

ВІДГУК

офіційного опонента доктора фізико-математичних наук, професора
Тяпкіна Юрія Костянтиновича на дисертацію Микуляка Сергія Васильовича
“Закономірності динаміки структурованих геосередовищ:
теорія, моделі, експеримент”, подану на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук за спеціальністю
04.00.22 – геофізика (103 – науки про Землю)

1. Актуальність обраної теми дисертаційного дослідження та зв'язок із планами та напрямками науково-дослідних робіт наукових установ, організацій, державними і галузевими науковими програмами.

Ідею розглядати геосередовище як складну структуровану ієрархічну відкриту систему запропонували Садовський М.А. з колегами ще у 80-х роках минулого століття. Проте створити універсальну математичну модель, яка би описувала динаміку таких систем на цей час не вдалося. Даний підхід особливо є важливим для опису динаміки тих геосередовищ, де структурованість відіграє суттєву роль. Це, насамперед, стосується середовищ у сейсмоактивних зонах, де має місце значна порушувальність гірських порід. Він також є важливим для моделювання динамічних процесів у регіонах з яскраво вираженою фрагментацією гірських порід, у природніх сипучих масивах, в яких дискретність є визначальною в їх динамічній поведінці.

Дисертація Микуляка С.В. саме присвячена моделюванню динамічних процесів у структурованих геосередовищах, виходячи з принципів, закладених у роботах Садовського М.А. та його співавторів. У дисертації розроблено моделі, в яких геосередовище розглядається як ієрархічна система. Зокрема, запропонована модель сейсмічного процесу в ієрархічно структурованому середовищі, яке знаходиться в стані самоорганізованої критичності. Крім того, проведено дослідження закономірностей хвильових процесів у дискретних середовищах.

Актуальність обраної здобувачем теми зумовлено й тим, що матеріали дисертації є частиною науково-дослідних робіт, що виконуються за планами Відділення геодинаміки вибуху Інституту геофізики ім.С.І. Субботіна НАН України.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і наукова новизна.

Обґрунтованість та достовірність сформульованих у дисертації наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується коректним застосуванням широкого спектру методів досліджень та підтвердженням теоретичних положень результатами експериментів.

Кореляція результатів, отриманих у дисертації з використанням розроблених моделей, із результатами, які отримані за допомогою незалежних експериментальних спостережень, підтверджує їх достовірність.

Наукова новизна дисертаційної роботи Микуляка С.В. полягає у отриманні ним нових теоретичних і практичних результатів, що у сукупності вирішують поставлені завдання. При цьому автором вперше:

- Розроблено нову модель сейсмічних процесів, яка базується на двох фундаментальних принципах: ієрархічній структурі сейсмоактивних областей та концепції самоорганізованої критичності. Модель відтворює основні емпіричні властивості сейсмічних процесів.

- Запропоновано нову модель ієрархічного дискретного середовища як системи вкладених ангармонічних осциляторів. Показано, що модель з трьома ієрархічними рівнями має періодичні, квазіперіодичні та хаотичні розв'язки. Процес перерозподілу енергії між рівнями та інтенсивність збудження осциляторів на ієрархічному рівні визначаються структурними параметрами.
- Розроблено оригінальну експериментальну методику вимірювання сили, що діє на окремі гранули на дні гранульованого зразка. В експериментах та комп'ютерному моделюванні з'ясовано, що розподіл максимального значення сил, з якими гранули діють на дно циліндра в гранульованому середовищі, утвореному сферичними гранулами, при імпульсному навантаженні має експоненційно згасаючий характер в діапазоні великих сил, що свідчить про існування в системі далекодіючих кореляцій.
- 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. Установлено, що акустичні збурення, які випромінює таке гранульоване середовище в процесі зсувного деформування, підпорядковуються закону Гутенберга-Ріхтера та закону Оморі.
- 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.
- Вперше виявлено та досліджено вихрові хвильові структури в процесі поширення хвилі стиснення в шарі гранульованого середовища, яке розташоване в полі сили тяжіння.
- Вперше встановлено вплив на діаграми деформування дискретних середовищ виду взаємодії дискретних елементів: пружного, пружно-пластичного, пружнов'язкого, типу упаковки та розмірів дискретних елементів. Показано зв'язок внутрішньої структури з нелінійністю, гістерезисом, формою діаграм.

3. Значущість дослідження для науки і практики та шляхи його використання.

Розроблена модель землетрусів, яка добре описує їх емпіричні закономірності, дає можливість кращого розуміння сейсмічних процесів та умов виникнення великих землетрусів. 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. Ці моделі можуть бути корисними для дослідження інших критичних явищ, таких як зсуви ґрунтів, селів, сходження сніжних лавин, тощо

Розроблені комп'ютерні коди для моделювання динаміки гранульованих масивів можуть бути успішно використані для ряду практичних задач у гірничій справі, у будівництві, у інших галузях, де мають справу з гранульованими середовищами.

4. Оцінка змісту, стилю та мови дисертаційної роботи, її завершеності та оформлення.

Дисертаційна робота Микуляка С.В. в цілому є завершеною науковою працею. Робота складається зі вступу, шести розділів, висновків та списку використаних джерел, що включає

370 найменувань. Робота містить 299 сторінок машинописного тексту, 161 рисунок та 2 додатки.

У **вступі** автором обґрунтовано актуальність теми моделювання динамічних процесів у структурованих геосередовищах, викладено мету роботи, основні завдання та методи їх вирішення, викладено наукову новизну отриманих результатів, сформульовані основні наукові та практичні досягнення здобувача, а також подано інформацію щодо апробації одержаних результатів, публікацій, структури й обсягу роботи.

У **першому розділі** зроблено ґрунтовний огляд літератури за темою дисертації та відображено сучасний стан проблем, що розглядаються в роботі. Детально проаналізовано існуючі моделі, які описують дискретні середовища, а також моделі, що враховують дискретну ієрархічну будову геосередовищ. Представлено огляд літератури методів розв'язку задач динаміки дискретних середовищ.

У **другому розділі** викладено результати числового моделювання двовимірних та тривимірних процесів поширення нелінійних хвиль, що виникають у гранульованих середовищах під дією імпульсних навантажень. Досліджуються деякі явища самоорганізації, а саме: утворення двопікових структур у середовищі, утвореному регулярно упакованими сферичними елементами та вихрові хвильові структури у прошарку дисперсного масиву куль в полі сили тяжіння. Для моделювання цих процесів використовується метод дискретних елементів.

У **третьому розділі** досліджуються деформаційні властивості дискретних середовищ. За допомогою числового моделювання показано, що деформаційні властивості гранульованих середовищ з пружною, пружнов'язкою та пружно-пластичною міжгранульною взаємодіями при динамічному навантаженні залежать від швидкості деформування, щільності упаковки та розмірів гранул. Характерною особливістю діаграм деформування для всіх видів взаємодії структурних елементів є нелінійність та наявність гістерезису.

Також експериментально проведено дослідження з деформування монодисперсного та полідисперсного гранульованих середовищ. Показано, що в усіх випадках діаграми деформування мають гістерезисний характер, а залишкова деформація залежить від пропорцій кількості різних елементів. Розроблено експериментальну методику вимірювання сили, що діє на окремі гранули на дні гранульованого зразка. Виконано експериментальні та комп'ютерні дослідження розподілу сил в гранульованому середовищі, підданому імпульсному навантаженню. Отримані в розрахунках часові залежності координатного числа, параметра орієнтаційного порядку, радіуса кореляції та розподілу сил чітко демонструють нерівноважний характер процесу деформування в гранульованому середовищі при імпульсному навантаженні.

Четвертий розділ присвячений моделюванню динаміки ієрархічно структурованих середовищ. Запропонована модель ієрархічного блокового середовища як система вкладених ангармонічних осциляторів. Отримана динамічна система, яка описує динаміку ієрархічно пов'язаних структурних елементів. Проаналізовано систему рівнянь для моделі з трьома ієрархічними рівнями з ідентичними на кожному рівні осциляторами та умовою, що вони рухаються синхронно. Використовуючи якісний аналіз, виявлено локалізовані періодичні, квазіперіодичні та хаотичні траєкторії. Також проведено дослідження коливальних процесів у багаторівневій системі. Досліджується також реакція системи на періодичне зовнішнє

навантаження, коли частота цього навантаження близька до власних частот ієрархічної системи.

Автором розроблена нова модель землетрусів, яка враховує те, що середовище у сейсмоактивній зоні має дискретну ієрархічну будову та знаходиться в стані самоорганізованої критичності. Модель добре відтворює основні закономірності, виявлені для природних сейсмічних процесів.

У п'ятому розділі експериментально досліджується динаміка гранульованого середовища з гранулами у формі кубів. Отримані в експериментах записи акустичних збурень, які випромінює гранульоване середовище в процесі зсувного деформування, показали, що показник степені в розподілі збурень за енергією знаходиться в межах, які характерні для землетрусів, тобто виконується закон Гутенберга-Ріхтера. Для великих акустичних збурень спостерігаються форшоки і афтершоки. Афтершоки затухають за степеневим законом з показником близьким до 1, як у законі Оморі. Опромінювання гранульованого середовища періодичними хвилями з різними частотами в процесі його деформування продемонструвало, що існує частота, при якій спостерігається максимальний ефект впливу цих збурень на зсувний процес. Показано також, що, діючи певним чином імпульсними збуреннями на гранульоване середовище, можливо уникати великих напружень при його зсувному деформуванні.

У шостому розділі виконано числове моделювання зсувного деформування масиву в умовах, подібних до експериментальних. Для цього було розроблено алгоритм та комп'ютерний код для моделювання динаміки гранульованого середовища, утвореного гранулами кубічної форми. Для стрибків кінетичної енергії поршня побудовано розподіли енергії та часову залежність кількості збурень до та після великих збурень. З'ясовано що розподіли енергії збурень мають степеневий характер, а показник степеня близький до показника степеня у законі Гутенберга-Ріхтера для землетрусів. Наявні афтершоки затухають з показником степеня близьким до 1, тобто за законом Оморі.

Побудовані розподіли флуктуацій швидкостей гранул та обчислено кореляцію флуктуацій швидкостей. Виявлено подібність розподілів флуктуацій швидкостей у модельному середовищі та у сейсмоактивному регіоні в Каліфорнії, який включає в себе трансформний розлом Сан Андреас, а також подібність кореляційних функцій.

Дисертаційна робота Микуляка С.В. та її автореферат написані державною мовою з дотриманням стилю, притаманного науковим публікаціям, оформлені належним чином та проілюстровані графічним матеріалом.

5. Дискусійні положення, зауваження та пропозиції.

Поряд з вказаними перевагами дисертації можна зробити такі зауваження та звернути увагу на деякі дискусійні положення.

1. Автор показав, що в шарі гранульованого середовища, що знаходиться у полі сили тяжіння, утворюються хвильові структури, проте він не вивчив властивості цих структур, зокрема, не дослідив їх стійкість.
2. Для аналізу моделі вкладених осциляторів здобувач обмежився розглядом випадку двох близьких значень параметра $\phi=0,7$ та $\phi=0,9$. Важливо було б порівняти поведінку системи для випадків, коли ϕ суттєво відрізняються.
3. У четвертому розділі на с.159 не пояснено значення величин N_1 та N_2 . На рис.4.4 використовується неозначена величина E_0 .

4. У п'ятому розділі на рис.5.5 не розшифровано позначення 4. На рис.5.9 не співпадають надписи: на самому рисунку $P=90$ Н, а в підрисунковому підписі $P=120$ Н. На рис.5.15 по осі абсцис повинно бути ΔF замість Δf .

Проте наведені зауваження не зменшують наукової цінності дисертації Микуляка С.В.

6. Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях.

Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій Микуляка С.В. в опублікованих працях достатня з огляду на встановлені вимоги. Основні результати досліджень опубліковано в 36 наукових працях: 23 статтях (6 входять до міжнародної наукометричної бази Scopus), одному матеріалі міжнародної конференції (входить до міжнародної наукометричної бази Scopus), 12 тезах доповідей на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях та одній монографії.

7. Ідентичність змісту автореферату і основних положень дисертації.

Зміст автореферату ідентичний змісту основних положень дисертації.

8. Вимоги “Порядку присудження наукових ступенів” та нормативних актів МОН України.

Дисертаційна робота Микуляка С.В. за змістом, обсягом і стилем викладеного матеріалу та оформленням відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12, 13, 14 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами, які внесені згідно з Постановами КМУ №656 від 19.08.2015 р., №1159 від 30.12.2015 р. та № 567 від 27.07.2016 р.), а також вимогам наказу №40 від 12.01.2017 р. “Про затвердження вимог до оформлення дисертації” які висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук, інших нормативних актів МОН України та паспорту спеціальності 04.00.22 – геофізика (103 – науки про Землю).

9. Загальний висновок.

Дисертацію Микуляка Сергія Васильовича “Закономірності динаміки структурованих геосередовищ: теорія, моделі, експеримент” присвячено актуальній темі, основні наукові положення і висновки є обґрунтованими та достовірними й достатньо висвітлені у наукових публікаціях, а отримані результати сукупно свідчать про вирішення конкретного наукового завдання – створенню математичних моделей геосередовищ з урахуванням їх дискретності та ієрархічності та їх дослідженню.

Дисертація є завершеним самостійним науковим дослідженням, містить наукову новизну, має практичне значення, а її автор – Микуляк Сергій Васильович – заслугове присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика (103 – науки про Землю).

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук, професор,
науковий консультант ТОВ "ЮГ-Нафтогазгеологія"

Підпис Тяпкіна Ю.К. засвідчую:
Керівник ТОВ "ЮГ-Нафтогазгеологія"



Тяпкін Ю.К.

Лойко М.П.