

## **ОТЗЫВ официального оппонента**

**на диссертацию Садалова Федора Дмитриевича «Оксидная минерализация в фумаролах окислительного типа (вулкан Толбачик, Камчатка)» на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 – «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых»**

Диссертация посвящена минералогии оксидов в фумаролах окислительного типа на примере вулканической системы Толбачик, Камчатка. Автором четко показано распределение конкретных оксидных минералов в пределах отдельных зон фумарол, определяемых по минералогии и температуре формирования, рассмотрены особенности их взаимоотношений между собой и с другими фазами (силикаты, сульфаты, хлориды и т.д.) и выявлены специфика и особенности эволюции химического состава оксидных фаз. Автор сделал заключение, что обильная и разнообразная оксидная минерализация толбачинских фумарол и «рудная» специфика химического состава большей части оксидов является результатом сочетания нескольких факторов: высокая температура; атмосферное давление; очень высокая активность кислорода в газовой среде; насыщенность "рудными" элементами вулканического газа.

Данная диссертация выглядит достаточно цельным и законченным трудом по оксидной минерализации фумарол Толбачика, рассматривающим все аспекты и детали этой ассоциации по химизму, эволюции и т.д., включая сопоставление с фумаролами других вулканических систем мира. В целом, цели и задачи исследований, их актуальность и научная новизна не вызывают никаких сомнений. Защищаемые положения диссертации, а также выводы и рекомендации, изложены достаточно четко и обоснованы результатами исследований, достоверность которых опять-таки не подвергается сомнению.

Основу диссертации составляют 27 публикаций: 8 статей в рецензируемых научных журналах, два из которых имеют очень высокий импакт-фактор (более 2.5); одна статья в сборнике и тезисы 16 докладов. Диссертация состоит из введения и шести глав, каждая из которых посвящена определенным аспектам оксидной минерализации в фумаролах на вулкане Толбачик.

**Глава 1** представляет собой краткий обзор по вулканической системе Толбачик и ее фумарольных полей (локализация, строение и т.д.), с которыми связана богатая оксидная минерализация. Обобщены все проведенные ранее исследования по Толбачику, а также сведения по оксидной минерализации в фумаролах других вулканических систем мира. Вопросов и замечаний по этой главе не возникло.

**Глава 2** содержит краткие сведения об исследованных образцах и использованных методах их изучения. При ознакомлении с главой 2 возникли некоторые замечания по описанию сканирующей электронной микроскопии (стр. 29). Очень жаль, что для анализа состава оксидных минералов использовался только SEM-EDS-метод, где в качестве стандартов на основные элементы были чистые металлы, и все это впоследствии не подтверждалось WDS-методом (микрозонд, стандарты – кислород-содержащие соединения), особенно для минералов с мультикомпонентным составом. Все это хорошо видно в таблицах диссертации для анализов, суммы которых были ниже 98 или выше 102 мас.%. Второй момент – размер анализируемых зерен. Ничего не сказано об ограничениях по их размеру при анализе на сканирующем микроскопе. При приведенных параметрах размер электронного зонда должен составлять около 10 нм, а область генерации рентгеновского излучения (локальность анализа) - 3-5 мкм и более. Т.е., зерна размером менее 5-10 мкм не очень пригодны для анализа, поскольку высока вероятность захвата соседних фаз. Третий момент – ничего не сказано о возможных наложениях элементов при анализе. Для примера –  $TiK\beta - VK\alpha$ . Были ли подобные наложения для других элементов при EDS-анализе

толбачинских минералов, в частности для фаз, содержащих Te, Sb или Sn? Если да, то, как они учитывались при анализе?

**Глава 3** – самая большая по объему и представляет собой весь фактический материал, полученный диссертантом в процессе исследований по оксидной минерализации из фумарол Толбачика (морфология, состав и т.д. для конкретных оксидных минералов). Все выполнено на очень высоком уровне и каких-либо серьезных вопросов и замечаний по этой главе не возникло, за исключением небольших деталей по  $\text{Cu}$ -шпинелидам, по упоминанию дельталюмита и аналитики минералов группы псевдобрукита (подглава 3.5, с. 124-145).

В Таблице 3.4.7. (стр. 116) приведены рентгенографические данные для образцов термаэрогенита разного состава, а вот сами составы здесь отсутствуют. Они, конечно, были показаны в более ранней Таблице 3.4.2 (стр. 111), но эмпирические формулы исследованных образцов были бы здесь также уместны для лучшего восприятия материала.

Дельталюмит ( $\text{Al}_{0,67}\text{Vas}_{0,33}\text{Al}_2\text{O}_4$ ) также является оксидной фазой, выявленной в фумаролах Толбачика. Поскольку диссертант сам непосредственно не изучал этот минерал, то он лишь вскользь упомянул его, сославшись на первоисточник (Пеков и др., 2019). Хотя диссертанту нужно было бы сделать краткий обзор по дельталюмиту в контексте его взаимоотношений с другими оксидными фазами в пределах фумарол.

С сожалением приходится констатировать, что все данные по составу толбачинских псевдобрукитов немного «потерялись» на фоне обширного обзора по псевдобрукитам со всего мира (стр. 129-145). И непонятно, нужно ли было делать такой крутой обзор. А замечания оппонента касаются непосредственно химического состава толбачинских псевдобрукитов. В Таблицах 3.5.2 и 3.5.3 для анализов с низкой концентрацией  $\text{TiO}_2$  (<35 мас.%), характерны низкие суммы (<98 мас.%) и для этого не даны какие-либо объяснения. Поэтому непонятно, что это – недоопределение главных компонентов, либо недоопределение малых количеств второстепенных

элементов, либо вообще этот минерал является ульвошпинелью? Справедливости ради отметим, что составы псевдобрукита с высокой концентрацией  $\text{TiO}_2$  (>45 мас.%) подтверждены диссертантом методом монокристаллической рентгенографии (изучены два кристалла из фумаролы Арсенатная). А вот составы с низким содержанием  $\text{TiO}_2$  (<35 мас.%) не использовались для монокристаллической съемки.

В тексте диссертации используется термин «тиалитовый компонент»  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$  для описания составов псевдобрукита (стр. 129). Можно ли теперь использовать этот термин? Дело в том, что недавно был утвержден новый минерал группы псевдобрукита, гриффинит, с составом  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$  (Ma et al., 2022; 2023). Он был обнаружен во включениях в корунде из пород, ложно называемыми мантийными ксенолитами из вулканитов Mount Carmel, Израиль. Реально эти породы являются шлаками электрометаллургического производства (ферросплавы и т.д., Galuskin, Galuskina, 2023). Как результат, все минералы, открытые в этих ассоциациях Mount Carmel, включая гриффинит и сассит  $\text{Ti}^{3+}_2\text{TiO}_5$  (Ma et al., 2022), являются техногенными. Природный  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$ -доминантный минерал группы псевдобрукита с эмпирической формулой  $(\text{Al}_{0.36}\text{Fe}^{2+}_{0.29}\text{Mg}_{0.28}\text{Fe}^{3+}_{0.07})(\text{Ti}_{1.56}\text{Al}_{0.32}\text{Fe}^{3+}_{0.07}\text{V}_{0.03}\text{Zr}_{0.01})\text{O}_5$  был описан в муллит-корунд-санидиновом роговике (ксенолит в базальте) из Шотландии (Loch Scridain area, Isle of Mull; Frank K. Mazdab; <https://www.rockptx.com/flkm-176-to-flkm-200/#FKM-189>).

На стр. 145 (рис. 3.5.8) приводятся треугольники  $\text{Fe}^{3+}_2\text{TiO}_5 - \text{Fe}^{2+}\text{Ti}_2\text{O}_5 - \text{Mg}^{2+}\text{Ti}_2\text{O}_5$  для составов минералов группы псевдобрукита со всего мира (исключая армоколлит). К сожалению, не совсем понятна обоснованность формальных границ для полей минеральных видов, использованных автором. И второе – не понятно, как учитывались и распределялись второстепенные компоненты между главными миналами?

**Глава 4** посвящена систематизации и обобщению данных по распределению отдельных химических элементов, входящих в состав фумарольных оксидов Толбачика в качестве видообразующих или

существенных примесных компонентов. По мнению диссертанта, высокие содержания Cu, Sn и Sb в составе оксидов, где главными видообразующими компонентами выступают литофильные и сидерофильные элементы – Fe, Mg, Al, Ti, Cr, являются ярким индивидуальным признаком, типоморфным для оксидных минералов фумарольного (эксталяционного) происхождения. К Главе 4 вопросы или замечания отсутствуют.

**Глава 5** рассматривает физико-химические условия формирования оксидных минералов в фумарольных отложениях Толбачика. Отмечено, что, несмотря на обилие и видовое разнообразие, оксидная минерализация в пределах фумарол Толбачика распределена неравномерно. На примере фумаролы Арсенатная показано, что наибольшее видовое разнообразие оксидных минералов, в т.ч. их химических разновидностей, богатых халькофильными элементами, наблюдается в промежуточной по температуре полиминеральной зоне (400-700°C). Рассмотрены главные факторы такого распределения оксидной минерализации в фумаролах Толбачика и отмечено, что исходная насыщенность "рудными" элементами вулканического газа является главным параметром, определяющим минералого-геохимическую уникальность толбачинских фумарольных систем. Детально обобщены все данные по температурам формирования оксидных минералов в разных зонах (на основании химического состава, ассоциации фаз, сопоставления с другими объектами и т.д.). Хорошо известно, что фумарольные системы Толбачика характеризуются высокоокислительной обстановкой минералообразования и традиционно предполагалось, что такая обстановка существовала в течение всего фумарольного процесса. Тем не менее, диссертантом особо отмечено, что присутствие реликтов магнетита в гематите свидетельствует о том, что на ранних стадиях эволюции минералообразующая система была более восстановительной по сравнению с той высокоокислительной, которая наблюдается сейчас. Таким образом, в этой главе соискатель всесторонне и детально рассмотрел все вероятные варианты  $T-X-fO_2$  условий для конкретных оксидных минералов, для



определенных минеральных зон и для всей фумарольной системы в целом. Однако в процессе чтения этой главы у оппонента возник вопрос по оценке температуры формирования гематита. Диссертант рассмотрел разные варианты оценки температуры этого минерала в определенных зонах фумарол (стр. 189-191). А вот пара гематит-корунд почему-то не была использована для этих целей. Почему? Этот термометр не работает в этих условиях? Или какие-то другие причины?

**Глава 6** - это основные результаты и выводы по оксидной минерализации, полученные в ходе исследований и написания диссертации. Все дано в относительно краткой форме и соответствует задачам исследования и защищаемым положениям. У оппонента нет нареканий к этой главе.

Еще раз отмечу, что диссертация и исследования Ф.Д. Сандалова выполнены на очень высоком научном уровне. Диссертация выглядит достаточно цельным, осмысленным и законченным произведением по оксидной минерализации фумарол вулканической системы Толбачика. Вопросы и замечания, возникшие у оппонента при прочтении текста диссертации, нисколько не умаляют высокую значимость самого диссертационного исследования.

Диссертация Ф.Д. Сандалова отвечает всем требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.6.4 – «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых» (по геолого-минералогическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, и оформлена согласно приложениям № 8, 9 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Сандалов Федор Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 – «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых».

**Официальный оппонент:**

**Шарьгин Виктор Викторович**

доктор геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник, лаборатория термобарогеохимии (№436),  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения  
Российской академии наук

Контактные данные:

Рабочий тел.: +7-383-373-05-26 (доб.568), e-mail: sharygin@igm.nsc.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом была защищена  
диссертация: 25.00.05 – Минералогия, кристаллография

Адрес места работы:

Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, проспект Коптюга, д. 3

Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН

Тел.: +7 (383) 373-03-28; e-mail: director@igm.nsc.ru

Интернет-сайт организации: <https://www.igm.nsc.ru/index.php/>

Я, Шарьгин  включение своих  
персональны  й диссертационного  
совета, и их д   
Шарьгин В.И.  05.12.2023