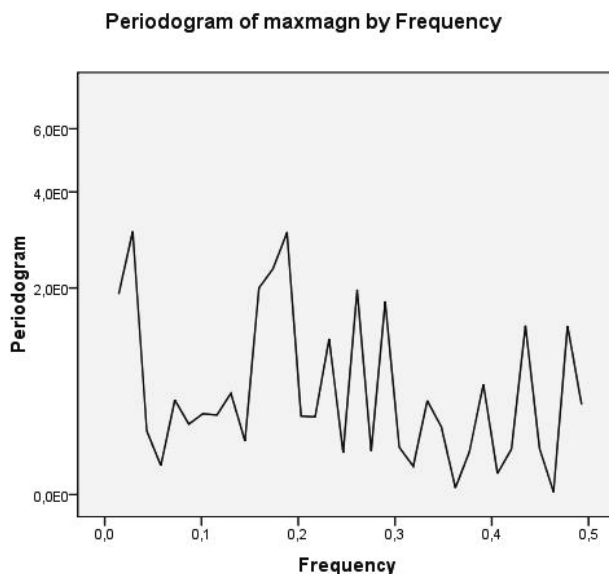


Рис. 1. Періодограма землетрусів за магнітудою > 4 балів (зона Вранча)

Не дивлячись на величезну кількість передвісників, жоден з них не дає точних вказівок на час, місце і силу майбутнього землетрусу. Однозначного причинно-наслідкового взаємозв'язку того або іншого явища із землетрусом немає. Оскільки в різних сейсмоактивних районах різні провісники працюють по-різному, даючи великий розкид в оцінках місця, часу

і сили майбутнього землетрусу, прогноз землетрусів за своєю природою має, взагалі кажучи, імовірнісний характер. Аналіз багаторічних даних по ряду геофізичних (в основному сейсмологічних) провісників показав, що вірогідність успішного прогнозу по кожному з них не перевищує 0,5. В цілях підвищення надійності і ефективності прогнозних оцінок необхідно комплексне використання декількох прогнозних ознак. Практика останніх років показала виправданість і перспективність такого підходу, принаймні, для середньострокового прогнозу [3].

Останнім часом з'являється все більше повідомлень про роль і можливість використання космічного моніторингу в дослідженні і прогнозуванні сейсмічних подій. Так, пропонується емпірична схема короткострокового прогнозу землетрусів на основі вивчення зв'язку між недавно виявленими хмарними сейсмоіндукованими структурами (ХСИС) з електротепловим пробом літосфери і квазіблискавичними структурами в атмосфері.

Вплив сонячної активності на геофізичні процеси зв'язується з блоково-структурованою будовою і граничною енергонасиченістю земних надр, що можливо приводить до селективного поглинання електромагнітного і інших видів енергій окремими елементами цієї блокової структури і, в першу чергу, літосферними розломами, чим обумовлена поява енергетично активованих зон літосферних розломів (у околиці яких і відбуваються потім землетруси). У зв'язку з цим пропонується новий клас провісників землетрусів у вигляді аномальних по ряду ознак хмарних сейсмоіндукованих структур, що дають у сукупності з іншими провісниками високу реалізацію прогнозу з  $M=6,5$  (більше 80%) [8].

Попередні результати проведеного нами крос-кореляційного аналізу рядів сонячної активності та сейсмоактивності в зоні Вранча (період 1964 — 1999 рр.) дають досить задовільні результати: коефіцієнт кореляції дорівнює 0,57.

### **Динаміка катастроф та основи теорії нелінійних динамічних систем в сейсмології**

В кінці минулого сторіччя вченими Інституту фізики Землі, потім Міжнародного інституту теорії прогнозу землетрусів і математичної геофізики почалася розробка принципово нового фундаментального наукового напрямку — обчислювальної сейсмології. До числа її основних завдань входило впровадження в геофізику нових математичних і статистичних методів в цілях підвищення точності і об'єму обробки даних; комплексний аналіз і інтерпретація геофізичних спостережень тощо. Тоді ж почалося активне вивчення можливості створення теоретичної бази прогнозування місць і часу сильних землетрусів [4].

В основі цих досліджень покладене, запропоноване академіком М. Садовським уявлення про суцільне геофізичне середовище як блоково-структуровану і відкриту систему з ієрархічною со-підлеглістю лінійних розмірів для блоків сусідніх рангів [9], тобто — розгляд літосфери Землі, як масштабно інваріантної системи, що має ієрархічну структуру.

У 1987 році група вчених Курт Візенфельд, Пер Бак і Чао Танг розробили концепцію для пояснення механізмів самоорганізації просторово протяжних динамічних систем. Було показано, що такі системи різної фізичної природи еволюціонують в критичні стаціонарні стани, що не мають постійних просторових масштабів або характерних часів життя. Поведінка в часі таких критичних станів, що самоорганізуються, і їх просторова структура є масштабно-інваріантною (фрактальною). Проста фізична модель, що демонструє таку поведінку, — це купа піску. Якщо крутизна схилу в якій-небудь точці на поверхні купи стає дуже великою, піщинка, що знаходиться там, обсипається, захоплюючи за собою інші піщинки. Нарешті, коли всі піщинки досягнуть деякого мінімального стійкого стану, лавина припиниться. Додавання однієї піщинки може спровокувати нову лавину. Такі ледве стійкі стани назвали критичними станами системи. Статистика для купи піску виявляється степеневою, як і для ряду лих і катастроф. Вона дуже схожа на ту статистику, яку ми маємо для землетрусів, тобто небезпека знаходиться на грані між детермінованою і імовірнісною поведінкою або “на кромці хаосу” [9, 10, 13].

Свого часу була висунута ідея розвитку самоорганізованої критичності (СОК-гіпотеза), що дозволила пояснити, чому для найрізноманітніших природних систем типове виникнення степеневих законів розподілу. СОК-гіпотеза дає підставу розглядати літосферу Землі як середовище, що постійно знаходиться в нестійкому стані. І дійсно, сейсмологи відзначали, що перед сильними землетрусами літосфера сильніше відгукується на проходження приливних хвиль або циклонів. Важливо, що навіть порівняно слабкі за геологічними мірками дії можуть грати роль пускового механізму або піщинки, що викликала лавину у відомій моделі пісочної купи. Одна з характерних ознак зростання критичності — аномально висока мінливість в інтенсивності сейсмічного режиму, тобто наявність виразних періодів активізації і затишшя і т. д. [10, 13].

На базі нової парадигми прогнозу землетрусів — теорії нелінійних динамічних систем, приділяючи основну увагу комплексному аналізу динаміки складної ієрархічної системи і сумісному використанню різних груп “провісників”, була розроблена група математичних алгоритмів. На першому кроці створення алгоритму виробляються методи згортання об’ємної інформації, яку дає моніторинг, в невеликий набір функціоналів — залежних від часу величин, які в агрегованому вигляді характеризують стан системи. Потім необхідно визначити найбільш інформативні функціонали і сконструювати алгоритм, що дозволяє оголошувати тривогу на основі значень цих функціоналів. “Навчання” алгоритму полягає в підборі параметрів, що використовуються для обчислення функціоналів, встановленні для них порогів, перевищення яких може свідчити про вхід системи в небезпечну область, і формулюванні правила оголошення тривоги. Цей етап оптимізує здібність алгоритму до ретроспективного прогнозу на основі інформації про передуючу їм активність. Завершальний крок — тестування в реальних умовах, направлене на визначення ефективності алгоритму.

## Атракторна модель геологічного середовища

З розширенням можливостей обчислювальної техніки все частіше використовуються моделі, що базуються на теорії динамічних систем. Відповідно до цього підходу систему моделюють системою звичайних диференціальних рівнянь.

Зображення розв'язань цих рівнянь як руху декотрої точки у просторі з розмірністю, що дорівнює кількості змінних, називають фазовими траєкторіями системи. Аналіз поведінки фазової траєкторії (щодо її стійкості) показує, що існують випадки, коли всі рішення системи зосереджуються на деякій замкненій підмножині. Така підмножина називається атрактором (від англ. “to attract” — притягувати).

Атрактор має певну “область притягіння” (множину початкових точок). Із часом усі фазові траєкторії, що зародилися у множині початкових точок, намагаються збігтися саме до цього атрактору. Для сталих коливань, що відповідають динамічному хаосу, запропоновано назву дивний атрактор. Рух точки на таких атракторах є нестійким, будь-які дві траєкторії на них завжди розбігаються, мала зміна початкових умов призводить до різних шляхів розвитку. Іншими словами, динаміка систем із дивними атракторами є хаотичною.

Ці атрактори дістали таку назву, бо вони у фазовому просторі справді виглядають незвично, являючи собою ні точку, ні періодичну траєкторію, ні поверхню. Іноді їх порівнюють з поверхнею, що складається з нескінченної множини шарів. Взятє навмання рішення блукатиме в дивному атракторі і через значний проміжок часу пройде досить близько до будь-якої його точки. Тут ми маємо дуже високий ступінь чутливості до початкових умов.

Щоб охарактеризувати атрактори, вводять поняття розмірності ( $m$ ). Розмірність визначає кількість інформації, необхідної для визначення координат точки, що належить атрактору в межах заданої точності. Важливою характеристикою атрактора є кореляційна розмірність  $D_c$  [13].

Для відомої динамічної системі нескладно визначити розмірність та кореляційну розмірність (наприклад, для системи Лоренца  $D_c=2,05$ ,  $m=3$ ). Однак, при вивченні природних систем у т. ч. геофізичних, доводиться описувати складні сигнали, що схожі на випадкові. Для таких систем неможливе вимірювання всіх компонент, бо не всі вони їй відомі. Тож постає питання про розмірність атрактора та мінімальне число фазових змінних, що необхідні для опису техногенного сейсмічного процесу.

Існують методи [13] реконструкції атракторів, що дають змогу з'ясувати, наскільки складною має бути модель досліджуваної системи (скільки має бути ступенів свободи або параметрів порядку, наскільки тривалим може бути часовий інтервал, на якому можна прогнозувати поведінку цієї системи). Як показав Такенс [13], можна відновити деякі якості атрактору (наприклад,  $m$  та  $D_c$ ) по часовій послідовності однієї з складових вектора  $\bar{x}(t)$ . Методика реконструкції атрактора основана на побудованні псевдоатрактору, при цьому сама вимірювана послідовність, взята з декотрою

часовою затримкою, використовується в якості компонент вектора:  $X(t) = \{X(t), X(t+\tau), X(t+2\tau), \dots, X(t+(m-1)\tau)\}$ . Оскільки компоненти вектора, що характеризує динамічну систему, незалежні, то у якості величини  $\tau$  вибирається перше значення, при котрому автокореляційна функція приймає нульове значення, або досягає мінімуму. Оскільки невідома розмірність вміщення  $m$ , то її знаходять за такою процедурою: послідовно додають компоненти, та при кожному  $m=2,3,\dots$  вираховують кореляційну розмірність  $D_c(m)$ . Починаючи з декотрої розмірності  $m$ , кореляційна розмірність  $D_c$  перестає змінюватись. Значення  $m$ , починаючи з котрого  $D_c$  перестає змінюватись, і є мінімальною розмірністю вміщення, тобто найменшою цілою розмірністю простору, що вміщує весь аттрактор. А відповідне значення  $D_c$  — оцінкою кореляційної розмірності аттрактора.

Так, при аналізі землетрусу у діапазоні магнитуд від 4 до 6 наводяться значення  $m=7$ ,  $D_c=3,73$  [2]. Таким числом основних параметрів характеризується у наведеному випадку процес.

Щодо можливості використання моделі для розрахунків у такому вигляді, то відомо [8], що розмірність динамічних систем для можливості розрахунків має бути не більшою, ніж 5-6. З ростом розмірності задачі експоненційно зростають об'єм необхідних обчислень та кількість експериментальних даних. Тобто потрібні величезні вибірки, значення змінних потрібно вимірювати з дуже високою точністю, для обробки даних потрібно використовувати суперкомп'ютери. Все це призводить до надмірної складності розрахунків та аналізу або взагалі робить його неможливим. Цей факт відомий під назвою "прокляття розмірності".

Як приклад розглянемо такий досить складний регіон як м. Одеса і представимо те, що дає і може дати вказана математична модель для визначення стану геологічного середовища цього регіону. Він обмежений адміністративною лінією по суходолу і має прибережні морську і лиманові зони. Основними чинниками зовнішньої дії є: прибережні зони і атмосферні явища, численні інженерні споруди і комунікації. Тому на карті-схемі міста можна виділити наступні аттракторні області: у прибережній зоні такі природні утворення як миси і інші частини, що різко виділяються, наприклад, Жевахова гора; такі штучні утворення як житлові масиви і підприємства, залізничний вокзал і дорога з вузловими станціями, аеропорт.

Для визначення виду аттракторів потрібно в першому лінійному наближенні по Ляпунову отримати стійке вирішення першого рівняння моделі і визначити значення коріння характеристичного рівняння. Саме по знаку і величині цих показників Ляпунова встановлюється вид аттрактора. Наприклад, якщо всі три показники негативні і приблизно рівні по величині  $(-, -, -)$ , то вийдуть стійкий вузол або фокус, коли вектори стану або траєкторії руху сходяться в точку відповідно по лініях і по спіралі; якщо два показники негативні, а третій рівний 0  $(-, -, 0)$ , то виходить стійкий граничний цикл, коли рух відбувається по замкнутій траєкторії (круг, овал і ін.); якщо один показник негативний, два рівні 0  $(-, 0, 0)$ , то вийдуть стійкий тор; якщо один показник негативний, другий позитивний, а третій рівний 0  $(-, 0, +)$ , то виходить дивний аттрактор. При цьому вузол, фокус, гранич-

ний цикл і тор є простими атракторами і характеризують регулярний рух (динаміку) в системі, коли траєкторії сходяться в цих атракторних областях. Дивний атрактор дозволяє деяку розбіжність траєкторій і тому характеризує певний хаос в системі. У результаті виходить те, що стійкий стан атракторних областей можливий тільки при траєкторіях руху, що сходяться, тобто при стискаючій деформації. Це дуже важливо для геологічного середовища, матеріал якого в природних умовах знаходиться в змозі дуже близькому до всебічного стиснення.

Тепер можна перейти до визначення виду атракторів у виділених областях м. Одеси на якісному рівні, тобто без точного вирішення першого рівняння. Так області житлових масивів, як правило, є простими атракторами і їх можна назвати ґрунтовими (рис. 2). Причому на вигляд цього атрактора робить істотний вплив близькість до прибережної зони, коли горизонтальні деформаційні складові зв'язані і відрізняються тільки по величині (на рисунку 3 у вигляді фокусу). Тут зв'язаність пов'язана не тільки з коефіцієнтом Пуассона, але і з напружено-деформованою анізотропією відповідного об'єму (маси) порід і ґрунтів (того або іншого житлового масиву) як частини геологічного середовища виділеного регіону. Така зв'язаність або взаємозв'язана деформаційних складових приводить до того, що траєкторії руху сходяться в крапці не по окремих лініях як у вузлі, а по спіралі як у фокусі. Зменшення взаємозв'язаної або незв'язаність можуть привести до замкнутих траєкторій руху у вигляді граничного циклу або до втрати стійкості. Так через те, що стискаюча горизонтальна деформаційна складова перпендикулярна лінії побережжя менше іншої складової по величині і може зменшуватися аж до 0 і навіть до розтягуючих значень на самому побережжі, в районі селища "Таїрова" розташовується нестійкий фокус. Вказана незв'язаність може зменшуватися або згладжуватися, наприклад, катакомбами як в центрі міста і розташуванням на вузькому перешийку між лиманами і морем як на селищі "Котовського", а також на значній відстані від побережжя як на "Черьомушок". Тому в цих районах можуть розташовуватися стійкі фокуси (рис. 3). Стійкий граничний цикл відрізняється тим, що в його достатньо малій околиці немає інших замкнутих траєкторій, а решта всіх траєкторій намотується на неї.

У морській прибережній зоні окремі різко виступаючі частини прибережної лінії у вигляді мису відрізняються природною стабільністю. Це відбувається тому, що тут діють дивні атрактори у вигляді граничного циклу, коли одна з горизонтальних деформаційних складових (направлена паралельно береговій лінії) дорівнює 0, через відсутність напруги на вільних бічних поверхнях, а інша є позитивною через те, що вся маса мису працює на відрив (рис. 2, 3). Дивний атрактор відрізняється тим, що з часом траєкторії руху не тільки стягуються, але і, потрапивши в його область залишаються тут назавжди. Тому дана область стискається і її об'єм може зменшуватися, забезпечуючи стабільну конфігурацію мисів. При цьому на самому атракторе траєкторії можуть експоненціально швидко розходитися, що приводить до локальної (неістотною) нестійкості і до появи ознак хаотичності руху. Це забезпечує певне і стабільне розташування мисів.



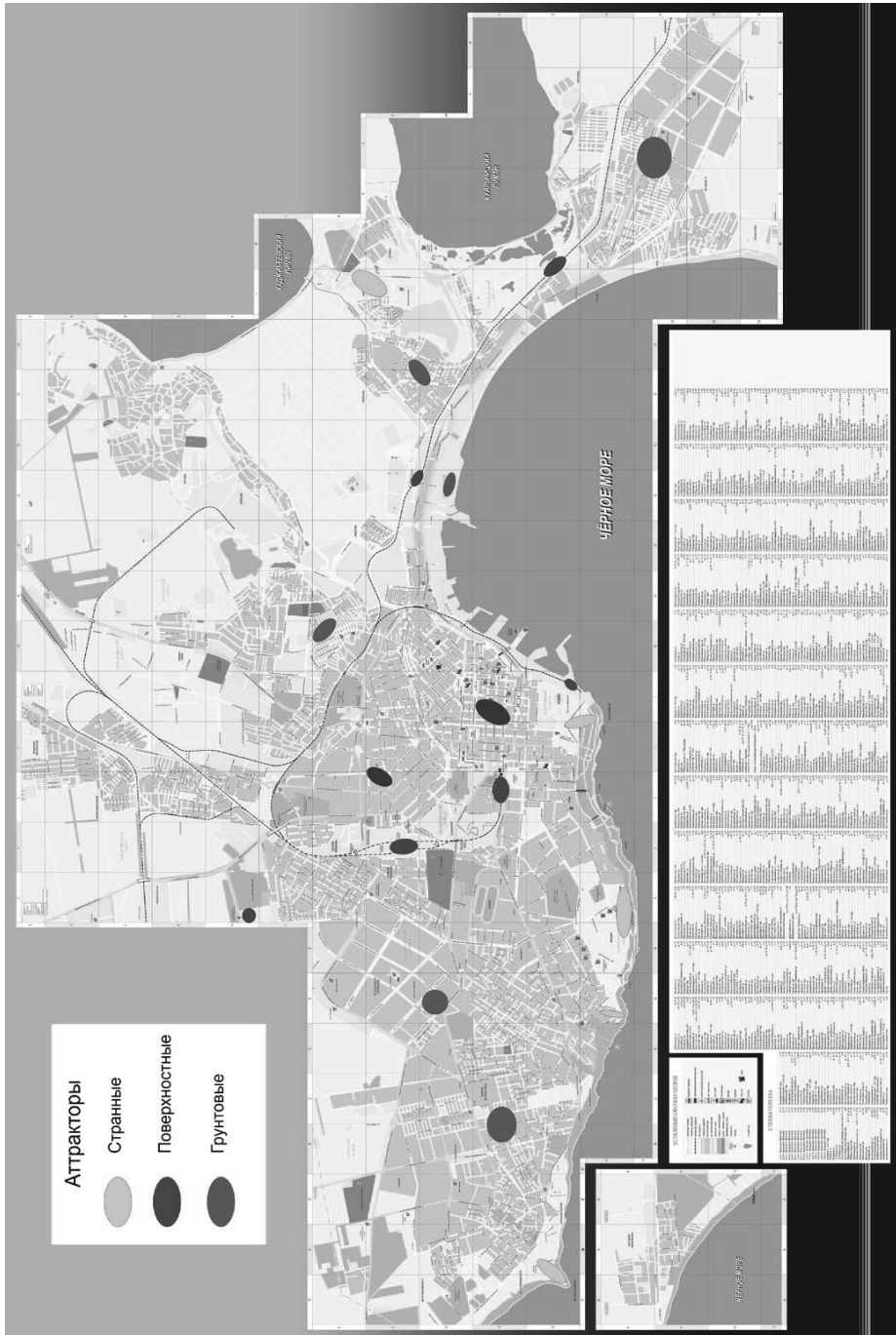


Рис. 2. Схема розгашування системи аттракторів на території Одеси та їх типи

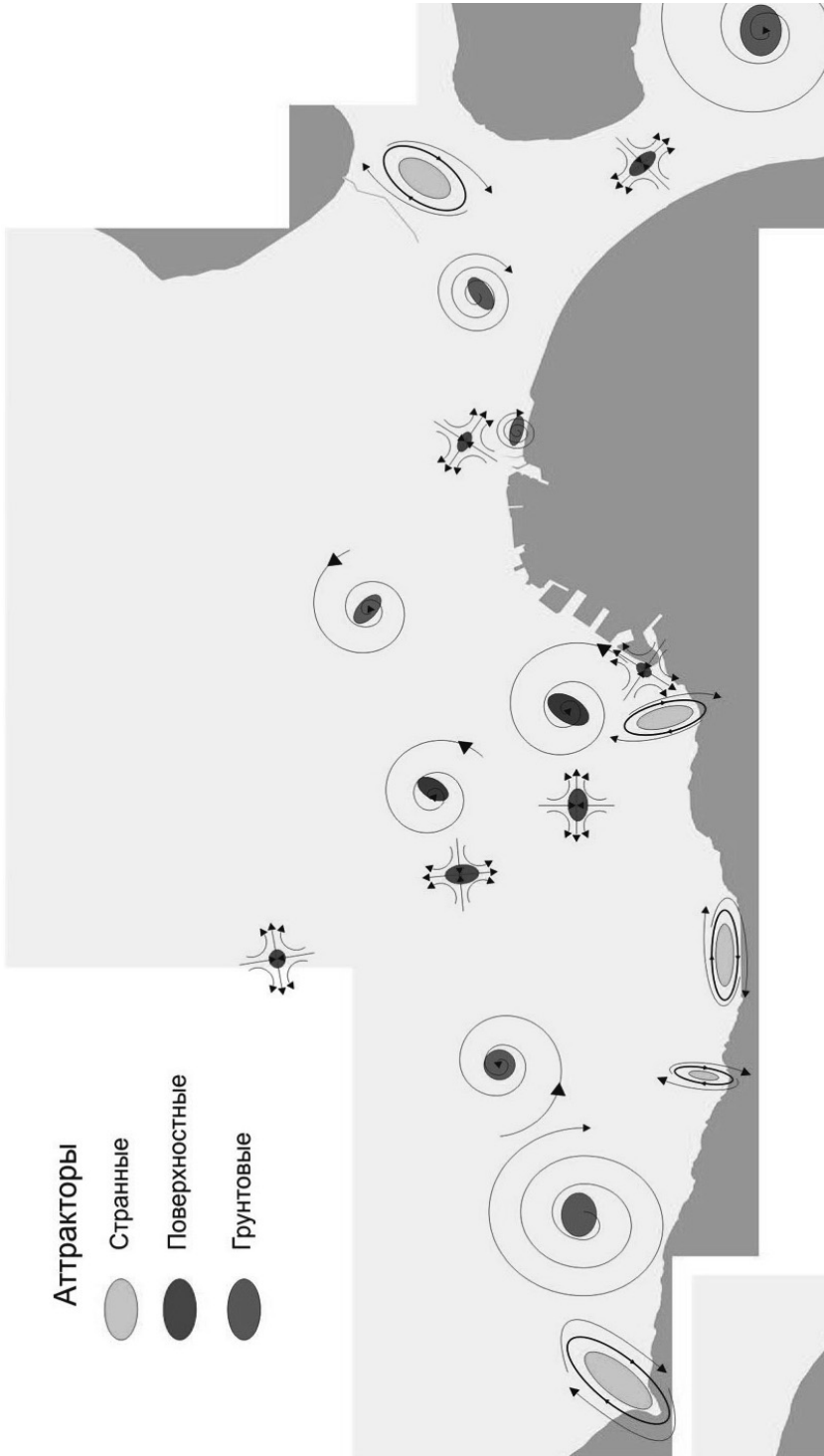


Рис. 3. Схема структуры агаторів в межах м. Одеси

Область “Жевахової гори” має дивний атрактор такого ж вигляду із-за її конфігурації і рози вітрів (рис. 3). Области Аеропорту, залізничного вокзалу і дороги відрізняються динамічністю і поверхневістю із-за незначного заглиблення. Тому тут можуть діяти нестійкі атрактори у вигляді сідла, коли одна з горизонтальних деформаційних складових є позитивною (рис. 3).

Таким чином, з мінімальним використанням представленої математичної моделі (на якісному рівні) отримана досить якісна картина стану геологічного середовища виділеного регіону. З цієї картини видно, що найбільш небезпечними з погляду втрати стійкості є прибережна зона у вигляді різних виступаючих частин берегової лінії і “Жевахова гора”, а також райони Аеропорту, залізничного вокзалу і дороги. Саме у цих районах навіть при невеликому по потужності землетрусі можливі найбільші переміщення і навіть руйнування (рис. 2). Серед житлових масивів найбезпечнішим є район “Черьомушок” як найбільш віддалений від узбережжя. Як можна побачити на рисунку 3 найбільш небезпечним напрямом зовнішньої дії є східно-західне.

Повне використання розробленої математичної моделі і відповідно вирішення системи з трьох диференціальних рівнянь дозволить не тільки деталізувати представлену картину, але і віртуально розглянути динаміку стану геологічного середовища виділеного регіону при зміні таких параметрів, що управляють, як зміна в'язкості порід і ґрунтів, створення нових інженерних споруд, особливо, в прибережній зоні, а також землетруси в найближчих регіонах. А це у свою чергу дає можливість уточнити місця розташування спеціальних діагностичних приладів, наприклад, пристроїв з використанням живих організмів (наприклад, риб), які розроблені нами раніше. Останнє засноване на тому, що атрактор є не тільки концентратором, але і випромінювачем енергії у вигляді хвилі, характеристики якої визначаються властивостями середовища і видом атрактора.

### Метод “русел” та “джокерів”

Задачі з області сейсмології, як відомо, не задовольняють таким обмеженням щодо розмірності. Але відомо, що задачі більшої розмірності можна вирішувати, використовуючи факт неоднорідності фазового простору динамічних систем, що досить часто спостерігається: стан системи в визначених областях фазового простору можна з прийнятною точністю охарактеризувати невеликою кількістю змінних, що описують проекцію малої розмірності. Інші змінні при цьому можуть бути підпорядковані змінним проекції (що називаються *параметрами порядку*), або вони не є важливими з точки зору описання системи в рамках задачі. Проекція малої розмірності може мати місце як на всьому фазовому просторі і в широкому класі задач, так і в окремих областях фазового простору. В цих більш складних випадках проекції малої розмірності можуть бути використані в обмежених областях фазового простору, причому в різних областях проекції можуть бути різними. Такі області називають *русами* [7,8]. Области, в котрих неможливо построи проекції малої розмірності, називають

областями *джокера*, або *джокерами*. Поведінка системи, що знаходиться в області джокера, вирізняється складністю, непередбачуваністю та різноманіттям, внаслідок чого доводиться використовувати ймовірнісні методи або й прості наближені правила, що вводяться емпірично або виходячи з простих міркувань.

Тож *джокер* являє собою правило, або ж алгоритм, що визначає поведінку об'єкту на деякій підмножині фазового простору (області джокера), на котрій різко зростає неозначеність в поведінці об'єкта. При попаданні зображуючої точки в область джокера, відбувається його спрацювання — вступає в дію відповідне правило (алгоритм).

В залежності від особливостей задачі, що потребує вирішення, джокери можуть бути різними. Наприклад, в [7] описані наступні типи джокерів, якими можна керуватися і при моделюванні сейсмічного процесу.

*Джокер першого роду* миттєво переводить систему в означену точку фазового простору. Типовий випадок спрацювання такого джокера — швидке руйнування системи (деталі самого процесу не моделюються).

*Джокер другого роду* при спрацюванні з вірогідністю  $p_1$  переводить систему в декотру точку фазового простору А, а з вірогідністю  $p_2$  — в точку В.

*Джокер третього роду* переводить систему в точку декотрої області фазового простору відповідно до заданого закону розподілу вірогідності. Цей джокер можна розглядати як узагальнення джокерів першого та другого роду.

Таким чином, опис системи за допомогою русел та джокерів являє собою свого роду компроміс між динамічними та статистичними методами, наслідуючи, по можливості, точність перших та простоту других. С іншого боку, розглядання об'єкту в термінах русел та джокерів можна розглядати як своєрідне використання техніки асимптотичного аналізу. А саме асимптотичні методи виявляються апаратом для синергетики та інших міждисциплінарних підходів [11].

У тих випадках, коли вдається знайти підходяще русло, можна строїти досить прості моделі. У цих випадках вдається достатньо просто описувати складні системи за допомогою *параметрів порядку* — найбільш важливих параметрів, що характеризують русла. Таким чином, для зменшення кількості змінних у розрахунковій моделі потрібно використовувати методи, що допомогли б звести деякі параметри.

Саме таким методом може стати виділення сейсмічно однорідних мікрорайонів на базі класифікації і районування по 3-х і більше основних параметрах геологічного середовища, що впливають на приріст сейсмічної бальності [11]. На основі розрахунків, що проводились з урахуванням 3-х основних параметрів: рівня ґрунтових вод, потужності четвертинних і крутизни земної поверхні було виділено для території м. Одеси 4 райони і 26 типів підрайонів однорідних за класами своїх параметрів, що склало біля 50-70 сейсмічних мікрорайонів [11]. На 39% території м. Одеси приріст сейсмічної бальності перевищує 1 бал, а на 11% території сейсмічний бал може бути знижений до 0. 5 (рис. 4А). Початковий бал збережеться на 25% території.

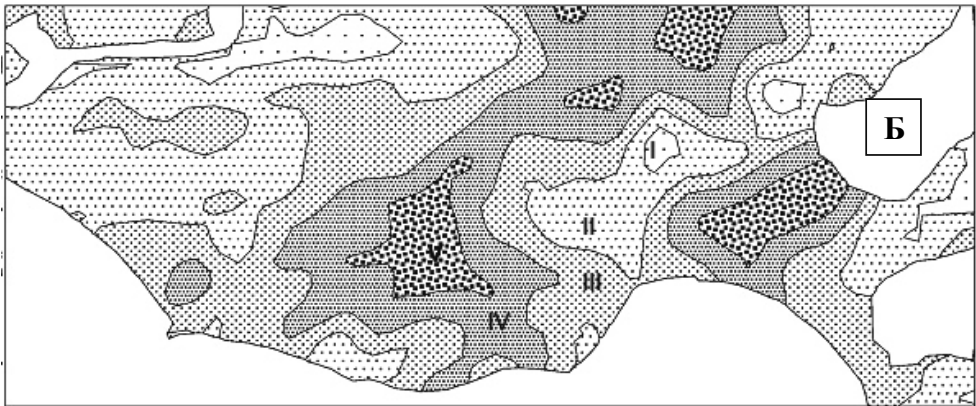
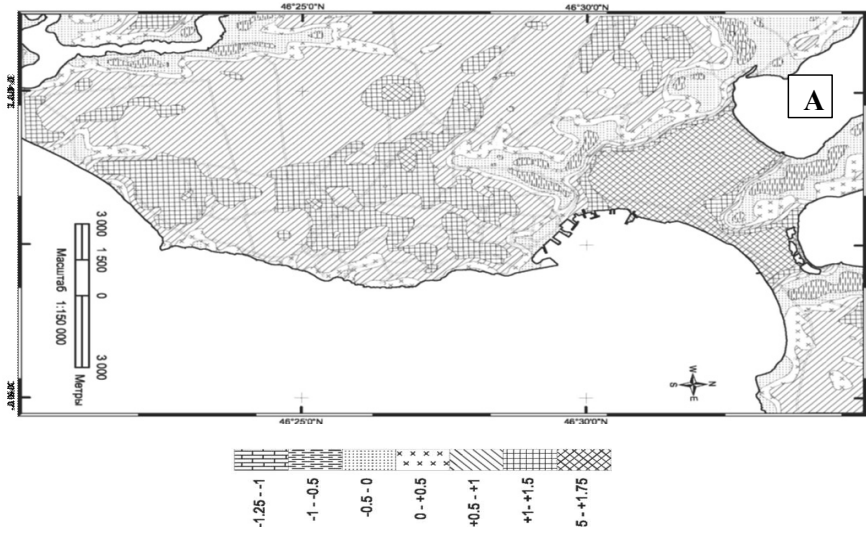


Схема розташування русел та дюкерів відповідно до приросту сейсмічної бальності

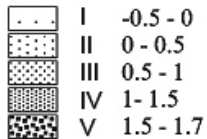


Рис. 4. Карта-схема природнення сейсмічної бальності по центральній частині м. Одеси (А), побудована на підставі інженерно-геологічного типологічного районування, та карта-схема моделювання можливих наслідків сейсмічних явищ (Б).

При використанні такого районування стає можливим введення у модель русел в однорідних за класами своїх параметрів районах і застосування математичного апарату синергетики та його використання для моделювання сценарію поведінки об'єктів у залежності від сейсмічних впливів. В нашому випадку в сейсмічно однорідних районах весь фазовий простір являє собою відповідні русла. Кожному з мікрорайонів відповідають русла з власними параметрами порядку, що можуть бути розраховані виходячи з аналізу відповідних даних [2]. Щоб отримати параметри порядку, необхідно провести реконструювання атракторів для різних сейсмічно однорідних мікрорайонів на основі відповідних сейсмограм. Наразі можна передбачати, що для мікрорайонів з меншим приростом сейсмічної бальності кількість параметрів порядку може бути меншою, ніж для мікрорайонів з максимальним приростом. За цими параметрами в подальшому матимемо усереднену картину поведінки земної поверхні в сейсмічних процесах. На границях між областями слід передбачати джокери відповідного роду, виходячи виключно з якісного аналізу. Так, на границях між областями I-II, II-III, III-IV, слід очікувати розвитку сценарію, що відповідає джокеру I-го роду, тобто усередненої картини між областями I-II, II-III, III-IV; між областями IV-V — другого роду, оскільки ми маємо значний приріст сейсмічної бальності, що може сприяти значному впливу імовірнісних процесів; між областями II, III, IV та водним середовищем — третього роду, як у найменш досліджених, або найбільш непередбачуваних областях. Також джокерами третього роду можуть бути замінені області складної поведінки, наприклад область V, якщо при подальшому аналізі буде виявлено вплив скритих або підпорядкованих змінних.

Таким чином, використання синергетичного підходу із знаходженням русел та джокерів дозволить об'єднати переваги, що їх надають теорія динамічних систем та практичні методи сейсмічного районування, детального сейсмічного районування та сейсмічного мікрорайонування, для проведення моделювання ступеню локальної сейсмічної небезпеки за умови часткової інструментальної сейсмологічної інформації по Одеському регіону.

## **Висновки**

Комплекс проведених досліджень, що включає аналіз літератури, теоретичні та математичні розрахунки й експериментальні дослідження показує можливість створення комплексної системи моніторингу сейсмічних процесів, що поєднає синергетичний метод прогнозування тектонічних процесів з інженерно-геологічною оцінкою ступеня сейсмічної небезпеки територій. Визначення ступеню сейсмічної небезпеки територій фізико-математичними та інженерно-геологічними методами об'єднаними в єдиний геосинергетичний комплекс актуально і вельми перспективно.

Створення універсальної методики моніторингу динамічних процесів для вирішення завдань короткострокового прогнозу катастрофічних землетрусів базується на тому, що будь-який тектонічний процес є процесом самоорганізаційним і ґрунтується на використанні черги положень теорії

змін, теорії катастроф та синергетики, які саме і описують самоорганізаційні процеси.

Побудовано цифрової картографічні моделі рельєфу земної поверхні на підставі використання методик цифрового моделювання за наступними чинниками потоку, можливих напрямків руху поверхневих потоків і їхньої інтенсивності геоморфологічних і морфометричних характеристик: крутості рельєфу, глибини розчленовування рельєфу, густоти розчленовування рельєфу, експозиції схилів, градієнтів зміни висоти, сумарної водозбірної площі можливого поверхневого й ін.

Використання синергетичного підходу із знаходженням русел та джокерів дозволило об'єднати переваги, що їх надають теорія динамічних систем та практичні методи сейсмічного районування, детального сейсмічного районування та сейсмічного мікрорайонування, для проведення моделювання ступеню локальної сейсмічної небезпеки за умови часткової інструментальної сейсмологічної інформації по Одеському регіону.

## Література

1. Андрианов И. В., Баранцев Р. Г., Маневич Л. И. Асимптотическая математика и синергетика: путь к целостной простоте. М.: УРСС, 2004
2. Захаров В. С. Поиск детерминизма в наблюдаемых геолого-географических данных: анализ корреляционной размерности временных рядов. Современные процессы геологии. Сборник научных трудов. М., Научный мир, 2002, с. 184-187.
3. Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. Синергетика и прогнозы будущего. М.: Наука, 1997, 288с.
4. Кейлис-Борок В. И. Динамика литосферы и прогноз землетрясений // Природа, 1989, № 12, С. 10-18.
5. Є. Г. Коніков, М. К. Кременчуцька. Синергетична модель геологічного середовища / Зб. пр. міжнар. наук. — практ. конф. — “Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития ‘2006’” — Одеса: Одеський національний морський університет, 2006. — С. 68-70.
6. Лебедєва Т. М., Кременчуцька М. К. Синергетичне моделювання сейсмічних процесів. // Зб. пр. міжнар. наук. — практ. конф. “Современные направления теоретических и прикладных исследований.” — Одеса: ОНМУ, 2008.
7. Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б. Джокеры, русла или поиски третьей парадигмы. “Знание — Сила”, № 3/1998.
8. Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б. Современные проблемы нелинейной динамики. М.: УРСС, 1999.
9. Сидорин А. Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 192 с.
10. Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 313 с.
11. Фесенко О. В. Сейсмічні умови Одеського регіону, інженерно-геологічні та геолого-геоморфологічні основи сейсмічного мікрорайонування м. Одеси. // Вісник Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова. — Одеса: Астропрінт, 2001. — т. 6. — вип. 9. — С. 132-138.
12. Фракталы в физике — Под. ред. Л. Пьетронеро и Э. Тозатти, М.: Мир, 1988.
13. Шустер Г. Детерминированный хаос. М.: Мир, 1988.

<sup>1</sup>Т. М. Лебедева, <sup>2</sup>М. К. Кременчуцкая, <sup>3</sup>Е. Г. Кони́ков,  
<sup>4</sup>В. В. Овчаренко, <sup>5</sup>А. Я. Шатагина, <sup>6</sup>А. В. Фесенко

Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова, Проблемная научно-исследовательская лаборатория инженерной геологии побережья моря, водохранилищ и горных склонов (ПНИЛ-1), кафедра инженерной геологии и гидрогеологии, Шампанский пер., 2, Одесса, 65058, Украина

## **ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРЕДСКАЗАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕОРИИ И МЕТОДОЛОГИ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ**

### **Резюме**

Обсуждается использование метода локального уменьшения размерности задачи нелинейной динамики — метода русел и джокеров — для описания сейсмических процессов. Рассматривается возможность связать комбинацию динамических и статистических методов с методом сейсмического микрорайонирования. Предложенные методы представляют собой дальнейшее развитие техники исследования геофизических систем путём комбинации динамических, статистических методов и практических методов сейсмического микрорайонирования.

**Ключевые слова:** землетрясения, сейсмическое микрорайонирование, синергетика, аттрактор, моделирование

<sup>1</sup>T. M. Lebedeva, <sup>2</sup>M. K. Kremenchutskaia, <sup>3</sup>E. G. Konikov,  
<sup>4</sup>V. V. Ovcharenko, <sup>5</sup>A. Ya. Shatagina, <sup>6</sup>A. V. Fesenko

<sup>1-5</sup> Odessa National University, Problem Research Laboratory # 1, department of Engineering Geology and Hydrogeology, Shampansky Str., 2 Odessa, 65058, Ukraine,  
<sup>6</sup> Department of Engineering Geology and Hydrogeology, Shampansky Str., 2 Odessa, 65058, Ukraine

## **SUBSTANTIATION OF THE PREDICTION TECHNIQUE OF THE SEISMIC PHENOMENA ON THE BASIS OF THE THEORY AND METHODS OF NONLINEAR DYNAMICS**

### **Summary**

The use possibility of the channels and jokers method, the one for local reduction of a nonlinear problem rank, is discussed. An opportunity of connection the combination of dynamic and statistical methods with a seismic microzonation method is considered. The offered methods are further development of research technique of the geophysical systems by combination of dynamic, statistical methods and practical methods of the seismic microzonation.

**Keywords:** earthquake, seismic microzonation, sinenegetic, attractor, simulation