

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертацію **Микуляка Сергія Васильовича**
«ЗАКОНОМІРНОСТІ ДИНАМІКИ СТРУКТУРОВАНИХ
ГЕОСЕРЕДОВИЩ: ТЕОРІЯ, МОДЕЛІ, ЕКСПЕРИМЕНТ»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-
математичних наук
за спеціальністю 04.00.22 – геофізика.

Дослідженню динамічних процесів у складних системах останнім часом приділяється багато уваги у зв'язку з розвитком нових математичних методів для вирішення задач динаміки таких систем. У дисертаційній роботі Микуляка С.В. природні геосередовища розглядаються як складні дискретні системи. Автор робить акцент на дискретності та ієрархічності природних геосередовищ, а також на тому, що вони є нелінійними та відкритими у термодинамічному сенсі. Цей підхід дає можливість будувати нові моделі, та досліджувати їх, звертаючи увагу на процеси самоорганізації, які характерні для таких відкритих систем. Саме цей підхід дав можливість автору побудувати модель сейсмічних процесів, в якій враховується дискретність і ієрархічність геосередовища та можливість перебувати у стані самоорганізованої критичності. Системний підхід дає можливість більш чіткого розуміння процесів, що відбувається в складних системах та можливість впливати на такі процеси.

Підхід до опису явищ з точки зору поведінки складної системи проникнула майже в усі сфери людської діяльності, включаючи медицину, фінанси, соціальну сферу, тощо. У силу цього актуальність теми дисертації Микуляка С.В., присвяченої динаміці структурованих геосередовищ, не викликає сумніву.

Наукова новизна. Автором отримано такі нові результати:

- Вперше досліджено особливості поширення нелінійних збурень у двовимірному дискретному масиві, утвореному зі сферичних дискретних елементів, в залежності від упаковки.
- Вперше виявлено та досліджено вихрові хвильові структури в процесі поширення хвилі стиснення в шарі дисперсного гранульованого середовища, розташованого в полі сили тяжіння.
- Розроблено нову оригінальну експериментальну методику вимірювання сили, що діє на окремі гранули на дні гранульованого зразка. В результаті експериментальних досліджень та числового моделювання встановлено, що розподіл максимальних значень сил, з якими гранули діють на дно циліндра в гранульованому середовищі, утвореному сферичними гранулами, при імпульсному навантаженні мають експоненційно згасаючий характер в діапазоні великих сил.
- Запропоновано нову модель ієрархічного дискретного середовища як системи вкладених ангармонічних осциляторів. На основі якісного дослідження з'ясовано, що модель з трьома ієрархічними рівнями має періодичні, квазіперіодичні та хаотичні розв'язки. Проаналізовано перерозподіл енергії між ієрархічними рівнями.
- Розроблено нову модель землетрусів, яка базується на тому, що сейсмоактивні області мають складну ієрархічну структуру та знаходяться в стані самоорганізованої критичності. Модель відтворює основні емпіричні властивості сейсмічних процесів.

- Розроблено методику експериментальних досліджень зсувного деформування гранульованого середовища, сформованого з гранул кубічної форми, в тому числі при дії на середовище зовнішніх періодичних та неперіодичних збурень. Проведено експериментальні дослідження цього процесу та з'ясовано його подібність до сейсмічних процесів та можливість впливати на нього.
- Обґрунтовано в рамках числового моделювання, що розподіл енергії акустичних збурень, які генерує гранульоване середовище з кубічними елементами при його зсувному деформуванні, близький до розподілу Гутенберга-Ріхтера, а афтершоки затухають за законом Оморі. Так само встановлено статистичну подібність поля швидкостей елементів у такому модельному середовищі з полем швидкостей руху земної поверхні у сейсмоактивному регіоні в Каліфорнії.

Практичне значення отриманих результатів.

Дослідження процесів перерозподілу енергії в ієрархічних системах важливі для побудови сейсдобезпечних промислових та цивільних об'єктів. Подібність процесів зсувного деформування гранульованого середовища та природних сейсмічних процесів відкриває перспективи для визначення умов виникнення великих землетрусів, а також можливість впливати на сейсмічний процес з метою релаксації напружень у сейсмоактивній зоні щоб уникнути руйнівних землетрусів.

Розроблені комп'ютерні коди для опису динаміки дискретних середовищ можуть бути використані для моделювання динаміки різноманітних складних структурованих природних та штучних об'єктів.

Повнота викладу в опублікованих працях положень, висновків, рекомендацій.

Основні положення і висновки дисертації повно і своєчасно опубліковано в журналах, які входять до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з фізико-математичних наук, або іноземних видань. За темою дисертації автором опубліковано 36 наукових праць: статей – 23 (6 входять до міжнародної наукометричної бази Scopus), з них 5 – без співавторів, 1 – матеріал міжнародної конференції (входить до міжнародної наукометричної бази Scopus), 12 тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, 1 – монографія. Високий рівень досліджень та їх достовірність підтверджується публікаціями автора у провідних міжнародних наукових журналах (Phys. Rev. E, Eur. Phys. J. B, Intern. J. Non-Linear Mech.).

Загальна характеристика структури та змісту роботи. Дисертація складається із вступу, шести розділів та списку літератури, який включає 406 посилань. У вступі обґрунтована актуальність теми й розкрита новизна отриманих результатів, а також їх можливе практичне застосування.

У **першому** розділі викладено огляд літератури щодо сучасного стану моделювання геосередовищ з точки зору динаміки складних систем, моделей дискретних та ієрархічних середовищ та методів розв'язку задач, пов'язаних з динамікою таких середовищ.

У **другому** розділі чисельно моделюються процеси поширення нелінійних хвиль у двовимірних та тривимірних гранульованих масивах. Досліджується вплив упаковки на характер хвильових процесів. Також вивчаються процеси самоорганізації у гранульованих середовищах такі, як формування двоікокових структур у середовищі, утвореному регулярно упакованими сферичними елементами та вихрові хвильові структури у шарі дисперсного масиву куль в полі сили тяжіння.

Третій розділ присвячений вивченню деформаційних властивостей дискретних середовищ. Проведено велику кількість комп'ютерних розрахунків двовимірних процесів

динамічного деформування гранульованих середовищ, утворених зі сферичних дискретних елементів однакового розміру та сферичних елементів трьох розмірів. Розглядалися різні види взаємодії елементів: пружна, пружнов'язка та пружно-пластична. У розрахунках продемонстровано, що у всіх випадках діаграми деформування є нелінійними, мають гістерезисний характер та залежать від швидкості деформування та щільності упаковки, тобто всі ті властивості, які характерні для природних геоматеріалів.

Розроблена нова унікальна методика для дослідження такої мікрохарактеристики гранульованого середовища як сила, що діє на окремі структурні елементи на дні гранульованого зразка при імпульсному навантаженні. В проведених за даною методикою експериментах отримано розподіл максимальних сил. З'ясовано, що в діапазоні великих сил функція розподілу затухає за експонентою. Крім того, комп'ютерне моделювання продемонструвало, що експоненційний розподіл великих сил має місце по всьому зразку і таким чином підтверджується наявність кореляцій сил взаємодії структурних елементів у процесі його динамічного навантаження. Отримані в розрахунках часові залежності координатного числа, параметра орієнтаційного порядку, радіусу кореляції та розподілу сил переконливо демонструють нерівноважний характер процесу деформування в гранульованому середовищі при імпульсному навантаженні.

У **четвертому** розділі представлено моделі ієрархічно структурованих середовищ. Зокрема, розроблена модель ієрархічно вкладених ангармонічних осциляторів. Отримано систему нелінійних рівнянь та проведено їх якісний аналіз для випадку трьохрівневої ієрархії і при умові, що осцилятори на одному рівні мають однакові властивості та рухаються синхронно.

Проведено також дослідження коливних процесів у багаторівневій системі. Встановлено, що модель з трьома ієрархічними рівнями має періодичні, квазіперіодичні та хаотичні розв'язки. Для багаторівневої системи встановлено, що існує критичне значення структурного параметра, яке відповідає формуванню співмірних коливань на першому та останньому ієрархічних рівнях.

В тривірневої моделі вивчався вплив дисипації на формування коливних процесів, коли найвищий структурний рівень зазнає дії гармонічної сили. Було вдосконалено метод особливих точок, результати якого були перевірені за допомогою методу Гальоркіна та числовим інтегруванням. У результаті досліджень отримано амплітудно-частотні криві, які характеризують резонансні та нелінійні явища у системі. Виявлено зміщення резонансних частот в залежності від міри нелінійності. Також спостерігаються деформації скелетних кривих при зміні міри нелінійності та гістерезисні явища.

На основі клітинних автоматів розроблено модель землетрусів, в якій сейсмоактивна область розглядається як складна відкрита ієрархічно структурована система. У моделі керуючими є всього три параметри. Вона добре відтворює основні емпіричні скейлінгові властивості сейсмічних процесів.

У **п'ятому** розділі наведено експериментальні дослідження динаміки модельного середовища, утвореного гранульованим масивом у вигляді кубів. Детально описано експериментальний стенд та методику проведення експериментів. Отримані в експериментах записи акустичних збурень, які випромінює гранульоване середовище в процесі зсувного деформування, дало можливість побудувати розподіли кількості збурень від енергії (закон Гутенберга-Ріхтера). З'ясовано, що показник степеня знаходиться в межах, характерних для землетрусів. Для великих акустичних збурень спостерігаються форшоки та афтершоки.

Також наведено результати експериментів з опромінювання гранульованого середовища періодичними хвилями з різними частотами в процесі його деформування. Ці експерименти показали, що слабкі збурення впливають на даний процес та існує виділена частота, при якій має місце максимальний ефект. За допомогою дії імпульсних збурень на гранульоване середовище досягалось деформування середовища за менших напружень, тобто процес деформування ставав більш гладким, що є важливим для можливості впливу на процеси деформування складних систем, зокрема на сейсмоактивні області.

Шостий розділ присвячений числовому моделюванню зсувного деформування гранульованого масиву, утвореного гранулами кубічної форми. Для моделювання динаміки гранульованого середовища розроблено комп'ютерний код на основі методу дискретних елементів. Даний метод має на увазі, що розв'язується система рівнянь, яка описує динаміку кожного структурного елемента. Для опису обертальної кінематики структурних елементів автор використовує кінетичне рівняння для кватерніонів.

Розв'язувалась задача про зсув масиву із 3000 кубічних елементів. В результаті проведених розрахунків автором встановлено:

- Залежності видів енергії масиву від часу мають стохастичний характер, а їхні спектри є степеневими функціями, що свідчить про відсутність виділених частот і про масштабну інваріантність процесу. Такі властивості гранульованого середовища є притаманним для систем, які перебувають у критичному стані.
- Методом детрендового флуктуаційного аналізу досліджено кореляційні властивості сил, з якими гранульоване середовище діє на верхню частину смісті в напрямку зсуву. Аналіз показав, що у даному часовому ряді мають місце далекодіючі кореляції.
- Для стрибків кінетичної енергії поршня, побудовано розподіли енергії та часову залежність кількості збурень до та після великих збурень. Розподіли енергій збурень мають степеневий характер з показником степені близьким до показника степені у законі Гутенберга-Ріхтера для землетрусів. З'ясовано, що існування форшоків та афтершоків залежить від швидкості деформування та розмірів гранул.

У **прикінцевій частині** дисертації сформульовано висновки та стисло наведено основні результати досліджень.

Зауваження та дискусійні положення дисертаційного дослідження. У цілому, дисертація Микуляка С.В. є актуальною і завершеною науково-дослідницькою роботою, що містить теоретичні та експериментальні дослідження динаміки структурованих геосередовищ на основі дискретних та ієрархічних моделей. Роботу добре оформлено, зміст дисертації викладено чітко, гарною науковою мовою. Разом з тим є деякі зауваження.

1. В роботі не дуже детально викладено алгоритми для числових розрахунків динаміки гранульованих середовищ, не описано як вони тестувались та відсутнє дослідження їх стійкості. Також доцільно б було навести в додатках хоча б скорочений опис алгоритма Верле, що застосовувався.
2. Рис. 2.21 не описано в тексті (с. 84)
3. Не зовсім ясний опис Рис. 4.1 (с.160)
4. Не зовсім якісна фраза «істотна хаотизация перетину Пуанкаре» (с. 172). Взагалі, треба дещо обережніше вживати слово «хаотичний»
5. У розділі 4 (стор. 177) замість «метою статті є...» повинно бути «метою підрозділу є...». На стор.207 у висновках до 4 розділу вказано, що «В результаті цих досліджень

- з'ясовано, що ісрархічні системи виявляють квазіперіодичні та хаотичні режими, розвиток яких залежить від параметра φ », але згідно досліджень у підрозділі 4.2.2 ці режими залежать і від показника β
6. У розділі 5 (стор. 219) константа C (5.2) повинна бути додатньою.
 7. У розділі 6 (стор.227) замість виразу «довгохвильових кореляцій» повинно бути «далекодіючих кореляцій».
 8. Іноді зустрічаються нестандартні терміни та описки. Зокрема, використовуються слова «зворотній», «рішення», «кількість» замість «зворотний», «розв'язок», «число», але, в цілому, оформлення тексту дисертації є коректним та відповідає вимогам МОН.

Зазначені зауваження не знижують високої оцінки результатів, що їх отримано в дисертаційній роботі Микуляка С.В.

Автореферат повністю відображає основний зміст виконаних досліджень і отриманих результатів дисертаційної роботи та є оформленим згідно з вимогами ДАК МОН України.

До результатів докторської дисертації не включено наукові положення і дослідження, за якими було захищено кандидатську дисертацію.

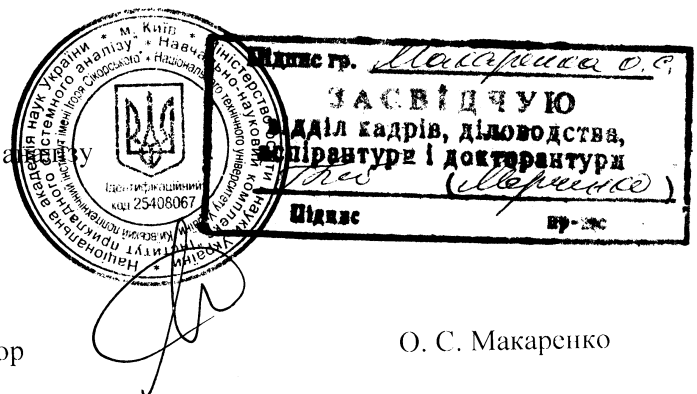
Висновок щодо відповідності дисертації вимогам ДАК України

З представлених матеріалів можна констатувати, що дисертаційна робота Микуляка С.В. «Закономірності динаміки структурованих геосередовищ: теорія, моделі, експеримент», є закінченою науково-дослідною роботою, в якій досліджено динамічні процеси у структурованих геосередовищах.

В той же час робота є перспективною з точки зору подальших досліджень та прикладних застосувань. Так, її результати можуть допомагати при розробці нових технологій обробки та роздрібнення порід та оптимізації існуючих технологій. Також можуть бути запропоновані пропозиції з методик розгрузки порід в зонах землетрусів. Деякі методи з дослідження блокових середовищ можуть бути перенесені на дослідження інших ісрархічних систем, наприклад мозку.

Дисертаційна робота Микуляка С.В. за актуальністю, обсягом проведених досліджень, кількістю публікацій та новизною отриманих результатів відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р., а також вимогам наказу №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та інших нормативних актів МОН України, а її автор Микуляк Сергій Васильович, безумовно, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 04.00.22 - геофізика.

Офіційний опонент,
завідувач відділу прикладного нелінійного аналізу
Інституту прикладного системного аналізу
Національного технічного університету
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
доктор фізико-математичних наук, професор



О. С. Макаренко