

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Арясової Ольги Вікторівни**

«Геодинамічні процеси в літосфері і кімберлітовий магматизм»,

поданої на здобуття наукового ступеня

доктора фізико-математичних наук

за спеціальністю 04.00.22 — геофізика.

**Актуальність теми дослідження.** Останнім часом в літературі активно обговорюються фізико-хімічні механізми, що визначають потужність літосфери і положення її підшви. Незважаючи на це, на теперішній час навіть смисл терміну “літосфера” не є однозначним і часто прив’язується до сукупності методів, що використовуються для визначення цього терміну. Теорія, яка пояснює формування океанічної літосфери, відсутня, і існують лише суто кінематичні моделі океанічної літосфери (модель плити і модель CHABLIS), що базуються на нефізичних припущеннях. Немає ясності у фундаментальному питанні про те, де розміщується підшва континентальної літосфери: безпосередньо під хімічним пограншаром, або на деякій відстані від нього.

В дисертаційній роботі представлено нову технологію теплового моделювання літосфери, яка гарантує, що результуюча літосферна геотерма відповідає реальному квазістаціонарному стану мантийної конвекції, та дозволяє послідовно і кількісно проаналізувати взаємодію регулярної мантийної конвекції з континентальною і субокеанічною літосферою.

Значний інтерес викликають процеси в джерелах кімберлітового магматизму. Важливим є питання про те, як кімберлітові розплави, які є продуктами плавлення низького ступеня, збираються у макроскопічні осередки, з яких в подальшому вивергаються на поверхню. При описанні цього процесу зазвичай використовуються система визначальних рівнянь, що була введена в геофізичну практику Маккензі. Але у випадку гранично високого відношення в’язкості матриці до в’язкості рідини, що сегрегує, система визначальних рівнянь, що використовується, не є повністю коректною. Саме така ситуація є характерною для сегрегації кімберлітів. У дисертаційній роботі

сформульовано нове загальне рівняння зв'язку для задачі про сегрегацію розплаву, що замикає систему визначальних рівнянь і може застосовуватись, зокрема, у випадку сегрегації кімберлітових магм.

Щоб процес сегрегації магм став можливим, необхідним є утворення зв'язної системи розплавних включень. Тому вивчення проникності систем з випадковим розміщенням включень розплаву на гранях або ребрах зерен кристалічної структури є важливим для розуміння процесу сегрегації. Цьому питанню присвячений сьомий розділ дисертації.

**Ступінь обґрунтованості положень, висновків і рекомендацій.** Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел, що налічує 444 найменувань, і двох додатків.

Основні результати дисертації представлено в розділах 2-7.

В другому розділі запропоновано новий підхід до моделювання теплового стану стаціонарної літосфери, що використовує умову граничної стійкості шару, в якому відбувається перехід від літосфери до конвектуючої мантиї. Запропонований підхід гарантує, що одержана літосферна геотерма відповідає реальному квазістаціонарному стану мантийної конвекції. Це є суттєвою перевагою запропонованого методу над загальноприйнятим (стандартним), який базується на знаходженні розв'язку стаціонарного рівняння теплопровідності з заданими на поверхні температурою і тепловим потоком і не бере до уваги взаємодію літосфери і конвектуючої мантиї. Іншою відмінною запропонованого методу від стандартного є те, що розв'язок лише слабо залежить від варіацій теплогенерації в корі, що узгоджується з фізичною інтуїцією. За дещо спрощених умов було одержано аналітичні розв'язки задачі як для океанічного, так і для континентального регіону. Оцінки теплового потоку для океанічних регіонів в областях старої кори, отримані в результаті аналітичних і чисельних методів, узгоджуються з даними спостережень. Розв'язки задачі для континентального регіону дозволили одержати співвідношення між потенціальною температурою конвектуючої мантиї, потужністю літосфери і літосферною геотермою, які добре узгоджуються з літосферними геотермами, побудованими за даними термобарометрії ксенолітів/ксенокристів кімберлітів. Слід зазначити, що в роботі використовується велика вибірка РТ визначень для ксенолітів/ксенокристів з 39 кімберлітів. Всі

визначення були виконані автором за допомогою одного й того ж одноклинопіроксенового термобарометра Німіса і Тейлора, що дозволило одержати вибірку однорідної якості.

У третьому розділі запропоновано схему взаємодії літосфери з гарячими мантійними підняттями. Продемонстровано просторову зближеність і часову синхронність вивержень трапів, карбонатитів і кімберлітів як мінімум у 8 випадках, що є підтвердженням теорії породження всіх трьох типів магматизму загальною причиною — взаємодією літосфери з головою гігантського мантійного підняття. Хоча в літературі описано окремі спостереження просторово-часових спряженостей кімберлітів, карбонатитів і платобазальтів, публікацій, в яких були б представлені повні дані про такі кореляції, немає. Ідею про те, що кімберлітовий магматизм ініціюється мантійним плюмом, що досягає подошви деплетованої літосфери, підтверджено в роботі даними термобарометрії ксенолітів/ксенокристів кімберлітів, згідно яких найбільш глибокий ксеноліт, що виноситься кімберлітовою магмою, а значить і всі інші, в більшості випадків підбирається в межах деплетованої літосфери, і, значить, джерела кімберлітів розташовуються поблизу або в межах деплетованої літосфери.

У четвертому розділі продемонстровано, що відношення вмістів рідкісноземельних елементів (РЗЕ) в клинопіроксені і гранаті закономірним чином змінюються з глибиною вздовж літосферної мантії. Причиною цього явища в роботі названа нерівноважна диференціація, тобто недостатньо тривалий контакт між фазами при дифузійному розподілі хімічного елемента, при якому не встигає встановитися дифузійна рівновага. Припущення, що нерівноважна диференціація є механізмом, який забезпечує просторове фракціонування, підтверджується тим, що нахили залежності логарифмів мінеральних вмістів РЗЕ в клинопіроксені від тиску корелюють з енергією активації дифузії РЗЕ. Крім того, теорію підтримують результати моделювання, проведеного автором, згідно яких найкращу згоду зі спостереженнями дає модель нерівноважної диференціації, що супроводжує плавлення помірно високого ступеня (10-20%) деплетованого перидотиту.

У п'ятому розділі запропоновано модель насичення кімберлітових розплавів рідкими і розсіяними елементами (РРЕ). Зазвичай для пояснення рідкісноелементного складу кімберлітів пропонуються багатостадійні моделі. Такі моделі є

багатопараметричними, що важко поєднати з дивовижною схожістю рідкісноелементних складів кімберлітової магми у світових провінціях. В дисертації показано, що кількість незалежних параметрів моделі може бути зменшено: в дифузійно-урівноваженій гірській породі вміст елемента лише в одному з модальних мінералів є незалежним, а склад насиченого розплаву і вмісти PPE в усіх модальних мінералах породи, що знаходиться в рівновазі з цим розплавом, не залежать від модального складу породи і можуть бути обчислені, якщо відомі вмісти PPE в одному з мінералів.

У шостому розділі аналітичними методами одержано нове загальне рівняння нерозривності суміші для задачі про компакцію матриці і сегрегацію розплаву. Це рівняння виражає в явному вигляді умову узгодженості просочування розплаву і непружної деформації матриці і замикає систему визначальних рівнянь. Воно є таким же фундаментальним, як і визначальні рівняння гідродинамічної системи. Одержане рівняння, на відміну від традиційного рівняння, що виражає умову рівності тисків розплаву і матриці і замикає систему визначальних рівнянь, може застосовуватись у задачах про сегрегацію малов'язких розплавів (кімберлітів, карбонатитів) відносно дуже в'язкої матриці. На одновимірних розв'язках продемонстровано, що стиль і характерний час сегрегації розплаву із зони часткового плавлення визначається, фактично, відношенням в'язкостей розплаву і матриці. Детально вивчено випадок сегрегації малов'язких розплавів.

У сьомому розділі побудовано чисельні моделі проникності систем розплавних включень, розташованих на ребрах або на гранях кристалічної структури. Знайдені пороги проникності дозволяють робити висновки про можливість сегрегації розплаву з частково розплавленого агрегату. Розроблений метод моделювання може бути застосований до систем розплавних включень іншої геометрії.

**Наукова новизна і достовірність результатів.** Найбільш вагомими новими результатами дисертаційної роботи О. В. Арясової є такі:

1. Розроблено новий підхід до теплового моделювання стаціонарної літосфери, що використовує умову граничної стійкості конвективного пограничного шару і гарантує, що розв'язок описує реальну стаціонарну геотерму. При цьому кількісні співвідношення між референтним тепловим потоком, потужністю літосфери і

потенціальною температурою, що впливають з моделі, узгоджуються з результатами термобарометрії ксенолітів/ксенокристів кімберлітів світових провінцій.

2. Вперше продемонстровано, що в літосферній мантії кратонів співвідношення вмістів РЗЕ закономірним чином змінюються з глибиною. Доведено, що причиною цього ефекту може бути нерівноважна диференціація РЗЕ між розплавом і твердим залишком, що супроводжувала епізоди часткового плавлення мантії.

3. Одержано нове загальне рівняння нерозривності суміші для задачі про компакцію матриці і сегрегацію розплаву. Це рівняння замикає систему визначальних рівнянь і виражає в явному вигляді умову узгодженості просочування розплаву і непружної деформації матриці.

4. Доведено, що вмісти РРЕ в мінералах дифузійно-урівноваженої гірської породи не залежать від модального складу. Показано, що при цьому єдиними незалежними параметрами, що характеризують рідкісноелементний склад, є вмісти РРЕ в одному з модальних мінералів.

5. Побудовано чисельну модель провідності і проникності випадкової системи провідних елементів, розташованих на гранях зерен кубічної решітки, а також частково розплавленого бімінерального агрегату, зерна якого мають різні форми і розміри, в припущенні, що розплави виникають тільки на ребрах контактуючих зерен різного складу. Знайдено пороги зв'язності цих систем.

Отримані результати є достовірними, оскільки висновки теоретичного аналізу перевірялись порівняннями зі спостереженнями і лабораторними даними, програмне забезпечення проходило цілеспрямоване тестування, а аналітичні співвідношення були одержані за допомогою строгих математичних міркувань.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати дисертації мають як теоретичне, так і практичне застосування. В роботі доведено незалежність вмістів РРЕ в мінералах дифузійно-урівноваженої гірської породи від модального складу. Цей факт дозволяє розрахувати вмісти РРЕ в усіх мінеральних фазах і в насиченому розплаві по вимірюванням вмістів РРЕ тільки в одному з мінералів.

Запропонований підхід до теплового моделювання стаціонарної літосфери може бути використаний для побудови розв'язку, що описує стаціонарну геотерму, яка задовольняє умову неперервності теплового потоку на межі літосфери і конвектуючої

мантії. Крім того, такий підхід дозволяє обчислити залежність літосферної геотерми від потенціальної температури конвектуючої мантії і потужності хімічного пограничного шару.

Основні положення та результати дисертації **опубліковано** у двадцяти чотирьох статтях у фахових виданнях. Матеріали дисертації доповідались на багатьох міжнародних наукових конференціях. Здобувач має одинадцять тез доповідей на міжнародних конференціях

### **Зауваження:**

1. Автор пропонує "розширену трактовку правила Кліффорда", яка спирається на кореляцію кімберлітового магматизму не з архейським віком кори, як у оригінальному формулюванні правила Кліффорда, а з архейським віком літосфери. Незважаючи на те, що така кореляція у переважній більшості випадків є, вірогідно, правильною, використання назви "правило Кліффорда" є не зовсім вдалим, тому що створює враження нібито "розширене правило Кліффорда" є пошуковою ознакою. В той же час, на відміну від "правила Кліффорда", яке спирається на вік кори, тобто на геологічну інформацію, "розширене правило" потребує дослідження глибинних ксенолітів, тобто існування вже відкритого кімберліта.

2. Запропонований автором у Розділі 3 механізм генерації кімберлітових магм, який пов'язує виплавлення кімберлітів із впливом гарячого мантійного підняття (мантійного плюму), що досягає підшви літосфери, вочевидь не вичерпує різноманіття ситуацій, що зустрічаються у природі. Найбільш суттєва відмінність спостерігається у Північній Америці, де повністю відсутня кореляція між континентальними платобазальтами, карбонатитами і кімберлітами. Автор вказує на цю відмінність, але не розглядає ніякий інший механізм.

3. Як підкреслюється на сторінці 85 дисертації, гранична стійкість пограничного шару між літосферою і конвектуючою мантією є необхідною умовою стаціонарного стану літосфери і конвектуючої мантії. Насправді, автор використовує цю умову як достатню, а не необхідну умову стаціонарності, що потребує додаткових пояснень.

4. Незважаючи на візуально непогану кореляцію між обвідною результатів

термобарометрії в координатах (тепловий потік, глибина найбільш глибокого ксеноліту) і залежністю теплового потоку від потужності літосфери (модельні криві на рис. 2.7), залишається питання, як співвідносяться кількісно потужність літосфери, глибина зупинки мантийного плюму і глибина, на якій формується джерело магматизму. Різниця між ними може сягати від кілометрів до перших десятків кілометрів. Тобто кореляція є, скоріш, якісною ніж кількісною.

5. На рис. 5.5 наведено палеотемператури і палеотиски визначені для ксенолітів канадських кімберлітових трубок Jericho, поле Лак де Гра і Nikos, о. Сомерсет. Логічно було б в стилі аналізу в Розділі 2 розрахувати геотерми Хастерока і Чепмена для цих кімберлітів, але автор чомусь цього не зробив.

6. Як витікає із моделі формування кластерних вивержень кімберлітів (див. рис. 6.8), що запропоновано автором, джерела всіх вивержень розміщується на тій самій глибині. Якщо ця модель є правильною, можна передбачити, що найбільш глибокі кімберліти у всіх кластерах походять приблизно з однієї глибини. Як побажання, на думку рецензента, автор в подальших дослідженнях має перевірити це передбачення на реальних даних.

7. Моделі, які покладено в основу розгляду у Розділі 7, є, звичайно, значним спрощенням кристалічної структури гірських порід. Зокрема, агрегат, який складається із однакових кубічних зерен є термодинамічно нестійким, оскільки в такому агрегаті вздовж ребер решітки контактують чотири зерна, в той час як термодинамічно стійкою є структура із потрійним зчленуванням. Однаковість зерен теж неможлива в термодинамічно врівноваженому кристалічному агрегаті. Тому результати в дисертації не можуть претендувати більш ніж на з'ясування якісної залежності проникності від суттєвих розмірних параметрів.

Зазначимо, що наведені зауваження скоріше носять характер наукової дискусії і **СУТТЄВО НЕ ВПЛИВАЮТЬ** на загальну високу оцінку дисертаційної роботи.

**Автореферат повністю відображає зміст дисертації.**

**Загальний висновок.** Дисертація О. В. Арясової є завершеною працею, яка містить нові науково обґрунтовані результати, що мають теоретичне і практичне

значення, тема дисертації є актуальною. Автор продемонстрував високу кваліфікацію, володіння сучасними методами досліджень та великий творчий потенціал.

На основі проведеного аналізу вважаю, що дисертаційна робота Арясової Ольги Вікторівни «Геодинамічні процеси в літосфері і кімберлітовий магматизм», поданої на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук, за обсягом проведених наукових досліджень, їх актуальністю, новизною та науковим рівнем відповідає вимогам п. 10, п. 12 та п. 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24 липня 2013 року, а її автор — Арясова Ольга Вікторівна — заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 — геофізика.

Офіційний опонент  
академік НАН України,  
доктор геологічних наук, професор,  
директор Інституту геохімії,  
мінералогії та рудоутворення  
ім. М. П. Семененка НАН України



  
О. М. Пономаренко