

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу **Прокопьева Ильи Романовича**

«ПЕТРОГЕНЕЗИС И РУДОНОСНОСТЬ ЩЕЛОЧНЫХ КАРБОНАТИТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ СИБИРСКОГО КРАТОНА И СКЛАДЧАТОГО ОБРАМЛЕНИЯ»,

представленную на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальностям: 1.6.3 – «Петрология, вулканология», 1.6.10 – «Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения»

Диссертационная работа Прокопьева Ильи Романовича посвящена изучению пород рудоносных щелочных карбонатитовых комплексов, образованных в разные временные интервалы в пределах Сибирского кратона и его смежных структур – Центрально-Азиатского и Таймырского складчатых областей. Соискателем применялся комплексный подход к изучению карбонатитовых объектов широким спектром методов геологического, минералогического, изотопно-геохронологического, геохимического и термобарогеохимического исследований вещества. **Актуальность** и **новизна** проведённых работ определяется значительным фундаментальным вкладом в реконструкции условий зарождения карбонатитовых расплавов, процессов формирования карбонатитов и физико-химических особенностей генетически связанного с ними рудогенеза, а **практическая значимость** – современным стратегическим приоритетом изучения редкоземельных рудных объектов в России. Полученные результаты могут быть использованы для поиска и оценки рудных объектов на промышленное Nb-РЗЭ оруденение.

Впервые проведен анализ физико-химических условий формирования и эволюции минералообразующих сред (расплавов, флюидов) при становлении различных по генезису и рудоносности пород щелочных карбонатитовых комплексов. Одним из достоинств работы отмечу несомненный **личный вклад** соискателя, проводившего геологическое изучение и отбор материала на всех (кроме Таймыра) объектах, комплексные аналитические исследования, обобщение фактического материала и построение генетических моделей формирования щелочно-карбонатитовых комплексов.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений с фактическим материалом общим объемом 328 страниц, содержит 105 рисунков, 53 таблицы и список литературы из 592 источников.

Апробация исследований полностью соответствует уровню докторских диссертационных работ. Результаты представлены на российских и международных совещаниях, прошли экспертную оценку в отчетах по проектам НИР ИГМ СО РАН, РФФИ и опубликованы в 50 статьях (во многих соискатель является первым автором), в журналах

из списка ВАК, большинство из которых имеют высокий импакт-фактор и входят в квартили Q₁, Q₂ по международным базам WOS и SCOPUS.

Автореферат в достаточной мере отражает содержание и основные результаты, представленные в диссертационной работе.

В постановке научной проблемы исследований показано, что изученные объекты относятся к трем генетическим типам щелочно-карбонатитовых комплексов: магнезиокарбонатитовым, щелочно-ультраосновным и щелочно-базитовым.

Во **Введении** формулируется научная проблема, цели и задачи исследования, приводятся характеристики аналитических методов, краткое описание методик и инструментальной базы. Формулируются защищаемые положения, научная новизна, связь работы с научно-техническими программами: базовыми проектами НИР ИГМ СО РАН; грантами РНФ, где соискатель был руководителем, основным исполнителем и исполнителем; грантом Президента РФ поддержки молодых ученых. Приводится список публикаций соискателя по теме исследований. Раздел логично построен, содержит всю необходимую информацию, требуемую при оформлении диссертационной работы.

Особенности моделей эволюции различных карбонатитовых систем логично прослеживаются по тексту диссертации, а также в четырех защищаемых положениях. **В первом положении** обосновывается протерозойский временной интервал внедрения апатит-доломитовых карбонатитов Алдана, приводятся особенности состава магнезиокарбонатитовых расплавов и характеристика физико-химических условий эволюции карбонатитовых флюидов на гидротермальном этапе. **Второе положение** определяет особенности состава щелочно-ультраосновных (айллитовых) расплавов, эволюция которых приводит к формированию редкометалльных карбонатитов Чадобецкого комплекса на Сибирском кратоне. **Третье положение** характеризует карбонатиты массива Арбарастах на Алданском щите, образованные в результате эволюции щелочно-ультраосновного айллитового расплава. Показана двухэтапность формирования редкометалльной и редкоземельной минерализации карбонатитов массива Арбарастах. **В четвертом положении** определяются особенности состава, рудоносности расплавов и флюидов комплексных Fe-F-Ba-Sr-редкоземельных карбонатитов Центрально-Азиатской провинции и Центрально-Таймырского региона – продуктов эволюции щелочно-базитовых и карбонатитовых магм.

В первой главе описано современное состояние изученности пород щелочно-карбонатитовых комплексов. Приводится систематика карбонатитов, особенности состава пород, основные модели формирования карбонатитовых расплавов и геологические обстановки для карбонатитовых комплексов. Особое внимание уделено процессам

рудоносности карбонатитов, обзору экспериментальных данных и моделирования карбонатитовых систем. Анализируются результаты термобарогеохимического изучения расплавных и флюидных включений, захваченных минералами карбонатитов и ассоциирующих с ними щелочно-силикатных пород. Обсуждаются модели образования натрокарбонатитовых лав вулкана Олдоиньо Ленгаи в Танзании. Описываются процессы солевой несмесимости, которые неоднократно используются в генетических моделях формирования пород и руд карбонатитовых комплексов.

Принципиальным замечанием является достаточно вольное толкование терминов «рассол-расплав» и «солевой расплав», которые часто используются в этой главе и далее по всему тексту. Например, в неудачном по смыслу и содержанию фрагменте на стр. 45: *“По мере того, как **карбонатитовые расплавы превращаются** (эволюционируют) в более богатые магнием и железом **составы**, в **расплаве** постепенно накапливаются **флюиды**, щелочи и солевые компоненты, которые понижают солидус системы и формируют **собственную фракцию щелочного солевого расплава** или **рассол-расплава (brine-melt)** (Prokopyev et al., 2016, 2023a) (рис. 7).”* Расплавы не могут эволюционировать в «составы», в расплаве не могут накапливаться разные «флюиды» и не ясно, что представляет собой «собственная фракция» щелочного солевого расплава или рассол-расплава? По физико-химической терминологии рассолом называют концентрированный водный раствор солевых компонентов в условиях близких к насыщению (т.е. до кристаллизации солей в растворе), а солевым расплавом – жидкое (расплавленное) состояние соли либо нескольких солей в определённых граничных условиях между их точками плавления и кипения. В этой связи требуют пояснений термины рассол-расплав (brine-melt) и солевой расплав в трактовке соискателя. Вероятно, во фразе выше имелось ввиду увеличение растворимости флюидной фазы в карбонатитовом расплаве по мере эволюции P - T - X параметров. Из такого расплава мог выделяться флюид в разной степени концентрированный, в т.ч. рассол (1-й вариант, карбонатно-солевая несмесимость). Далее, по мере снижения P - T параметров флюид (рассол) мог вскипеть и разделиться на паровую фазу и концентрированный флюид (2-вариант, кипящая водно-солевая система). Флюидные включения, захваченные минералами в этих процессах, различаются по фазовым переходам. Во включениях рассолов кристаллические солевые фазы растворяются после исчезновения усадочного пузыря, а во втором случае растворение всех солевых фаз наблюдается до исчезновения усадочного пузыря (т.е. до полной гомогенизации). Во втором варианте в минерале-хозяине должны находиться сингенетичные флюидные включения – концентрированного водного раствора и существенно газовые с низкоплотным раствором. Подчеркну, что в описанных выше фазовых переходах флюида нет какого-либо солевого расплава. В связи с

вышесказанным, рекомендую использовать при описаниях высоконцентрированных флюидов термин рассол (т.е. включения рассола) вместо «рассол-расплав» или «солевой расплав».

Замечание и комментарии о значительном расхождении температуры гомогенизации и температуры образования (захвата) флюидных включений на стр. 51. Это “классическая” проблема интерпретации данных по термометрии флюидных включений, для решения которой нужно иметь данные не о глубине образования минерала, а о предполагаемом температурном интервале захвата включений (например, по минеральным термометрам), и затем с учетом температуры гомогенизации, наклона изохор в зависимости от концентрации и типа солей во флюиде получать значения флюидного давления, которое обычно превышает литостатическую нагрузку (т.е. в общем случае не соответствует глубине кристаллизации минерала-хозяина).

Вторая глава характеризует особенности петрогенезиса апатит-доломитовых карбонатитов Центрально-Алданского региона. Показаны результаты петрологических исследований РЗЭ-апатитоносных интрузий Селигдарского типа, генезис которых оставался долгое время дискуссионным. Детально описана геология Алданского щита и объектов исследования, рассмотрены особенности минерального состава и последовательность образования апатит-доломитовых карбонатитов: Селигдар, Усть-Чульман, Муосталаах, Дорожное, Бирикээн. Приводятся новые Ar-Ar и U-Pb (циркон, SHRIMP II) датировки минералов карбонатитов. Полученный возрастной интервал 1.90-1.87 млрд лет ограничивает период становления апатитоносных интрузий Алдана и является обоснованием для **первого защищаемого положения**. В геодинамическом аспекте, внедрение Алданских магнезиокарбонатитов совпадает с позднепалеопротерозойскими постколлизийными процессами в пределах Сибирского кратона на рубеже 1.9–1.85 млрд лет (Котов и др., 2004; Gladkochub et al., 2006, 2012) и, в частности, синхронно с формированием Каларо-Нимнырско-Малозадойской LIP (1.87–1.86 млрд лет).

Исследования расплавных включений в апатите карбонатитов Алдана свидетельствуют о магматической природе апатитоносных интрузий Селигдарского типа. В результате термобарогеохимических исследований получены данные по особенностям состава и условиям генерации магнезиокарбонатитовых расплавов (исходных для карбонатитов) – выплавкам из карбонатизированной литосферы. Состав такого расплава по данным LA-ICP-MS содержимого включений отличается повышенными содержаниями REE, Ba и Sr. Предполагается, что апатитовая минерализация карбонатитов Селигдарского типа связана с магматическим этапом. Результаты изучения флюидных включений

показали, что карбонатитовые флюиды сульфатно-хлоридного состава участвовали в процессах редкоземельной минерализации карбонатитов Алдана. На этом также основывается формулировка **первого защищаемого положения**.

Хотелось бы обратить внимание на присутствие в расплавных включениях магнезиокарбонатитового расплава в апатите дочерней фазы тенардита (Na_2SO_4), который по минералогическим данным кристаллизуется на гидротермальном этапе формирования карбонатитов. Уточните, тенардит во включениях является продуктом кристаллизации из обогащенного SO_3 карбонатитового расплава?

В главе используются некорректные термины – доломитовый расплав (стр. 97) и минералы группы мусковита (стр. 98).

Третья глава посвящена петрологическому изучению ультраосновных лампрофиров – айллицитов, проявленных в пределах пермо-триасового Чадобецкого щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса на юге Сибирского кратона. Показано, что айллициты находятся в пределах непротерозойского карбонатит-фоскоритового массива Арбарастах на Алданском щите, петрологическая информация по которым представлена для сравнения.

Чадобецкий щелочно-ультраосновной карбонатитовый комплекс является уникальным проявлением всех петрографических разновидностей ультраосновных лампрофиров, включая кимберлитоподобные трубки взрыва (дамтьерниты). Комплекс представлен несколькими фазами внедрения лампрофиров и карбонатитов, а кора выветривания по карбонатитам сформировала РЗЭ-редкометалльное Чуктуконское месторождение (Красноярский край). Приведены результаты детальных минералогических исследований ультраосновных лампрофиров, показаны особенности химизма минералов и эволюция их составов. Изучены основные пороодообразующие минералы (оливин, минералы группы шпинели, флогопит и карбонаты), описаны особенности состава гидротермальной редкоземельной минерализации. По результатам изотопно-геохронологических исследований (Ar-Ar, U-Pb) получены оценки интервала ~250-240 млн лет становления Чадобецкого комплекса, что совпадает с активностью Сибирского плюма на юге Сибирского кратона.

В третьей главе приводятся также результаты изучения состава расплавных включений в оливине из ультраосновных лампрофиров (айллицитов) методами Рамановской спектроскопии, WDS, LA-ICP-MS и др. Утверждается, что включения несут информацию о составе исходных расплавов для айллицитов. Такие расплавы имеют повышенные содержания Ba, Sr, REE, Ta, Nb, Zr, Hf и эти данные используются для обоснования **второго защищаемого положения**. Сделана попытка реконструировать

исходный состав карбонатитового расплава и определить ассоциацию рудных элементов, накапливающихся в карбонатитовой магме.

Основные замечания по этой главе. Почему большой объем новых данных по геохронологии пород Чадобецкого щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса не используется для обоснования второго защищаемого положения? При изучении расплавных включений в минералах пород Чадобецкого комплекса и массива Арбарастах не получено каких-либо свидетельств явлений несмесимости расплавов. В этой связи не ясен вклад процессов карбонатно-солевой несмесимости в формирование карбонатитов, если таковые предполагаются.

Одним из научных достижений соискателя являются оригинальные данные по т.н. пеллетальным лапиллиям в кимберлитоподобных ультраосновных лампрофирах. Детально описан минеральный состав и строение лапиллий – порций (капель) щелочно-силикатно-карбонатного расплава, который «налипал» и быстро кристаллизовался на небольших обломках разных пород. При этом не понятна аргументация по отнесению этих необычных образований к разновидности «расплавных включений» (стр. 157), поскольку матриксом для расплавных включений является минерал-хозяин, а для лапиллий – ультраосновной расплав. Очевидно, что изучались ксенолиты, захваченные ультраосновным расплавом. Мне кажется, что названия «пеллетальные лапиллии» для их идентификации вполне достаточно.

В четвертой главе представлены результаты исследований карбонатитов неопротерозойского массива Арбарастах, которые являются продуктами эволюции щелочно-ультраосновных (айллитовых) расплавов. Детально изучена минералогия рудоносных карбонатитов и фоскоритов, приводятся составы основных породообразующих и рудных минералов. Анализируются изотопно-геохронологические данные по породам массива – одного из проявлений щелочно-карбонатитового редкометалльного магматизма вдоль южной окраины Сибирского кратона, проявленного в интервале 650-630 млн лет. При изучении химизма минеральных фаз, а также включений в минералах карбонатитов массива показана специфика состава и металлоносности карбонатитовых расплавов, содержащих высокие концентрации LREE, Ba, Sr, Ta и Nb. Такие расплавы характерны для процессов формирования пород щелочно-ультраосновных карбонатит-фоскоритовых комплексов и эти данные используются в **третьем защищаемом положении**.

Из замечаний отмечу, что представлены результаты изучения фоскоритов, но процессы их формирования и генетические связи с карбонатитами не анализируются. Не ясно, насколько корректно проводить сравнение характеристик карбонатитовых расплавов

для двух разновозрастных комплексов – Чадобецкого и Арбарастахского. Приводятся описания флюоритовых карбонатитов, но особенности их генезиса не обсуждаются. Нет также информации о процессах формирования т.н. силикокарбонатитов.

Глава пятая характеризует особенности флюидного режима формирования карбонатитов, связанных с эволюцией щелочно-базитовых комплексов. Объектами исследования были позднемезозойские Fe-F-REE карбонатиты Центрально-Азиатского складчатого пояса в Туве, Монголии и Забайкалье, а также схожие по генезису триасовые карбонатиты Центрального Таймыра. Приводится обзор и обобщение данных предшественников, а также новые данные по карбонатитам Таймыра. Отмечу, что для последних представлен детальный анализ минералогии и получена датировка по бастнезиту. Основные результаты петрологических исследований дают информацию по характеристике рассолов и флюидов, участвующих в формировании карбонатитов. Аргументированы два этапа F-P3Э минералообразования и на основе этого формулируется **четвертое защищаемое положение.**

В качестве замечания и рекомендации хотелось бы обратить внимание на публикации по различным геологическим объектам (онгонитам, риолитам, редкометалльным пегматитам, породам щелочных комплексов) и на экспериментальные работы, где изучались явления силикатно-фторидной несмешиваемости с участием фторидно-кальциевого (флюоритового) расплава, из которого могли формироваться крупные скопления (тела), сложенные магматическим флюоритом. Хорошо проявленные тетрад-эффекты редких земель на нормированных к хондриту спектрах пород и слагающих их минералов можно использовать для аргументации выводов о процессах фторидно-силикатной жидкостной несмешиваемости, проходивших в щелочных магмах при формировании некоторых щелочно-карбонатитовых комплексов.

В **Заключении** формулируются основные петрологические и генетические выводы, соответствующие поставленным целям и задачам комплексного научного исследования.

Высказанные замечания и комментарии несут рекомендательный характер и, надеюсь, будут учитываться соискателем в дальнейшей работе.

Диссертационная работа, вне всякого сомнения, является **завершенным исследованием, выполненном на высоком научном уровне.** Полученные данные обосновано **соответствуют двум специальностям:** 1.6.3 – «Петрология, вулканология» и 1.6.10 – «Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения». **Достоверность** полученных петрологических данных **не вызывает сомнения.** **Защищаемые положения обоснованы в достаточной степени.**

Содержание диссертационного исследования полностью отвечает критериям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г), а соискатель Прокопьев Илья Романович заслуживает присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальностям: 1.6.3 – «Петрология, вулканология», 1.6.10 – «Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения».

Официальный оппонент

Перетяжко Игорь Сергеевич

доктор геолого-минералогических наук

по специальности 25.00.04 – «Петрология, вулканология»,

Заведующий лабораторией физико-химической петрологии и генетической минералогии,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии

им. А.П. Виноградова Сибирского отделения РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского 1А

Тел.: 8(3952)42-65-00, e-mail: pgmigor@igc.irk.ru

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

21 мая 2025 г.

