

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Асавина Алексея Михайловича

«Коэффициенты распределения в системе расплав- оливин- кальциевый пироксен и фракционирование редких элементов в щелочных расплавах по экспериментальным и природным данным», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.04 – петрология, вулканология.

Главной целью диссертационной работы Асавина А.М. является исследование вариаций коэффициентов распределения редких элементов в расплавах повышенной щелочности на различных этапах их фракционирования и выявление основных факторов, влияющих на изменения величин этих коэффициентов. Объектами исследования избраны щелочные магмы, наиболее близкие к первичным, а именно меймечитовые, пикритовые, щелочно-базальтовые, анкарамитовые и мелилит-нефелинитовые. В качестве продуктов дифференциации щелочных магм изучены фонолиты, трахиты и луявриты. Выполненное исследование актуально по постановке задач и выбору методов изучения процессов распределения редких элементов в эволюции магм. Основным мотивом проведенного исследования, определяющего **актуальность работы** в целом, является недостаточная до настоящего времени изученность вариаций коэффициентов распределения редких элементов в процессах эволюции щелочных магм, причин изменчивости этих величин и степени их отражения в значениях индикаторных микроэлементных отношений. В связи с этим, **новизной данной работы** следует считать получение автором новых величин коэффициентов распределения редких элементов для системы «минерал-расплав» магм повышенной щелочности и оценка возможности их применения в петролого-геохимических исследованиях. Основой работы служат результаты новых экспериментальных исследований процессов кристаллизации щелочных магм и крупное обобщение литературных данных по этой проблеме, а также термодинамические расчеты и наблюдения по равновесным состояниям исследованных магматических систем. Наибольший научный задел автором работы был получен при изучении им внутриплитного магматизма Атлантического океана с выделением нескольких типов первичных магм и исследовании процессов их эволюции. **Достоверность** использованных данных связывается автором с прецизионностью результатов аналитических исследований по определению концентраций редких элементов в породах и минералах и с прямыми наблюдениями в экспериментах процессов плавления и кристаллизации расплавов.

Независимая проверка достоверности данных осуществлялась сопоставлением полученных результатов с многочисленными опубликованными данными по сходным магматическим системам. Необходимая **апробация результатов** проведенного исследования подтверждается публикациями автора, а именно 15 статьями в рецензируемых журналах из списка ВАК и главами коллективных монографий. Результаты работы многократно докладывались на российских и международных конференциях, а разработанная автором база данных по внутриплитному магматизму Атлантического океана получила государственное регистрационное свидетельство.

По результатам исследований автором диссертационной работы сформулированы 5 защищаемых положений, которые приведены в тексте по главам в соответствии с приводимой доказательной базой.

В целом, диссертационная работа Асавина А.М. имеет **объем в 371 стр.**, состоит из 5-ти глав и Заключения. Раздел «Введение» озаглавлен автором как «Цели работы». Текст исследования хорошо иллюстрирован и содержит **152 рисунка и 104 таблицы**. Обращает на себя внимание исключительно детальная проработка результатов предшествующих исследований касающихся темы диссертации, список использованной литературы включает 776 наименований, который занимает 36 страниц от объема работы.

Прежде чем изложить общие данные о содержании глав работы, необходимо отметить некоторое несоответствие данных, приведенных в Разделе «Цели работы», заменяющем раздел «Введение» в самой диссертационной работе и в ее автореферате в разделе «Общая характеристика работы». Так в тексте работы нет раздела «Фактический материал и методы исследования», тогда как он имеется в автореферате и из него становится ясно, что помимо островов Атлантического океана, автором исследовалась, в частности и Маймеча-Котуйская магматическая провинция. Также в работе, в отличие от автореферата, отсутствуют данные о практической значимости исследования.

В **Главе 1**, озаглавленной как **«Коэффициенты распределения. Вариации отношений редких элементов в вулканитах и первичных магмах океанических островов»**, автором приводятся сведения о термодинамической основе понятия коэффициентов распределения редких элементов в системе «минерал-расплав» и о факторах, способных влиять на их величины. Показаны механизмы концентрирования редких элементов в минералах, из которых главным признается процесс изоморфных замещений, а также показаны принципиальные различия между эффективными и равновесными коэффициентами распределения. В разделах главы автор последовательно рассматривает историю исследований по установлению коэффициентов распределения редких элементов для магматических систем, выделяя несколько этапов. Эта информация

представляет собой обзор литературных данных и имеет большое собственное значение, как сводка, позволяющая проследить путь трансформации понятий, вовлечения в исследование все большего числа минералов из магматических пород различного типа и применения все более совершенных методов анализа и экспериментальных подходов вплоть до учета таких факторов, как температура и давление кристаллизации, активность летучих компонентов. В итоге обзора автором отмечен недостаток сведений о коэффициентах распределения для ультраосновных и щелочных магматических расплавов и кристаллизующихся из них минеральных фаз, в частности водосодержащих. Важным выводом автора из литературного обзора является признание факта вариативности коэффициентов распределения даже в рамках одной магматической системы в процессе ее эволюции и изменений термодинамического состояния. В других разделах главы автором показана методология и результаты разработки оригинальной базы геолого-геохимических данных «GIM», объединяющей сведения по внутриплитному океаническому магматизму, главным образом по Атлантическому океану. В сравнении с этой базой показаны существующие аналоги баз данных, оценены их преимущества и недостатки. Детально показана структура разработанной базы, порядок ввода и выборки данных, ее возможности и перспективы развития. В разделе «Анализ петрохимических характеристик внутриплитного магматизма» на основе данных собранных в базе GIM автором показаны результаты обработки геохимических данных по внутриплитному магматизму Атлантического океана и установлены общие закономерности поведения порообразующих и редких элементов при эволюции исходных магм различных типов и их дифференциатов. В результате детального геохимического анализа магматических пород автором для внутриплитного магматизма Атлантики выделены пять типов магм - фойдиты, базаниты, пикриты, щелочные оливиновые базальты и толеиты и показаны их вещественные особенности. Еще одним итогом обработки данных базы GIM с применением GIS технологий стало установление вещественной зональности проявлений внутриплитового магматизма в Атлантике с выделением 8-ми петрохимических провинций проявлений первичных магм, что показано автором в разделах «Петрохимическая зональность внутриплитного магматизма Атлантического океана» и «Редкометалльная зональность внутриплитного магматизма Атлантического океана». Автор справедливо заключает, что установленная вещественная зональность может быть связана как с составом мантийных источников, так и с особенностями процессов генерации первичных магм различной щелочности. Связь результатов региональных геохимических исследований внутриплитного океанического магматизма и установления закономерностей распределения магм различного типа в структуре Атлантики собственно

с темой диссертационной работы усматривается автором в возможной вариативности особенностей распределения редких элементов в системе «минерал-расплав» как на уровне источников магм и их зарождения, так и в процессе эволюции расплавов. Можно считать доказанным вытекающее из проведенного анализа **Первое защищаемое положение** об установлении глобальной пространственной гетерогенности петрохимических и редкометальных характеристик магматизма океанических островов Атлантического океана, но необходимо отметить также, что это положение не является главным в отношении темы исследования.

В Главе 2 «Ультраосновные расплавы» на примере Маймеча-Котуйской магматической провинции автором исследовано распределение редких элементов между минералами вкрапленниками и основной массой ряда ультраосновных вулканитов – меймечитов, щелочных пикритов, анкарамитов (пикрито-базальтов). В разделах главы показаны геологическое положение ультраосновных вулканитов магматической провинции, приведена сводка геохронологических данных, дано петрографическое описание и классификация пород, содержатся данные об их составе и условиях кристаллизации с учетом различных параметров. В других разделах главы автор приводит аналитические методы, используемые для оценки содержаний редких элементов и последующего расчета величин коэффициентов распределения, а также данные о распределении редких элементов в ультраосновных расплавах и минералах и в итоге данные о вариациях коэффициентов распределения. Основные выводы по результатам исследований ультраосновных пород Маймеча-Котуйской провинции заключаются в установлении равновесности вкрапленников оливинов вкрапленников в пикритах и меймечитах с составами основных масс, в получении данных об окислительно-восстановительных условиях кристаллизации оливина и шпинелей и установлении значительных вариаций коэффициентов распределения элементов группы железа (Ni, Co, Cr, Mn). Показано, что при фракционировании оливина в процессах эволюции ультраосновных магм следует ожидать увеличение в остаточных расплавах величин LTR/HTR, Th/U и Nb/Ta отношений. По итогам исследований ультраосновных магматических комплексов пород автором сформулировано **Второе защищаемое положение**, основным мотивом которого является вывод о изменении в результате процессов фракционирования субликвидусных минералов в остаточных расплавах одних редкоэлементных отношений и постоянстве других, в частности Zr/Hf. Это положение в рамках примененных методик анализа следует считать доказанным.

В Главе 3 «Высоко кальциевые первичные щелочные магмы» автором приведены результаты исследований мелилититов, мелилититовых нефеленитов,

турьяитов и лампроитов, выполненные на основе ограниченной коллекции природных образцов Африки и Маймеча-Котуйской провинции, а также на примере искусственных материалов. В разделах главы показаны петрохимические особенности мелилититовых пород, приведены данные об их редкоэлементном составе, а также продемонстрированы основные закономерности в поведении редких элементов, отраженные в полученных коэффициентах распределения, в том числе и по данным проведенных экспериментальных исследований. Для получения данных о распределении ряда редких элементов, а именно Zr и Hf в продуктах экспериментов, автором предложена методика рентгено-спектрального микроанализа с контролем качества анализа по искусственно созданным стандартным образцам с заданными содержаниями этих элементов. Методика эксперимента, а также методика подготовки искусственных стандартов и собственно анализа исключительно подробно излагаются. Выработанный подход позволил автору получить достаточно достоверную информацию о коэффициентах распределения редких элементов для системы «минерал-расплав» в мелилититовых нефелинитах, турьяитах и лампроитах. При этом детально рассмотрены составы кристаллизующихся минеральных фаз и условия их кристаллизации. Результаты экспериментальных исследований и анализа минералов и стекол по оригинальным методикам позволили автору впервые установить характер вариаций коэффициентов распределения Zr и Hf для клинопироксенов, флогопита, мелилита и магнетита, а также TR для мелилита в высококальциевых магмах и сформулировать в соответствующем содержании **Третье защищаемое положение.**

Замечанием к этой главе следует считать отсутствие данных о приборной базе локального микроэлементного анализа с использованием лазерного источника.

В Главе 4 «Щелочно-базальтовые магмы» приведены результаты исследований одной из наиболее распространенной среди внутриплитных океанических магматических комплексов группы субщелочных базальтоидных пород. Автором предполагается, что различные типы пород этой группы отражают процессы эволюции единых магматических систем, и установление вариаций коэффициентов распределения редких элементов для них будет отражать процессы кристаллизации и дифференциации исходных магм в промежуточных очагах. Материал для исследований щелочно-базальтовых комплексов пород океанических островов в ряду от анкарамитов до трахиандезитов и трахитов получен автором как лично, так и предоставлен ему другими исследователями. В разделах главы приведены данные по петрохимии пород океанических островов щелочно-базальтового типа и данные по их редкоэлементным характеристикам. Поведение в процессах эволюции щелочно-базальтовых магм ряда редких элементов рассмотрено подробно и даже излишне детально, повторяя известные ранее установленные

закономерности. Из замечаний к приведенному табличному материалу о составах пород следует отметить отсутствие данных об аналитических методах и расшифровки номеров проб и образцов. Если автор считает, что упоминание о целой группе аналитических методов приведенных в одной из глав достаточно для подтверждения качества исследований, то это не так. Следовало бы для отдельных таблиц или их групп по типу содержания дать указания о примененных методах анализа. Не вполне понятен смысл выделения этапов эволюции рассматриваемых магматических систем океанических островов по типам пород, которые сами по себе являются членами единых дифференцированных серий пород или самостоятельными проявлениями. Неудачным является выделение в главе отдельного раздела в качестве заключения по предыдущему разделу под наименованием «Заключение по разделу фракционирование редких элементов». В этом «разделе» кратко повторяются выводы уже изложенные в предыдущем. В заключительном разделе главы «Вариации коэффициентов распределения в щелочно-базальтовых сериях» и собственно в Заключении по главе отмечено, что анализ вариаций коэффициентов распределения для почти 20 редких элементов в щелочно-базальтовых расплавах для пироксенов, оливинов, магнетита и плагиоклаза показал равновесие минералов-вкрапленников с расплавами, отвечающими составу основных масс. Установлено, что в пределах каждой группы пород (анкарамиты, щелочные оливиновые базальты, трахибазальты, трахиандезиты) выделяются собственные тренды дифференциации, что подтверждается различными трендами вариаций коэффициентов распределения. Показано, что каждый из породообразующих субликвидусных минералов в щелочно-базальтовых системах обладает собственными закономерностями в распределении редких элементов в зависимости от температуры кристаллизации и состава расплава. По результатам исследований процессов распределения редких элементов в ходе кристаллизации щелочно-базальтовых магм автором предложено **Четвертое защищаемое положение**, основой которого является утверждение о том, что в щелочно-базальтовых расплавах эффект уменьшения температур, увеличения щёлочности и фракционирование субликвидусных фаз в процессе их дифференциации не приводит к существенным изменениям величин коэффициентов распределения редких элементов. Это заключение может быть принято.

Замечанием к 4-ой главе является недостаточное обоснование равновесных условий кристаллизация для целой группы минералов в щелочно-базальтовом расплаве, соответствующем по составу основной массе пород. Дополнительным обоснованием такого равновесия могло бы быть демонстрация условий равновесия между кристаллизующимися минералами, но этого не сделано.

В Главе 5 «Щелочные расплавы заключительных этапов фракционирования»

рассмотрены вариации коэффициентов распределения редких элементов в продуктах дифференциации щелочных расплавов - трахитах, фонолитах и их субвулканических аналогах. Автором справедливо отмечается, что если на начальных этапах эволюции первичных магм относительное распределение редких элементов в субликвидусной системе «минерал-расплав» не столь отчетливо, то на последующих этапах с появлением различных по составу кристаллизующихся фаз и их фракционирования коэффициенты распределения, а также собственно состав магм начинают играть определяющую роль в формировании вещественного состава остаточных расплавов. В разделах главы рассмотрены вариации коэффициентов распределения редких элементов для высококремнеземистых кварц-нормативных расплавов с относительно невысоким содержанием щелочей, высококалиевых щелочных расплавов, а также высокощелочных нефелин-нормативных и агпаитовых расплавов. Как и в предыдущих главах, большое внимание автором уделено результатам предшествующих исследований процессов дифференциации щелочных расплавов с приведением обзора литературных данных по коэффициентам распределения редких элементов для свойственных им минеральных фаз. Автором исследованы вариации коэффициентов распределения редких элементов для трахитов и фонолитов. Для расчетов коэффициентов вновь исследованы составы породообразующих минералов и основных масс пород. Новым при этом является получение автором значений коэффициентов распределения не только для полевых шпатов и пироксенов, но и для фельдшпатоидов (гаюин, нефелин). В разделе главы «Коэффициенты распределения в агпаитовых расплавах, связанных со щелочными интрузиями» автором приведены данные по порфировидным типам пород, для которых возможен расчет коэффициентов распределения «минерал-расплав». Автором были получены коэффициенты распределения для щелочных пироксенов, амфиболов, щелочных полевых шпатов и нефелина. При этом отмечена значительная роль в эволюции щелочных дифференциатов летучих компонентов, в частности фтора. Численные модели фракционирования первичных расплавов щелочно-базальтовых серий пород рассмотрены в отдельном разделе 5-ой главы. Автором проведена проверка моделей кристаллизационной дифференциации и ее роли в формировании последовательных или дискретных рядов составов пород. Выводом проведенного исследования явилось то, что вулканические породы океанических островов нельзя объединить единым процессом их образования из одного первичного расплава, тогда как следует предполагать существование трех независимых типа первичных магм – анкарамит-пикритовой, щелочно-оливин-базальтовой и базанитовой. В завершающем главу разделе автор приводит результаты

моделирования процессов фракционирования редких элементов в магмах островодужных обстановок.

В целом, на основе данных, изложенных в 5-й главе автор приводит **Пятое защищаемое положение**, главным содержанием которого является вывод о значительном уменьшении коэффициентов распределения ряда редких элементов в пользу остаточных расплавов в условиях возрастания щелочности и слабого изменения температур равновесия в продуктах дифференциации щелочных магм. Это, по мнению автора, может приводить к формированию рудных концентраций на заключительных этапах эволюции агпаитовых щелочных расплавов. Данное положение может быть принято не в полной мере. Представляется, что в этом случае значительную роль в распределении редких элементов принимают на себя акцессорные фазы, которые в достаточной степени в работе не исследованы.

В Заключении диссертационной работы автор приводит главные результаты исследований причин вариаций коэффициентов распределения для главных типов первичных щелочных магм и их дифференциатов. В этом последнем разделе автор повторяет формулировки защищаемых положений.

Помимо отмеченных замечаний по главам диссертационной работы следует указать, что в тексте, в целом, отмечается ряд формальных и принципиальных недочетов. Они касаются не только несколько небрежного оформления текста исследования, рисунков и таблиц, но и приведения в тексте таких неточных выражений, как «Доли миналов рассчитаны на 3 катиона: Fo –форстерит, Fa – фаялит, La – ларнит» (см. таблицу 4.3) и т.д. Примеров таких формальных ошибок в тексте достаточно много, они касаются и подписей к рисункам и заголовка нескольких таблиц. Имеются и простые грамматические и орфографические ошибки, которые оппонент не считает нужным комментировать. Следует отметить, что такая крупная работа, базирующаяся не только на полученных автором материалах, но и на детальном обобщении литературных данных требовала бы более тщательного редактирования.

Автореферат отражает структуру и содержание выполненной диссертационной работы, включает все необходимые сведения о проведенном исследовании и соответствует требованиям ВАК. В автореферате отмечены актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, отражены степень ее апробации и использованный фактический материал. Следует отметить недостаточно хорошее представление в автореферате рисунков, которые плохо читаются из-за их подготовки в различных форматах и программах, не относящихся к графическим векторным редакторам.

Заключение. Характеризуя диссертационную работу Асавина А.М. в целом, следует отметить, что она представляет собой завершенное петрологическое научное исследование, и как по актуальности выполненных исследований, так и по степени их детальности и результативности превосходит рамки квалификационных работ, представляемых в области Наук о Земле на соискание ученой степени кандидата наук. Несмотря на высказанные замечания к оформлению и содержанию по тексту работы, материалы исследования имеют большое собственное значение и дают необходимые предпосылки для продолжения изучения процессов распределения редких элементов в магматических системах, к поиску новых подходов и применению новых аналитических методик. Особенно это касается дальнейшего продолжения и углубления в изучении сложных и многообразных по типам и минеральному составу щелочных магматических пород. Оппонент отмечает несомненный по существу работы личный вклад соискателя в выполнение исследований, корректность всех необходимых ссылок на предшествующие исследования.

Необходимо заключить, что актуальность, научная новизна, достаточная апробация результатов, а также их научная и практическая значимость дают основание считать, что представленная диссертационная работа Асавина Алексея Михайловича соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.04 – петрология, вулканология.

Отзыв официального оппонента представил

Перепелов Александр Борисович

доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник,
заведующий лабораторией геохимии гранитоидного магматизма и метаморфизма
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геохимии им.
А.П. Виноградова Сибирского Отделения Российской Академии наук

Телефон (3952)429556

Факс (3952)427050

E-mail: alper@igc.irk.ru

Дата: 27 января 2017 г.



Подпись *Перепелова А.Б.*
ЗАВЕРЯЮ
Зав. канцелярией
ИГХ СО РАН *Перепелов*