

Отзыв официального оппонента

Солововой Ирины Петровны, доктора геолого-минералогических наук, ведущего научного сотрудника Федерального государственного учреждения науки Института геологии рудных месторождений, петрографии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), г. Москва

на диссертацию Шарьгина Виктора Викторовича «Минералообразование в пирометаморфических, щелочно-магматических и метеоритных ассоциациях», представленную в виде научного доклада на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 «минералогия, кристаллография»

Рассматриваемая работа посвящена минералого-геохимическим, термобарогеохимическим, аналитическим и теоретическим исследованиям специфических магматических и метаморфических (пирометаморфических) минеральных ассоциаций и расплавных сложно-композитных включений. Проведенное исследование должно способствовать появлению новых моделей оценки термодинамических параметров при формировании вулканитов и интрузивных тел широкого профиля химического и минерального состава. В ходе работ получен обширный объем новых минералогических и геохимических данных для магматических и метаморфических пород, а также для некоторых типов метеоритов.

Актуальность работы, согласно выбранной диссертантом структуре научного доклада, состоит из трех направлений изучения и интерпретации полученных результатов исследования вещественного состава природного каменного материала. Актуальность одного из направлений (1) связана с детальным прецизионным изучением химизма минералов конкретных пород для уточнения имеющихся и разработке новых минеральных термометров. Второе направление исследования (2) включает изучение различных типов микровключений в минералах щелочных и связанных с ними карбонатитовых породах с помощью экспериментального термобарогеохимического метода, что позволило детализировать условия проявления силикатно-солевой несмесимости. Подобная несмесимость по своей сути является эффективным механизмом накопления, переноса и осаждения редких элементов, вплоть до формирования месторождений, альтернативным кристаллизационной дифференциации. Третье направление исследования (3) определяется приоритетностью минерального изучения метеоритов, которое является одной из немногих возможностей получения информации

об условиях формирования внеземных минеральных ассоциаций. Они являются единственным источником прямого определения химического состава космических тел.

Целью работы являлось реконструкция условий кристаллизации и механизмов формирования некоторых типов щелочных пород и карбонатитов, пирогенных пород и метеоритов.

Задачи исследований были сформулированы следующим образом.

1. Был выполнен анализ фазовых диаграмм (перовскит – браунмиллерит, корунд – гематит) с возможным использованием их в качестве модельного термометрического метода для реконструкции температурного режима образования пирогенных пород.

2. С помощью экспериментального термобарогеохимического метода были исследованы первичные и вторичные включения расплава в минералах различных щелочных пород и карбонатитов.

3. Изучалась минералогия некоторых типов метеоритов для выявления характера фракционирования элементов на поздних стадиях эволюции.

Фактический материал. Фактический материал включает каменный материал щелочных магматических и пирометаморфических пород, собранный в ходе полевых работ в период с 1990 по 2020 гг. В него вошли комбеит-волластонитовый нефелинит, оливин-флогопитовый ийолит и фонолиты вулкана Олдоиньо Ленгаи и туфов Лаэтоли Кратерного нагорья, расположенных в пределах восточной ветви Восточно-Африканской рифтовой системы Грегори, который сформировался 1.2 Ма назад. Объектами термобарогеохимического исследования являлись также нефелиниты и фонолиты из других вулканов этой области - Садимана и Мосоника, а также мелилитолиты вулкана Пьян ди Челле в Италии. Изученные метеориты (Эльга, Дарьинское, Уакит) заимствованы из коллекции Центрального Сибирского Геологического музея ИГМ СО РАН.

Научная новизна. В разделе выделено 4 пункта. 1. Охарактеризованы и зарегистрированы в Комиссии по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной минералогической ассоциации девять новых минеральных видов из магматических и пирогенных пород и метеоритов. 2. Для оценки температуры формирования пирометаморфических метакарбонатных пород предложено использовать две минеральные ассоциации (Fe-перовскит + шарьгинит/шуламтит и Fe-перовскит + натальякуликит). Для оценки температуры сосуществования пироксена с плагиоклазом в пирогенных породах предложено использовать ассоциацию гематит + корунд, и/или природный реальный состав фазы $FeAlO_3$. 3. Изучены ликвационные явления в нефелинитах и ийолитах рифта Грегори и Кратерного нагорья (силикат+CaF₂ и

силикат+натрокарбонатная составляющая), а также силикат-натрофосфатная несмесимость в железных метеоритах Эльга и Дарьинское.

Структура диссертации. Диссертация в виде научного доклада содержит три главы, объединенных результатами исследований новых минералов и минеральных ассоциаций, которые могут быть использованы для оценки температур формирования пород, а также исследований включений минералообразующих сред. Защищаемый научный доклад состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 62 страницы, которые включают текст, 28 фотографий, скомпонованных каждый из нескольких снимков микрообъектов, 8 графиков и схем и 9 таблиц. В работе приведены результаты исследований за 2012-2021 годы.

Апробация работы. Результаты исследования были доложены на российских и международных совещаниях и конференциях, которые проводились в России (Москва, Апатиты, Санкт-Петербург, Новосибирск, Улан-Удэ, Челябинск, Екатеринбург, Миасс) и за рубежом (Германия, Венгрия, Белоруссия, Турция, Китай, Италия, Индия).

В работе выдвинуты 4 защищаемых положения, основанные на результатах проведенных исследований, изложенных в трех главах работы. Защищаемые положения корректно сформулированы и полностью отвечают представленному материалу.

Темы трех глав научного доклада объединены методами минеральной и экспериментальной термобарогеохимии, основанными на детальном изучении видов и химических составов минералов пород и включений, а также структурных взаимоотношений между объектами изучения.

Первая глава посвящена исследованию минеральных парагенезисов и возможности их использования при реконструкции условий формирования таких мало изучаемых явлений как пирогенный метаморфизм, связанный с горением в угленосных, битуминозных и нефтеносных толщах, где источником тепла является не магматический расплав, а горение органического вещества. При этом температуры могут достигать очень высоких значений (до 1000 - 1200°C и более). На основании детальных минералогических исследований фаз пирогенных пород, а также анализа фазовых диаграмм оксидных систем, в частности для перовскита с замещением Ti на Fe и Al, и системы $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5 - \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5$, диссертант предлагает использовать некоторые минеральные парагенезисы для оценки высокотемпературных реакций. Для этого проводился систематический анализ структурных параметров каждой фазы с выявлением их зависимости от термодинамических условий образования. Результаты проведенной работы показали, что выбранные ассоциации фаз могут быть успешно использованы в качестве новых температурных реперов для высокотемпературной субфации пород спуррит-

мервинитовой фации метаморфизма. Предложенная модель оценки температуры была опробована на породах крупнейшего массива пирометаморфической формации Хатрурим на территории Израиля. В пределах комплекса описано более 40 новых минералов. Диссертант принимал активное участие в исследовании 5 новых минеральных видов из пород Хатрурим Бэзин.

По материалам первой главы сформулировано **первое защищаемое положение**.

Вторая глава наиболее обширна и посвящена результатам комплексного изучения расплавных включений в минералах щелочных пород, часть которых содержит несмешиваемые силикатную и солевую компоненты. Почти все полученные результаты носят пионерский характер. Отмечу наиболее интересные и необычные для петрологии силикатных пород достижения. Наиболее полно диссертантом изучены щелочные породы вулкана Олдоиньо Ленгаи, которые включали нефелиниты, фонолиты, ийолиты. В этот раздел также включены результаты изучения включений в нефелинитах вулканов Садиман и Мосоник и туфы Лаэтоли (Кратерное нагорье). Расплавные включения исследовались в различных вкрапленниках, характерных для конкретных пород, и включали оливин, нефелин, санидин, клиноироксен, фторапатит, волластонит, титанит, перовскит, Ti-андрадит и титаномагнетит. В некоторых случаях эти минералы содержали также флюидные включения и сульфид. В расплавах нефелинитов и ийолитов была установлена натрокарбонатитовая ликвация. Интересно, что если в нефелините ийолитов, кристаллизовавшемся на раннем этапе, сосуществуют силикатный и натрокарбонатитовый расплавы вплоть до 1100°C (надликвидусная несмешиваемость), то во фторапатите фиксируются только солевые включения. Дочерние фазы солевого расплава представлены ньеререйтом, грегориитом, сильвином, галитом, алабандином, пирротинном, флюоритом, баритом, виллиомитом, куспидином, гаюином, содалитом и другими редкими минералами.

Изучение фонолитов Олдоиньо Ленгаи, наиболее ранних продуктов извержений вулкана, показало, что, несмотря на обилие разнообразных включений, все они имеют силикатный состав, не обремененный ликвационными проявлениями. Определенные диссертантом дочерние минералы во включениях и фазы основной массы породы, насыщенные летучими компонентами, амфиболы, содалит, канкринит и цеолиты, свидетельствуют о невысокой температуре и пролонгированной кристаллизации исходной магмы.

По материалам главы 2 сформулированы **второе и третье защищаемые положения**.

При ознакомлении с главой 2 возникли **вопросы** и незначительные **замечания**.

Стр. 23, 36 и везде по тексту. В описании высокотемпературных опытов используется выражение «плавление стекла». Можно говорить о его размягчении, но не плавлении.

Стр. 24. При описании термических экспериментов с включениями в нефелине Олдоиньо Ленгаи отмечалось появление и затем исчезновение капель солевого расплава разного состава или новообразованных фаз (фторид, хлорид, сульфат) при 670–840°C. Очень необычное явление. Почему было решено, что это солевой расплав, причем фторид-, хлорид-, сульфатного состава?

Стр. 26, 31, 35 и везде по тексту. При описании фазового состава включений часто указывается на присутствие в них ксеногенных фаз. По каким критериям они были отнесены к «ксеногенным»?

Стр. 33. На странице 33 сказано «Наличие водосодержащей фазы, представленной флогопитом, кристаллизующегося на ранней стадии образования ийолитов, указывает на ощутимое количество воды в исходном расплаве, а содержания H₂O (1.0-2.3 мас.%) во включениях расплава в нефелине, возможно, отражают постепенное уменьшение ее количества в процессе кристаллизации». В табл. 3 даны составы ийолитов, но без концентрации H₂O, поэтому говорить об «ощутимом количестве воды в исходном расплаве», опираясь только на присутствие флогопита, лучше осторожнее.

Стр. 36 - 37. При рассмотрении процесса фазовых превращений во включениях с дочерней фазой флюорита указано, что при 600-630°C происходит «плавление флюорита с образованием капли флюоритового расплава». То есть, по мнению диссертанта, в какой-то момент недоплавленное округлое зерно кристалла CaF₂ «превращается» в каплю монофазного флюоритового расплава и возникает силикатно-солевая (монофазная) несмешиваемость? Как объяснить такое превращение? Тем более, что температура плавления монофазы флюорита составляет 1360°C. Все значительно упрощается в том случае, если CaF₂ рассматривать как составляющую более сложного солевого расплава или H₂O-содержащего флюида. В таблице 5 указано, что концентрация Na₂O в силикатном расплаве достигает чрезвычайно высоких концентраций - 14.6 мас.% в присутствии H₂O и Cl до 0.9%. При таком соотношении NaCl должен перераспределяться во флюид или второй расплав (солевой). Однако, если флюорит является дочерней фазой силикатного расплава, то откуда берется флюоритовый расплав при 600°C, который не растворяется в силикатном? Может быть это не расплав? Типичный процесс растворения фаз во включениях в высокотемпературных экспериментах предполагает постепенное

округление граней кристаллов и уменьшение размера зерен, которые могут быть приняты за расплав.

Глава 3 посвящена результатам изучения кристаллизации необычных минеральных видов в магматических железных метеоритах и проявления силикат-натрофосфатной несмесимости. Было показано, что в железных метеоритах постоянно присутствуют троилитовые нодулы и обособления, представляющие продукты затвердевания сульфидного расплава, который образовался за счет отделения от Fe-металлической жидкости магматических железных метеоритов. Была также проведена работа по обнаружению и изучению в железных метеоритах микрофаз (фосфаты, силикаты, сульфиды, микровключения расплава), которые иногда имеют экзотический состав и образуются на самых поздних этапах становления метеоритов. Диссертантом были изучены 3 метеорита: **Эльга** (ШЕ) (бассейн реки Эльги, левый приток реки Индигирки), **Дарьинское** (ШС), (Западно-Уральская область, Казахстан) и **Уакит** (ШАВ), (Эвенкийский район, Республика Бурятия).

В метеорите **Эльга** в металлической части обнаружены силикатные включения, содержащие клинопироксен, ортопироксен и стекло, иногда фосфаты (фторapatит, мерриллит, панетит), оливин, хромит и рутил. Выявлены признаки локального импактного плавления как в металле, так и в силикатных включениях. В одном из силикатных включений обнаружена силикат-натрофосфатная жидкостная несмесимость с образованием фосфатных глобуль в силикатной матрице. Установлено, что высоконатровые Ca-Mg-Fe-фосфаты формируют менискообразные выделения, что свидетельствует о силикат-натрофосфатной жидкостной несмесимости в процессе остывания исходного расплава. Диссертант проводил тщательное изучение химического состава минералов, определенных в силикатной и натрофосфатной составляющих, результаты которого изложены в разделе «Химический состав минералов в ликвационном включении». Предложены классификационные диаграммы для высоко-Ti амфиболов подгруппы обертита и для составов минерала подгруппы энigmatита.

В троилитовом нодуле железного метеорита **Дарьинское** (ШС) была изучена силикат-натрофосфатная несмесимость с обособлением в виде высоконатровых фосфатных и силикатных включений расплава. Большинство фосфатных включений подверглись вторичным изменениям. Силикатные включения содержат стекло и редкие силикатные и фосфатные фазы. Силикатные стекла имеют кислый и высоконатровый щелочной состав и практически не содержат Al_2O_3 . Сосуществование в троилитовом нодуле различных типов включений свидетельствует об их гетерогенном захвате и о большой вероятности существования силикат-натрофосфатной ликвации в сульфидном

расплаве на самых поздних этапах формирования метеорита. Для метеорита Уакит характерно присутствие сульфидных нодулей добреелит-троилитового состава и мелких сульфидных обособлений. Метеорит Уакит характеризуется широким набором экзотических акцессорных минералов: когенит Fe_3C , карлсбергит CrN , никельфосфид $(Ni,Fe)_3P$, уакитит VN , гроховскиит $CuCrS_2$ и другие, которые относятся к первичному парагенезису. В метеорите Уакит диссертантом совместно с другими исследователями были открыты и детально описаны два новых минерала, уакитит и гроховскиит. Фазовые взаимоотношения в сульфидных включениях показывают, что уакитит и гроховскиит являются первичными и относительно ранними фазами.

К главе 3 вопросы или замечания отсутствуют.

По материалам главы 3 сформулировано **четвертое защищаемое положение**.

В заключение отмечу, что защищаемые положения обоснованы результатами проведенных теоретических и экспериментальных термобарогеохимических исследований и аналитическими данными. Результаты работы изложены в 202 научных публикациях, среди которых 96 статей опубликованы в рецензируемых журналах и сборниках. В докладе приведен список из 40 опубликованных статей в журналах с квартилем Q1-Q2 (по SCIMAGO, Scopus). Приведенные в отзыве замечания не являются критическими и легко могут быть учтены в дальнейшей работе. Полученные В.В. Шарыгиным результаты вносят существенный вклад в развитие представлений о формировании уникальных натрокарбонатитовых магм и участия в их образовании ликвационных процессов и могут быть использованы при построении моделей физико-химических условий и механизмов их эволюции. Поставленные в работе проблемы решены на высоком научном уровне с использованием современных методов исследования вещества. Научный доклад хорошо проиллюстрирован, написан ясно и лаконично и не содержит «избыточной» информации».

Представленная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, и автор, несомненно, достоин присуждения степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 «минералогия, кристаллография».

Ведущий научный сотрудник Лаборатории Геохимии

Доктор геолого-минералогических наук

ИГЕМ РАН, Старомонетный пер., 35, Москва, 119017,

solovova@igem.ru

12 сентября 2022 года

И.П. Соловова

Соловова И.П.

