

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»



Национальный
исследовательский
**Томский
государственный
университет**



**Геолого-
географический
факультет**

Томского
государственного
университета

ДИНАМИКА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГЕОСФЕР ЗЕМЛИ

Материалы Всероссийской конференции с международным участием,
посвященной 100-летию подготовки в Томском государственном университете
специалистов в области наук о Земле

8–12 ноября 2021 года

ТОМ I

Томск 2021

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИФРАКЦИИ ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ

Д.В. Лычагин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, lychagin@mail.tsu.ru

Данная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения от 26.07.2021 № 075-15-2021-693 (№ 13.ЦКП.21.0012).

Метод дифракции отраженных электронов открывает новые возможности получения информации по ориентации кристаллов и дефектах кристаллического строения. В статье рассмотрено применение этого метода для исследования деформации и рекристаллизации минералов. Показана возможность использования этого метода для определения характеристик границ и двойников. Описаны возможности и ограничения по исследованию кристаллографической текстуры минералов и фазовому анализу.

Ключевые слова: дифракция отраженных электронов, сканирующая электронная микроскопия, границы, двойники, кристаллографическая ориентация

The electron backscatter diffraction method opens up new possibilities for obtaining information on the orientations of crystals and the crystal structure defects. The application of this method to study the deformation and recrystallization of minerals is considered. The possibility of using this method to determine the characteristics of individual boundaries and twins is shown. Possibilities and limitations of studying the crystallographic texture and phase analysis of minerals are described.

Keywords: electron backscatter diffraction, scanning electron microscopy, boundaries, twins, crystallographic orientation

Данные по кристаллографической текстуре дают возможность судить о рекристаллизации и характере деформации в минерале. Это позволяет анализировать кристаллографию скольжения, выделять роль двойникования, судить об уровне напряжения и температуре деформации. Наиболее широко распространенным методом исследования текстуры служил метод рентгеноструктурного анализа. Имея ряд достоинств, этот метод имеет ограничения. Он достаточно трудоемок, если не использована автоматизация съемки и обработки результатов. Кроме этого локальность метода определяется размером рентгеновского луча (минимальный диаметр 0,5 мм). С появлением приставок для дифракции отраженных электронов на растровых электронных микроскопах появилась возможность одновременно с анализом морфологии поверхности и химическим анализом минералов получать данные о кристаллографической ориентации зерен, внутренней дефектной структуре зерен, напряжениях и распределении выбранных фаз. Этот метод обладает высокой разрешающей способностью, предельный уровень которой определяется конструкцией электронного микроскопа. В частности, наиболее хорошие параметры дает растровый электронный микроскоп с катодом полевой эмиссии. В этом случае появляется возможность анализировать зерна диаметром 20 нм (шаг 5 нм). Угловое разрешение метода ограничено до $\sim 0,5^\circ$. Границы зерен можно достоверно диагностировать от 2° . Программное обеспечение позволяет проводить раз-

структуры и получать большой массив данных в короткие сроки. Ограничения метода обусловлены большим размером зерна, ограничивающим статистику по зернам или отсутствием картины кикучи линий, делающих невозможность применение метода. В настоящее время, этот метод применяется в различных областях, охватывающих область исследований от нанoeлектроники до геологических структур. С методикой применения этого метода и различными его приложениями можно ознакомиться в работах, указанных в списке литературы.

Для обработки и анализа результатов, полученных в режиме дифракции отраженных электронов, используют программы INCA Crystal и HKL Channel 5. В настоящее время, для индивидуально обработки результатов на персональном компьютере разработана программа AZtecCrystal (пробная версия AZtecTimed и лицензионная версия AZtecFlex). Версия AZtecCrystal более удобна для работы и имеет дополнительные возможности (представленные ниже результаты обработаны в этой программе).

Программное обеспечение дает возможность анализировать результаты дифракции отраженных электронов, картирования химического состава с использованием энергодисперсионного анализатора и снимков ориентационного контраста. В результате анализа детектором отраженных электронов можно получить карты ориентации кристаллитов, провести идентификацию и картирование фаз. Можно проводить анализ текстур, используя прямые и обратные

полюсные фигуры и функцию распределения ориентаций. При работе можно использовать модуль, предназначенный для анализа границ, выделяя малоугловые, большеугловые и специальные границы. Составной частью анализа является возможность определения кристаллографических индексов оси разориентации. Причем в программе AZtecCrystal

есть модуль для представления ориентации этих осей в виде прямых и обратных полюсных фигур. Это не полный перечень возможностей анализа.

Проиллюстрируем возможности применения этого метода на примере структуры жильного кварца Южно-Муйского блока Западного Забайкалья (Lychagin D.V. et. al., 2020) (рис. 1).

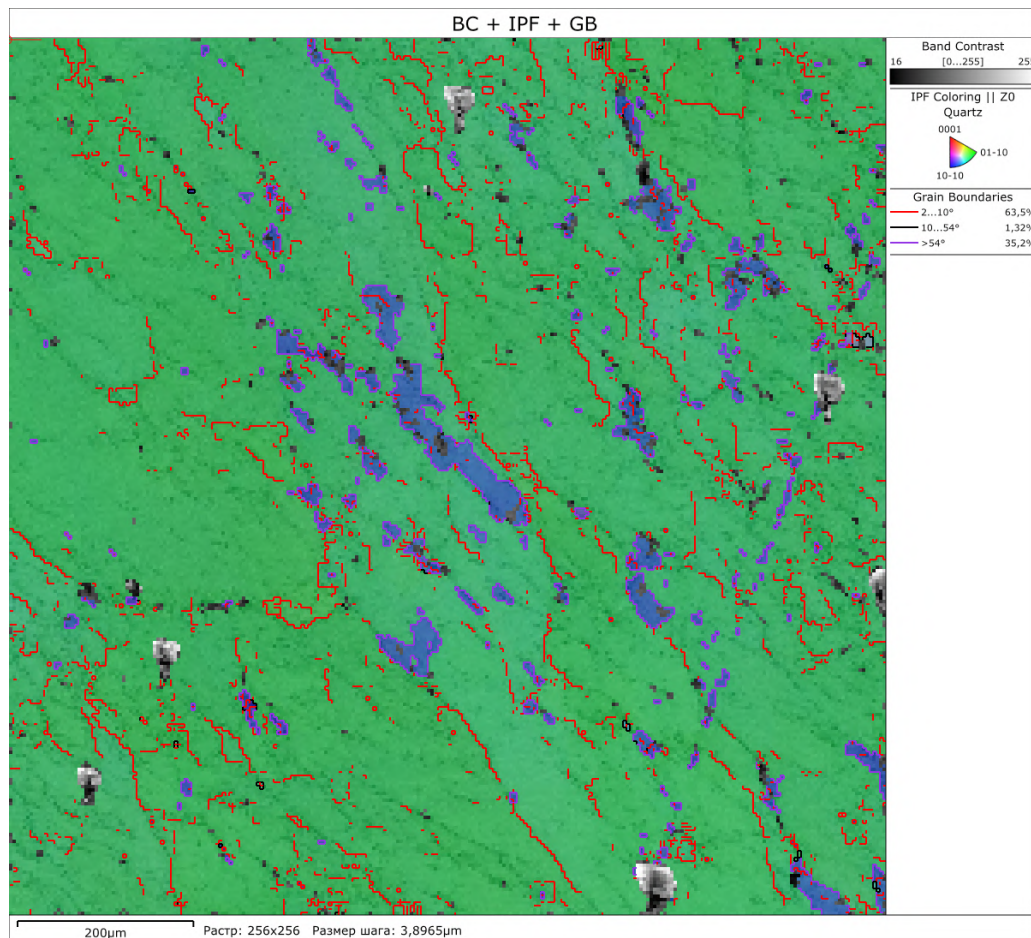


Рис. 1. Карта ориентаций жильного кварца в цветах обратной полюсной фигуры и границ разориентации (пояснения на вставке, результаты Кунгуловой Э.Н.)

Карта ориентаций кварца представлена двумя областями. Основная имеет ориентацию . Кроме этого можно выделить области, имеющую ориентацию . Эти области отделены друг от друга границами с разориентацией вблизи 60° . Для выбора оптимального диапазона углов для задания границ необходимо после очистки изображения от дефектов индицирования рассмотреть распределение углов разориентации (рис. 2).

Будем рассматривать данные для соседних пар. На гистограмме хорошо выделяется область для малоугловых границ (менее 10°) и пик вблизи 60° . Первые границы образуют сетку в основном зерне (красный цвет). Вторые – ограничивают области с разной кристаллографической ориентацией и представляют собой двойниковые границы Дофине. Кроме этого проявляют себя 30° границы. Однако, на карте разориентаций они имеют единичный точечный характер, что не позволя-

ет говорить о достоверности их определения.

Программа позволяет легко вывести прямые и обратные полюсные фигуры, функцию распределения ориентаций, а также осей разориентации. Данное представление практически не используется исследователями, между тем оно необходимо для детального кристаллографического анализа. Один из вариантов показан на рисунке 3.

На рисунке хорошо выделяется ориентация вблизи угла $[001]$, что соответствует оси разориентации при двойниковании.

Более сложный вариант для полного анализа представляет случай образцов с большим количеством структурных трещин и дополнительных плохо определяемых фаз (минералов). Такой случай может возникнуть при построении карт ориентации форстерита в дунитах (рис. 4).

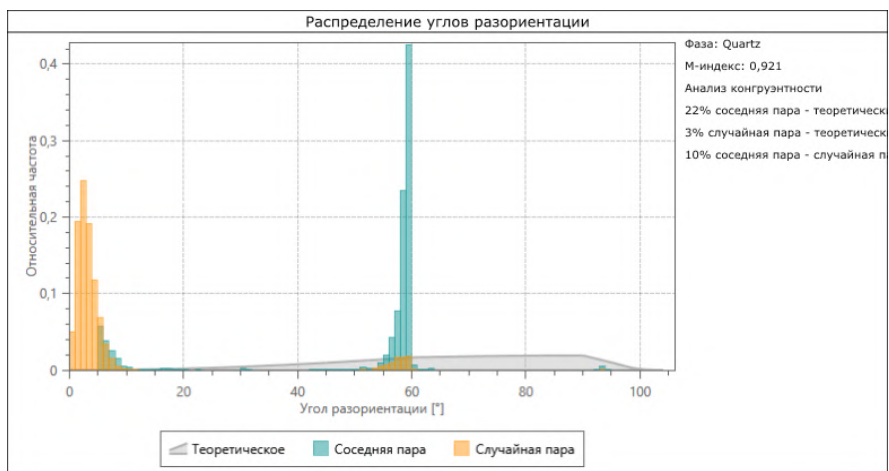


Рис. 2. Распределение углов разориентации в структуре жильного кварца

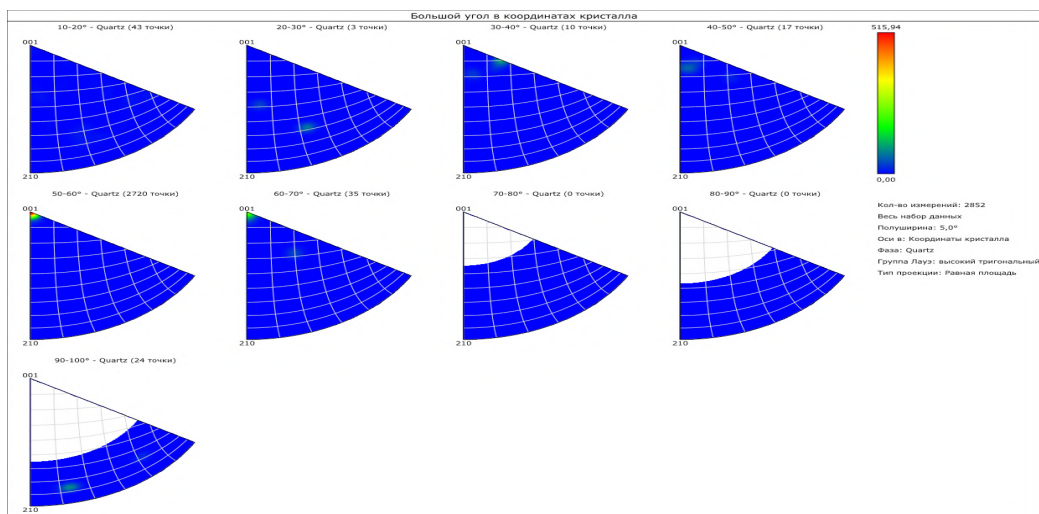


Рис. 3. Представление кристаллографической ориентации осей разориентации для больших углов в координатах кристалла

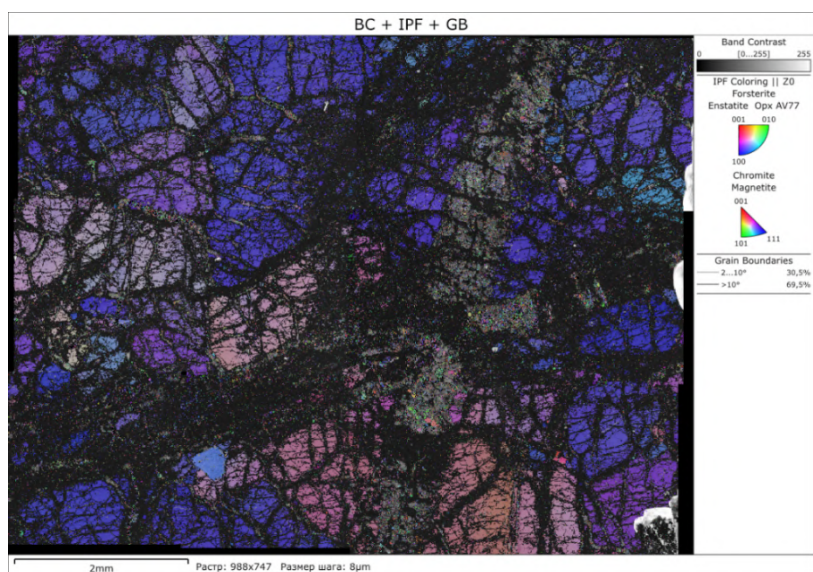


Рис. 4. Карта ориентации форстерита в дунитах (данные А.А. Пешкова)

Эффективность индирования по всему снимку составляет менее 30 %. Ростовая блочность форстерита

та хорошо прослеживается. Между тем, разориентация отдельных областей внутри данного крупного зерна носит условный характер, так как они отделены друг от друга или трещинами или другими непроиндцированными фазами. Для такого случая эффективность применения метода заметно снижется. Кроме этого, ограничение площади съемки 1 мм² не позволяет набрать статистику по текстуре для крупнозернистых агрегатов.

Таким образом, применение метода дифракции отраженных электронов весьма эффективно для микроанализа кристаллографических ориентировок (текстуры) и типа границ зерен минералов с учетом некоторых ограничений метода.

Работа выполнена с использованием оборудования Томского регионального центра коллективного пользования ТГУ.

Автор выражает благодарность Э.Н. Кунгуловой

и А.А. Пешкову, предоставившие результаты для иллюстрации метода, а также Е.Н. Москвичеву за финишную подготовку образцов и проведение съемки.

Литература

1. Engler O., Randle V. Introduction to texture analysis: macrotexture, microtexture, and orientation mapping. Taylor and Francis Group, LLC, CRC Press, 2010. 488 p.
2. Lychagin D.V. et. al. Microstructure of Vein Quartz Aggregates as an Indicator of Their Deformation History: An Example of Vein Systems from Western Transbaikalia (Russia) // Minerals. 2020. 10. 865.
3. Prior D.J. et al. EBSD in the Earth Sciences: Applications, Common Practice, and Challenges, Chapter 26 // Electron Backscatter Diffraction in Materials Science / A.J. Schwartz et al. Springer Science+Business Media, LLC, 2009, pp. 345–360.

УДК 549 + 550.42 (571.66)

ФУМАРОЛЬНЫЕ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ВУЛКАНА ТОЛБАЧИК НА КАМЧАТКЕ – УНИКАЛЬНАЯ ПРИРОДНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

И.В. Пеков¹, Н.В. Зубкова¹, Н.Н. Кошлякова¹, Н.В. Щипалкина¹, Ф.Д. Сандалов¹, М.О. Булах¹,
А.А. Агаханов², В.О. Япаскурт¹, А.Г. Турчкова¹, Е.Г. Сидоров³

¹Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, igorpekov@mail.ru

²Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана РАН, Москва, Россия

³Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 19-17-00050.

Активные фумарольные поля вулкана Толбачик (Камчатка) – самый яркий в мире пример наземных эксгальационных минералообразующих систем окислительного типа. Здесь установлено более 360 минералов, в т.ч. 134 новых. Разнообразие и своеобразие этой минерализации обусловлены уникальным сочетанием физико-химических условий и механизмов формирования: это высокие температуры, атмосферное давление, очень высокая фугитивность кислорода, газовый транспорт многих компонентов, специфическая геохимия газов.

Ключевые слова. минералогия, геохимия, фумарола, окислительные условия, новый минерал, вулкан Толбачик, Камчатка

Active fumarole fields of the Tolbachik volcano (Kamchatka, Russia) represent the world-brightest example of the terraneous oxidizing-type exhalative mineral-forming system. >360 minerals including 134 new species are identified there. Both originality and diversity of this mineralization are caused by a unique combination of physical and chemical conditions: there are high temperatures, atmospheric pressure, very high O₂ fugacity, gas transport of many elements, and specific geochemistry.

Keywords: mineralogy, geochemistry, fumarole, oxidizing conditions, new mineral, Tolbachik volcano, Kamchatka

Фумарольные поля, порожденные вулканом Толбачик, относящимся к Ключевской группе вулканов на Камчатке, привлекают пристальное внимание минералогов и геохимиков уже почти полвека. Их интенсивное изучение началось во время Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ), происходившего в 1975–1976 годах (Набоко, Главатских, 1983; Боль-

шое..., 1984). Уже в первые пятнадцать лет после БТТИ в активных фумаролах Толбачика, принадлежащих к окислительному типу, было установлено, главным образом, научным коллективом под руководством Л.П. Вергасовой и С.К. Филатова, почти сто минералов, в том числе открыто десять новых минеральных видов (Вергасова, Филатов, 1993). За последующие двадцать