

**ОТЗЫВ официального оппонента на диссертацию на соискание ученой
степени кандидата геолого-минералогических наук**

Щеклеиной Марии Дмитриевны

**на тему: «Кварц как индикатор предэруптивных условий
существования кислых магматических очагов» по специальности**

1.6.3. Петрология, вулканология

Диссертационная работа М.Д. Щеклеиной посвящена изучению роли кварца, являющегося контейнером для расплавных включений, которые несут в себе информацию о магматической системе (состав, Р-Т условия кристаллизации кислых расплавов), в частности, на ее предэруптивной стадии. Кроме того, для кислых магм, инициирующих катастрофические извержения, характерно высокое содержание летучих компонентов. Кварц является одним из главных минералов кислых магматических систем и «законсервированные» в нем расплавные и флюидные включения дают уникальную возможность оценить содержание летучих компонентов в расплаве, а также играют важную роль в понимании процессов, происходящих в магматических очагах перед извержением. Все это определяет актуальность представленной работы.

Цель проведенной работы заключалась в разработке методики для корректной реконструкции состава расплава и определения предэруптивных условий существования кислых магматических очагов по данным изучения зерен вулканогенного кварца и включений в нем. В связи с поставленной целью, автором решались следующие задачи:

- разработка методики оценки температур равновесия кварц-расплав на основании опубликованных экспериментальных данных,
- разработка метода оценки влияния постзахватной кристаллизации кварца на стенках включений на состав захваченного расплава, характеристика постзахватных изменений в расплавных включениях в кварце при повторном нагреве,

- опробование разработанных методов на материале природных объектов.

Задачи работы вполне адекватны поставленной цели исследования.

В основе диссертации лежит как собственный фактический материал, собранный автором, так и коллекции, предоставленные другими исследователями. В качестве реперных объектов исследования был выбран пирокластический материал ряда вулканических структур: тефра толщи Бишоп тафф кальдеры Лонг Валли в Калифорнии, спекшиеся туфы толщи Голыгинских игнимбритов Паужетской кальдеры на Южной Камчатке, пирокластический материал вулкана Хангар Срединного хребта Камчатки, а также тефра вулкана Эльбрус на Кавказе.

Диссертационная работа изложена на 159 страницах и состоит из введения, 7 глав, списка литературы из 294 наименований и приложения. Текст содержит 24 таблицы и 74 рисунка.

Во введении сформулированы актуальность, научная новизна, основные защищаемые положения, раскрыт личный вклад автора и приведены другие обстоятельства выполнения работы.

Апробация работы была проведена на отечественных и международных конференциях, автором сделано 7 докладов. Основные результаты изложены в 4 работах, рекомендованных АК МГУ.

В первой главе на основе литературных данных рассмотрены вопросы, касающиеся механизмов извержений и сепарации кислого материала в магматических системах, рассматриваются факторы, контролирующие динамику извержения и влияющие на характер формирующихся пирокластических отложений.

В качестве примера изучения крупной эруптивной толщи рассмотрены отложения вулкана Тоба в Индонезии, характеризующиеся вариациями минерального и химического состава. Показаны механизмы, объясняющие вариации составов разных толщ туфов, а также приведена эволюция строения его магматической системы: от единого расслоенного резервуара до множества мелких магматических камер.

В разделе «Полиморфы кремнезема» рассматриваются поля стабильности кварца, тридимита и кристобалита, а также обсуждаются различные особенности кварца (зональность, содержания элементов-примесей, в частности Ti), как источника петрологической информации. Далее рассматриваются особенности изучения расплавных включений.

Также в этой главе приводится краткий литературный обзор каждого из рассматриваемых в диссертации объектов – кальдеры Лонг Валли в США, Паужетской кальдеры, вулкана Хангар на Камчатке и вулкана Эльбрус. Приведена петрография пород, временные оценки, представления об эволюции магматической системы по литературным данным.

Во второй главе рассмотрены аналитические методы исследования (электронно-зондовый анализ, анализ CL-снимков, рамановская спектроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ), которыми пользовался автор, а также коротко описаны условия экспериментов с расплавными включениями при нагревании в печи.

Глава 3 посвящена калибровке модели кварц – расплав на основе опубликованных экспериментальных данных. Были суммированы данные по 235 экспериментам, в которых кристаллизовался кварц, приведен состав закалочных стекол и имеются оценки содержания воды. Калибровка модели проводилась в четыре последовательных этапа. На первом этапе подбирались коэффициенты для четырех параметров модели ($Al, Na, K, \sqrt{Al \cdot (Na+K)}$), что позволило использовать эксперименты в простых синтетических системах. На втором этапе в калибровке участвовали эксперименты, проведенные при различном давлении (до 3.5 ГПа) в безводных условиях. На третьем этапе определялось влияние воды на температуру кристаллизации кремнезема с использованием экспериментов, проведенных в недосыщенных и насыщенных водой условиях. На четвертом этапе оценивалось влияние Ti, Fe, Mg и Ca на температуру кристаллизации кремнезема. Подбор коэффициентов проводился методом наименьших квадратов. Предложенная модель позволяет оценить температуру для сухих и водосодержащих

расплавов в широком диапазоне температуры (670–1650 °С), давления (0–3 ГПа) и содержания воды (0–8 мас.%).

В главе 4 «Постзахватные изменения во включениях в кварце» показаны существующие представления о постзахватных изменениях химического состава расплавных включений, в том числе летучих компонентов. Приводятся результаты методической работы автора по оценке влияния постзахватной кристаллизации кварца, отложенного на стенках включений на состав захваченного расплава. Также дается характеристика постзахватных изменений в составе расплавных включений в кварце при их нагреве до температур – 1100°С, 1150°С и 1200°С. Автор приходит к выводу, что во включениях, частично сохраняющих летучие компоненты, происходит увеличение содержания кремнезема расплава с последующей кристаллизацией кристобалита. Это приводит к буферированию состава расплава. Если включение при нагреве теряет воду постепенно, плавление кварца (минерала-хозяина) не происходит, и включение может сохранять исходное содержание петрогенных компонентов вплоть до полной дегазации включения.

В главе 5 рассматриваются результаты исследования расплавных включений в кварце пород различных природных объектов – кальдеры Лонг-Валли, Паужетской кальдеры, вулканов Хангар и Эльбрус. Были реконструированы условия образования (температура, давление) и составы магматических расплавов, из которых кристаллизовались вкрапленники кварца в породах этих объектов. Содержания воды в стеклах расплавных включений были оценены с помощью рамановской спектроскопии и по «избыточному кислороду».

В главе 6 обсуждаются полученные результаты изучения расплавных включений. Автор предлагает некоторый общий алгоритм по работе с вулканогенными вкрапленниками кварца для интерпретации петрологической информации. Также приводится обобщение по природным объектам исследования.

В главе 7 «Выводы» тезисно приведены общие заключения, к которым удалось прийти в результате проведенной работы.

Говоря о новизне материала диссертации, следует особенно отметить разработку геотермометра, описывающего равновесие кварц-расплав с учетом влияния давления и летучих компонентов. Практические выводы представляются достоверными.

В работе три защищаемых положения. Первое защищаемое положение обосновано полностью представленным материалом, второе и третье положения обоснованы не в полной мере.

К диссертации имеются следующие замечания:

1. В первой главе описание объектов исследования дано очень сумбурно и невнятно. Например, при описании вулкана Эльбрус автор пишет на стр. 47: «Породы Эльбруса относятся к магнезиальным гранитоидам [Frost et al., 2001] и по классификации гранитоидов лежат на границе групп постколлизийных гранитоидов и гранитоидов островных дуг [Frost et al., 2001]. И относятся преимущественно к кальциево-щелочной серии [Gubanov et al., 2004]». Имеется в виду известково-щелочная серия? И почему используется классификация гранитоидов по [Frost et al., 2001], если это вулканические породы? Далее автор пишет: «Породы Эльбруса имеют такое же распределение микроэлементов, как и риодациты Тузлука и трахиандезиты Худеса и Таш-Тебе, а концентрации элементов промежуточные между риодацитами Тузлука и трахиандезитами Худеса и Таш-Тебе [Газеев и др., 2004]». А какое распределение имеют породы Эльбруса, из текста неясно. Что такое риодациты Тузлука и трахиандезиты Худеса и Таш-Тебе, почему автор сравнивает эти породы, неясно. Кроме того, ни до того, ни после, эти объекты не упоминаются. И такие примеры не единичны.

2. В главе «Постзахватные изменения» автор описывает результаты серии экспериментов с первичными расплавленными включениями в кварце образца толщи Бишоп тафф кальдеры Лонг Валли в США при температурах

1100°C, 1150°C и 1200°C и атмосферном давлении. При этом не приводятся составы расплавных включений ни до, ни после экспериментов, что обязательно для такой методической работы. Тем более, эти данные будут являться основой для петрологических построений. Также неясно, каким образом был определен кристобалит? Делалась рентгеновская дифракция?

3. В этой же главе говорится «Содержание воды, оцененное с помощью рамановской спектроскопии [Kotov et al., 2021], лежит ниже предела обнаружения метода (0.5 мас. %) в обеих группах включений – как во включениях с неизмененными составами, так и во включениях, чьи составы сместились в более кремнистую область по линии контроля кварц-расплав». Вместе с тем, автор указывает, что средняя оценка содержания воды по «недостатку суммы» показывает более высокую концентрацию воды. И далее, в главе 5, где приводятся результаты изучения расплавных включений в кварце из этой же толщи Бишоп тафф, средняя оценка содержания воды по «недостатку суммы» составляет уже 5.2 мас.%. Чем вы объясняете такую значительную разницу между содержаниями воды в одних и тех же расплавах, оцененных по «недостатку суммы» и с помощью рамановской спектроскопии?

4. Все химические анализы стекол расплавных включений из разных объектов выполнены на энерго-дисперсионном спектрометре и приводятся в пересчете на 100%, хотя предполагают высокие концентрации H₂O (5-6 %), что представляется неправильным. Первичные данные обязательно должны быть представлены.

5. Содержание воды в расплаве автор предлагает оценивать «по избыточному кислороду». Само по себе, измерение кислорода каким-либо методом (ЭДС или волновым зондом) задача довольно сложная, поэтому требует серьезного обоснования и четкого описания, возможно, в отдельном разделе. В работе же такая методика описана только в главе «Методы исследования» и неполно. Сказано, что в качестве эталонов использовались стехиометричные синтетические соединения и природные силикаты

[Jarosewich, 1980], но составы этих эталонов не приведены, также как не указано, каким методом они получены. Определение кислорода проводилось при ускоряющем напряжении 20 кВ, хотя такие измерения проводятся при 10 кВ и даже ниже. Не указано, как рассчитывалось 2σ по H_2O . И, наконец, не приведены первичные данные анализа без пересчета суммы на 100 %. Все это не дает до конца оценить достоверность предлагаемого подхода для определения H_2O в расплаве.

6. Содержание летучих компонентов в расплавах, в частности Cl, составляют сотые процента. Предел обнаружения для этого элемента не указан. Насколько значимы такие содержания?

7. В главе 5 на стр. 100 – 101 приводятся содержания воды в стеклах пемз и в стеклах расплавных включений вулкана Хангар (Камчатка), оцененной как с помощью метода рамановской спектроскопии, так и по «недостатку суммы» со ссылкой на статью [Kotov et al., 2021]. Однако такие данные в статье отсутствуют, там рассматриваются пемзы Курильского озера (п-ов Камчатка). В приложении, в таблицах П1.6, П1.7 действительно приводятся содержания воды в стеклах расплавных включений в кварце пород вулкана Хангар, определенные методом рамановской спектроскопии, но со ссылкой на работу [Balashova, 2012]. Автор указывает, что «содержание воды в расплаве составляет от 4 до 6 мас.% H_2O . С ростом кремнекислотности концентрации воды в системе увеличиваются». Однако из таблицы видно, что содержания воды в большинстве включений (10 включений) составляет 1-3 мас. %, в 7 анализах – 4-5 мас.% и лишь в одном случае – 6.27 мас. %. При этом, роста концентрации воды в расплаве от увеличения кремнекислотности последнего не наблюдается. Например, при содержании SiO_2 в расплаве 75.72 мас. %, концентрация H_2O составляет 6.27 мас. %. При содержании SiO_2 в расплаве 76.71 мас. %, концентрация H_2O составляет 1.60 мас. %. А при 78 мас. % SiO_2 , концентрации H_2O могут составлять как 3.96 мас. %, так и 1.73 мас.%.

8. Следует также отметить, что работа написана очень небрежно, изобилует большим количеством ошибок и опечаток из-за чего ее очень трудно читать.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.6.3. – *Петрология, вулканология*, а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Щеклеина Мария Дмитриевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.3. *Петрология, вулканология*.

Официальный оппонент: кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории редкометального магматизма ИГЕМ РАН Андреева Ирина Анатольевна

 26 ноября 2025 года

Контактные данные: тел.: 7(915)480-00-13, e-mail: andreeva@igem.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 04.00.08 – петрология, вулканология

Адрес места работы: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 35

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук. Тел.: 7 (495) 951-4579; e-mail: director@igem.ru

Подпись сотрудника И.А. Андреевой

ИГЕМ РАН удостоверяю:

Зав. канцелярией


М.Н. Оболенская
26.11.2025 г.