

**Отзыв официального оппонента**  
**на диссертацию Крука Михаила Николаевича «Минералогия и петрогенезис**  
**ультраосновного щелочного карбонатит-фоскоритового комплекса Арбарастах,**  
**Республика Саха (Якутия)», представленную на соискание ученой степени кандидата**  
**геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 – Минералогия,**  
**кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.**

В диссертационной работе Крука Михаила Николаевича представлены результаты комплексных минералогических, геохимических и геохронологических исследований комплекса пород ультраосновного щелочного карбонатит-фоскоритового комплекса Арбарастах, расположенного в Республике Саха (Якутия).

Актуальность выбранной темы не вызывает сомнений и обусловлена нижеследующим. Изучение щелочных карбонатитовых комплексов имеет фундаментальное значение, так как они являются важным источником информации для расшифровки глубинных мантийных процессов. Кроме того, с щелочными карбонатитовыми комплексами связаны месторождения редкоземельных и редких элементов, апатита, флюорита и других полезных ископаемых. Следует также отметить, что вопрос генезиса фоскоритов в составе таких комплексов является дискуссионным.

Малая изученность и уникальность ассоциации пород комплекса Арбарастах определили цель работы К.Н. Крука как реконструкцию петрогенезиса пород комплекса Арбарастах. Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи: петрографическая и минералогическая характеристики основных разновидностей пород комплекса, выявление минералогических индикаторов эволюции магматической системы; оценка Р-Т параметров кристаллизации айлликитового расплава; определение времени формирования основных разновидностей пород, слагающих этот комплекс; петролого-геохимическая характеристика пород комплекса и реконструкция наиболее вероятных источников вещества; сопоставление полученных результатов с опубликованной информацией по ультраосновным щелочным карбонатитовым комплексам, содержащим фоскориты и ультраосновные лампрофиры, а также неопротерозойским ультраосновным щелочным карбонатитовым комплексам юга Сибирского кратона; и создание петрогенетической модели образования комплекса Арбарастах.

Работа основана на представительном каменном материале, который включал основные разновидности пород комплекса Арбарастах: щелочные силикатные породы, карбонатиты, фоскориты и ультраосновные лампрофиры. Работа выполнялась на образцах из коллекции лаборатории рудоносности щелочного магматизма ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Для изучения петрографических и минералогических особенностей пород использовались методы оптической и электронной микроскопии и микрозондовый анализ. Геохронологические исследования выполнены методами  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  и U-Pb изотопного датирования. Петрохимические, геохимические и изотопные характеристики пород получены при помощи рентгено-флуоресцентного анализа и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

Соискателем получен большой объем информации с применением комплекса современных аналитических методов. Эти данные использованы для решения поставленных задач и грамотно интерпретированы с учетом современных петрологических подходов. Сформулированы три защищаемых положения, которые, в целом, хорошо обоснованы и логичны исходя из полученных результатов. Основные

научные положения диссертации опубликованы в 5 статьях в рецензируемых высокорейтинговых журналах, рекомендуемых ВАК и индексируемых в международной библиографической базе данных Scopus (3 из них в журналах первого квартиля и одна – второго), а также докладывались на международной и всероссийской конференциях. Таким образом, степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, является высокой.

Диссертация объемом 187 страниц, включает введение, 7 глав, заключение, список литературы, 56 рисунков и 20 приложений.

Введение включает стандартную информацию, в которой в полной мере отражены актуальность работы, фактический материал, личный вклад автора, цели и задачи, новизна и практическая значимость полученных результатов, а также приведены сформулированные защищаемые положения.

Первая глава посвящена состоянию проблемы изучения щелочных карбонатитовых комплексов. Рассмотрена история изучения карбонатитов, приведены классификационные понятия карбонатитов, представлены основные генетические модели образования карбонатитов и фоскоритов. В завершении главы читатель может ознакомиться с геологической изученностью комплекса Арбарастах.

В главе 2 соискатель приводит подробное описание методов исследования вещества. Аналитические методы и механизмы обработки полученных результатов охарактеризованы исчерпывающе.

В главе 3 рассмотрено географическое и структурно-геологическое положение комплекса Арбарастах. Показана связь массива с другими щелочными карбонатитовыми комплексами в южной части Сибирского кратона. Приводятся свидетельства, что комплекс Арбарастах представляет собой классическую концентрически-зональную многофазную интрузию. Также в данной главе дается описание характера пространственной связи различных пород внутри комплекса.

Глава 4 посвящена геохронологическим исследованиям. Приведены возрастные интервалы образования комплекса Арбарастарх, которые находятся в пределах 657-637 млн лет. Полученные автором данные согласуются с полученными ранее результатами для пород комплекса. Кроме того, возрастной интервал пересекается с возрастными значениями для других щелочных комплексов, расположенных в краевых частях юга Сибирского кратона.

Пятая глава является одной из основных в диссертации и посвящена петрографии и минералогии пород комплекса Арбарастах. Соискатель приводит подробное описание минералогических характеристик всех разновидностей пород, а также рассматривает особенности химического состава главных и второстепенных минералов комплекса. Полученные результаты позволили автору выделить три группы пород – айлликиты, «фоскоритовую группу», в которую входят фоскориты и апатит-доломитовые карбонатиты, и «щелочно-силикатно-карбонатитовую» группу, которая включает пироксениты, ийолиты, нефелиновые сиениты и пироксен-флогопитовые карбонатиты. Данные группы пород, по мнению автора, не могут являться продуктами единого процесса кристаллизационной дифференциации. Произведены расчеты параметров кристаллизации ультраосновных лампрофиров, температурный интервал оценен в пределах от 1170 до 1300°C, при значениях  $fO_2$  вблизи буфера FMQ. Детальное изучение оливинов, минералов группы шпинели, ильменитов и флогопитов айлликитов позволяет предположить, что данные породы являются наименее дифференцированной

разновидностью по сравнению с другими породами комплекса. На основе 5 главы сформулировано первое защищаемое положение.

На примитивный характер айлликитового расплава также указывают петролого-геохимические и изотопные характеристики пород, рассматриваемые в главе 6. Петрологические характеристики айлликитов, а именно высокие концентрации Ni, Sr и Mg позволяют соискателю сделать вывод, что ультраосновные лампрофиры сформированы из наиболее примитивного расплава. Также в главе приведена изотопная характеристика пород комплекса Арбарастах, рассчитаны тренды ассимиляции-фракционной кристаллизации для определения возможности коровой контаминации. На основе проведенного моделирования было рассчитано, что для получения наблюдаемых вариации изотопных характеристик Sr, Nd и Pb, необходимо было ассимилировать до 70% корового вещества с высокой скоростью метасоматической фильтрации огромного объема карбонат-содержащего расплава, что представить в природных условиях весьма проблематично. Соискатель предлагает альтернативную модель, в которой данные изотопные характеристики могут быть получены при взаимодействии астеносферной и субконтинентальной мантии. На основании особенностей петрохимического состава айлликитов, автор предполагает, что первичный расплав для пород комплекса был образован при частичном плавлении метасоматизированных гранатовых перидотитов. На основе разделов 5.4.2 и 6.1 сформулировано второе защищаемое положение. Результаты, приведенные в главе 6, являются основой для третьего защищаемого положения.

В седьмой главе М.Н. Крук даёт логичное обоснование, почему существующие на сегодняшний день модели образования щелочно-карбонатитовых комплексов, содержащих фоскориты, не применимы для комплекса Арбарастах. Автор предлагает свою модель, в которой примитивный расплав был схож с айлликитовым, и образуется в ходе низкой степени частичного плавления метасоматизированного мантийного источника. Некоторые порции этого расплава остаются в промежуточных камерах в коре, и обнаруживаются в виде даек на поверхности в пределах комплекса. Основная же часть расплава, после выделения пироксенового куммулата, испытывает ликвацию, распадаясь на силикатную и обогащенную Fe и P карбонатную несмешиваемые жидкости. Кристаллизация силикатной магмы привело к формированию ийлоитов и нефелиновых сиенитов, а карбонатитовой – фоскоритов и апатит-доломитовых карбонатитов. Последние, проникая в уже закристаллизованные пироксениты, метасоматизировали их в разной степени, результатом чего стало образование пироксен-флогопит кальцитовых карбонатитов.

В заключении представлены выводы, полученные в ходе работы. Исследования М.Н. Крука позволяют предполагать, что становление пород комплекса Арбарастах является сложным длительным многостадийным процессом, включающим в себя сочетание процессов фракционной кристаллизации, ликвации и карбонатного метасоматоза.

Суммируя обзор работы, отмечу, что соискателем получен большой объем новых данных, проведена грамотная интерпретация результатов исследования. Впервые были рассмотрены эволюционные тренды составов главных и второстепенных минералов пород комплекса. Впервые дана детальная вещественная характеристика ультраосновных лампрофиров. Впервые построена петрогенетическая модель формирования пород комплекса Арбарастах.

Имеется ряд замечаний технического характера, которые немного портят впечатление о диссертации, являющейся при этом в плане смыслового научного содержания великолепной.

1) В работе много опечаток (в частности, в русских словах присутствуют латинские буквы), имеются орфографические и грамматические ошибки, не согласованность в окончании слов. В частности, во введении в первом защищаемом положении присутствует лишняя запятая – «(составы минералов групп оливина и шпинели, флогопитов, ильменитов)», а в третьем – отсутствует – «Пироксениты, ийолиты фоскориты, карбонатиты и айлликиты». Следует отметить, что в тексте диссертации второе защищаемое положение написано с запятой.

2) В работе присутствуют разные стили шрифтов и разный цвет шрифта в одном абзаце.

3) Следует приводить легенду с символами для всех рисунков. Например, на рис. 7.1 не обозначено какой символ какой породе соответствует, что затрудняет понимание текста. Руководствуясь логикой, что символы на других рисунках соответствует породам, приходится возвращаться к ним.

К работе имеются замечания/комментарии дискуссионного и рекомендательного характера.

1) В главе 4 приводятся детальные геохронологические исследования различных пород комплекса Арбарастах  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  и U-Pb методами. По полученным данным делаются следующие важные выводы: 1) о длительной истории становления комплекса Арбарастах и многоимпульсном характере внедрение магм, с формированием различных типов пород, представленных в комплексе; 2) полученный возрастной интервал коррелирует с возрастными значениями для других щелочных комплексов на юге Сибирского кратона, которые характеризуются близкими типами редкометальных рудопроявлений и месторождений. Последний аргумент позволяет автору в последующем проводить аналогии между изучаемым объектом и другими комплексами при построении петрогенетической модели образования комплекса Арбарастах. Учитывая важность сделанных выводов на основе первой главы для дальнейшей интерпретации данных, возможно, следовало их вынести в качестве отдельного защищаемого положения.

2) В первом защищаемом положении на основании прослеженной эволюции состава «сквозных» минералов выделаны три когерентные группы пород комплекса Арбарастах. В целом, из полученных данных, приведенных в разделе 5.4.1, положение хорошо обосновано. Однако читателю требуется детальное прочтение главы, чтобы провести структурированное сопоставление данных, которое позволяет оценить обоснованность выводов. На мой взгляд, в конце раздела 5.4.1 перед формулировкой защищаемого положения следовало привести суммированные аргументы для выделения групп. Например, привести главные свидетельства, почему такие-то породы отнесены к общей щелочно-силикатно-карбонатитовой группе на основании сходства эволюции состава; или на основании каких основных характеристик состава минералов айлликиты выделены в отдельную группу; и так далее.

3) На мой взгляд, в Главе 3, которая, по сути, является обобщением по обзору литературных данных о состоянии изученности комплекса Арбарастах и оригинальных геологических наблюдений, можно было бы привести более расширенную информацию. Глава состоит всего из 3 страниц. В частности, полезным было бы привести, если такая информация имеется, схему последовательности образования пород по геологическим

наблюдениям. В работе особое внимание уделяется айлликитам. Исходя из геологической схемы (рис. 3.1в), и по тексту публикации, дайки айлликитов являются последней (или одной из последних) фазой внедрения. Об этом могут говорить и геохронологические данные. Такая информация по геологическим наблюдениям в Главе 3 была бы очень полезной. Сопоставление последовательности образования пород, основанное на минералогическом и геохимическом изучении, с геологическими наблюдениями, усилило бы петрогенетическую модель формирования комплекса Арбарастах и работу в целом.

4) В главе 7, посвященной петрогенетической модели формирования комплекса Арбарастах, при внимательном прочтении требуются некоторые усилия, чтобы в голове суммировать схему, дающую представление о петрогенезисе пород комплекса. Если бы автора добавил рисунок-схему петрологической модели, это бы улучшило работу. Следует отметить, что такая схема (или подобная) уже была составлена соискателем и опубликована им в статье – Kruk M.N., Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Izbrodin I.A. Chemical evolution of major and minor minerals in rocks of the Arbarastakh Complex (Aldan shield, Republic of Sakha, Yakutia). // Geosystem and Geoenvironment. 2024.

5) В работе делается вывод, что айлликиты являются наиболее примитивными породами комплекса Арбарастах. При этом они являются наиболее поздними фазами внедрения в контексте геологического строения комплекса. На основе интерпретации данных, автор делает вывод, что родоначальной магмой для комплекса является расплав по составу близкий к айлликитам. В тексте имеются основания для этого. Наглядная схема, предложенная в предыдущем комментарии, подчеркнула бы данный вывод автора.

6) Автор пишет – «На наш взгляд, породы комплекса Арбарастах также были сформированы из примитивного обогащенного карбонатом и фосфором расплава, сходного с айлликитовым, образованного на глубине в результате низкой степени частичного плавления метасоматизированного мантийного источника. Некоторые порции этого лампрофирового расплава проходят через земную кору, не накапливаясь и не фракционируя в промежуточных камерах в коре, и обнаруживаются в виде наиболее примитивных лампрофировых даек на поверхности в пределах комплекса». Если отбросить ошибки в измерении возраста, то из геохронологическим данных следует, что комплекс формировался, как минимум, на протяжении 20-25 млн лет. Если айлликиты в составе комплекса представляют собой примитивную магму, находившуюся в промежуточной камере в коре с момента начала формирования комплекса, то возможна их контаминация коровым материалом за такой временной интервал. Это следовало обсудить в дискуссии. Возможно ли рассмотреть вариант о многоимпульсном внедрении магмы напрямую из источника, не привлекая промежуточную камеру?

7) Третье защищаемое положение обосновано, но я бы подкорректировал его формулировку – «Пироксениты, ийолиты фоскориты, карбонатиты и айлликиты комплекса Арбарастах образованы из родительского расплава/родоначальной магмы (протоайлликитвый?) с изотопно умеренным деплетированным мантийным источником. Первичный расплав для пород комплекса связан с плавлением метасоматизированных гранатовых перидотитов». Возвращаясь ко второму защищаемому положению, где автор обосновывает, что айлликиты сформированы из наиболее примитивного расплава по сравнению с другими разновидностями пород комплекса, можно сделать вывод, что их изотопные характеристики наиболее близки первичной/примитивной магме. Соответственно, реконструкции источника лучше делать на основании характеристик

айллитов, которые наиболее близки к деплетированной мантии. Остальные породы подверглись процессам дифференциации, контаминация, метасоматоза и т.д.

По актуальности, новизне, степени достоверности и научной значимости результатов, а также обоснованности научных положений и выводов, работа Крука Михаила Николаевича «Минералогия и петрогенезис ультраосновного щелочного карбонатит-фоскоритового комплекса Арбарастах, Республика Саха (Якутия)», представленная на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук, отвечает требованиям, предъявляемым ВАК при Минобрнауки России к кандидатским диссертациям, в том числе соответствует пп. 9-14 раздела II Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 25.01.2024). Автореферат отражает основные положения диссертации. Считаю, что Крук Михаил Николаевич заслуживает искомой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 – Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Шарыгин Игорь Сергеевич

Кандидат геолого-минералогических наук.

Ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией

ФГБУН Институт земной коры Сибирского отделения Российской Академии наук

Лаборатория петрологии, геохимии и рудогенеза

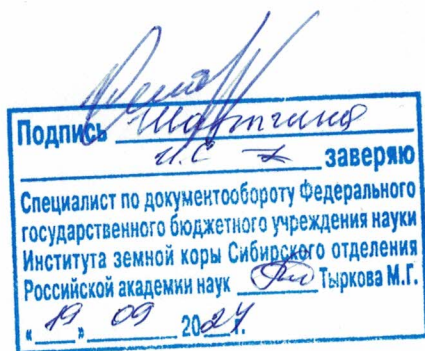
Почтовый адрес: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

E-mail: isharygin@crust.irk.ru

Телефон: р.т. 8(3952)423454

Я, Шарыгин Игорь Сергеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

19 сентября 2024 г.



Шарыгин Игорь Сергеевич