

Відгук

офіційного опонента про дисертаційну роботу Арясової Ольги Вікторівни «Геодинамічні процеси в літосфері і кімберлітовий магматизм», представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22-геофізика.

Представлена робота присвячена актуальній і важливій проблемі, яка пов'язана з вивченням геодинамічних процесів у континентальній літосфері. Термін "літосфера" широко використовується в геофізиці. В даній роботі приймається, що літосфера – це є верхній шар Землі, в якому теплоперенос являється чисто кондуктивним. Крім того вважається, що від мантії літосфера відділена конвективним пограничним шаром. Так як реологія гірських порід залежить від температури, перехід від континентальної літосфери до конвектуючої мантії часто пов'язують із конкретними значеннями температури (наприклад, 1300°C) або з перетином геотерми і мантійної адіабати. Важливим також на думку дисертанта являється визначення потужності літосфери і, відповідно, положення її підшови. Для океанічної літосфери ситуація дещо інша. З одного боку, існує велика кількість спостережень теплового потоку і вимірів глибини океану і їх залежності від віку океанічної кори, а також чисельні моделі глобальної конвекції, в яких неминуче виникає жорсткий пограничний шар, що ідентифікується з літосферою. З іншого боку, відсутня теорія, що пояснює формування океанічної літосфери, яка б дозволяла розрахувати залежність потужності літосфери від потенціальної температури. Інтерпретація результатів спостережень теплового потоку і батиметрії ґрунтується на чисто кінематичних моделях: "модель плити", CHABLIS, що не мають під собою реальної фізичної основи. Єдине дослідження, в якому була запропонована послідовна фізична картина формування океанічної літосфери, базується на спрощеній модельній реології гірських порід.

У дисертаційній роботі побудовано динамічну теорію взаємодії мантійної конвекції з літосферою. Ця теорія спирається на експериментальні дані про реологію гірських порід і коректне визначення критичного значення числа Релея. Крім того, результатом представленої теорії є нова технологія теплового моделювання літосфери, згідно якої отримано кількісні співвідношення між тепловим станом континентальної літосфери, потенціальною температурою конвектуючої мантії і потужністю літосфери. Для океанічного регіону теорія визначає залежність потужності літосфери і теплового потоку від потенціальної температури. Результати дисертаційної роботи узгоджуються з літературними даними (Чалапати Рао і Леманн, 2011, Девіса та ін., 2015). Для перевірки прогнозів моделі і підтвердження теорії у роботі представлено результати вивчення складів кімберлітів і їх ксенолітів.

Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів основної частини, 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** приведено загальну характеристику роботи: розкрито сутність і стан вивчення наукової проблеми, показано актуальність дисертації, сформуовано її мету та обґрунтовано задачі, які необхідно розв'язати. Крім того, представлено наукову новизну отриманих результатів, відмічено їх зв'язок із науковими програмами, планами і темами, приведені дані для практичного використання результатів роботи, а також апробацію результатів дисертації, вказано на особистий внесок здобувача та обсяг публікацій за темою роботи.

У **першому розділі** представлено огляд літератури за темою дисертації і відображено сучасний стан проблем, що розглядаються в роботі.

У **другому розділі** здійснено моделювання теплового стану стаціонарної літосфери, що використовує умову граничної стійкості шару, в якому відбувається перехід від літосфери до конвектуючої мантії. Приймається, що літосфера є верхнім шаром Землі, що включає кору і літосферну мантію, в якому теплоперенос є чисто кондуктивним. Разом з конвективним пограничним шаром, в якому відбувається перехід від кондуктивної літосфери до конвектуючої мантії, літосфера формує тепловий пограничний шар мантіїної конвекції. Літосфера включає також хімічний пограничний шар. Загальноприйнята практика моделювання теплового стану літосфери ґрунтується на розв'язанні одновимірною рівняння теплопровідності з температурою і тепловим потоком, заданими на поверхні, в якості граничних умов. Такий метод не розглядає теплову взаємодію літосфери і конвектуючої мантії. На відміну від загальної практики розв'язання стаціонарного рівняння теплопровідності із заданими граничними умовами на поверхні, у роботі запропоновано новий підхід для моделювання теплового стану стаціонарної літосфери, який використовує умову граничної стійкості шару, в якому здійснено перехід від літосфери до конвектуючої мантії. За результатами моделювання в океанічних регіонах границя між літосферою і мантією визначається завдяки реології гірських порід і потенціальною температурою конвектуючої мантії. В субконтинентальних регіонах перехід від літосфери до конвектуючої мантії супроводжується зміною складу порід. Крім того, на відміну від стандартного підходу, отриманий в дисертації розв'язок тільки слабо залежить від варіацій теплогенерації в корі в тому сенсі, що дві стаціонарні геотерми, які відповідають різним значенням теплогенерації, але однаковим значенням інших параметрів, зближуються з глибиною. Таким чином, принцип граничної стійкості полягає в тому, що при стаціонарній розвиненій конвекції пограничні шари знаходяться на межі стійкості. Математично принцип граничної стійкості (MSC — marginal stability condition) формулюється як рівність числа Релея критичному значенню, яке визначено для конвективного пограничного шару (CBL — convective boundary layer), в якому здійснено перехід від літосфери до мантії. Крім того, літосфера формує тепловий пограничний шар (TBL — thermal boundary layer), а також включає хімічний пограничний шар (ChBL — chemical boundary layer). У роботі обґрунтовано, що континентальна літосфера співпадає з хімічним пограничним шаром ChBL. Спочатку розглянуто модель, в якій відсутній хімічний пограничний шар ChBL, тобто вважається, що

конвертована рідина є хімічно однорідною. Таке припущення є загально прийнятим для моделей субокеанічної конвекції. Ввівши так звану реологічну глибину H_{rh} , тобто глибину, на якій розміщена основа літосфери, дисертантом визначено, що вона (реологічна глибина) є ключовим параметром, що контролює режим взаємодії мантийної конвекції з літосферою. Якщо реологічна глибина є більшою за потужність хімічного пограничного шару ChBL, тобто $H_{rh} > H_{Ch}$, то основа літосфери лежить на реологічній глибині H_{rh} . Для випадку, коли реологічна глибина є меншою за потужність хімічного пограничного шару, тобто $H_{rh} < H_{Ch}$, тоді хімічний пограничний шар ChBL співпадає з літосферою. Перший випадок спостерігається в субокеанічній мантиї, а другий — в континентальній літосфері. Щоб застосувати принцип граничної стійкості необхідно знати реологію середовища, уміти розраховувати число Релея для конвективного пограничного шару і знати значення критичного числа Релея. У дисертаційній роботі використовується залежне від реології значення числа Релея, що визначене на основі чисельного моделювання.

У **третьому розділі** на основі найповніших сучасних баз даних платобазальтів, карбонатитів і кімберлітів продемонстровано існування виражених просторово-часових кореляцій між цими трьома типами внутрішньоплитового магматизму в Євразії і Африці. На основі геолого-географічних даних показано, що мантийні плюми проникають до підосви континентальної літосфери. Сформовано розширене так зване «правило Кліффорда». Варіації складу магм, що породжуються загальною причиною, вказують на те, що магма виникає в різних умовах, швидше за все, при різному тиску. Найбільш природним поясненням цих спостережень є припущення, що висхідна мантийна течія досягає підосви деплетованої літосфери і слідує її рельєфу. Інакше кажучи, магматизм, що спричиняється дією висхідної мантийної течії, є природним "експериментом" по плавленню в умовах підосви літосфери.

У **четвертому розділі** показано, що вміст рідкісноземельних елементів в клинопіроксені і гранаті закономірним чином змінюється з глибиною. Обговорюються причини і наслідки цього явища.

У **п'ятому розділі** обговорюються причини дивовижної схожості редкісноелементного складу кімберлітів з різних світових провінцій і можливі механізми насичення кімберлітових розплавів рідкісними і розсіяними елементами. Відомо, що однією з характерних і стійких особливостей кімберлітів є їх збагачення рідкісними і розсіяними елементами в порівнянні з «примітивною» мантиєю.

У **розділі шість** розглядається задача про сегрегацію розплаву з частково розплавленого агрегату. На основі отриманих розв'язків обговорюються особливості сегрегації кімберлітів і карбонатитів. Зокрема показано, що для двохфазних систем із величезною відмінністю в'язкості між розплавом і твердою породою стандартна система рівнянь гідродинаміки багатофазних систем може бути доповнена рівнянням нерозривності суміші, що має такий же фундаментальний характер як і рівняння класичної гідродинаміки.

У цьому розділі побудовано чисельні моделі проникності частково розплавлених мінеральних агрегатів. Розглядаються дві моделі: 1) побудовано модель провідності і проникності випадкової системи елементів, які розміщено на гранях зерен кубічної решітки. Відповідні грані моделюються чотирьохполосниками, які зв'язані між собою у вузлах на ребрах решітки; 2) Побудовано модель провідності і проникності частково розправленого бімінерального агрегата, зерна якого мають різні форми і розміри.

Враження від роботи: дисертаційна робота Арясової Ольги Вікторівни 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 з результатами, які отримано іншими методами.

До недоліків роботи можна віднести редакційні помилки. Наприклад, підписи на графіку в розділі 3 (рис.3.2) є на англійській мові. У тексті роботи є присутні помилки редакційного характеру. Як рекомендацію, пропоную зробити порівняльний аналіз результатів моделювання теплового стану літосфери, що ґрунтується на розв'язанні одновимірного рівняння теплопровідності з температурою і тепловим потоком, заданими на поверхні, в якості граничних умов і принципу граничної стійкості (MSC — marginal stability condition), який формулюється як рівність числа Релея критичному значенню, яке визначено для конвективного пограничного шару (CBL — convective boundary layer), в якому здійснено перехід від літосфери до мантії. Редакційні помилки та рекомендації не зменшують цінність роботи.

Основні результати Арясової Ольги Вікторівної опубліковано в 35 публікаціях і доповідалися на міжнародних і вітчизняних наукових конференціях. Вважаю, що робота Арясової О.В. являється хорошою докторською дисертацією, що відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор заслуговує присудження їй 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