

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию на соискание ученой степени

**кандидата геолого-минералогических наук Крука Михаила
Николаевича**

**на тему: «МИНЕРАЛОГИЯ И ПЕТРОГЕНЕЗИС УЛЬТРАОСНОВНОГО
ЩЕЛОЧНОГО КАРБОНАТИТ-ФОСКОРИТОВОГО КОМПЛЕКСА
АРБАРАСТАХ, РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ)»**

**по специальности 1.6.4. – «Минералогия, кристаллография. Геохимия,
геохимические методы поисков полезных ископаемых»**

В работе М.Н. Крука рассматривается важная и актуальная тема петрогенезиса ультраосновного щелочного карбонатит-фоскоритового комплекса Арбарастах, расположенного в Республике Саха (Якутия). Автор проводит глубокий анализ генетических особенностей этого комплекса, уделяя внимание минералогическому составу пород, их геохимическим характеристикам, а также возрастным и тектоническим условиям их формирования. Работа включает в себя также изучение изотопных данных и реконструкцию процессов, происходивших в мантийных источниках, что имеет как фундаментальное, так и прикладное значение. Актуальность исследования М.Н. Крука не вызывает сомнений, поскольку щелочные карбонатит-фоскоритовые комплексы представляют собой важные объекты для понимания процессов глубинного мантийного метасоматоза и магматической дифференциации. Эти породы имеют экономическое значение, так как с ними связаны месторождения редкоземельных элементов, апатита, магнетита и других полезных ископаемых. Изучение таких комплексов способствует развитию научных основ для разведки месторождений и разработки рудных тел, что подчеркивает прикладное значение работы.

Диссертационная работа содержит ряд оригинальных научных результатов, среди которых можно выделить следующие аспекты:

- Получены новые данные о минералогическом составе пород комплекса Арбарастах, а также установлены эволюционные тренды состава главных и второстепенных минералов.
- Проведены детальные изотопные исследования, которые позволили определить возрастные интервалы формирования пород комплекса.
- Впервые была предложена петрогенетическая модель формирования карбонатит-фоскоритового комплекса Арбарастах, что является важным вкладом в понимание процессов мантийного метасоматоза и формирования щелочных карбонатитовых комплексов.

Диссертация Крука М.Н. состоит из семи глав, которые четко структурированы и логически связаны между собой. Каждая глава подробно рассматривает один из аспектов исследования, начиная с анализа литературы и заканчивая результатами экспериментальных данных.

Глава 1 включает краткий обзор существующих представлений о карбонатитах и фоскоритах, а также моделей их образования. Этот обзор меня несколько разочаровал. В

первой же фразе содержится новая для меня информация о приоритете П.Н. Бозе при описании карбонатитов, но в известных мне обзорах по карбонатитам такие сведения отсутствуют. Я нашел и прочитал работу Н.П. Бозе 1884 года, но не нашел описания пород, которые могли бы быть впоследствии переопределены как карбонатиты. Оба рисунка шлифов относятся к траппам. Непонятно, хотя и очень интересно, какое именно описание и какой объект имел в виду автор. Разделы, посвященные экспериментальным исследованиям и описаниям проявлений карбонатитов заканчиваются на работах 2012-2013 годов, несмотря на то, что интерес к карбонатитам растет в геометрической прогрессии. Пропущены многие работы по карбонатитовым комплексам в России (Ковдор, Вуориярви и др.), опубликованные за последние 15-20 лет.

Глава 2 диссертационной работы посвящена описанию методов, использованных для изучения минералогии и петрогенезиса карбонатит-фоскоритового комплекса Арбарастах. Данная часть исследования является крайне важной, так как точность и достоверность полученных научных результатов напрямую зависят от примененных методик. Приведенные методы исследования соответствуют международным стандартам, что подчеркивает высокий уровень подготовки автора и его работы в целом.

В главе 3 представлено детальное описание геологического строения комплекса, а также характера пространственных взаимоотношений с окружающими породами. Особое внимание уделено определению возраста различных пород комплекса, что позволяет связать его с определёнными этапами щелочного магматизма в регионе. Отмечу, что в подписи к рис. 3 отсутствует расшифровка буквы «И» и приведена неправильная ссылка на работу Глаголева и др., 1974.

Глава 4 посвящена геохронологическому анализу пород комплекса Арбарастах и включает результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и U-Pb исследований, которые были проведены для определения возраста ключевых типов пород. Автор успешно применяет современные геохронологические методы для датировки пород комплекса, что позволяет установить четкую временную последовательность их формирования. Использование разных изотопных систем, таких как $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и U-Pb, усиливает надежность результатов и делает выводы более обоснованными. Отмечу важный для дальнейшего обсуждения результат Ar-Ar датирования: самыми древними породами оказались карбонатиты (651-658 млн. лет), щелочные сиениты показали возраст 646 млн. лет, а самыми молодыми породами получились пироксениты и айликиты (632 и 631 млн. лет соответственно). Приведенная погрешность в 6-8 млн. лет не может поменять этой последовательности формирования пород комплекса. U-Pb метод подтвердил возраст карбонатитов на уровне $650,3 \pm 9,8$ млн. лет и щелочных сиенитов - $641,7 \pm 5,6$ млн. лет. К сожалению, возраст фоскоритов не был определен ни одним из геохронологических методов.

Глава 5 посвящена петрографо-минералогической характеристике пород комплекса Арбарастах. Это одна из наиболее объемных глав работы, в которой проводится детальное петрографическое и минералогическое изучение пород. Рассматриваются различные типы пород комплекса, такие как фоскориты, карбонатиты и щелочные силикатные породы. Автор уделяет значительное внимание изменениям состава основных и второстепенных минералов, что помогает выявить стадии магматической дифференциации и метасоматоза. Это особенно важно для понимания стадий формирования ультраосновных щелочных карбонатитовых комплексов. Несмотря на обширные исследования, было бы полезно дополнить работу структурными методами для некоторых редких минералов, чтобы подтвердить их принадлежность к определенным минеральным видам. Диагностика редких

минералов проведена только по микрозондовым данным, без подтверждения структурными методами, что могло бы повысить точность идентификации. Также непонятно, на каком основании в одних породах описывается нефелин, а в других тринефелин, хотя их анализы почти идентичны (не содержат калий в значимых количествах). К сожалению, в тексте диссертации и в приложениях не приводятся полученные анализы нефелина/тринефелина. Отсутствие калия в его составе весьма необычно и могло бы свидетельствовать о крайне низкой температуре формирования парагенезисов или о других весьма специфичных условиях. В многих других щелочных массивах мира состав нефелина близок к «нефелину Морозевича» с формулой $\text{Na}_3\text{KAl}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$. Специфику массива Арбарастах безусловно нужно было обсудить в тексте диссертации.

Обсуждение результатов в главе 5 вызвало у меня наибольшее количество вопросов. Одновременно утверждается, что невозможно придумать схему формирования всех пород массива из единого источника, и что айликисты являются наименее дифференцированными породами комплекса. Если единой дифференциации не было, то как можно сравнивать ее степень? Кроме этого, в главе 4 было показано, что айликисты являются самыми молодыми породами, моложе карбонатитов примерно на 20 млн. лет, а щелочных сиенитов на 15 млн. лет. В этой главе приводятся свидетельства активной метасоматической проработки пироксенитов, но представители «силикатно-карбонатитовой группы» полностью включены в схему дифференциации. Все ли эти породы можно рассматривать как магматические? В качестве основного индикатора дифференциации автор выбрал магнезиальность слюды и содержание в ней титана. Однако, мой опыт свидетельствует о невысокой надежности этого критерия, так как в лампроитах часто встречаются зональные кристаллы, в которых магнезиальность и титанистость возрастает в каймах. Если бы автор выбрал в качестве индикатора, например, магнезиальность оливина, то он бы получил совсем другую последовательность формирования пород. Для пегматоидных фоскоритов на рис. 5.32 приведены составы с $\text{Al} \sim 0$, что соответствует стехиометрии не флогопита, а тетраферрифлогопита. Содержание титана в шпинелидах автор интерпретирует слишком упрощенно, что не позволяет принять его аргументацию. Неверным утверждением также является возможность полного перераспределения Mg и Al из шпинелидов во флогопит, так как шпинель-флогопитовые породы описаны повсеместно. На рис. 5.35 показано содержание около 8000 г/т Mn в анализах оливина Fo88 из фоскоритов, что соответствует ураганному содержанию (более 1 мас. % MnO). В приложенных таблицах я таких анализов не обнаружил. Возможно, это ошибки пересчета и построения диаграмм. Если заново построить этот график по данным из приложения, то он выглядит уже не так необычно. Автор сильно усложнил себе и читателям восприятие материала, постоянно оперируя разными единицами измерения одного и того же (ф.е., ppm, мас. %). На рис. 5.36 хорошо видно, что наименее щелочной клинопироксен есть только в нефелиновых сиенитах, и если бы этот критерий выбирался автором для определения последовательности формирования, то схема поменялась бы еще раз.

Отдельный раздел диссертации (5.4.2) посвящен интерпретации минерального состава айликистов. Для определения температуры использовался не предназначенный для этих целей геооксисбарометр [Ballhaus et al., 1993] в условиях, выходящих за пределы использования (отсутствие ортопироксена). Получившиеся значения температуры представляются существенно завышенными. На рис. 5.37 заметна ошибка в нанесении линий кислородных буферов QFM и NNO, так как между ними должна быть примерно 1 лог. ед., а они на графике почти слились. Из-за этого, глубина рассуждений автора о

соответствии фугитивности кислорода, полученной разными методами с различными методами коррекции, осталась недоступной читателю, а оценка условий кажется недостоверной. Сравнение состава оливина айликитов с составами оливина из некоторых типов мантийных пород на взгляд рецензента носит отрывочный характер. Везде ли составы оливина зернистых и деформированных перидотитов отличаются или только в ксенолитах из кимберлитов, изученных Giuliani et al., 2018? Обязательно ли определенное Ni/Mg отношение свидетельствует о присутствии флогопита в источнике? О чем говорит факт, что это отношение выходит за рамки указанного в статье Veter et al., 2017? Почему не приведено сравнение состава оливина с обычными перидотитами и вулканическими сериями нормального ряда? Те же вопросы возникают с интерпретацией отношения Ca/Fe.

Глава 6 посвящена изучению химического и изотопного состава пород комплекса. Автор анализирует состав радиогенных изотопов (Sr, Nd, Pb) и сопоставляет полученные данные с характеристиками других щелочных карбонатитовых комплексов. Особое внимание уделено обсуждению источников вещества, задействованных в образовании пород комплекса. При обсуждении геохимических особенностей пород автор неоднократно объясняет повышенное содержание какого-то элемента присутствием его минерала-концентратора (например, высокое содержание Zr и Hf в измененных пироксенитах присутствием циркона). На мой взгляд, если это не связано с физическим перемещением уже сформированных зерен минерала, то должно быть наоборот – высокое содержание какого-то элемента вызывает кристаллизацию соответствующего минерала. Автор предполагает метасоматическую проработку (флогопитизацию и карбонатизацию) пироксенита и отмечает резкое повышение содержания HFSE элементов, которые практически нерастворимы во флюиде. Каким агентом тогда осуществлялся этот метасоматоз? На графике $\text{SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (рис. 6.1) среди пород отсутствуют айликиты, хотя на соседних графиках они есть. На подписях целой серии рисунков главы 6 смешаны единственное и множественное число. Второе защищаемое положение, опирающееся на материалы главы 5, почему-то сформулировано в разделе 6.1. Кроме редакционного замечания (ильменит не бывает во множественном числе) мне непонятно словосочетание «наиболее примитивного расплава» в отношении к айликитам. Критерии примитивности магмы (возможности равновесия с мантийным веществом) в диссертации не обсуждались. Насколько я понимаю, магма может быть или не быть примитивной. Что означает более или менее примитивный мне непонятно, особенно, если не оценивался состав первичного расплава ни для одной из составляющих комплекса Арбарастах. Видимо, автор хотел сказать «наименее дифференцированной магмы». На стр. 105 предполагается, что изотопная система U-Pb не нарушалась существенно при метасоматическом изменении пироксенитов. Это еще раз поднимает вопрос о метасоматическом агенте, который не переносит хорошо растворимые во флюиде уран и свинец. Автор обсуждает возможные механизмы магматической дифференциации, приводящие к формированию фоскоритовых и карбонатитовых пород комплекса, а также факторы, способствовавшие процессу их образования. Насколько я понял, AFC модель рассчитывалась только на основе изотопных систем Nd-Sr и U-Pb. Хорошо видно, что часть пород лежат на одной линии смешения, а часть может принадлежать другой линии. Непонятно, почему рассматривается только два источника, один из которых деплетированная мантия. Могут ли подобные соотношения объясняться смешением, при котором одним из источников является метасоматизированная в различной степени литосферная мантия. Тогда оценка степени ассимиляции в 40% могла бы существенно снизиться и стать реальной.

В главе 7 предложена петрогенетическая модель формирования комплекса Арбарастах, основанная на результатах петрогеохимических и изотопных исследований. При обсуждении генезиса двумя ключевыми вопросами, которые не обсуждены в достаточной мере в тексте диссертации, являются соотношения возраста различных пород комплекса и соотношение их объемов. Почему за примитивную магму приняты айликиты, которых меньше всего, и они являются самыми молодыми породами?

Многие замечания редакционного характера я сделал в самом тексте работы и не стал выносить в отзыв. Отмечу не только настойчивость автора в написании айликитов с двумя «л», что по-видимому, является принципиальной позицией этой группы исследователей, но также написание слово расчётный с двумя «н» и кумулатов с двумя «м». В разных частях работы комплекс называется Абарастарх, Арбарастарх или Арбарастах.

К достоинствам работы следует отнести комплексное применение современных методов исследования, таких как электронная микроскопия, микронзондовый анализ и изотопные исследования, что позволяет получить точные данные о составе и генезисе пород, а также детальное изучение эволюционных изменений состава минералов в каждом типе пород.

Диссертация Михаила Николаевича Крука является важным научным исследованием, существенно углубляющим знания о петрогенезисе ультраосновных щелочных карбонатит-фоскоритовых комплексов. Работа выполнена на высоком уровне и соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.6.4. – «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых». Автореферат соответствует диссертации по содержанию. На основании вышеизложенного считаю, что соискатель Крук Михаил Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук.

Официальный оппонент:

Доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН,
Директор Минералогического музея им. А.Е.Ферсмана РАН
Плечов Павел Юрьевич

Контактные данные:

тел.: 7(495)4543900, e-mail: pplechov@gmail.com

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

25.00.04 – петрология, вулканология

Адрес места работы:

119071, Москва, Ленинский проспект, д. 18, к.2, Минералогический музей им.
А.Е.Ферсмана РАН, тел.: 7(495)4543900; e-mail: museum@fmm.ru

Подпись сотрудника П.Ю.Плечова

Директора Минералогического музея им. А.Е.Ферсмана РАН удостоверяю:

Ведущий специалист Фриденберг

