

В І Д З И В

офіційного опонента на дисертаційну роботу
**АРЯСОВОЇ ОЛЬГИ ВІКТОРІВНИ “ГЕОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В
ЛІТОСФЕРІ І КІМБЕРЛІТОВИЙ МАГМАТИЗМ”**

що представлена на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю
04.00.22 – геофізика.

Серед сучасних проблем геофізики актуальним є розуміння механізмів, що визначають положення підшови літосфери і її потужність. Важливу чи визначальну роль тут можна очікувати внаслідок розширення застосування моделей і методів реології у комплексі із сучасними геоінформаційними технологіями. Такого типу дослідження активно проводяться протягом декількох десятиліть, але в даний час немає ясності в фундаментальному питанні про те, де розміщується підшовка континентальної літосфери. Одна з причин полягає в тому, що реологічні характеристики гірських порід сильно залежать від температури, отже перехід від континентальної літосфери до конвектуючої мантиї часто пов'язується з конкретними значеннями температури, або з наближенням до температури солідусу.

Існує велика кількість спостережень теплового потоку і вимірів глибини океану і їх залежності від віку океанічної кори, а також моделі глобальної конвекції, в яких жорсткий пограничний шар ідентифікується з літосферою. Однак теорія, що пояснює формування океанічної літосфери і дозволяє визначити залежність потужності літосфери від потенціальної температури, відсутня. Параметризація результатів спостережень теплового потоку і батиметрії ґрунтується на чисто кінематичних моделях. Послідовна фізична картина формування океанічної літосфери базується на спрощених реологічних моделях гірських порід. Отже тема дисертаційної роботи, безумовно, є актуальною.

У дисертаційній роботі побудовано динамічну теорію взаємодії мантийної конвекції з літосферою. Результатом теорії є нова технологія теплового моделювання літосфери, яка гарантує, що результуюча літосферна геотерма відповідає реальному квазістаціонарному стану мантийної конвекції, і дозволяє отримати кількісні співвідношення між тепловим станом, потенціальною температурою і потужністю літосфери. Оскільки склад магм залежить від тиску, при якому вони виплавляються, теорія передбачає існування певних зв'язків між складом магми і потужністю літосфери. Результати дисертаційної роботи узгоджуються з відомими з літератури даними.

Перевірка прогнозів моделі проведена з використанням результатів вивчення складів кімберлітів і їх ксенолітів. Щоб отримати вибірку РТ визначень однорідної якості, у дисертаційній роботі виконана велика кількість РТ визначень для ксенолітів-ксенокристів з 39 кімберлітів за допомогою одного і того ж

одноклинопіроксенового термобарометра. Ці дані використані для перевірки і підтвердження теорії, що розвинута.

Одним із важливих питань є питання збору кімберлітових розплавів, які є продуктами плавлення низького ступеня, в макроскопічні осередки, та їх подальше виверження на поверхню. Цей процес зазвичай описують у рамках гідродинаміки багатофазних середовищ. Рівняння зв'язку для системи, яке припускає рівність тисків фаз, незастосовне у випадку, коли пористість заповнена кімберліт-карбонатитовою рідиною через великий контраст в'язкості рідини і матриці. У дисертаційній роботі сформульовано загальне рівняння зв'язку, що виражає в явному вигляді умову узгодженості просочування розплаву і непружної деформації матриці і замикає систему рівнянь задачі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувались у відділі тектонофізики Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України згідно з планами наукових досліджень у рамках наступних тем.

- Тектонофізичні фактори структурного контролю магматизму платформ і щитів, стрес-метаморфізму порід і рудовміщуючих комплексів (2011-2015 рр., номер держреєстрації 0111U000228).
- Глибинна будова і геодинамічний розвиток Інгульського мегаблоку Українського щита у зв'язку з пошуками стратегічних видів корисних копалини (2013-2015 рр., номер держреєстрації 0113U002502).
- Закономірності розміщення родовищ стратегічних мінеральних ресурсів на території України та геофізичні і геодинамічні критерії їх пошуків (2010-2012 рр., номер держреєстрації 0110U004267).
- Розробка, удосконалення і використання методів теоретичної і польової тектонофізики з метою вивчення мантийних процесів, динаміки земної кори і прогнозування пошуків родовищ корисних копалини (2004-2010 рр., номер держреєстрації 0211U004351).
- Геофізичні і геодинамічні критерії виділення площ, перспективних на енергетичні і мінеральні ресурси і алмази (2007-2009 рр., номер держреєстрації 0107U006543).
- Оцінка перспектив корінної алмазоносності Українського щита за деякими геофізичними дослідженнями земної кори і верхньої мантиї (2004-2006 рр., номер держреєстрації 0104U002978).
- Створення комплексної тривимірної геофізичної моделі літосфери у зв'язку з магматизмом, тектонікою і утворенням корисних копалин Українського щита (2002-2006 рр., номер держреєстрації 0102U002478).

Об'єктом дослідження є континентальна літосфера. *Предмет* дослідження — геодинамічні процеси в літосфері. Основними *методами* досліджень дисертаційної роботи є математичні методи розв'язання фізичних задач.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Запропоновано підхід до теплового моделювання стаціонарної літосфери, що використовує умову граничної стійкості конвективного пограничного шару. Виконання цієї умови означає, що система мантийної конвекції, що включає конвектуючу мантию і тепловий пограничний шар (тобто літосферу і конвективний пограншар), знаходиться в стаціонарному стані.
2. Показано, що в субконтинентальній мантиї конвективний пограншар розташовується безпосередньо біля підшови хімічного пограничного шару, який включає кору і розущільнений деплетований шар, тобто потужність континентальної літосфери визначається потужністю хімічного пограничного шару. Кількісні співвідношення між референтним тепловим потоком, потужністю літосфери і потенціальною температурою, що випливають з моделі, узгоджуються з результатами термобарометрії кімберлітів світових провінцій.
3. Показано, що в тій частині океанічної мантиї, яка знаходиться в стаціонарному стані, підшовка літосфери встановлюється на реологічній глибині, що залежить лише від потенціальної температури конвектуючої мантиї і реології порід. Відмічено узгодження із сейсмологічними даними.
4. Продемонстровано, що в літосферній мантиї кратонів спостерігається великомасштабне фракціонування РЗЕ, тобто закономірна зміна міжелементних співвідношень в групі РЗЕ з глибиною, що можливо тільки в присутності розплаву. Показано, що причиною цього ефекту може бути нерівноважна диференціація РЗЕ між розплавом і реститом, що супроводжувала епізоди часткового плавлення мантиї.
5. Показано, що в частково розплавленій дифузійно-урівноваженій гірській породі єдиними незалежними параметрами, що характеризують рідкісно-елементний склад, є вмісти рідкісних і розсіяних елементів (PPE) в одному з модальних мінералів.
6. Для задачі про компакцію матриці і сегрегацію розплаву одержано загальне рівняння нерозривності суміші, що виражає в явному вигляді умову узгодженості просочування розплаву і непружної деформації матриці.
7. Побудовано чисельну модель провідності і проникності випадкової системи провідних елементів, розташованих на гранях зерен кубічної решітки. Показано, що поріг зв'язності системи відповідає приблизно 50% зайнятих граней решітки.
8. Побудовано чисельну модель провідності і проникності частково розплавленого бімінерального агрегату, зерна якого мають різні форми і розміри, в припущенні, що розплави виникають тільки на ребрах контактуючих зерен різного складу.
9. Сформульовано розширене "правило Кліффорда", що акцентує асоціацію проявів кімберлітового магматизму з потужною деплетованою літосферою.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Загальний обсяг дисертації складає 330 сторінок, список використаних джерел налічує 444 найменування. Дисертація містить 70 малюнків і 5 таблиць.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми роботи, показано зв'язок з науковими програмами і проектами, визначено мету і завдання дослідження, сформульовано новизну одержаних результатів і їх практичне значення, вказано обсяг публікацій за темою роботи, особистий внесок здобувача, апробацію результатів і структуру дисертації.

У **першому розділі** представлено огляд літератури за темою дисертації і відображено сучасний стан проблем, що розглядаються в роботі. Обґрунтовано вибір пари геотермометр-геобарометр, що використовується в роботі.

У **другому розділі** побудовано динамічну теорію взаємодії регулярної мантийної конвекції з континентальною та океанічною літосферою. Запропоновано новий підхід до моделювання теплового стану стаціонарної літосфери, що використовує умову граничної стійкості шару, в якому відбувається перехід від літосфери до конвектуючої мантиї.

Загальноприйнята практика моделювання теплового стану літосфери ґрунтується на розв'язанні одновимірного стаціонарного рівняння теплопровідності з температурою і тепловим потоком, заданими на поверхні, в якості граничних умов. Запропонований автором розв'язок слабо залежить від варіацій теплогенерації в корі. Дві стаціонарні геотерми, які відповідають різним значенням теплогенерації, але однаковим значенням інших параметрів, зближуються з глибиною. Принцип граничної стійкості полягає в тому, що при стаціонарній розвиненій конвекції пограничні шари знаходяться на межі стійкості.

Оскільки реологічні параметри гірських порід залежать від температури, літосфера є твердою, і тільки її нижня частина, тобто конвективний пограничний шар, знаходиться на межі стійкості. Математично принцип граничної стійкості формулюється як рівність числа Релея, визначеного для конвективного пограничного шару, критичному значенню.

У **третьому розділі** вивчається взаємодія з континентальною літосферою гарячих мантийних підняття, які можуть розглядатись як флуктуації мантийної конвекції. На основі найповніших сучасних баз даних продемонстровано існування виражених просторово-часових кореляцій між трьома типами внутрішньоплитового магматизму в Євразії і Африці.

Синхронність магматизму і зближеність ареалів його проявів означає, що вся маґма виникає під впливом деякої спільної причини, припускається, що такою спільною причиною є мантийні плюми.

У **четвертому розділі** показано, що просторовий розподіл рідкісноземельних елементів у верхній мантиї є інформативним і чутливим інструментом, який дозволяє з'ясувати важливі особливості протікання процесів крупномасштабного плавлення в мантиї кратонів. Виявлено, що вмісти рідкісноземельних

елементів у клинопіроксені і гранаті закономірним чином змінюється з глибиною. Обговорюються причини і наслідки цього явища.

У **п'ятому розділі** обговорюються причини схожості редкісноелементного складу кімберлітів з різних світових провінцій і можливі механізми насичення кімберлітових розплавів. Для пояснення редкісноелементного складу кімберлітів пропонуються багатостадійні процеси. Склади розплавів, що виникають внаслідок цих процесів, залежать від термодинамічних умов, а також складу і ступеня плавлення резервуарів, що беруть участь у формуванні джерела.

У **розділі шість** розглядається задача про сегрегацію розплаву з частково розплавленого агрегату. На основі отриманих розв'язків обговорюються особливості сегрегації кімберлітів і карбонатитів. Частково розплавлені системи є частковим випадком багатозфазних середовищ і описуються в рамках гідродинаміки в'язкої рідини. Умова рівності тисків розплаву і матриці є неприйнятною для описання сегрегації малов'язких розплавів відносно дуже в'язкої матриці. В роботі отримано загальне рівняння нерозривності двофазної суміші.

У **сьомому розділі** побудовано чисельні моделі проникності частково розплавлених мінеральних агрегатів. Розглядаються дві моделі. У першій плавлення відбувається по гранях зерен кристалічної структури. У другій розглядається полімінеральний агрегат, що складається з різних за розміром і формою мономінеральних зерен двох різних складів.

Таким чином показано, що стандартний метод теплового моделювання літосфери, який ґрунтується на розв'язанні стаціонарного рівняння теплопровідності з граничними умовами (температура і тепловий потік), що задаються на поверхні, не враховує теплообмін між літосферою і конвектуючою мантією і тому не гарантує, що розв'язки описують реальний стан, при якому тепловий потік на межі між літосферою і конвектуючою мантією є неперервним. Запропоновано підхід до теплового моделювання стаціонарної літосфери, що використовує умову граничної стійкості пограничного шару на межі між літосферою і конвектуючою мантією замість задання теплового потоку на поверхні.

Показано, що в субокеанічній мантії в областях, де стан літосфери наближується до стаціонарного (вік кори >60-80 млн. років), положення рівноважної межі між літосферою і конвектуючою мантією визначається тільки реологією гірських порід і потенціальною температурою конвектуючої мантії. У континентальних регіонах пограничний шар між літосферою і конвектуючою мантією розташовується безпосередньо біля підшови деплетованого шару літосфери, і перехід від літосфери до конвектуючої мантії супроводжується зміною складу порід.

Для задачі про компакцію матриці і сегрегацію розплаву одержано загальне рівняння нерозривності суміші, що виражає в явному вигляді умову

узгодженості просочування розплаву і непружної деформації матриці і замикає систему визначальних рівнянь.

Побудовано аналітичні і чисельні одновимірні розв'язки задачі про компакцію. З цих розв'язків випливає, що для малов'язких розплавів час сегрегації контролюється в'язкістю пористої матриці і не залежить ні від в'язкості розплаву, ні від проникності матриці. Час сегрегації зменшується зі збільшенням потужності пористого шару, заповненого рідиною. Показано, що це може бути причиною формування кластерів одновікових і односкладових виявлень, які характерні для кімберлітових провінцій.

Побудовано чисельну модель провідності і проникності випадкової системи провідних елементів, розташованих на гранях зерен кубічної решітки. Показано, що поріг зв'язності p_c системи відповідає приблизно 50% зайнятих граней решітки.

Побудовано чисельну модель провідності і проникності частково розплавленого бімінерального агрегату, зерна якого мають різні форми і розміри, в припущенні, що розплави виникають тільки на ребрах контактуючих зерен різного складу. Виникнення зв'язної системи часткового плавлення вимагає плавлення по ребрах не менш ніж приблизно 15% зерен.

Запропоновано принципово новий підхід до теплового моделювання стаціонарної літосфери, що дозволило побудувати кількісні моделі. Результати моделювання зіставлено з даними термобарометрії ксенолітів кімберлітів.

Зауваження по дисертації зводяться до наступного.

1. В дисертації дискутується “правило Кліффорда”, яке було запропоноване 50 років тому. Це результат спостережень того часу. Враховуючи стиль роботи, можна було б сформулювати якісно і кількісно новий статистичний критерій локалізації провінцій, а не розширяти старе правило.
2. Не зовсім зрозумілими є коментарі про недоліки стандартних підходів до розв'язку рівнянь теплопроводності. А також про переваги, на цьому тлі, пропонованого, який забезпечує стаціонарність геотерми та інш.
3. В роботі використана досить складна реологічна модель рідини з неньютонівською в'язкістю. Але разом з тим неочевидним є вибір параметрів, а саме показника ступеню, передекспоненціального фактору. Крім того, така модель є доцільною при аналізі скінчених деформацій рідини (розплаву). Можливо, тут було б доцільним обмежитись рідиною Ньютона, оскільки аналітичний розв'язок спрощений.
4. Коефіцієнт інтенсивності напружень, який використовується для визначення тиску найбільш глибокого ксеноліту, відноситься до випадку пружного середовища. В той же час мова йде про багатозфазний розплав, в'язко-пластичний, нелінійний.
5. У висновках по роботі є неоднозначний термін інфінітезимальне плавлення. Можливо, це початкове плавлення на ребрах зерен, або ж те, що не

супроводжується сегрегацією розплаву, але ідентифікація відповідного геофізичного параметру в роботі не вказана.

Слід зазначити, що наведені вище зауваження не знижують загальне позитивне враження про дисертацію. Робота добре оформлена та проілюстрована, містить корисні додаткові матеріали. Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертації, стиль викладення відповідає прийнятому в науковій літературі.

Підсумовуючи вищесказане, можна зробити загальний висновок, що подана дисертаційна робота є актуальною, містить наукові положення та науково обґрунтовані результати у галузі геофізики, що розв'язують важливу наукову проблему, має новизну й практичну цінність, а її науковий рівень відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», які висуваються до докторських дисертацій, а автор дисертації Арясова Ольга Вікторівна заслуговує на присвоєння їй наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика.

Головний науковий співробітник
Інституту механіки імені С.П.Тимошенка
НАН України,
доктор фізико-математичних наук

Маслов Б.П.

Підпис Б.П.Маслова «Засвідчую»
Вчений секретар