

ВІДГУК

офіційного опонента доктора фізико-математичних наук, професора

Стародуба Юрія Петровича

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.

Актуальність теми дисертаційної роботи. Природні масиви гірських порід є суттєво неоднорідними середовищами, тому часто моделі, засновані на континуальному баченні моделей середовища, не мають успіху в описанні динамічних процесів у таких складних системах. У даний час розробляються нові підходи до опису природних геосередовищ, які враховують їх складну дискретну фізико-ієрархічну будову. При цьому динамічну поведінку геологічних середовищ моделюють як складну, дискретну, відкриту в термодинамічному сенсі систему. Такий підхід використовує автор дисертаційної роботи «Закономірності динаміки структурованих геосередовищ: теорія, моделі, експеримент» у моделюванні динамічних процесів у геосередовищах, акцентуючи увагу на їх дискретності, ієрархічності та нелінійності.

Зв'язок роботи з із науковими програмами, планами, темами і напрямками науково-дослідних робіт наукових установ, організацій, державними і галузевими науковими програмами. Дисертаційна робота виконана на базі Відділення геодинаміки вибуху Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України за наступними науковими темами:

- Дослідження закономірностей динаміки структурно-неоднорідних геосередовищ (2013 – 2017 рр., номер держреєстрації 0113U000006);
- Розробка наукових основ нерівноважної динаміки геосередовищ для створення новітніх технологій інтенсифікації видобутку корисних копалин (2014 – 2016 рр., номер держреєстрації 0113U007992);
- Дослідження закономірностей самоорганізації і утворення структур в нерівноважних геофізичних середовищах з метою розробки новітніх ефективних методів видобування корисних копалин (2017 – 2019 рр., номер держреєстрації 0117U000248);
- Дослідження закономірностей нелінійної нерівноважної геодинаміки для створення наукових основ розробки новітніх імпульсно-хвильових технологій підвищення видобутку вуглеводнів (2017 – 2019 рр., номер держреєстрації 0117U000249);
- Дослідження критичних явищ та інших проявів самоорганізації у структурованих геосередовищах з метою оцінки сейсмічних ризиків (2017 – 2019 рр., номер держреєстрації 0118U000044).

Мета і завдання дисертаційної роботи. Метою роботи є розробити і вивчити закономірності динаміки моделей неоднорідних геологічних середовищ з урахуванням їх складної дискретної та ієрархічної будови. Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідити закономірності поширення хвиль у дискретних середовищах з нелінійною взаємодією дискретних елементів та виявити явища їх самоорганізації;

- вивчити вплив процесів взаємодії між структурними елементами, розмірів та форми на деформаційні властивості структурованих середовищ;
- теоретично та експериментально проаналізувати вплив параметрів дискретного середовища на динамічні процеси деформування;
- розробити математичну модель динаміки ієрархічно-дискретного середовища та теоретично дослідити властивості динаміки у відгуку ієрархічного середовища на зовнішні впливи, особливості обміну енергії між різними ієрархічними рівнями, існування різних типів розв’язків опису моделі;
- розробити модель опису сейсмічних процесів у сейсмоактивній зоні, дослідити властивості моделі щодо відтворення емпіричних закономірностей, існуючих для реальних сейсмічних процесів;
- теоретично та експериментально з’ясувати подібність зсувного деформування моделі гранульованого середовища та процесів, що мають місце в сейсмоактивних зонах щодо вивчення впливу на природні сейсмічні процеси.

Об’єктом та предметом дослідження є структуроване геологічне середовище та динамічні процеси в ньому.

Методи дослідження. Для досягнення мети використовувались наступні методи: метод якісного аналізу для моделі ієрархічних осциляторів, метод особливих точок для трирівневої ієрархічної системи ангармонічних осциляторів, метод Гальоркіна для перевірки достовірності результатів методу особливих точок, метод клітинних автоматів для побудови блоково-ієрархічної моделі землетрусів, методи математичної статистики для обробки теоретичних та експериментальних результатів, експериментальний метод з калібруванням вимірювальних пристроїв для вивчення динаміки дискретних середовищ.

Обґрунтованість та достовірність сформульованих у дисертації наукових положень.

Достовірність результатів, отриманих числовими методами забезпечувалася тестуванням програм, порівнянням отриманих розв’язків систем нелінійних диференційних рівнянь з використанням декількох відмінних числових методів, підтверджується високим рівнем кореляції модельних розрахунків із результатами, які одержані за допомогою незалежних експериментальних спостережень та тестуванням створених програмних засобів з використанням пакетів Wolfram Mathematica та Fortran PowerStation.

Достовірність та обґрунтованість наукових положень і висновків забезпечується чіткою постановкою задач, коректним застосуванням широкого обсягу досліджень, дотриманням початкових та граничних умов, строгим виконанням математичних перетворень при отриманні системи рівнянь для моделі ієрархічно вкладених осциляторів.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в тому, що запропоновано ряд нових моделей структурованих геосередовищ, що враховують дискретність та ієрархічність, на основі яких отримано нові результати динаміки геологічних середовищ.

У дисертації чітко сформульовано положення, що визначають наукову новизну отриманих результатів. Найбільше значення для геофізичної науки мають наступні положення:

- 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 проведених експериментальних досліджень та числового моделювання отримано розподіл

максимальних значень сил, з якими гранули діють на дно циліндра при імпульсному навантаженні.

- Запропоновано нову модель ієрархічного дискретного середовища, яка являє собою систему вкладених ангармонічних осциляторів. На основі дослідження з'ясовано, що модель з трьома ієрархічними рівнями має періодичні, квазіперіодичні та хаотичні розв'язки. Розглянуто періодичні режими, що виникають у трирівневій ієрархічній моделі з дисипацією, в якій найвищий структурний рівень зазнає дії гармонічної сили.
- Розроблено нову модель землетрусів, у якій геосередовище розглядається як складна дискретна ієрархічна система, що знаходиться в стані самоорганізації. Модель враховує зміну властивостей геосередовища в області, з високими магнітудами землетрусів. Опрацьована модель добре відтворює основні закономірності сейсмічних процесів.
- Розроблено методику експериментальних досліджень зсувного деформування гранульованого середовища, утвореного гранулами кубічної форми, в тому числі при дії на середовище зовнішніх періодичних та неперіодичних збурень. Проведено експерименти зі зсувного деформування та з'ясовано його подібність до сейсмічних процесів та можливість впливати на нього.
- На основі проведених числових розрахунків уперше з'ясовано, що розподіл енергії хвильових збурень, які генерує гранульоване середовище з кубічними елементами при його зсувному деформуванні, близький до розподілу Гутенберга-Ріхтера. При цьому афтершоки затухають за законом Оморі. Встановлено статистичну подібність поля швидкостей елементів у такому модельному середовищі з полем швидкостей руху земної поверхні в сейсмоактивному регіоні в Каліфорнії.

Практичне значення отриманих результатів.

Автором розроблено модель опису сейсмічних процесів, яка дає можливість краще зрозуміти процеси обміну енергії між структурними елементами середовища в сейсмоактивній зоні.

Статистична подібність процесів зсувного деформування масиву кубічних гранул та деформаційних процесів, що мають місце в сейсмоактивних зонах, зумовлених рухом тектонічних плит, дає перспективу проведення дальніших досліджень з метою прогнозування великих землетрусів та можливості впливу на природні деформаційні процеси для уникнення великих, що мають значну руйнівну силу землетрусів. Дані дослідження також важливі для кращого розуміння подібних природних критичних процесів: сходження сніжних лавин, зсувів ґрунтів, селевих явищ тощо.

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

Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків та списку використаних джерел, що включає 406 найменувань. Робота містить 303 сторінки машинописного тексту, 150 рисунків та 2 додатки.

У вступі дано загальну характеристику роботи, обґрунтовано доцільність обраного напрямку та актуальність дисертації, сформульовано мету, основні методи і задачі досліджень, визначено наукову новизну отриманих результатів, сформульовані основні наукові досягнення дисертанта, наведена інформація щодо апробації отриманих результатів, публікацій, структури та обсягу роботи.

Перший розділ присвячено огляду літератури. Розглянуті моделі геологічних середовищ, у яких враховуються їх дискретні та ієрархічні властивості. Зроблено огляд математичних моделей гранульованих середовищ та методів розв'язку задач динаміки таких середовищ. Зроблено огляд літератури стосовно моделей самоорганізованої критичності та їх застосування для опису критичних явищ у геофізиці. З наведеного загального огляду літератури автор робить висновок, що моделювання динаміки геосередовищ у рамках підходу, в якому геосередовище розглядається як складна дискретна, відкрита в термодинамічному сенсі система з ієрархічною будовою, з нелінійною та дисипативною взаємодією між дискретними елементами, знаходиться в початковій стадії, а дослідження динаміки дискретних ієрархічних середовищ практично відсутні.

У **другому** розділі моделюються процеси поширення нелінійних хвиль у гранульованих структурах. У двовимірній задачі про поширення імпульсного збурення в дискретному середовищі досліджується вплив початкової упаковки на характер хвильового процесу. Результати проведеного моделювання показали, що хвильові процеси в структурованому середовищі мають принципові відмінності від аналогічних процесів у однорідних твердих тілах. Досліджено процес поширення нелінійних хвиль у ланцюгу дискретних елементів у рамках узагальненої моделі Герца із врахуванням їх пластичного деформування. Отримано, що в процесі поширення нелінійної хвилі в такому середовищі її амплітуда поступово загасає, а відокремлена хвиля згодом трансформується в солітоноподібну хвилю.

Проведено комп'ютерне моделювання двовимірних та тривимірних процесів поширення хвилі стиснення в шарі гранульованого середовища, що знаходиться в полі сили тяжіння. З'ясовано, що в шарі зі сферичними гранулами можуть формуватися вихрові структури, параметри яких залежать від розмірів гранул. Кореляційний аналіз дав можливість визначити положення, момент виникнення і тривалість існування хвильових структур.

У **третьому розділі** досліджуються деформаційні властивості дискретних середовищ. Проведено числові розрахунки двовимірних процесів динамічного деформування гранульованих середовищ, утворених зі сферичних дискретних елементів однакового розміру та сферичних елементів трьох розмірів. Розглядалися три види взаємодії елементів: пружна, пружно-в'язка та пружно-пластична. У всіх випадках діаграми деформування є нелінійними, мають гістерезисний характер та залежать від швидкості деформування та щільності упаковки елементів.

Автором запропонована нова унікальна методика для дослідження сил, що діють на окремі гранули на дні гранульованого зразка при динамічному навантаженні. В експериментах, проведених з використанням даної методики, побудовано розподіл максимальних сил. Отримано, що в діапазоні великих сил впливу, функція розподілу має експоненційну залежність, а числове моделювання показало, що експоненційний розподіл великих сил є властивим і всередині зразка, що свідчить про існування дальніх кореляцій сил взаємодії структурних елементів у процесі динамічного навантаження зразка. Отримані в розрахунках часові залежності координатного числа, параметра орієнтаційного порядку, радіуса кореляції та розподілу сил свідчать про нерівноважний характер динамічного деформування гранульованого середовища. У розділі також автором проведено експериментальне дослідження процесів динамічного деформування структурованого модельного середовища з метою отримання діаграми деформування.

З'ясовано, що діаграми деформування залежать від розмірів елементів структури та від характеру їх взаємодії.

Четвертий розділ присвячений моделюванню динаміки ієрархічно структурованих середовищ. Спочатку розглядається одновимірне дискретне ієрархічне середовище, яке моделюється найпростішою системою: ланцюгом куль однакового радіуса. Показано, що у випадку, коли зв'язки між елементами різних рівнів відрізняються суттєво, в ієрархічному середовищі може розповсюджуватись відокремлена хвиля, яка локалізовано переносить енергію.

Запропонована модель ієрархічного блокового середовища, як системи вкладених ангармонічних осциляторів. Отримана динамічна система, що 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 аналіз перетинів Пуанкаре, виявлено локалізовані квазіперіодичні та хаотичні траєкторії.

Проведено також дослідження коливних процесів у багаторівневій системі. Показано, що може існувати критичне значення співвідношення мас осциляторів на сусідніх рівнях, яке відповідає формуванню порівнянних коливань на першому та останньому ієрархічних рівнях.

Розглянуто періодичні режими, що виникають у трирівневій ієрархічній моделі з дисипацією, коли найвищий структурний рівень піддається дії гармонічної сили. Для вивчення цих режимів, як розв'язків сильно нелінійної високорозмірної динамічної системи, вдосконалено метод особливих точок та перевірено результати за допомогою методу Гальоркіна та прямого числового розв'язку. Аналізуючи амплітудно-частотні криві, показано, що ієрархічна структура може вести себе як підсилювач сигналу, прикладеного до найвищого рівня ієрархії. Останнє дозволяє вивчати механізм накопичення та перерозподілу пружної енергії в складних геосистемах у сейсмічних подіях.

Розроблена нова модель землетрусів, яка базується на двох фундаментальних принципах: ієрархічній структурі сейсмоактивних областей та концепції самоорганізованої критичності. Модель побудована на основі клітинних автоматів і описує процес накопичення та обміну енергією між структурними елементами (блоками). Землетруси в даній моделі ідентифікуються як лавиноподібні процеси вивільнення накопиченої в блоках енергії. У моделі керуючими є три параметри. Вона добре відтворює основні емпіричні скейлінгові співвідношення сейсмічних процесів.

У п'ятому розділі експериментально досліджується динаміка модельного середовища, утвореного гранульованим масивом у вигляді кубів. Розроблена методика експериментальних досліджень зсувного деформування гранульованого середовища, в тому числі при дії на середовище зовнішніх періодичних та неперіодичних збурень. Для отриманих у експериментах записів випромінюваних гранульованим середовищем хвильових збурень побудовано розподіли кількості збурень у залежності від енергії (закон Гутенберга-Ріхтера). З'ясовано, що показник степеня знаходиться в межах, які характерні для землетрусів. Для великих акустичних збурень спостерігаються форшоки та афтершоки.

Опромінювання гранульованого середовища періодичними хвилями з різними частотами в процесі його деформування, показало, що слабкі збурення впливають на цей процес та те, що існує певна частота, при якій спостерігається максимальний ефект. При дії імпульсних збурень на гранульоване середовище деформування середовища відбувалося за менших напружень, більш гладко, без великих стрибків. Останні описані результати є

важливими щодо можливостей впливу на процеси деформування складних систем, зокрема, на процеси в сейсмоактивних областях.

У шостому розділі приведені результати числового моделювання зсувного деформування гранульованого масиву в умовах, подібних до експериментальних, на основі розробленого комп'ютерного коду з використанням методу дискретних елементів. Проведено розрахунки зсувного деформування гранульованого масиву із 3000 кубічних гранул при постійній діючій силі та при постійній швидкості зсуву. Для стрибків кінетичної енергії поршня, які можна розглядати як збурення, що передаються від гранульованої системи до зовнішнього середовища, побудовані розподіли енергії та часова залежність числа збурень до і після великих збурень для двох швидкостей деформування та двох масивів з різними розмірами елементів. Автором з'ясовано, що розподіли енергій збурень мають степеневий характер, а показник степеня близький до показника степеня у законі Гутенберга-Ріхтера для землетрусів. Існування форшоків та афтершоків залежить від швидкості деформування та розмірів елементів. Наявні афтершоки загасають з показником степеня близьким до 1, тобто за законом Оморі. Побудовані розподіли флуктуацій швидкостей елементів та обчислено кореляцію флуктуацій швидкостей. Виявлено подібність розподілів флуктуацій швидкостей в модельному середовищі і в сейсмоактивному регіоні в Каліфорнії, який включає в себе розлом Сан-Андреас. Також має місце подібність кореляційних функцій.

Важливо зазначити, що дисертацію Микуляка С.В. написано державною мовою, автореферат написано державною мовою з дотриманням стилю, належним чином оформлено та проілюстровано необхідним і достатнім за обсягом графічним матеріалом.

Дискусійні положення, зауваження та пропозиції. Позитивно оцінюючи роботу, вважаю за необхідне зробити зауваження та звернути увагу на наступні дискусійні положення:

1. З тексту дисертації не зрозуміло, чи впливають розміри каналу, в якому знаходиться двовимірний гранульований масив, на параметри двопікової хвильової структури (розділ 2.1).
2. Автор не пояснює з яких міркувань вибиралися відповідні розміри ємності, в якій знаходився масив гранул при зсувному деформуванні як в експериментах, так і в розрахунках (відповідно розділи 5 та 6). Чи впливають розміри ємності на деформаційний процес?
3. У розділі 6.3 автор не вказує, що ϵ , чи може бути критерієм при визначенні великих збурень.
4. На рис. 2.38 (стор.100), де представлено залежність кореляційної функції від часу, не вказано її розмірність.
5. Мають місце деякі описки, так наприклад на стор.166 (розділ 4.2.1) перед виразом $h < 1$ необхідно поставити розділовий знак (кому), на стор.162 (розділ 4.1) формула $C_2 = C_2 \alpha^2$ повинна бути записана у виді $C_2 = C_0 \alpha^2$ і т.д.

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.

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.

Ідентичність змісту автореферату і основних положень дисертації.

Зміст автореферату цілком відображає всі результати та положення дисертаційної роботи.

Відповідність дисертації вимогам «Порядку присудження наукових ступенів» та нормативних актів МОН України.

Дисертаційна робота Микуляка С.В. 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» щодо дисертаційних робіт, які подаються на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук, інших нормативних актів МОН України та паспорту спеціальності «04.00.22 – геофізика».

Загальний висновок.

Вважаю, що дисертаційна робота Микуляка С.В. «Закономірності динаміки структурованих геосередовищ: теорія, моделі, експеримент» значним чином розвиває та розв'язує низку складних актуальних проблем сучасної геофізики. Дисертацію присвячено актуальній темі, основні наукові положення і висновки є обґрунтованими та достовірними й достатньо висвітлені в наукових публікаціях, а отримані результати сукупно свідчать про вирішення важливої наукової проблеми – виявлення закономірностей динамічних процесів у структурованих геосередовищах з використанням розроблених моделей, в яких враховується дискретність ієрархічність, нелінійність та дисипативність геосередовищ.

Дисертація є завершеним самостійним науковим дослідженням, бесперечно містить наукову новизну, має практичне значення, а сам здобувач **Микуляк Сергій Васильович** заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю «04.00.22 – геофізика».

Доктор фізико-математичних наук, професор
за спеціальністю «04.00.22 – геофізика»,
професор кафедри цивільного захисту
та комп'ютерного моделювання екогеофізичних
процесів Львівського державного університету
безпеки життєдіяльності,
академік Української нафтогазової академії

Стародуб Юрій Петрович

Підпис проф. Стародуба Ю.П. засвідчую:

