



<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-2-4>
УДК 552.321.6

Применение метода дифракции отраженных электронов для решения петрологических задач (на примере ультрамафитов)

Д.Е. Савельев¹, Н.С. Власенко²

¹Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, ул. К. Маркса 16/2,
г. Уфа, 450077 Россия; savl71@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7/9,
г. Санкт-Петербург, 199034 Россия

Статья поступила в редакцию 03.02.2026 г., после доработки 28.05.2026 г., принята к печати 10.06.2026 г

Аннотация. Дифракция обратно-рассеянных электронов (electron back-scattered diffraction, EBSD) – современный прецизионный метод, который используется для изучения микроструктурных особенностей кристаллических материалов. В статье рассмотрены различные аспекты применения метода к природным образцам ультрамафитов, включая подготовку поверхности, получение первичных данных и их постобработку в программах HKL Channel 5 и MTEX. Проведено сравнение с классическим методом микроструктурного изучения прозрачных минералов на универсальном Федоровском столике. Главные достоинства метода EBSD – локальность, высокая скорость получения первичных данных, автоматизация, объективность. Основные сложности заключаются в повышенных требованиях к качеству поверхности образцов и необходимости изучения значительных площадей для получения представительной информации для зерен крупного размера. На примере свежих дунитов из массива Урало-Аляскинского типа продемонстрированы возможности метода, включая анализ предпочтительной кристаллографической ориентировки оливина, определение активных систем скольжения, оценку внутризерновой разориентировки, определение размеров субзерен и рекристаллизованных зерен (необластов). Показано, что современные инструменты получения и обработки данных EBSD дают возможность объективно оценить относительный вклад в формирование горных пород таких факторов, как пластическая деформация и рекристаллизация, и оценить режим пластического течения геоматериалов в литосфере.

Ключевые слова: EBSD, пластическая деформация, рекристаллизация, предпочтительная кристаллографическая ориентировка, порфинокласт, необласт, ультрамафиты, оливин, хромшпинелид.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме FMRS-2025-0014, а также при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета, шифр проекта 124032000029-9.

Благодарности. Авторы благодарны рецензенту В.В. Шиловских и редакторам журнала, чьи ценные замечания позволили значительно улучшить текст рукописи. Авторы также признательны И.И. Мусабинову за помощь в проведении EBSD исследований, которые были выполнены на базе ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов» (г. Уфа, Россия), а также М.С. Ложкину (РЦ «Наноконструирование фотоактивных материалов» Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия) за травление образцов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. Д.Е.Савельев, Н.С. Власенко – разработка концепции, проведение исследований, написание рукописи.

Для цитирования: Савельев Д.Е., Власенко Н.С. Применение метода дифракции отраженных электронов для решения петрологических задач (на примере ультрамафитов). *Минералогия*, 2026, 12(2), 36–51. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-2-4>

Application of electron backscattered diffraction to solving petrological problems on example of ultramafic rocks

D.E. Saveliev¹, N.S. Vlasenko²

¹ Institute of Geology, Ufa Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, ul. K. Marksa 16/2, Ufa, 450077 Russia; savl71@mail.ru

² St. Petersburg State University, Universitetskaya nab. 7/9, St. Petersburg, 199034 Russia

Received 03.02.2026, revised 28.05.2026, accepted 10.06.2026

Abstract. Electron backscatter diffraction (EBSD) is a modern high-precision method for studying the microstructural features of a wide range of crystalline materials. This paper examines EBSD application for natural ultramafic rocks including surface preparation, analysis, and post-processing in HKL Channel and MTEX software. The EBSD data are compared with those measured using classical microstructural study of transparent minerals on a universal Fedorov stage. The main EBSD advantages include high localization and rapid data acquisition, automation, objectivity, and a wide range of the studied materials. The main challenges are related to strict requirements for sample surface quality and necessary study of large areas to obtain representative information because of the large grain size of rock. Using fresh Uralian-Alaska-type dunites as example, we showed the EBSD possibilities including the analysis of preferred crystallographic orientation of olivine, identification of active slip systems, assessment of intragranular misorientation, and determination of sizes of subgrains and recrystallized grains (neoblasts). It is shown that modern tools for obtaining and processing EBSD data enable an objective assessment of relative contributions of plastic deformation and recrystallization to rock formation and estimation of a plastic flow regime of geomaterials in the lithosphere.

Keywords: EBSD, plastic deformation, recrystallization, lattice preferred orientation, porphyroclast, neoblast, ultramafic rock, olivine, chromite.

Funding. This work was supported by state contracts nos. FMRS-2025-0014 (Institute of Geology, Ufa Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia) and 124032000029-9 (St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia).

Acknowledgements. The authors are grateful to reviewer V.V. Shilovskikh and editors of the journal, whose valuable comments allowed significant improvement of the manuscript. The authors are also grateful to I.I. Musabirov for assistance with EBSD studies at the Center for Collective Use “Structural and Physicomechanical Studies of Materials” of the Institute for Superplasticity Problems of Metals, Russian Academy of Sciences (Ufa, Russia) and to M.S. Lozhkin (Research Center “Nanoengineering of Photoactive Materials” of the St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia) for sample etching.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Author contribution. D.E. Saveliev, N.S. Vlasenko – concept development, research, writing the manuscript.

For citation: Saveliev D.E., Vlasenko N.S. Application of electron backscattered diffraction to solving petrological problems on example of ultramafic rocks. *Mineralogiya*, 1 2026, 2(2), 36–51. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-2-4>

ВВЕДЕНИЕ

Внутренняя структура минеральных индивидов (зерен), слагаемых ими агрегатов и горных пород является их важнейшей характеристикой наряду с химическим составом. Однако до недавнего времени микроструктуры горных пород количественно могли быть оценены только петрографами высочайшего уровня, что объясняет превалирование работ, посвященных только химическим и минералогическим характеристикам геологических материалов. Традиционно микроструктурные исследования в науках о Земле проводились петрографическими методами и ограничивались использованием измерения оптических характеристик прозрачных анизотропных минералов на универсальном столике Федорова. Чаще всего такие ра-

боты выполнялись при исследовании метаморфических комплексов на основе исследований кварца, кальцита, слюд и, в меньшей степени, полевых шпатов и амфиболов. Одним из первых этот метод применил Б. Зандер в начале XX века (Саранчина, Кожевников, 1985; Казаков, 1987).

Начиная с 1960-х годов петроструктурный метод стали использовать петрологи, изучающие ультрамафиты мантийных разрезов офиолитовых комплексов. Именно благодаря петрографическому подходу впервые была доказана высокотемпературная тектонитовая природа лерцолитов и гарцбургитов и показано, что они формировались в ходе пластического течения при подъеме мантийных диапиров в зонах декомпрессии под рифтогенными структурами Земли (Carter, Ave Lallement, 1970;

Carter, 1976; Nicolas et al., 1971; Poirier, 1985; Гончаренко, 1989; Щербаков, 1990; Денисова, 1989, 1990; Чернышов, 2001).

На рубеже XX–XXI веков на смену петроструктурному методу пришел более продуктивный и объективный метод изучения микроструктуры кристаллических материалов – дифракция отраженных (обратно-рассеянных) электронов на базе сканирующей электронной микроскопии (electron back-scattered diffraction, EBSD) (Метод..., 2014; Даниленко и др., 2012; Варюхин и др., 2014; Prior et al., 1999; 2009; Spiess et al., 2001). По сравнению с оптическим методом, EBSD может применяться к непрозрачным и изотропным минералам. Этот метод является полностью инструментальным, т. е. в отличие от петрографического, где первичные данные считывались и записывались оператором по лимбам и дужкам столика Федорова, EBSD сканирование проводится в автоматическом режиме и данные обрабатываются компьютерными алгоритмами, что во многом исключает субъективность измерений. Кроме того, при помощи EBSD можно получить более разнообразную информацию, по сравнению с Федоровским методом.

Данные, полученные методом EBSD, разделяются на три класса: 1) карты, 2) текстуры деформации (fabric, или петроструктурные диаграммы в терминологии петроструктурного анализа), 3) функции распределения ориентировок (ФРО – orientation distribution function, ODF), к которым относится графическое или цифровое представление интенсивности проявления текстуры. Все перечисленное можно приенить к изучению ультрамафитов.

Основной целью проведенных нами EBSD исследований ультрамафитов являлось определение количественных характеристик микроструктуры пород для выявления роли различных петрогенетических процессов, включая магматизм, пластическое течение, рекристаллизацию и метаморфизм, в становлении массивов. Цель настоящей статьи – обобщить накопленный авторами опыт в применении метода EBSD для расшифровки микроструктурных особенностей образцов ультрамафитов Урала. Несомненно, любой обзор на эту тему не может быть исчерпывающим, но мы надеемся, что наша работа поможет начинающим исследователям сориентироваться в подходах к подготовке препаратов, проведению съемки и обработке первичных данных.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Ниже рассмотрены методические аспекты подготовки образцов, получения первичных данных и их постобработки в различных программных продуктах (HKL Channel 5, Aztec Crystal, MTEX).

Пробоподготовка. Подготовка образцов ультрамафитов для микроструктурных исследований начинается еще при изучении обнажений или керн в полевых условиях. По возможности, следует выбирать образцы, наименее затронутые наложенными (вторичными по отношению к изучаемому) процессами. В случае с ультрамафитами наиболее распространенный наложенный процесс – серпентинизация, которая затушевывает структуры, возникшие при высокотемпературной деформации (пластическом течении) мантийного материала. Второй важный аспект – отбор образцов с максимально выраженными макроскопическими структурными характеристиками, к которым традиционно относятся минеральная уплощенность (foliation, schistosity – S), которая часто совпадает с первичной полосчатостью, и линейность (lineation – L). Линейность обычно выражена удлинением минеральных зерен и/или агрегатов в плоскости полосчатости/минеральной уплощенности.

В идеальном случае отобранный образец разрезается перпендикулярно плоскости S , а направление L направлено вдоль его длинной стороны на плоскости среза. В структурной геологии принято сопоставлять направление L с осью X , перпендикуляр к нему, лежащий в плоскости S , является осью Y , а нормаль к S – осью Z . Определенное неудобство в дальнейшем связано с тем, что в системе координат микроскопа оси Y и Z меняются местами.

Размер и ориентировка препарата должны соответствовать решаемой задаче, однако в большинстве случаев области исследования ограничены площадью порядка 1 мм², хотя методы автоматизации и позволяют увеличить это значение. Максимальный размер анализируемой области обычно не превышает 15 × 10 мм в связи с геометрическими ограничениями существующей аппаратуры для EBSD.

Дальнейшая пробоподготовка проводится стандартными для электронной микроскопии методами с дополнительными финальными шагами ультрамикрополировки на коллоидных суспензиях или ионного травления, причем выбор зависит от характеристик образца и часто требует экспериментального подбора. Особые требования к поверхно-

сти обусловлены малой глубиной получения сигнала для EBSD (10–30 нм). Соответственно, механически деформированный слой, полученный при полировке образца, должен быть полностью удален.

При изучении образцов в Ресурсном центре (РЦ) «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия) съемка проводилась на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Hitachi S-3400N с энерго-дисперсионным детектором Oxford Instruments HKL NordlysNano. Травление образцов проводилось на установке для ионного травления Oxford Instruments IonFab-300 направленным потоком ионов аргона высокой плотности (0.5–0.6 мА/см²) в РЦ «Нанопотоника» (СПбГУ).

При изучении препаратов в Институте проблем сверхпластичности металлов (ИПСПМ РАН, г. Уфа, Россия) деформированный слой с полированных препаратов удалялся на суспензиях «0.04 μm – Colloidal Silica Suspension, Non-Stick/Rinsable» и «0.02 – Colloidal Silica Suspension, Non-Crystallizing» (Allied High Tech Products Inc.). После образец тщательно промывался в проточной воде и обрабатывался спиртом с обдувкой сжатым воздухом (азотом).

Перед изучением поверхность препаратов может быть покрыта тонким слоем углерода (0.5–1.5 нм). Режим напыления для каждого набора условий, специфичных для применяемого оборудования, следует подбирать опытным путем.

Перед EBSD исследованиями необходимо изучить препарат в режиме BSE/EDS, чтобы иметь представление о его макроструктуре, фазовом и химическом составе. Желательно предварительно разметить участки образца, поскольку съемка в режиме EBSD производится на наклонном препарате, и навигация в этом режиме затруднена.

Основы метода. Метод EBSD основан на локальном анизотропном Брэгговском рассеянии электронов на кристаллической решетке. Отраженные электроны регистрируются плоским двумерным детектором. В случае дифракции на кристаллической решетке фиксируются дифракционные полосы (полосы Кикучи), соответствующие кристаллографическим плоскостям с определенными hkl индексами. Каждая кристаллическая решетка имеет уникальную структуру и набор полос Кикучи. Конфигурация набора полос в каждом случае определяется ориентировкой кристаллической структуры минерала к плоскости образца. Подробно физические основы данного метода описаны в

соответствующих руководствах и обзорных работах (Метод..., 2009; Даниленко и др., 2012; Варюхин и др., 2014).

Доля отраженных электронов зависит как от характера исследуемого материала, так и от условий съемки. Так как доля дифрагировавших относительно общего количества отраженных электронов зависит от качества поверхности кристалла и его общей дифракционной способности, первый измеряемый параметр – контраст дифракционных полос (band contrast). Контраст полос нельзя напрямую сравнивать для различных по составу фаз, но он чувствителен к локальному совершенству кристаллической структуры и хорошо оконтуривает деформации, диффузионные каймы, блочность и т. д.

Картина Кикучи выглядит как набор диффузных прямых линий, каждая из которых соответствует определенной плоскости кристаллической решетки. Картины Кикучи несут информацию о симметрии и параметрах элементарной ячейки, но их прямая расшифровка сложна, а для низкосимметричных соединений невозможна при настоящем уровне развития технологий. Поэтому полученные картины обычно индицируются методом сравнения с теоретическими картинками, построенными на основе структурных данных. Суммарное угловое расхождение экспериментальной и теоретической картин (Mean Angle Deviation, MAD) служит мерой качества индицирования, и в общем случае для 12 полос должно быть ниже 1°.

Дальнейший анализ текстур и структур с применением метода EBSD состоит в интерпретации индицированных картин, соответственно, при неверном индицировании все результаты последующей обработки могут оказаться ошибочными. Во избежание этого, при подготовке к EBSD анализу следует как можно более полно определить список фаз-кандидатов, теоретические картины Кикучи для которых будут использоваться в качестве фаз сравнения.

Для визуализации ориентировки зерен существует два основных метода, каждый из которых имеет свои недостатки: 1) цветовая кодировка в углах Эйлера соответствует последовательному вращению кристаллического тела относительно заранее выбранных направлений (системы координат) в трех плоскостях, причем каждое вращение отдельно кодируется в цветовой палитре RGB; 2) кодировка в цветах полюсных фигур предполагает сравнение ориентировки одной из осей системы координат с кристаллографическими осями

кристалла и, соответственно, для полной картины требуется построение трех карт. В случае вынесения всех измеренных ориентаций на сетку Вульфа можно построить полюсные фигуры как наглядное представление текстурных данных.

Важно понимать, что EBSD – метод сравнения, т. е. полученные наборы полос Кикучи программа сравнивает с предварительно выбранными из базы вариантами и предлагает варианты, исходя из количества совпавших полос и MAD. Для надежного определения фазы 10–12 полос должны совпадать с теоретической картиной для фазы сравнения, MAD должен быть < 1 . Чем больше полос и меньше MAD, тем выше точность определения. В случае если фазы нет в предустановленной базе программы, ее можно ввести вручную, воспользовавшись блоком Twist пакета HKL Channel.

При использовании метода EBSD первая информация, которую мы получаем – степень раскристаллизованности фазы. Аморфное вещество или вещество со значительно нарушенным поверхностным слоем полос давать не будет. Затем уточняется правильность диагностики фаз в пределах выбранного поля – количество совпадающих полос и MAD. Перед получением карты задаются перечень фаз, шаг и поле картирования. Процедура в зависимости от шага может занимать до 8 ч. После окончания картирования получаются несколько основных карт: карта контраста полос BC (band contrast) в режиме «градации серого цвета», отражающая качество получаемых полос Кикучи для каждой фазы; карта фаз, иллюстрирующая взаимоотношения разных фаз; и карты распределения в углах Эйлера и отдельно по осям X , Y и Z , которые показывают ориентировку кристаллической структуры для каждого отдельного зерна по отношению к плоскости образца. Эти карты лежат в основе построения прямых и обратных полюсных фигур.

Методические аспекты EBSD сканирования.

Нами EBSD сканирование проводилось с использованием двух различных программ: блок Flamenco из пакета HKL Channel 5 (ИПСМ РАН) и AzTec (СПбГУ). Геологу важно предварительно выяснить, какие фазы входят в состав образца и одновременно имеются в базе программы на данном микроскопе. Их необходимо выбрать из списка и проконтролировать корректность идентификации. Обычно считается, что для этого достаточно определить 10 точек на зерно. Поскольку геологические образцы отличаются крупным размером зерна (от 10 мкм до первых миллиметров), для получения

представительных обзорных карт рекомендуется шаг 10–20 мкм, а для особенно крупнозернистых (в рассматриваемом случае – массивные хромиты, дуниты) – до 30–40 мкм. На участках детализации (структура отдельных зерен) шаг может составлять 1–10 мкм, в наиболее современном оборудовании достигнута локальность определения с шагом 50 нм. Если предметом исследования являются тонкие структурные характеристики, например, внутризеренные деформации, рекомендуется выбирать минимальный шаг сканирования.

Крупнозернистая структура геологических материалов обуславливает еще один важный нюанс. Минимальное увеличение, при котором возможно EBSD сканирование на СЭМ Tescan Mira, составляет $\times 90$, что соответствует участку сканирования 2.5×2.5 мм. Для получения представительных данных о микроструктуре ультрамафитов необходимо изучить не менее 100 зерен, а значит исследовать минимум шесть таких участков. Для объединения (сшивания) частных карт можно применить блок MapStitcher из пакета HKL Channel 5. Нужно иметь в виду, что карты с различным шагом сканирования объединить невозможно. Кроме того, при больших отклонениях от нормали к поверхности образца могут проявляться геометрические аберрации, которые требуют дополнительной корректировки.

Методика обработки данных. Обработка данных делится на первичную и постобработку. К первичной можно отнести очистку изображения от случайных точек (wild spikes), удаление шума, сшивание нескольких участков. Первичная обработка проводится в программах AzTec Crystal и HKL Channel 5 и является частью стандартной процедуры подготовки данных для пользователя, обычно проводится на месте проведения анализа.

Дальнейшая обработка предполагает построение карт, текстурных диаграмм и функций определения ориентировок. В пакете HKL Channel 5 для этого используются блоки Tango + MapSticher, Mambo и Salsa, соответственно. Альтернативным инструментом для обработки данных EBSD является программа MTEX, работающая в среде MatLab* (Bachmann et al., 2010a). Далее мы будем ссылаться на оба ресурса.

Процедура обработки в нашем случае включает следующее. После сканирования участка (блок Tango в пакете HKL Channel 5) производится фильтрация шума (Noise reduction). На первом этапе применяется инструмент удаления заведомо отклоняющихся решений Wild Spikes, а затем экс-

траполяция нулевых решений с использованием соседних ненулевых решений (обычно 6–8). Оставшиеся «шумы» можно осторожно убрать вручную, присваивая им «нулевые решения», в качестве завершающего шага можно опять экстраполировать решения. Следует помнить, что злоупотребление искусственной экстраполяцией данных приводит к ухудшению общего результата. Для многих материалов характерно возникновение систематической ошибки индексации, в частности, в оливине и хромите. Для оливина это связано с наличием псевдогексагональной симметрии и выражается в появлении ложных двойниковых границ с осью [100] и углом 60° . Обычно это выглядит как хаотическая пикселизация границ внутри зерен. Исправить ошибочную индексацию позволяет применение следующей последовательности действий: 1) автоматический поиск и определение зерен, введение правила игнорирования disregarded для оси разориентировки угла фазы ромбической сингонии; 2) в блоке Project Manager удаляется систематическая ошибка индексирования (Remove Systematic Misindexing, вкладка “Edit”), после чего на карте исчезнут все или большая часть пикселизованных границ.

После очистки всех данных, они могут быть сшиты в блоке MapSticher, а результат сохраняется под новым именем. Рекомендуется открыть его снова в программе Tango и провести окончательную корректировку изображений, чтобы удалить артефакты сшивки.

Основное преимущество программного пакета HKL Channel 5 – это удобный графический интерфейс. В частности, удаление шума и экстраполяция (заполнение) пустых ячеек («нулевых решений») здесь проводится постепенно и после каждого шага можно оценить результат. В программе MTEX эти процедуры выполняются из командной строки (например, (Hielscher et al., 2019)), и пользователь имеет дело уже с готовым результатом. В каждом варианте есть свои плюсы и минусы. Наилучший результат получается при оптимальном комплексировании двух указанных программ.

Текстурные диаграммы. Наиболее часто в литературе используются круговые диаграммы, или прямые полюсные фигуры (ППФ – pole figures, PF). Полюсная фигура – это совокупность стереографических проекций определенной кристаллографической плоскости [hkl] для всех зерен выбранного участка. В плоскости обычно представляют проекцию одной полусферы. Часто для большей на-

глядности полюсные фигуры представляют в виде карты плотности значений. Эти диаграммы дают представление о предпочтительной ориентировке той или иной фазы.

Обычно система координат образца задается относительно плоскости S и направления L , и в этом случае диаграммы плотности ППФ отражают предпочтительную ориентировку кристаллической решетки минералов относительно этих заранее заданных направлений. Для описания текстурных закономерностей в литературе употребляются термины «предпочтительная кристаллографическая ориентировка»: crystallographic preferred orientation (CPO) или lattice preferred orientation (LPO). Диаграммы плотности ППФ часто используются для определения действующих систем скольжения, например, в оливине. Поскольку поведение оливина при пластической деформации хорошо изучено экспериментально (Jung, 2017), то полученные данные обычно сравнивают с типовыми CPO и делают вывод о характере деформации, а также PT условиях.

Обратные полюсные фигуры (ОПФ) и карты в цветовой кодировке ОПФ. В отличие от ППФ, ОПФ строятся в координатной системе кристалла, и для этого используется такой фундаментальный сектор, где любая иная точка соответствует единственной точке внутри этого сектора при применении операций симметрии точечной группы кристалла. Полное представление об ориентировке кристалла задается тремя ортогональными ОПФ (для каждой из кристаллографических осей), но часто для наглядности достаточно единственной ОПФ для оси Z (ось Y в координатной системе структурной геологии). Цветовая схема ОПФ задается при помощи градиентного закрашивания фундаментального сектора и соответствует проекции заданной оси на образец.

Оба представления ориентировки зерен входят в функционал программных пакетов HKL Channel 5, AzTec и MTEX.

Оценка интенсивности предпочтительной кристаллографической ориентировки. В петрологии ультрамафитов и метаморфических пород принято оценивать интенсивность текстуры, или же меру отличия полученных картин предпочтительной кристаллографической ориентировки минералов от теоретически случайной, которая имеет определенной вид для каждой сингонии. Оценку интенсивности развития текстуры (fabric strength), о которой принято сообщать в геологических публикациях, можно провести двумя способами.

Первый вариант подразумевает расчет индекса J (Bunge, 1982; Skemer et al., 2005), который принимает значения от 0 для случайной текстуры до бесконечности, которая характеризует монокристаллическое состояние. Для его расчета можно использовать программу Salsa, где производится расчет ФПО/ODF. Используется следующий путь: Edit/New ODF, затем выбирается приближение Гаусса с разрешением $16 \times 16 \times 16$ и полушириной 5° .

Другой вариант заключается в расчете индекса M (Skemer et al., 2005), который принимает значения от 0 (случайная ориентировка) до 1 (монокристалл). Для этого сначала необходимо построить гистограмму распределения некоррелированных, т. е. случайно выбранных точек из любых зерен исследованного участка. При этом «коррелированными» считаются точки из контактирующих между собой зерен. Данная диаграмма строится из вкладки Edit/Misorientation histogramm блока Project Manager (Salsa). В появившемся окне следует поставить галочку в окне Uncorrelated и Theoretical curve. Расчет производится по формулам (Skemer et al., 2005; Jung et al., 2006), практическое выполнение которой легко воспроизводится в таблице Excel.

ПРИМЕР РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ниже на нескольких примерах будут продемонстрированы результаты EBSD изучения ультрамафитов Уральского подвижного пояса. Петрологические аспекты рассмотрим на примере образца свежего дунита, отобранного из карьера по добыче огнеупорного сырья на Кытлымском массиве Платиноносного пояса Урала (обр. KN-2020).

На рис. 1 показаны примеры карт, сшитых в программе MapSticher. Первая карта, возникающая в процессе исследований – карта контраста полос Кикучи, или карта качества дифракции (рис. 1а). Затем приведена схема сшивки отдельных участков (рис. 1б), карта фазового состава демонстрирует пространственное взаимоотношение фаз (рис. 1в) и две ориентационные карты – в цветовой кодировке углов Эйлера (рис. 1г) и цветовой кодировке ОПФ (рис. 1д), в нижнем правом углу даны цветовые ключи к ним (рис. 1е, ж). Анализируя приведенные изображения, можно заметить, что несмотря на значительную обработку первичных данных, карты имеют довольно «зашумленную» структуру зерен и субзерен. Помимо этого, на картах выделяются артефакты сшивания, особенно отчетливо они видны в нижней левой части изображения.

Рисунки 2а–д иллюстрируют автономное применение алгоритмов программы MTEX к тем же первичным данным, сшитым в программе MapSticher без предварительной обработки инструментами программы Tango. Прямая обработка алгоритмами MTEX дает хороший результат без необходимости применять трудоемкую очистку данных (Noise Reduction + Extrapolation) в программе Tango. Ощутимым минусом является отсутствие простого механизма исправления систематических ошибок индексации, связанной с псевдосимметрией: на рис. 2г хорошо видны несколько зерен с интенсивно развитыми внутренними границами, которые вероятно являются ошибочно индексированными двойниками, на изображениях карт в программе Tango они обычно выглядят как пикселизированные изображения.

Основываясь на отмеченных выше особенностях рассмотренных программных продуктов, мы рекомендуем первоначально проводить обработку первичных данных инструментами программы Tango, а конечные результаты получать с использованием алгоритмов MTEX. Две подобные карты с указанием различных типов границ оливина (рис. 2д, е) демонстрируют результат следующего этапа работы в программе MTEX без предварительного исправления «псевдосимметрии» (рис. 2д) и с внесенными исправлениями (рис. 2е).

Дальнейшая обработка данных заключается в оценке сложных структурных эффектов. На карте (рис. 2д, е) черным цветом показаны большеугловые границы (БУГ), разделяющие домены с величиной разориентировки более 15° , которые и являются собственно границами зерен, а синим цветом – малоугловые границы (МУГ) с величиной разориентировки менее 15° , или субзеренные границы. Такая карта обычно строится для одной фазы, для которой задаются граничные величины угла разориентировки, причем для МУГ однозначно определена дислокационная природа. Прямолинейные МУГ часто представляют собой полосы пластического излома в порфирокластах, значение которых очень велико при анализе активных систем скольжения данного минерала (Добржинская, 1989; Щербаков, 1990.). В нашем примере хорошо видны крупные удлиненные под малым углом к горизонтальному направлению порфирокласты с обильными МУГ.

В программе MTEX можно оценить относительную разориентировку внутри зерен в градусах, которая дает представление о доле рекристаллизо-

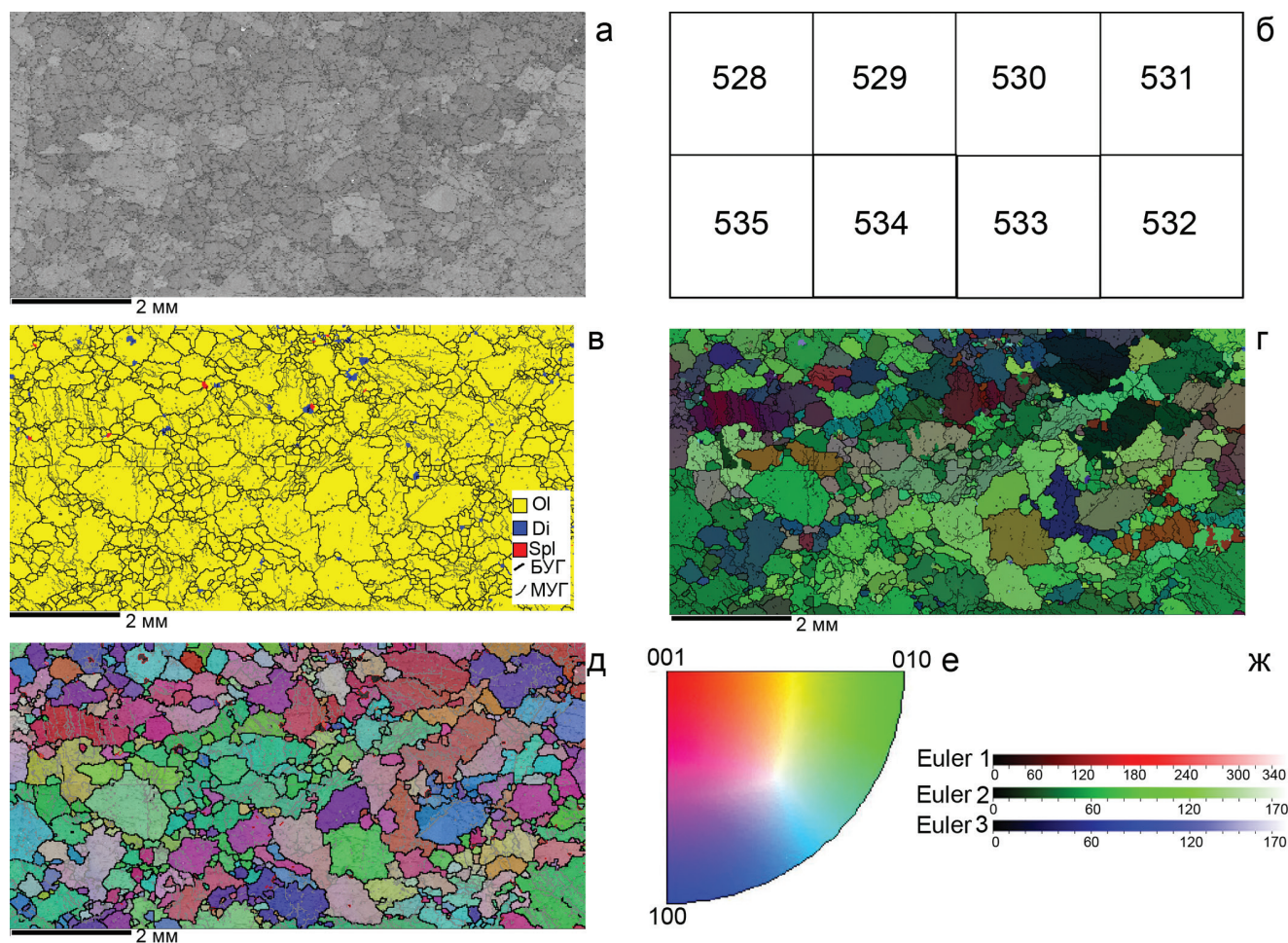


Рис. 1. EBSD карты образца KN-2020, полученные в программе Tango и сшитые инструментом MapSticher: а – карта контраста полос Кикучи (BC = band contrast); б – схема сшивания участков; в – карта фазового состава (Ol – оливин, Di – диопсид, Spl – хромшпинелид, БУГ – границы зерен, МУГ – границы субзерен); г, д – ориентационные карты в цветовой кодировке: г – углов Эйлера, д – обратных полюсных фигур (ОПФ $\perp$ Z здесь и далее); е, ж – легенды для карт в ОПФ и углах Эйлера, соответственно.

Fig. 1. EBSD maps of sample KN-2020 produced in the Tango program and stitched using the MapSticher tool: а – Kikuchi band contrast map (BC = band contrast); б – stitching scheme of the sections; в – phase composition map (Ol – olivine, Di – diopside, Spl – chromian spinel, БУГ – grain boundaries, МУГ – subgrain boundaries); г, д – orientation maps: г – in Euler angle color coding; д – in inverse pole figure (IPF $\perp$ Z) color coding; е, ж – legend for the IPF and Euler angle maps, respectively.

ванных зерен (необластов), которые образовались путем динамической рекристаллизации в наиболее искаженных участках структуры. Для этой цели в программе MTEX предусмотрены алгоритмы КАМ (kernel average misorientation – средняя разориентация ядра) (рис. 2е), GROD (grain reference orientation deviation – разориентация между отдельной точкой внутри зерна и средней ориентировкой для данного зерна) и GOS (grain orientation spread – внутризеренный разброс ориентировок) (рис. 2ж). Алгоритм КАМ показывает разориентацию между соседними пикселями, при условии, что она не превышает за-

данного порогового значения (в данном случае 5°). Ядро представляет собой набор точек заданного размера, окружающих интересующую точку сканирования. Если пластическая деформация возникает в результате скольжения дислокаций и вращения кристаллической решетки, этот подход позволяет количественно оценить локальные градиенты пластической деформации (Bachman et al., 2010б). Алгоритм GOS это среднее отклонение ориентации между каждой точкой в зерне и рассчитанной средней ориентацией зерна. Его результатом будет категоризация и окрашивание зерен, соответственно,

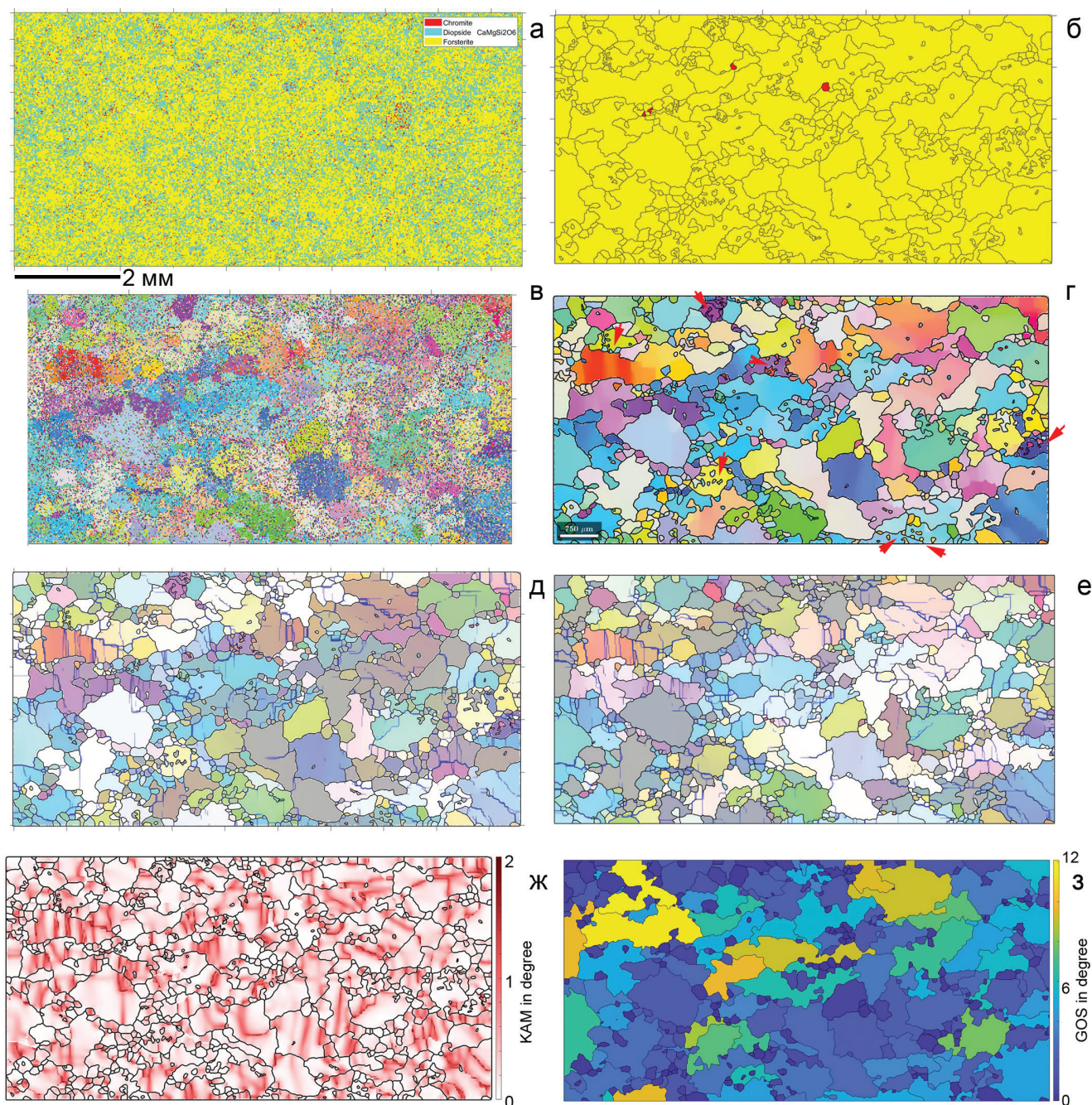


Рис. 2. Различные карты, полученные в программе MTEX: а – карта фазового состава без удаления шума; б – то же после удаления шума и заполнения зерен алгоритмами MTEX; в – карта в цветовой кодировке ОПФ без удаления шума; г – то же после удаления шума и заполнения зерен алгоритмами MTEX (стрелками показаны зерна оливина с пикселизованными внутренними границами, обусловленными наличием ошибок в индексации – псевдосимметрии с осью [100] и углом 60° (Systematic Misindexing)); д – карта в цветах ОПФ с выделенными синим цветом малоугловыми границами в оливине; е – аналогичная карта с предварительным удалением шума (Noise Reduction) и псевдосимметрии инструментами Tango (HKL Channel 5); ж – карта в цветовой градации KAM (наиболее насыщенные цвета указывают области повышенной плотности дислокаций); з – карта в цветовой градации GOS.

Fig. 2. Various maps produced in the MTEX program: а – phase composition map without noise reduction; б – the same after noise reduction and grain filling using MTEX algorithms; в – map in IPF color coding without noise reduction; г – the same after noise reduction and grain filling using MTEX algorithms (arrows indicate olivine grains with pixelated internal boundaries caused by indexing errors – pseudosymmetry with the [100] axis and an angle of 60° (Systematic Misindexing)); д – map in IPF colors with low-angle boundaries in olivine highlighted in blue; е – similar map with noise and pseudosymmetry reduction in the Tango tools (HKL Channel 5); ж – map in KAM color gradation (the most saturated colors indicate areas of higher dislocation density); з – map in GOS color gradation.

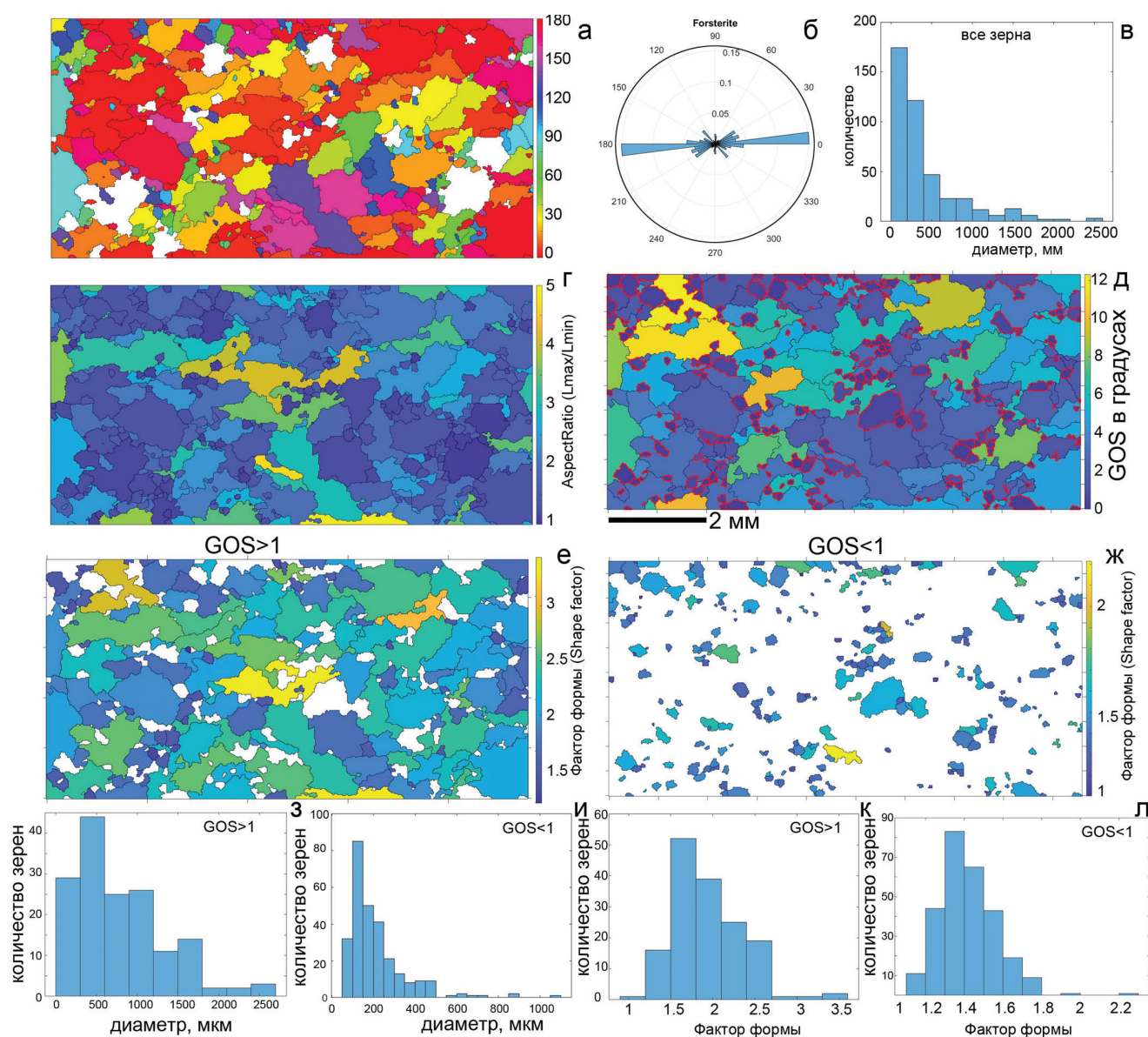


Рис. 3. Некоторые морфометрические характеристики зерен оливина из образца дунита KN-2020: а – карта в цветовой кодировке ориентации длинных осей зерен оливина относительно оси X (0–180°); б – роза-диаграмма, демонстрирующая преимущественную ориентировку по форме зерен оливина (SPO = shape preferred orientation); в – гистограмма распределения зерен по диаметру для всей выборки зерен; г – карта в цветовой градации величины отношения длинных и коротких осей зерен (AspectRatio); д – карта в цветовой градации GOS с выделенным подмножеством однородных зерен (GOS < 1°); е, ж – карты в цветовой градации величины фактора формы зерен для неоднородных (GOS > 1°) и однородных (GOS < 1°) зерен, соответственно; з–л – гистограммы распределения зерен по диаметру (ferret-diameter) (з, и) и величине фактора формы (к, л) для неоднородных и однородных зерен, соответственно.

Fig. 3. Some morphometric characteristics of olivine grains from the dunite sample KN-2020: а – color-coded map of the orientation of long axes of olivine grains relatively to X axis (0–180°); б – rose diagram demonstrating the preferred orientation by shape of olivine grains (SPO = shape preferred orientation); в – histogram of grain diameter distribution for the entire grain sampling; г – color-coded map of the ratio of long and short grain axes (AspectRatio); д – color-coded map of the GOS with highlighted subset of homogeneous grains (GOS < 1°); е, ж – color-coded maps of the Form Factor value for inhomogeneous (GOS > 1°) and homogeneous (GOS < 1°) grains, respectively; з–л – histograms of grain distribution by ferret-diameter (з, и) and the value of the Form Factor (к, л) for heterogeneous and homogeneous grains, respectively.

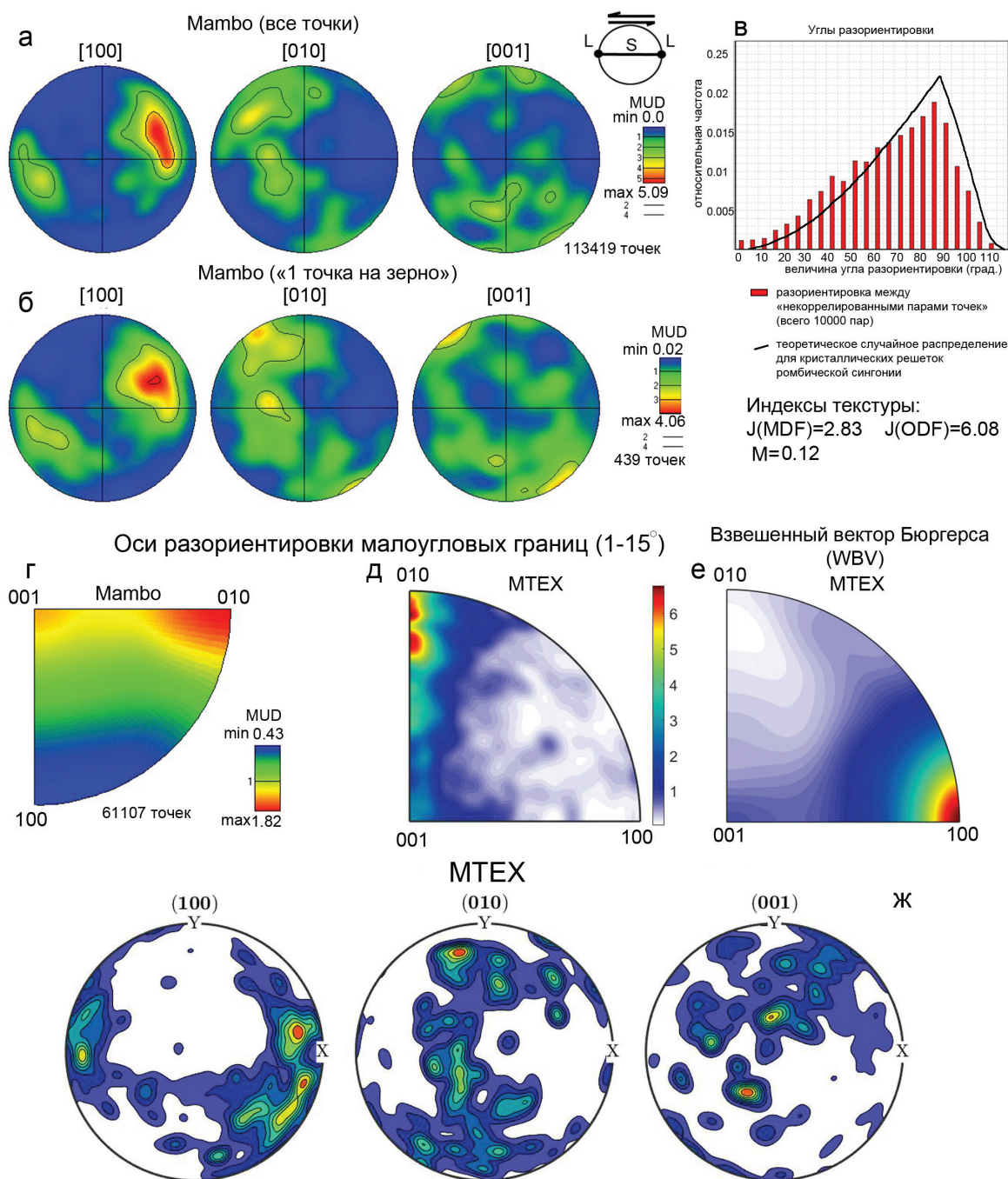


Рис. 4. Текстуальные характеристики образца дунита KN-2020: а, б – прямые полюсные фигуры для оливина, полученные в программе Mambo (равноплощадная проекция на верхнюю полусферу, полуширина 20°): а – обработаны все точки; б – режим «1 точка на зерно»; в – гистограмма распределения углов разориентировки для пар некоррелированных (случайно выбранных) точек, ниже приведены рассчитанные в программах Salsa индексы J по параметрам ODF и MDF, а также индекс M по формуле из работы (Skemer et al., 2005); г, д – диаграммы плотности для распределения осей разориентировки малоугловых границ (г – Mambo; д – MTEX); е – диаграммы плотности для распределения направления взвешенного вектора Бюргерса (WBV) для дислокаций в оливине, рассчитанные по алгоритму MTEX; ж – прямые полюсные фигуры для оливина, полученные в программе MTEX (равноплощадная проекция на нижнюю полусферу)

Fig. 4. Textural characteristics of the dunite sample KN-2020: а, б – direct pole figures for olivine produced in the Mambo program (equal-area projection on the upper hemisphere, half-width 20°): а – all points processed; б – “1 point per grain” mode; в – histogram of the distribution of misorientation angles for pairs of uncorrelated (randomly selected) points, below are the J indices calculated in the Salsa programs for the ODF and MDF parameters, as well as the M index using the formula from (Skemer et al., 2005); г, д – density diagrams for the distribution of misorientation axes of low-angle boundaries

(г – Mambo; д – MTEX); е – density diagrams for the distribution of the weighted Burgers vector (WBV) direction for dislocations in olivine calculated in the MTEX algorithm; ж – straight pole figures for olivine produced in the MTEX program (equal-area projection on the lower hemisphere).

степени их деформации (Bachman et al., 2010б). На рис. 2ж наиболее густо окрашенные зерна в синие тона обладают наименьшей внутренней разориентировкой и представляют собой рекристаллизованные зерна.

Другой подход к оценке ориентировки зерен по форме (shape preferred orientation, SPO) основан на оценке соотношения пропорций зерна. Для образца дунита KN-2020 определена интенсивная предпочтительная ориентировка зерен по форме и их преимущественное удлинение вдоль оси X образца (рис. 3а, б). Предварительная оценка гранулометрического состава показала, что преобладают мелкие зерна размером в срезе менее 0.5 мм (рис. 3в). Обычно для измерения зерен используются такие параметры, как ferret diameter либо эквивалентный диаметр круга, что зависит от конкретной программы. Далее для краткости мы будем использовать термин «диаметр».

Используя алгоритм GOS, все зерна разделены на зерна с однородной внутренней структурой ($GOS < 1$) и неоднородным строением ($GOS > 1$) и оценены раздельно. Результат выделения зерен с $GOS < 1$ показан на рис. 3д. Отдельно выделены подмножества зерен с $GOS > 1$ и $GOS < 1$, и для каждого из них построены карты фактора формы, который показывает относительное отклонение формы зерна от окружности (рис. 3е, ж). Также отдельно для обоих подмножеств измерены диаметр зерен и отношение длинных и коротких сторон. Некоторые результаты продемонстрированы на рис. 3з–л, а подробный анализ проведен ниже.

Одним из важнейших вопросов, которые решает метод EBSD, является режим деформации (пластического течения) материалов, выведенный из их структуры. В этом смысле, одним из главных результатов является определение текстур деформации (ППФ), а из них – активных систем скольжения. Для определения ППФ в пакете HKL Channel 5 служит блок Mambo, а в программе MTEX предусмотрены соответствующие алгоритмы. На рис. 4а, б, ж приведены результаты построения ППФ оливина изученного образца дунита различными методами. Здесь также приведены гистограмма распределения углов разориентировки в 10 000 парах случайных

(некоррелированных) точек и рассчитанные индексы интенсивности текстуры, диаграммы плотности для распределений осей поворота (разориентировки) малоугловых границ, направлений взвешенного вектора Бюргерса дислокаций в оливине.

Оси разориентировки (misorientation axes) – важная характеристика МУГ, т. е. границ субзерен (ГСЗ – subgrain boundary, SGB). Плотность осей разориентировки субграниц может быть построена как в координатах образца, так и в координатах кристалла. В первом случае диаграмма плотности строится на основе стереографической проекции, во втором – в фундаментальном секторе (рис. 4г, д). Основное приложение диаграммы – определить одно из направлений в триаде «направление скольжения – плоскость скольжения – ось разориентировки», и тем самым методом исключения определить нормаль к плоскости скольжения. Направление скольжения обычно определяется по максимуму, совпадающему с удлинением зерен, или же с предпочтительной ориентировкой по форме (SPO). В частности, для оливина существует два возможных направления скольжения – $[100]$ и $[001]$. В случае образца KN-2020 оно совпадает с осью $[100]$ минерала.

Направление скольжения может быть также определено независимо от SPO и более точно с использованием алгоритма вычисления взвешенного вектора Бюргерса (WBV), как это описано в работах (Wheeler et al., 2009, 2024) и реализовано в программе MTEX. Применение данного алгоритма к МУГ образца KN-2020 показало, что интенсивный максимум соответствует направлению $[100]$ оливина (рис. 4е). В целом, это согласуется с предпочтительной ориентировкой зерен по форме (SPO) и расположением макроскопических структурных элементов, в частности, линейностью зерен оливина и агрегатной линейностью хромшпинелидов.

ПЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ

Полученные в ходе EBSD сканирования и постобработки данных результаты позволяют извлечь важную информацию о поведении геологи-

ческих материалов в условиях высоких температур и давлений в области субсолидуса. В частности, образец KN-2020 дунита урало-аяскинского типа сложен зернами оливина, претерпевшими интенсивную пластическую деформацию и частичную динамическую рекристаллизацию в условиях высоких температур и давлений. Не отрицая первично кумулятивной природы оливина (Иванов, 1997; Шмелев, Филиппова, 2010; Степанов, 2018), полученные данные показывают, что первично магматические характеристики породы были полностью переработаны наложенными высокотемпературными тектоническими процессами, что соответствует предположениям, высказанным в работах (Ефимов, 1984; 2010).

Данные EBSD демонстрируют интенсивную предпочтительную кристаллографическую ориентировку оливина, как это следует из значений текстурных индексов (для изученного образца $J = 2.83-6.08$, $M = 0.12$) и резких максимумов на круговых полюсных диаграммах. Зеренная структура породы имеет отчетливо бимодальный состав, образованный двумя классами зерен: 1) крупными и преимущественно удлиненными порфирокластами и 2) мелкими и преимущественно изометричными необластами (рекристаллизованными зернами). Два класса зерен имеют контрастные основные характеристики. Для порфирокластов характерны размеры 0.8–3.0 мм, высокие значения отношения длинных осей к коротким ($Aspect\ Ratio = 2-5$), высокие значения фактора формы (1.5–3.0) и значительные величины внутренней разориентировки ($GOS > 1$). Необласты характеризуются мелкими размерами (0.1–1.0 мм), малым значением $Aspect\ Ratio$ (1–2), фактор формы также близок к 1, минимальны значения $GOS (< 1)$.

Обильные прямолинейные МУГ в порфирокластах указывают на их принадлежность к полосам пластического излома, сформированным геометрически необходимыми дислокациями. Анализ распределения осей разориентировок МУГ и взвешенного вектора Бюргерса дислокаций позволяет определить, что ведущую роль при формировании пород играло пластическое течение в режиме дислокационной ползучести, когда активной системой скольжения являлась $\{0kl\}$ [100]. Средние размеры рекристаллизованных зерен (около 150 мкм) позволяют провести оценки стресса в диапазоне 30–50 МПа, используя известные соотношения экспериментальных пьезометров (Karato et al., 1980; Van Der Wal et al., 1993).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие основные выводы. Микроструктурные методы исследования дают дополнительную информацию о механизмах образования ультрамафитов, включая как офиолитовые комплексы, так и дунитовые тела массивов Урало-Аляскинского типа, поскольку геохимические методы не позволяют охарактеризовать динамические факторы, которые могли играть определяющую роль не только в формировании структуры, но и в перераспределении минеральных фаз (а значит – и химических элементов) в недрах. Показано, что метод дифракции обратно-рассеянных электронов не ограничен прозрачными и анизотропными минералами, является количественным, дает повышенную точность и локальность; анализ может проводиться на сохраненных данных и, в случае необходимости, повторяться с новыми параметрами. Современные инструменты получения и обработки данных дают возможность объективно оценить относительный вклад в формирование горных пород таких факторов, как динамическая рекристаллизация и пластическая деформация, включая определение активных систем скольжения.

ЛИТЕРАТУРА

- Варюхин В.Н., Пашинская Е.Г., Завдовеев А.В., Бурховецкий В.В. (2014) Возможности метода дифракции обратно-рассеянных электронов для анализа структуры деформированных материалов. Киев, Наукова думка, 106 с. <https://doi.org/10.13140/2.1.5016.6720>
- Гончаренко А.И. (1989) Деформация и петроструктурная эволюция альпинотипных гипербазитов. Томск, Изд-во Томского ун-та, 404 с.
- Даниленко В.Н., Миронов С.Ю., Беляков А.Н., Жилиев А.П. (2012) Применение EBSD анализа в физическом материаловедении (обзор). *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 78(2), 28–46.
- Денисова Е.А. (1989) Складчатая структура ультраосновных тектонитов массивов Южного Урала. *Геотектоника*, 4, 52–62.
- Денисова Е.А. (1990) Строение и деформационные структуры офиолитовых массивов с лерцолитовым типом разреза. *Геотектоника*, 2, 14–27.
- Добржинская Л.Ф. (1989) Деформации магматических пород в условиях глубинного тектогенеза. М., Наука, 288 с.
- Ефимов А.А. Габбро-гипербазитовые комплексы Урала и проблема офиолитов. М.: Наука, 1984. 232 с.

- Ефимов А.А. (2010) Итоги столетнего изучения Платиноносного пояса Урала. *Литосфера*, 5, 134–153.
- Иванов О.К. (1997) Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала. Екатеринбург, Изд-во Уральского университета, 488 с.
- Казаков А.Н. (1987) Динамический анализ микроструктурных ориентировок минералов. Л., Наука, 272 с.
- Метод дифракции отраженных электронов в материаловедении /под. ред. А. Шварца, М. Кумара, Б. Адамса, Д. Филда (перевод с англ.). (2014) М., Техносфера, 544 с.
- Пушкарев Е.В., Аникина Е.В., Гарути Дж., Закарини Ф. (2007) Хром-платиновое оруденение нижнетагильского типа на Урале: Структурно-вещественная характеристика и проблема генезиса. *Литосфера*, 3, 28–65.
- Саранчина Г.М., Кожевников В.Н. (1985) Федоровский метод (определение минералов, микроструктурный анализ). Л., Недра, 208 с.
- Степанов С.Ю. (2018) Структурно-вещественные закономерности проявления хромит-платинового оруденения в клинопироксенит-дунитовых массивах Среднего Урала. Дис. на соиск. степ. канд. геол.-мин. наук. Санкт-Петербург. 174 с.
- Чернышов А.И. (2001) Ультрамафиты (пластическое течение, структурная и петроструктурная неоднородность). Томск, Чародей, 215 с.
- Шмелев В.Р., Филиппова С.Д. (2010) Структура и механизм формирования Нижнетагильского дунит-клинопироксенитового массива (Средний Урал). *Геотектоника*, 4, 65–86.
- Щербаков С.А. (1990) Пластические деформации ультрабазитов офиолитовой ассоциации Урала. М., Наука, 120 с.
- Bachmann F., Hielscher R., Schaeben H. (2010a) Texture analysis with MTEX- Free and open source software toolbox. *Solid State Phenomena*, 160, 63–68. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.160.63
- Bachmann F., Hielscher R., Jupp P.E., Pantleon W., Schaeben H., Wegert E. (2010b) Inferential statistics of electron backscatter diffraction data from within individual crystalline grains. *Journal of Applied Crystallography*, 43, 1338–1355. https://doi.org/10.1107/S002188981003027X
- Bunge H. (1982) Texture Analysis in Materials Science: Mathematical Models. Butterworths, London. 593 p.
- Carter N.L. (1976) Steady state flow of rocks. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 14, 301–360.
- Carter N.L., Ave Lallemand H.G. (1970) High temperature deformation of dunite and peridotite. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81, 2181–2202.
- Hielscher R., Silberman C., Schmidl E., Ihlemann J. (2019) Denoising of Crystal Orientation Maps. *Journal of Applied Crystallography*, 52, 984–996. https://doi.org/10.1107/S1600576719009075
- Jung H., Katayama I., Jiang Z., Hiraga T., Karato S. (2006) Effect of water and stress on the lattice-preferred orientation of olivine. *Tectonophysics*, 421, 1–22. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.02.011
- Jung H. (2017) Crystal preferred orientations of olivine, orthopyroxene, serpentine, chlorite, and amphibole, and implications for seismic anisotropy in subduction zones: a review. *Geosciences Journal*, 21, 985–1011. http://dx.doi.org/10.1007/s12303-017-0045-1
- Karato S.I., Toriumi M., Fujii T. (1980). Dynamic recrystallization of olivine single crystals during high temperature creep. *Geophysical Research Letters*, 7(9), 649–652. https://doi.org/10.1029/GL007i009p00649
- Nicolas A., Bouchez J.L., Boudier F., Mercier J.C. (1971) Textures, structures and fabrics due to solid state flow in some European lherzolites. *Tectonophysics*, 12, 55–86. https://doi.org/10.1016/0040-1951(71)90066-7
- Poirier J.-P. (1985) Creep of crystals. High-temperature deformation processes in metals, ceramics and minerals. Cambridge University Press, 287 p.
- Prior D.J., Boyle A.P., Brenker F., Cheadle M.J., Day A., Lopez G., Peruzzo L., Potts G.J., Reddy S.M., Spiess R., Timms N.O., Trimby P.W., Wheeler J., Zetterstrom L. (1999) The application of electron backscattered and orientation contrast imaging in the SEM to textural problems in rocks. *American Mineralogist*, 84, 1741–1749. https://doi.org/0003-004X/99/1112-1741\$05.00
- Prior D.J., Mariani E., Wheeler J. (2009) EBSD in the Earth Sciences: applications, common practice and challenges. In: *Electron Backscatter Diffraction in Materials Science: 2nd Edition*. Editors Schwartz A.J., Kumar M., Adams B.L., Field D.P. Springer. 345–357.
- Skemer Ph., Katayama I., Jiang Z., Karato S.-I. (2005) The misorientation index: Development of a new method for calculating the strength of lattice-preferred orientation. *Tectonophysics*, 411, 157–167. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.08.023
- Spiess R., Peruzzo L., Prior D.J., Wheeler J. (2001) Development of garnet porphyroblasts by multiple nucleation, coalescence and boundary misorientation-driven rotations. *Journal of metamorphic geology*, 19, 269–290. https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2001.00311.x
- Van der Wal D., Chopra P., Drury M., FitzGerald J. D. (1993). Relationships between dynamically recrystallized grain size and deformation conditions in experimentally deformed olivine rocks. *Geophysics Research Letters*, 20(14), 1479–1482. https://doi.org/10.1029/93GL01382
- Wheeler J., Mariani E., Piasolo S., Prior D.J., Trimby P., Drury M.R. (2009) The weighted Burgers vector: a new quantity for constraining dislocation densities and types using electron backscatter diffraction on 2D sections through crystalline materials. *Journal of Microscopy*. https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.2009.03136.x
- Wheeler J., Piazolo S., Prior D.J., Trimby P.W., Tielke J.A. (2024) Using crystal-lattice distortion data for geological investigations: the weighted Burgers vector method. *Journal of Structural Geology*, 179, 105040. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2023.105040

REFERENCES

- Bachmann F., Hielscher R., Schaeben H. (2010a) Texture analysis with MTEX- Free and open source software toolbox. *Solid State Phenomena*, 160, 63–68. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.160.63>
- Bachmann F., Hielscher R., Jupp P.E., Pantleon W., Schaeben H., Wegert E. (2010b) Inferential statistics of electron backscatter diffraction data from within individual crystalline grains. *Journal of Applied Crystallography*, 43, 1338–1355. <https://doi.org/10.1107/S002188981003027X>
- Bunge H. (1982) Texture Analysis in Materials Science: Mathematical Models. Butterworths, London. 593 p.
- Carter N.L. (1976) Steady state flow of rocks. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 14, 301–360.
- Carter N.L., Ave Lallemant H.G. (1970) High temperature deformation of dunite and peridotite. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81, 2181–2202.
- Chernyshov A.I. (2001) Ultramafites (plastic flow, structural and petrostructural heterogeneity). Charodey, Tomsk, 215 p. (in Russian)
- Denisova E.A. (1989) [A folded framework of ultramafic tectonites from massifs of the Southern Urals] *Geotektonika (Geotektonics)*, 4, 52–62. (in Russian)
- Denisova E.A. (1990) [Building and deformation structures of the Iherzolite-type ophiolite massifs]. *Geotektonika (Geotektonics)*, 2, 14–27 p. (in Russian)
- Dobrzhetinskaya L.F. (1989) Deformations of igneous rocks at the condition of deep tectogenesis. Moscow: Nauka, 288 p. (in Russian)
- Efimov A.A. Gabbro-hyperbasite complexes of the Urals and the problem of ophiolites. Moscow: Nauka, 1984. 232 p. (in Russian)
- Efimov A.A. (2010) Results of a Centenary Study of the Ural Platinum Belt. *Litosvera (Lithosphere)*, 5, 134–153. (in Russian)
- Goncharenko A.I. (1989) Deformation and petro structural evolution of alpinotype ultrabasites. Tomsk, Izd-vo Tomskogo university, 404 p. (in Russian)
- Hielscher R., Silberman C., Schmidl E., Ihlemann J. (2019) Denoising of Crystal Orientation Maps. *Journal of Applied Crystallography*, 52, 984–996. <https://doi.org/10.1107/S1600576719009075>
- Ivanov O.K. (1997) Concentric Zoned Pyroxenite-Dunite Massifs of the Urals. Yekaterinburg, Izd-vo Uralskogo university, 488 p. (in Russian)
- Jung H., Katayama I., Jiang Z., Hiraga T., Karato S. (2006) Effect of water and stress on the lattice-preferred orientation of olivine. *Tectonophysics*, 421, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.02.011>
- Jung H. (2017) Crystal preferred orientations of olivine, orthopyroxene, serpentine, chlorite, and amphibole, and implications for seismic anisotropy in subduction zones: a review. *Geosciences Journal*, 21, 985–1011. <http://dx.doi.org/10.1007/s12303-017-0045-1>
- Karato S.I., Toriumi M., Fujii T. (1980). Dynamic recrystallization of olivine single crystals during high temperature creep. *Geophysical Research Letters*, 7(9), 649–652. <https://doi.org/10.1029/GL007i009p00649>
- Nicolas A., Bouchez J.L., Boudier F., Mercier J.C. (1971) Textures, structures and fabrics due to solid state flow in some European Iherzolites. *Tectonophysics*, 12, 55–86. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(71\)90066-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(71)90066-7)
- Poirier J.-P. (1985) Creep of crystals. High-temperature deformation processes in metals, ceramics and minerals. Cambridge University Press, 287 p.
- Prior D.J., Boyle A.P., Brenker F., Cheadle M.J., Day A., Lopez G., Peruzzo L., Potts G.J., Reddy S.M., Spiess R., Timms N.O., Trimby P.W., Wheeler J., Zetterstrom L. (1999) The application of electron backscattered and orientation contrast imaging in the SEM to textural problems in rocks. *American Mineralogist*, 84, 1741–1749. [https://doi.org/10.1003-004X/99/1112-1741\\$05.00](https://doi.org/10.1003-004X/99/1112-1741$05.00)
- Prior D.J., Mariani E., Wheeler J. (2009) EBSD in the Earth Sciences: applications, common practice and challenges. In: Electron Backscatter Diffraction in Materials Science: 2nd Edition. Editors Schwartz A.J., Kumar M., Adams B.L., Field D.P. Springer, 345–357.
- Pushkarev E.V., Anikin E.V., Garuti G., Zaccarini F. (2007) Nizhny Tagil-Type Chrome-Platinum Mineralization in the Urals: Structural and Compositional Characteristics and the Problem of Genesis. *Litosvera (Lithosphere)*, 3, 28–65. (in Russian)
- Schwartz J., Kumar M., Adams B.L., Field D.P. (2009) Electron backscattered diffraction in Material Science. Springer Science+Business Media. 2009. 528 p.
- Shcherbakov S.A. (1990) Plastic deformations of ultrabasic rock of the Urals ophiolite association. Moscow, Nauka, 120 p. (in Russian)
- Shmelev V.R., Filippova S.D. (2010) Structure and formation mechanism of the Nizhny Tagil dunite-clinopyroxenite massif (Middle Urals). *Geotektonika (Geotektonika)*, 4, 65–86.
- Skemer Ph., Katayama I., Jiang Z., Karato S.-I. (2005) The misorientation index: Development of a new method for calculating the strength of lattice-preferred orientation. *Tectonophysics*, 411, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.08.023>
- Spiess R., Peruzzo L., Prior D.J., Wheeler J. (2001) Development of garnet porphyroblasts by multiple nucleation, coalescence and boundary misorientation-driven rotations. *Journal of metamorphic geology*, 19, 269–290. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2001.00311.x>
- Stepanov S.Yu. (2018) Structural and compositional patterns of chromite-platinum mineralization in clinopyroxenite-dunite massifs of the Middle Urals. (Candidate dissertation). St. Petersburg. 174 p. (in Russian)
- Van der Wal D., Chopra P., Drury M., FitzGerald J.D. (1993). Relationships between dynamically recrystallized grain size and deformation conditions in experimentally deformed olivine rocks. *Geophysics Research Letters*, 20(14), 1479–1482. <https://doi.org/10.1029/93GL01382>
- Wheeler J., Mariani E., Piasolo S., Prior D.J., Trimby P., Drury M.R. (2009) The weighted Burgers vector: a new

quantity for constraining dislocation densities and types using electron backscatter diffraction on 2D sections through crystalline materials. *Journal of Microscopy*. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.2009.03136.x>

Wheeler J., Piazzolo S., Prior D.J., Trimby P.W., Tielke J.A. (2024) Using crystal-lattice distortion data for geological investigations: the weighted Burgers vector method. *Journal of Structural Geology*, 179, 105040. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2023.105040>

Информация об авторах

Савельев Дмитрий Евгеньевич – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии УФИЦ РАН, г. Уфа, Россия; sav171@mail.ru

Власенко Наталья Сергеевна – инженер, РЦ Геомодель, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; ly17@mail.ru

Information about the authors

Dmitry E. Saveliev – Doct. Sci. (Geol.-Mineral.), Key Researcher, Institute of Geology UFRS RAS, Ufa, Russia; sav171@mail.ru

Natalya S. Vlasenko – Engineer, RC Geomodel, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; ly17@mail.ru