

ОТЗЫВ

на диссертацию Елены Александровны Хромовой
«Возраст и петрогенезис пород щелочно-ультраосновного карбонатитового
Белозиминского массива (Восточный Саян)», представленной на соискание ученой
степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.3 – петрология,
вулканология

Работа Е.А.Хромовой посвящена крайне интересной проблеме петрологии – образованию и эволюции флюидно-магматических систем с щелочно-ультраосновными, щелочными и карбонатитовыми расплавами.

Несмотря на то, что карбонатиты и связанные с ними силикатные расплавы активно изучаются как экспериментально, так и на природных объектах уже более 50 лет, многие вопросы генезиса и эволюции карбонатитовых расплавов остаются спорными или не находят объяснения, удовлетворяющего современную науку. Это касается механизма формирования собственно карбонатитовых расплавов, а также расплавов, которые будут для них первичными и их источников, эволюции состава карбонатитов и перехода карбонатит-содержащей магматической системы к гидротермальной стадии, и др. Большое внимание в современных исследованиях уделяют проблеме накопления в карбонатитах и связанных с ними карботермалитах РЗЭ и других редких металлов, так как с карбонатитами связаны ведущие геолого-промышленные типы месторождений этих критических для развитой экономики металлов. Решение именно этих вопросов стало целью представленной работы. В связи с этим избранная Е.А.Хромовой тема диссертации представляется весьма актуальной как в научном плане, так и с точки зрения практической оценки перспектив на редкометальное оруденение разнообразных проявлений мантийного магматизма.

В соответствии с поставленной целью, диссертантом проведен комплекс исследований, включавших, помимо минералого-петрологического изучения пород, большой объем разнообразных изотопных исследований: определение изотопного возраста пород $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом по флогопиту и изучение изотопного состава Pb в 6 пробах карбонатитов и силикатных пород Белозиминского массива, а также определение изотопного состава Sr и Nd валовых проб пород и изотопного состава Hf в цирконах. Геохимические исследования минералов выполнены LA-ICP-MS методом. Таким образом, диссертантом получен большой объем аналитических данных современными методами в авторитетных лабораториях. Эти данные в целом грамотно интерпретированы и удачно использованы для решения поставленных задач что, в конечном счете, определяет достоверность полученных Е.А. Хромовой результатов.

Диссертация объемом 182 стр., состоит из 4 глав, которым предшествует введение, содержащее стандартную информацию о целях и задачах, научной новизне, значимости, и защищаемых положениях.

Глава 1 «Карбонатиты и связанные с ними месторождения (обзор проблемы)» представляет собой вводную часть работы. Она содержит краткую историческую справку об открытии карбонатитов и признании их магматической природы, рассмотрение механизмов формирования карбонатитовых расплавов, включая выплавление из карбонатизированных мантийных перидотитов, несмесимость силикатной и карбонатной жидкостей и фракционную кристаллизацию кремний-недосыщенных расплавов, а также основные геолого-промышленные типы месторождений, связанных с карбонатитами.

В целом данная глава является компактным содержательным обзором проблемы карбонатитов, в ней акцентированы основные вопросы, рассматриваемые в диссертационной работе.

Однако к этой главе имеются замечания. В качестве общих отметим следующие. Среди рассматриваемых работ отсутствуют последние публикации, датируемые 2020-2023 годами. Это приводит к тому, что в тексте не отражены некоторые последние тенденции в изучении карбонатитов. Например, при рассмотрении плавления карбонатизированных перидотитов не упомянут вариант плавления за счет изменения окислительно-восстановительных условий, который сейчас рассматривается как основной механизм формирования первичных карбонатитовых расплавов (см. Yaxley et al., 2022, и ссылки в этой работе <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-032320-104243>). Также при обсуждении классификации карбонатитов не учтены новые предложения по генетической классификации на основе минералогии (Yaxley et al., 2022) и дополнения к классификации на первичные карбонатиты и карботермалиты, которые могут быть связаны с сиенитами (Mithell, Gittens, 2022 <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106861>).

Не всегда понятно отнесение известных карбонатитовых проявлений к тому или иному типу по происхождению, например, почему Ковдор и Кандагуба отнесены к типу карботермальных, а также нельзя считать доказанным, что при становлении массива Турий Мыс не была проявлена несмесимость карбонатных и силикатных расплавов.

В качестве пожелания можно отметить, что было бы правильно в этой главе привести перечень нерешенных проблем в петрологии и металлогении карбонатитов, на решение которых направлена данная работа, например, почему карбонатиты намного сильнее обогащены легкими РЗЭ чем высокозарядными элементами? Или почему пироклор, очень хорошо растворимый в карбонатных расплавах, кристаллизуется из них достаточно рано и обильно?

В Главе 2 «Геологическая характеристика Зиминского рудного района и Белозиминского массива» охарактеризован Зиминский рудный район, дана история геологического изучения Белозиминского массива, описано геологическое строение щелочно-карбонатитовых массивов этого района и наиболее подробно рассмотрен Белозиминский массив. Геологическая характеристика дана на основе многочисленных публикаций. Оригинальные данные автора приведены в разделе 2.5. «Возраст Белозиминского массива». Ранее уже был установлен возраст кальцитовых карбонатитов (543 ± 3 млн лет, Багдасаров, Вороновский, 1980) и сиенитов (643 ± 3 млн лет, Ярмолук и др., 2005; 645 ± 5 млн лет, Salnikova et al., 2019), т.е. датировки указывали на существенно более молодой возраст карбонатитов относительно сиенитов того же массива. Автором диссертации было выполнено изотопное датирование доломитовых карбонатитов $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом по флогопиту, которое показало их возраст в 645 ± 5 млн лет. Таким образом, было показано, что карбонатиты одновозрастны щелочным породам массива. Этот вывод был подтвержден изучением изотопного состава Pb в 6 пробах карбонатитов и силикатных пород Белозиминского массива. На диаграмме в координатах $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ все точки образуют изохрону с возрастом 631 ± 11 млн лет, что в пределах ошибок согласуется с изотопными возрастными карбонатных и силикатных пород массива, полученными другими методами. Соответственно, эти данные надежно подтверждают первое защищаемое положение о возрасте пород Белозиминского массива в 645 млн лет.

Далее автор рассматривает геотектонический контекст этого временного интервала, в который вдоль южного и юго-западного края Сибирского кратона был сформирован целый ряд щелочно-карбонатитовых массивов. Автор склоняется поддержать точку зрения об определяющем этот магматизм относительном движении плит.

В целом эта глава дает достаточную геологическую характеристику массивов Зиминского района, а оригинальные изотопные датировки хорошо **обосновывают первое защищаемое положение**, которое удачно обобщено таблицей из Рис. 2.5.3.

Тем не менее, к Главе 2 можно сделать следующее замечание, касающееся геотектонической интерпретации полученных возрастов. Геотектонический контекст рассмотрен слишком приблизительно, хотелось бы видеть в этом разделе хотя бы краткое описание событий в области Палеоазиатского океана около 640 млн лет. Автор мог бы воспользоваться, например, работой (Хераскова и др., 2015) и рядом других. Почему на Рис. 2.5.3. положение неопротерозойских щелочно-карбонатитовых массивов показано на физической карте, а не на палеорекострукции соответствующего возраста? На рисунках 2.1.1 и 2.4.1 нет возрастов и названий свит, хотя в тексте они перечислены.

Глава 3 «Петрография и минералогия Белозиминского массива» содержит петрографическую характеристику пород массива, как силикатных, так и карбонатитов, и рассмотрение составов минералов, как по главным компонентам, так и по элементам-примесям (клинопироксена, нефелина, амфибола, слюды, перовскита, ильменита, карбонатов и др.). Автором особенно детально были исследованы составы пироксенов, причем в них также изучены твердофазные включения. Далее для сквозных минералов силикатных пород (клинопироксен, амфибол, апатит, перовскит и др.) и карбонатитов (пироксен) рассмотрена эволюция составов от ранних магматических фаз к поздним, а также на гидротермальной стадии. Автор показала, что по мере эволюции магматической системы возрастает активность кремния и щелочей и происходит увеличение фугитивности кислорода. Такой характер эволюции системы указывает на контроль механизмом фракционной кристаллизации.

Петрографические описания дают ясное представление о породах массива.

Несомненно, что представленные в этой главе результаты обширных по охвату пород и минералов, и при этом детальных, выполненных современными методами минералого-геохимических исследований вносят значительный вклад в изучение не только массива Белая Зима, но и в целом важны для щелочно-ультраосновных массивов с карбонатитами.

Таким образом, большим объемом минералого-геохимических данных **обосновано второе защищаемое положение** о том, что формирование силикатных пород Белозиминского массива связано с процессом фракционной кристаллизации, а также **третье защищаемое положение** об эволюции составов минералов группы пироксенов в карбонатитах и ранней кристаллизации Nb- и Zr-содержащих минералов, что приводит к обеднению этими элементами поздних карбонатитов и возрастанию в них R3Э, Ba, U, Fe.

Несмотря на высокое качество минералого-геохимических исследований, представленных в третьей главе, к ней имеется ряд замечаний. В качестве общих замечаний отметим:

- отсутствует расшифровка петрографической позиции изученных минералов, например, клинопироксены в разных породах – это праймокристы, кумулус, ойкокристы, хадакристаллы и пр.?, а также позиции анализируемой области в кристалле (ядро, кайма). Из таблиц 3.7.1 – 3.7.3 видны сильные вариации составов клинопироксенов в пределах одной породы, но информации о позиции анализа нет ни в тексте, ни в таблицах. Или еще пример: в йолитах амфибол представлен ферропаргаситом, ферроэденитом, и магнезиогастингситом – как эти различия распределены в породе и соотносятся между

собой? Эта информация важна для прослеживания эволюции составов минералов в последовательных фазах внедрения;

- не проведена проверка модели фракционной кристаллизации количественными, например, масс-балансовыми, расчетами;

- отсутствуют количественные оценки условий кристаллизации минералов, хотя полученные автором данные в ряде случаев позволяли такие оценки провести, например, оценки фугитивности кислорода по составам ильменита и ульвошпинели или геохимии оливина (V, Sc) или перовскита (Nb). Два последних замечания носят скорее характер пожеланий, однако присутствие этих расчетов в работе могло бы повысить уровень доказанности второго защищаемого положения.

Отметим некоторые частные замечания к этой главе:

- стр. 46 – не существует твердого раствора между магнетитом и ильменитом. Автор может обратиться к своему же рисунку 3.7.9, где обозначены твердые растворы магнетит – ульвошпинель и ильменит – гематит. Ламели ильменита в магнетите указывают на окислительный процесс (так называемый «окислительный» распад).

- стр. 51 – почему калиевый полевой шпат представлен вкрапленником?

- стр. 54 – почему автор считает, что скелетные формы оливина означают замещение? Скелетные кристаллы оливина возникают при быстрой кристаллизации, либо при растворении. На фото шлифов (Рис. 3.4.2) скелетного оливина не видно.

В Главе 4 «Петрохимические и геохимические особенности пород массива» приведены сведения о петрохимии и геохимии всех основных пород Белозиминского массива, как силикатных, так и карбонатных, Sr-Nd-Pb изотопная характеристика пород, а также Lu-Hf изотопный состав цирконов из карбонатитов. На основании этих оригинальных данных автор расшифровывает поведение P3Э, Nb, Zr в ходе становления массива и показывает, что эволюция от ранних мельтейгитов к поздним нефелиновым сиенитам протекала с уменьшением содержаний P3Э и Nb, и ростом содержаний Zr. Для объяснения такого поведения редких элементов на основе собственных данных и результатов работ предшественников диссертант подтверждает модель формирования массива за счет фракционной кристаллизации карбонатно-силикатного расплава и несмесимости силикатного и карбонатного расплавов. Таким образом, в этой главе также обосновывается **третье защищаемое положение.**

На основании изотопных данных обсуждается источник первичных расплавов, в качестве такового предполагается гетерогенный умеренно деплетированный мантийный субстрат. Коровая контаминация в формировании изотопного состава пород не имела

большого значения; обогащение литосферной мантии происходило за счет карбонатного метасоматического агента; мантийный субстрат содержал гранат и флогопит.

Изотопный состав Hf в цирконах согласуется с выводом о характере источника расплавов и указывает на некоторую роль коровой контаминации в поздних нефелиновых сиенитах.

В качестве замечаний к этой главе отметим:

- отсутствуют сведения о дисперсии при сравнении средних содержаний в породах (Рис. 4.4.3), что снижает аргументацию характера их распределения;

- характеристика мантийного источника дана в очень общих терминах и не увязана с геодинамической обстановкой формирования массива;

Заключение весьма лаконично суммирует основные выводы работы.

Резюмируя обзор диссертационной работы, отметим, что автору удалось для хорошо изученного объекта получить новые результаты, особенно отметим расшифровку причин вариаций содержаний редких элементов в последовательных дифференциатах и ликвантах. Несомненно, что обширный геохимический материал по минералам массива будет востребован многими исследователями щелочных пород и карбонатитов.

Сделанные замечания не снижают общего положительного впечатления о представленной работе, основные положения которой опубликованы в 5 статьях в научных журналах, в том числе индексируемых в международных базах WOS и Scopus, и рекомендованных ВАК Минобразования РФ, а также докладывались на всероссийских конференциях.

В целом, работа Елены Александровны Хромовой «Возраст и петрогенезис пород щелочно-ультраосновного карбонатитового Белозиминского массива (Восточный Саян)» отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям как по широте, важности и научной значимости разработок, так и с точки зрения новизны и достоверности представленного материала. Автореферат отражает основные положения диссертации. Считаю, что Елена Александровна Христова заслуживает искомой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.3 – петрология, вулканология.

Анна Андреевна Носова

доктор геолого-минералогических наук, специальность 25.00.04 – петрология, вулканология, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), лаборатория Петрографии.

Почтовый адрес: 119017, Москва, Старомонетный пер., 35

Электронная почта: nosova@igem.ru, ilsanora@mail.ru

Телефон: +79167052803

Я, Носова Анна Андреевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись



28 августа 2023 года

Подпись руки *Носовой А.А.*
удостоверяется.
Заведующий канцелярией Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института геологии рудных
месторождений, петрографии, минералогии и геохимии
Российской академии наук МИНОБРНАУКИ России

