

Відгук

офіційного опонента про дисертаційну роботу Лубкова Михайла Валерійовича «**В'язкопружні та теплові процеси в геодинаміці (дослідження в рамках варіаційної скінчено-елементної методики)**», представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22-геофізика.

Представлена дисертаційна робота присвячена вивченню геодинамічних процесів на основі розробленої автором варіаційної скінчено-елементної методики для моделювання квазістаціонарних в'язкопружних і теплових геофізичних процесів. Таке моделювання та геофізична інтерпретація отриманих результатів дозволяють на кількісному рівні досліджувати геофізичні процеси, що протікають у складних неоднорідних геодинамічних об'єктах і, відповідно, робити фундаментальні висновки та важливі народногосподарські прогнози.

Дослідження геодинамічних процесів неможливо здійснити у повній мірі без урахування різноманітних теплових ефектів. Тому виникає потреба у можливості моделювання теплових процесів у складних геодинамічних об'єктах і геосистемах із неоднорідними тепловими властивостями. У зв'язку з цим затребуваним і актуальним є створення надійної і універсальної методики для моделювання і дослідження в'язкопружних та теплових процесів у геодинаміці. Дійсно, побудова і чисельна реалізація геофізичних моделей, які відображують в'язкопружну і теплову природу складних неоднорідних геодинамічних об'єктів, дозволяє досягти глибокого розуміння багатьох раніше недоступних законів природи про Землю. Ці знання мають як фундаментальне значення для подальшого розвитку наук про Землю, так і важливе практичне застосування в народному господарстві країни.

Практична значимість дисертаційної роботи полягає у реалізації розробленої варіаційної скінчено-елементної методики для розв'язання широкого класу геофізичних задач у вигляді прикладних пакетів програм для забезпечення моделювання відповідних геодинамічних процесів, результатах розв'язання нових задач геодинаміки, які дозволяють на кількісному рівні досліджувати конкретні геофізичні процеси, що протікають у складних неоднорідних геодинамічних об'єктах.

Таким чином, представлена робота є актуальною з точки зору математичного моделювання геофізичних процесів і практичного використання результатів для народного господарства.

Дисертаційна робота складається зі вступу, восьми розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації складає 331 сторінку, список використаних джерел налічує 342 найменування. Дисертація містить 124 рисунки і 11 таблиць.

У **вступі** приведено загальну характеристику роботи: розкрито сутність і стан вивчення наукової проблеми, показано актуальність дисертації, сформульовано її мету та обґрунтовано задачі, які необхідно розв'язати. Крім того, представлено наукову новизну отриманих результатів, показано їх зв'язок із науковими

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** отримано системи рівнянь лінеаризованих квазістаціонарних в'язкопружних і теплових геофізичних задач на основі універсальних співвідношень механіки і термодинаміки суцільного середовища. У варіаційній постановці сформульовано плоскі, осесиметричні та в наближенні шаруватих анізотропних оболонок задачі.

Другий розділ присвячено розв'язанню плоских, осесиметричних і в наближенні шаруватих анізотропних оболонок квазістаціонарних та теплових задач. При розв'язанні задач в'язкопружності використовується метод скінчених елементів у формі переміщень, оснований на варіаційному принципі Лагранжа:

$$\delta \tilde{E}(u, w) = 0; \quad (1)$$

Функціонал Лагранжа $\tilde{E}(u, w)$ визначається для випадку двомірних задач із застосуванням восьмивузлового ізопараметричного чотирикутного скінченого елемента. Для збіжності та гладкості скінчено-елементного розв'язку задачі для побудови пробних функцій (функцій форми) використовуються квадратичні алгебраїчні поліноми. Алгоритм скінчено-елементного розв'язання варіаційної задачі (1) полягає в наступному. Спочатку в локальній системі координат відбувається апроксимація змінних, компонентів переміщень, деформацій, об'ємних сил, що входять до функціоналу Лагранжа $\tilde{E}(u, w)$ з використанням функцій форми. Кожному вузлу скінченого елемента відповідає своя апроксимаційна складова. Наступний крок - варіювання функціоналу $\tilde{E}(u, w)$ по всіх вузлових складових переміщень і прирівнювання відповідних варіацій нулю. В результаті для кожного скінченого елемента одержуємо лінійну алгебраїчну систему, що складається з 16 рівнянь. Далі в глобальній системі координат (x, y) відбувається підсумовування локальних систем лінійних алгебраїчних рівнянь по усім скінченим елементам, на які розбито область досліджування і формування глобальної системи рівнянь. Розв'язання глобальної системи лінійних алгебраїчних рівнянь проводиться за допомогою чисельного методу Гауса, внаслідок чого визначаються компоненти переміщень в усіх вузлових точках скінчено-елементної сітки. За знайденими вузловими значеннями компонент квазістаціонарних переміщень можуть бути визначені компоненти швидкостей, деформацій, напружень та інші величини, у довільній точці скінченого елемента, тобто в будь-якій точці двомірної області досліджування. Звернено увагу на те, що представлена варіаційна скінчено-елементна методика дозволяє враховувати неоднорідний розподіл густини та в'язкопружних властивостей в поперечному розрізі області геофізичного досліджування як по вертикалі, так і по горизонталі. Процедура скінчено-елементного розв'язання осесиметричних квазістаціонарних в'язкопружних задач співпадає з приведеною процедурою для плоских задач. Плоска задача теплопровідності розв'язується на тій же сітці скінчених елементів, що і плоска квазістаціонарна задача в'язкопружності. При цьому в основі

розв'язання задачі теплопровідності також лежить варіаційне рівняння функціоналу теплопровідності:

$$\delta I(T) = 0. \quad (2)$$

Таким чином, у другому розділі представлено теоретичні основи варіаційної скінчено-елементної методики - для моделювання квазістаціонарних в'язкопружних і теплових геофізичних процесів. В цьому ж розділі приводяться методики розв'язання в'язкопружних і теплових задач в наближенні шаруватих анізотропних оболонок обертання.

Третій розділ присвячено апробації варіаційної скінчено-елементної методики та здійснено порівняльний аналіз отриманих результатів за методикою та за відомими методами з літературних джерел.

Як тестовий приклад, розглянуто двомірну нестационарну задачу охолодження прямокутної області розміром 1×2 м з коефіцієнтом теплопровідності $8.00 \cdot 10^{-7} \frac{\text{М}^2}{\text{с}}$ при одиничній початковій температурі та нульовій температурі на

границях області. Представлено розподіл температури в області через 27,8 години після початку охолодження, який отримано на основі представленої методики. На рис. 3.1.2 а представлений розподіл температури в області через 27,8 години після початку охолодження. На рис. 3.1.2 б приведений відповідний аналітичний розв'язок представлений в роботі [65, Карслоу і Єгера.]. Узгодженість результатів доводить верифікацію представленої варіаційної скінчено-елементної методики і можливості її застосування в різних областях геодинаміки. Аналогічно показано порівняльний аналіз для інших тестових прикладів: задача прогину опертої на кінцях невагомої двомірної ізотропної пружної балки з розмірами 10×2 м під дією рівномірного вертикального навантаження 10^5 Па, задача прогину тонкостінної пружної ізотропної циліндричної панелі, яка знаходиться під дією власної ваги, задача розігріву тришарової ізотропної замкненої конічної оболонки, що знаходиться в умовах осесиметричного конвективного теплообміну з навколишнім середовищем. Приведені тестові приклади для плоских, осесиметричних та в наближенні шаруватих оболонок пружних задач і задач теплопровідності демонструють добре узгодження результатів отриманих на основі варіаційної скінчено-елементної методики, яка представлена в дисертації, з відповідними відомими результатами. Зазначимо, що для розв'язання плоскої нестационарної задачі теплопровідності застосовується варіаційний скінчено-елементний метод у комбінації з різницеvim методом, що приводить до розв'язання варіаційного рівняння теплопровідності (2)

У розділі наведено ряд задач, які розв'язано на основі варіаційної скінчено-елементної методики.

У **четвертому розділі** на основі представленої варіаційної скінчено-елементної методики розв'язані нові задачі щодо визначення параметрів, які описують процес обертання Землі на основі уточнених моделей її внутрішньої будови. Визначено вплив в'язкопружності мантиї на компоненти збуреної нутації Землі; вплив в'язкості рідкого ядра Землі на компоненти збуреної нутації та числа Ляви і Шида 2-го порядку; вплив радіальної анізотропії мантиї на компоненти

збуреної нутації Землі та числа Ляви і Шида 2-го порядку; вплив горизонтальних неоднорідностей у верхній мантії Землі на числа Ляви і Шида 2-го порядку; вплив великомасштабних неоднорідностей мантії Землі на числа Ляви і Шида 2-го порядку. Значення чисел Ляви і Шида 2-го порядку для основних добових припливних хвиль, що отримані на основі комбінованого методу виходячи з радіально симетричної стандартної моделі Землі PREM, а також з урахуванням впливу великомасштабних неоднорідностей мантії, представлені в таблиці 5. Результати моделювання показують, що найбільші відхилення добових чисел Ляви і Шида 2-го порядку відносно відповідних значень моделі PREM характерні для великомасштабної неоднорідності, розташованої в нижній мантії (на глибині ~ 1600 км). Звернено увагу на те, що для всіх розглянутих вище неоднорідностей, відхилення чисел Ляви і Шида корелюють з частотами добових припливних хвиль.

У **п'ятому розділі** на основі представленої варіаційної скінчено-елементної методики розв'язані нові задачі про сучасні геотектонічні процеси. Визначено особливості сучасних вертикальних рухів локальних соляних і несоляних структур ДДЗ; відмітні особливості сучасного напружено-деформованого стану в осадовому чохлі локальних структур ДДЗ. Визначено вплив сучасних розломно-блокових рухів ДДЗ на гравітаційне поле. Визначені особливості сучасних горизонтальних рухів ДДЗ. Результати моделювання показують, що найбільш інтенсивні вертикальні рухи характерні для несоляних локальних надрозломних структур і структур короблення, тут відповідні швидкості денної поверхні сягають величин 4 і 2 мм/рік. Аналогічні швидкості для прирозломних і штампових структур не перевищують 1 мм/рік. Разом з тим, амплітуди вертикальних швидкостей денної поверхні залежать від характеру пологості відповідних скидів і підняттяв, зі збільшенням положистості зростає амплітуда швидкості. Наявність шарів пористого середовища в розглянутих локальних структурах, приводить до незначного збільшення швидкостей руху денної поверхні. Результати моделювання показують, що для усього розглянутого регіону ДДЗ, стійкі сучасні горизонтальні рухи земної кори мають приблизно однакову спрямованість з південного сходу на північний захід. В той же час інтенсивність сучасних горизонтальних рухів у регіоні ДДЗ є неоднорідною. Найбільш інтенсивні горизонтальні рухи в регіоні характерні для південного сходу ДДЗ і прилеглої до неї частини УЩ. Тут амплітуди швидкостей досягають 3 \sim 3.5 мм/рік. По мірі просування на північний захід інтенсивність сучасних горизонтальних рухів поступово знижується до 1 \sim 1.5 мм/рік. Поряд із цим, у прилеглої до ДДЗ на північному сході, частині ВКМ спостерігається різке зниження інтенсивності сучасних горизонтальних рухів до 0.5 \sim 1 мм/рік. Загальна спрямованість стійких сучасних горизонтальних рухів регіону ДДЗ у північно-західному напрямку доводить, що розглянутий регіон разом з іншою українською частиною Східно-Європейської континентальної плити випробовує насування з боку Північно-Кавказько-Кримського складчастого поясу.

У **розділі шість** розглянуто характерні риси напружено-деформованого стану і розподілу аномального гравітаційного поля, що виникають на ділянці земної кори

в зоні вогнища землетрусу. Результати моделювання показують, що на ділянці земної кори в зоні вогнища землетрусу можуть бути виявлені деякі загальні характерні риси напружено-деформованого стану і розподілу аномального гравітаційного поля. У випадку монолітного складу геологічних порід, що складають земну кору, характерні картини розподілу зсувних переміщень, напружень і аномального гравітаційного поля мають схожий характер, мало залежать від товщини кори, її геологічного складу і лінійних розмірів вогнища землетрусу. У той же час, збільшення ступеню тріщинуватості порід, що складають земну кору, призводить не тільки до різкої зміни кількісних залежностей в картинах розподілу зазначених полів, але також і до їх якісних змін. Для таких картин характерна поява нерегулярних областей максимумів та мінімумів, кількість яких зростає по мірі збільшення ступеню тріщинуватості порід.

У підрозділі § 6.4 Напружено-деформований стан та аномальне гравітаційне поле у вогнищі землетрусу автор стверджує, що на основі варіаційної скінчено-елементної методики, для багатошарових пружних оболонок, проведено моделювання напружено-деформованого стану земної кори, а також аномального гравітаційного поля, що виникають у вогнищі землетрусу зі зсувом по простяганню розлому. Дослідження проведено для типового складу сухих твердих геологічних порід, характерних для земної кори: піщаників, гранітоїдів і базальтів. Розглянуто шаруваті фрагменти кори, що примикають до лінії активного розриву, по якому відбувся черговий сейсмогенний зсув масиву геологічних порід. Автор показує, що традиційно у вивченні проблем, пов'язаних з виникненням землетрусів і їх наслідків, основна увага приділялася розробці критеріїв прогнозу землетрусів і пошуку закономірностей деформування, руйнування прилягаючих територій та поширення сейсмічних хвиль на основі тих або інших моделей вогнищ землетрусів. Наприклад, моделі лавино-нестійкого тріщиноутворення, дилатантно-дифузійної моделі, моделі консолідації, моделі stick-slip і т.п. Згідно з цими моделями деформаційні та сейсмічні процеси, що виникають у вогнищах землетрусів носять, як правило, хаотичний характер, в якому складно виділити якісь стійкі фази. Хочу зазначити, що вище сказане стосується моделей підготовки землетрусів (а не моделей вогнищ землетрусів). Ще одне зауваження стосується типу розриву, як зсув по простяганню. Чому саме такий тип розриву розглянуто і як цей тип розриву пов'язаний із параметрами $T_{\alpha\beta}, Q_{\alpha}$ – (геотектонічні зусилля, що діють на оболонку), які входять у функціонал Лагранжа E для пружного шаруватого фрагменту кори у вигляді оболонки в криволінійній системі координат (s, φ, z) . Цікавим, на мою думку, є результати, які стосуються розподілів зсувних переміщень, зсувних напружень та аномального гравітаційного поля на ділянці кори що складається з пісковикових різної потужності, гранітоїдів, базальтів. У випадку монолітного складу геологічних порід, характерні картини розподілу зсувних переміщень, напружень і аномального гравітаційного поля мають універсальний характер, мало залежать від товщини пружної частини літосфери, її геологічного складу і лінійних розмірів вогнища землетрусу. У той же час, збільшення ступеню тріщинуватості

порід призводить не тільки до різкої зміни кількісних залежностей у картинах розподілу зазначених полів, але також і до їх якісних змін. Для таких картин характерна поява нерегулярних областей максимумів та мінімумів, кількість яких зростає по мірі збільшення ступеню тріщинуватості порід.

У сьомому розділі на основі представленої варіаційної скінчено-елементної методики розв'язані нові задачі про плитні та внутрішньоплитні геотектонічні процеси. Визначені особливості напружено-деформованого стану океанічних літосферних плит в процесі їх згину; особливості процесу деформування океанічних літосферних плит різного типу в зоні субдукції; особливості процесу великомасштабного складкоутворення в осадовому шарі земної кори.

У восьмому розділі на основі представленої варіаційної скінчено-елементної методики розв'язані нові задачі про особливості теплових процесів у літосфері та земній корі. Визначені середні фонові температурні поля ДДЗ. Визначені особливості теплових процесів у зоні сучасної активізації ДДЗ. На основі тривимірної теплової моделі визначено особливості процесу нагрівання океанічної літосфери в зоні субдукції. Визначено особливості теплового процесу при передачі магми по розломам.

Дисертаційна робота Лубкова Михайла Валерійовича 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, які отримано іншими методами

До недоліків роботи можна віднести редакційні помилки. Наприклад, підписи на графіках та і самі рисунки є нечіткими. У тексті роботи є присутні помилки редакційного характеру. Наприклад, « різносна схема», а має бути «різницева схема» Відзначу, що редакційні помилки та рекомендації не зменшують цінності роботи. Основні результати Лубкова Михайла Валерійовича опубліковано в 49 публікаціях і доповідалися на міжнародних і вітчизняних наукових конференціях.

Вважаю, що робота Лубкова М.В. 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