

**МИКРОСТРУКТУРА ОЛИВИНА  
ИЗ УЛЬТРАМАФИТОВ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ МАССИВА РАЙ-ИЗ  
(ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ) ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ  
МЕТОДОМ EBSD**

© Савельев Дмитрий Евгеньевич

Институт геологии

ФГБНУ «Уфимский федеральный исследовательский центр  
Российской Академии наук»,  
г. Уфа, Российская Федерация

**Аннотация.** Микроструктурные особенности оливина из рудовмещающих ультрамафитов юго-западного рудного поля массива Рай-Из изучены количественно методом дифракции отраженных электронов (ДОЭ = EBSD). Метод EBSD все более широко используется в науках о Земле во всем мире. Он позволяет получать количественные данные о кристаллографической ориентировке кристаллических материалов с высокой разрешающей способностью, что делает его предпочтительным инструментом микроструктурных исследований по сравнению с традиционным петрографическим методом, основанным на применении универсального Федоровского столика. Петрографическое изучение шлифов показало, что дуниты и гарцбургиты обладают довольно свежим обликом, доля петельчатого серпентина (либо антигорита) составляет от 30 до 50 об.%, наиболее типичными структурами ультрамафитов изученной территории являются порфирокластическая и мозаичная. При изучении препаратов методом EBSD получены микроструктурные карты в кодировке углов Эйлера и обратных полюсных фигур. Интенсивность предпочтительной кристаллографической ориентировки была оценена при помощи индексов J и M. В результате изучения микроструктурных особенностей ультрамафитов Юго-Западного рудного поля массива Рай-Из выявлена сильная предпочтительная кристаллографическая ориентировка оливина в гарцбургитах, дунитах и вкрапленных хромититах, что обусловлено интенсивной пластической деформацией в режиме дислокационной ползучести. Вероятно, она играла определяющую роль в становлении ультрамафитового разреза и образовании хромититов. Переход основного направления течения от оси [100] к [001] может быть связан с глубинным уровнем перехода от верхней мантии к нижней коре. Для более точной оценки P-T-условий, окислительно-восстановительного и флюидного режима деформации необходимо проведение более детальных исследований.

**Ключевые слова:** EBSD, оливин, пластическая деформация, рекристаллизация, офиолиты, ультрамафиты, Рай-Из

**MICROSTRUCTURAL FEATURES OF OLIVINE FROM ULTRAMAFIC ROCKS OF SOUTH-WESTERN PART OF RAI-IZ MASSIF (POLAR URALS) ACCORDING STUDY BY EBSD METHOD**

© Savelyev Dmitry Evgenievich

Institute of Geology  
FGBNU "Ufa Federal Research Center"  
Ufa, Russian Federation

**Summary.** Microstructural features of olivine from ore-hosting ultramafic rocks of the South-Western Ore Field of the Rai-Iz massif were studied quantitatively by the electron backscatter diffraction (EBSD) method. EBSD is increasingly used in earth sciences worldwide. It provides high-resolution quantitative data on the crystallographic orientation of crystalline materials, making it a preferable tool for microstructural studies compared to the traditional petrographic method based on the universal Fedorovsky stage. Petrographic study of thin sections showed that dunites and harzburgites have a fairly fresh appearance, the proportion of mesh serpentine (or antigorite) is from 30 to 50 vol.%, the most typical structures of ultramafic rocks in the studied area are porphyroclastic and mosaic. When studying the preparations by the EBSD method, microstructural maps were obtained in the Euler angle and inverse pole figure encoding. The intensity of the crystallographic preferred orientation was estimated using the J and M indices. As a result of studying the microstructural features of the ultramafic rocks of the South-West Ore Field of the Rai-Iz massif, a strong crystallographic preferred orientation of olivine in harzburgites, dunites and disseminated chromitites was revealed, which is due to intense plastic deformation in the dislocation creep regime. Probably, it played a decisive role in the formation of the ultramafic rocks and chromitites. The transition of the main flow direction from the [100] to [001] axis may be associated with the deep level of the transition from the upper mantle to the lower crust. More detailed studies are required for a more accurate assessment of the PT conditions, oxidation-reduction and fluid deformation regime.

**Keywords:** EBSD, olivine, plastic deformation, recrystallization, ultramafic rocks, ophiolite, Rai-Iz

**Введение.** Метод дифракции отраженных электронов (ДОЭ = EBSD) все более широко используется в науках о Земле во всем мире [15,20,22]. Он позволяет получать количественные данные о кристаллографической ориентировке кристаллических материалов с высокой разрешающей способностью, что делает его предпочтительным инструментом микроструктурных исследований по сравнению с традиционным

петрографическим методом, основанным на применении универсального Федоровского столика [7,11].

Массив Рай-Из расположен в зоне Главного Уральского разлома на Полярном Урале, между метаморфическими образованиями Харбейского и Хараматолоуского комплексов (рис.1). Он является одним из ярких представителей мантийного разреза офиолитовой ассоциации в пределах Уральского складчатого пояса и привлекает исследователей на протяжении почти сто лет [1,4,6,9,12]. После распада СССР резко возросла роль массива как одного из наиболее хромитоносных офиолитовых комплексов Урала и всей России. Именно здесь находится единственное разрабатываемое в настоящее время месторождение хромовых руд металлургического типа, которые сложены высокохромистыми хромшпинелидами (месторождение Центральное).

Помимо данного месторождения, на массиве довольно широко развита хромититовая минерализация, выделено значительное количество рудопроявлений с различной степенью изученности [10]. Одним из перспективных на хромититы является так называемое Юго-Западное рудное поле, включающее несколько перспективных объектов. Целью данного исследования является изучение микроструктуры вмещающих ультрамафитов некоторых рудопроявлений Юго-Западного рудного поля методом EBSD и сравнительный анализ полученных данных с теми, что были получены ранее классическим Федоровским методом.

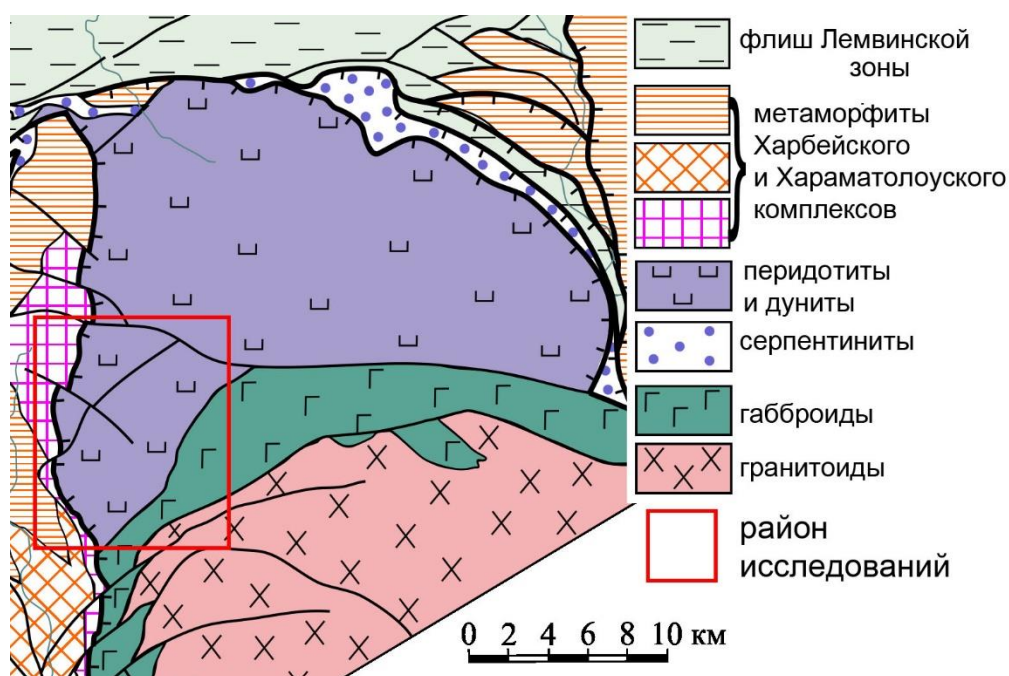


Рисунок 1 – Обзорная геологическая карта района исследований  
По Н.В.Вахрушевой и др., 2017 [1]

**Методы исследований.** Для изучения были выбраны несколько образцов дунитов и гарцбургитов из керна поисковых скважин, отобранные в ходе полевого выезда 2022 г. на массиве Рай-Из. В частности, образцы были отобраны на рудопроявлениях Юго-Западное-III (R-909), Юго-Западное-IV (R-911), Западное-II (R-916), Западное (R-921, R-922), Юго-Западное I (R-923).

Из керна были сделаны шлифы в трех взаимно перпендикулярных плоскостях и затем, по возможности, определялась макроструктура, включающая минеральную листоватость (и/или полосчатость) и линейность. В дальнейшем по возможности вырезались шлифы в плоскости, перпендикулярной к минеральной уплотненности и содержащие линейность, либо изучались срезы из плоскостей, наиболее близкие к данной ориентировке.

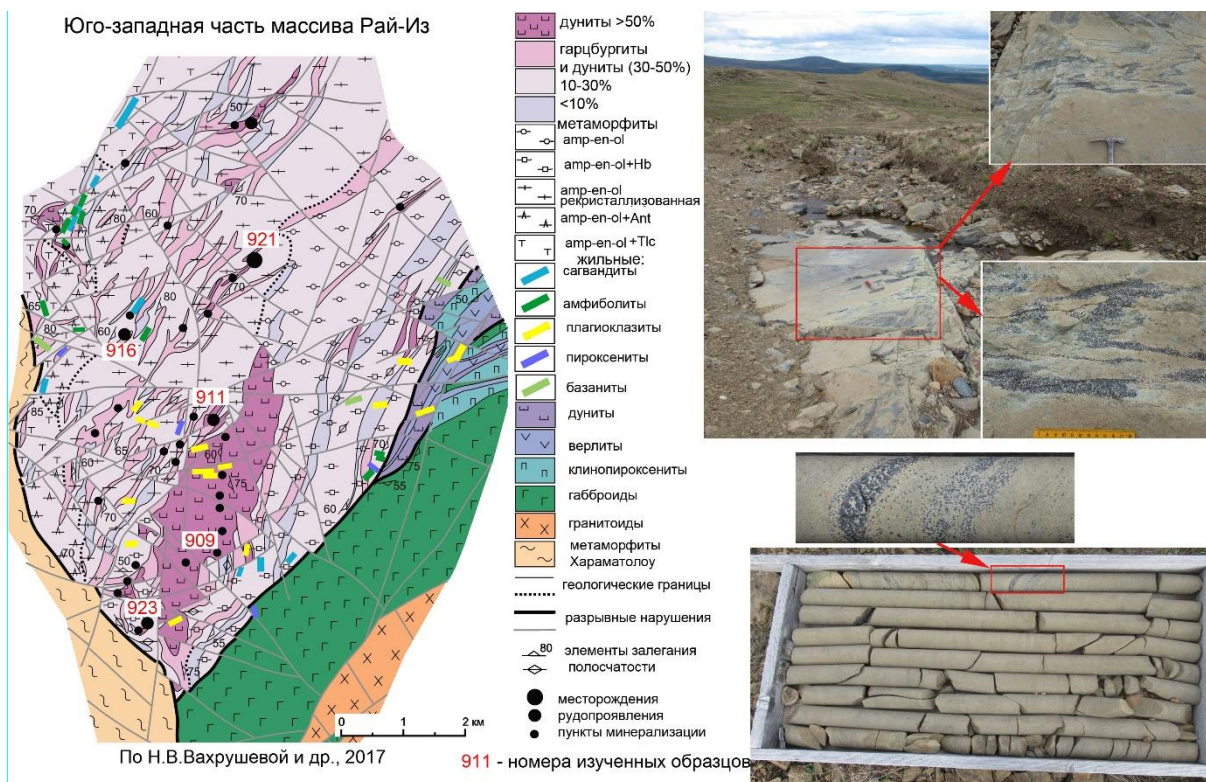


Рисунок 2 – Геологическое строение массива Рай-Из по [1] и точки отбора образцов

Рудопроявления: Юго-Западное-III (R-909), Юго-Западное-IV (R-911), Западное-II (R-916), Западное (R-921, R-922), Юго-Западное I (R-923)

Электронно-микроскопические исследования и изучение состава минералов проводились в полированных шлифах на сканирующем электронном микроскопе Vega Tescan Compact с энерго-дисперсионным анализатором Xplorer 15 Oxford Instruments (ИГ УФИЦ РАН, Уфа). Микроструктурное изучение препаратов проводилось методом дифракции обратно-рассеянных электронов

(EBSD). Подробно физические основы данного метода описаны в соответствующих руководствах и обзорных работах [3,20,21].

**Результаты исследований.** На массиве Рай-Из нами были изучены редковкрапленные хромититы, дуниты и гарцбургиты нескольких рудопроявлений юго-западного блока (рис.2). В некоторых обнажениях хорошо видна складчатость вкрапленных хромититов. Петрографическое изучение шлифов показало, что дуниты и гарцбургиты обладают довольно свежим обликом, доля петельчатого серпентина (либо антигорита) составляет от 30 до 50 об.%, что позволяет идентифицировать первичные структуры пород. Как ранее отмечалось предшественниками, наиболее типичными структурами ультрамафитов изученной территории являются порфирикластическая и мозаичная [2]. Для оливина и ортопироксена характерно широкое развитие признаков высокотемпературного пластического течения и динамической рекристаллизации: кинк-бандов, полос пластического излома, необластов вблизи крупных деформированных зерен.

При изучении препаратов методом EBSD получены микроструктурные карты в кодировке углов Эйлера и обратных полюсных фигур. Интенсивность предпочтительной кристаллографической ориентировки была оценена при помощи индексов J [13] и M [23]. Полученные цифры говорят о том, что оливин имеет интенсивно развитую предпочтительную ориентировку, тогда как ортопироксен — довольно умеренную.

На картах в кодировке обратных полюсных фигур (рис.3) отражено удлинение зерен оливина, которые часто разделены на блоки субпараллельными диагональными линиями, представленными малоугловыми границами (тонкие белые либо черные линии). При этом большеугловые границы зерен на этих картах показаны более широкими черными линиями.

На основе EBSD-сканирования нескольких участков для каждого образца (обычно 4-6 с шагом 15-25 мкм), нами были построены интегральные, или «синоптические» круговые диаграммы [5] (рис.4). Они показывают, что оливин имеет во всех образцах сильную предпочтительную кристаллографическую ориентировку, обусловленную трансляционным скольжением по разным системам: плоскостью скольжения почти всегда является (010), а вот направление варьирует – [100] либо [001].

**Обсуждение результатов.** Проведенные петрографические и микроструктурные исследования позволили установить, что в ультрамафитах, вмещающих хромитовое оруденение, а также во вкрапленных хромититах, широко проявлены структуры и текстуры, свидетельствующие о формировании рудоносного разреза в условиях высокотемпературного пластического течения.

Ранее микроструктурные особенности ультрамафитов массива были изучены оптическим методом с применением универсального Федоровского

столика [2, 8]. В результате было установлено, что наиболее типичными петроструктурными узорами являются следующие: тип 1 – с максимумом оси [100] и поясовым расположением двух других осей, при этом в подтипе 1 максимум оси [100] совпадает с линейностью, в подтипе 2 образует с ней различные углы; тип 2 – с четким максимумом оси [010] и в различной степени поясовым расположением двух других осей. Наши результаты в целом подтверждают наличие данных типов ориентировки, а дополнением к ним является выявление в отдельных случаях четких максимумов оси [001], о чем сказано ниже.

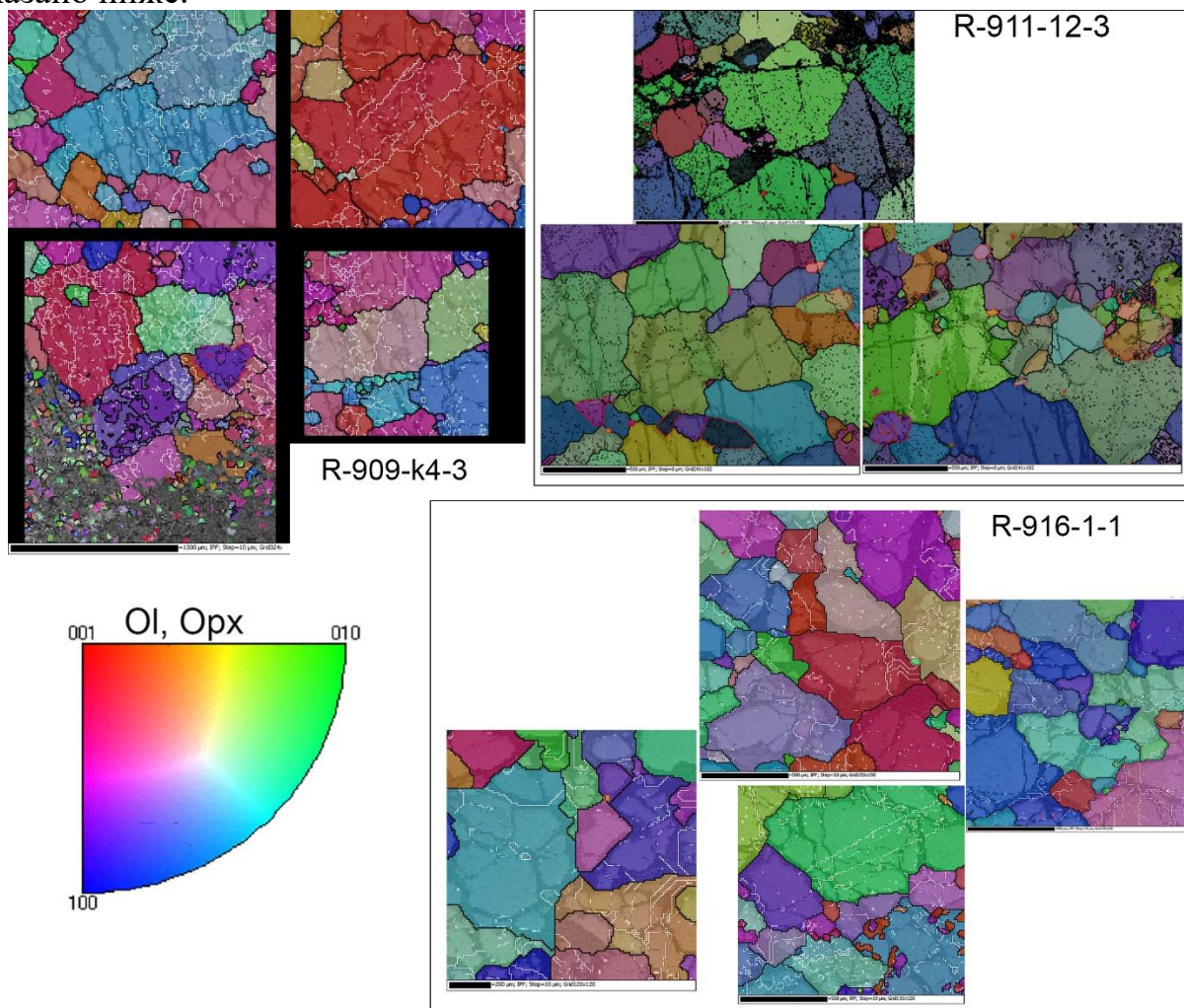


Рисунок 3 – Микроструктура изученных ультрамафитов на картах в кодировке обратных полюсных фигур

Примечание: в левой нижней части – цветовой ключ для карт кристаллов ромбической сингонии

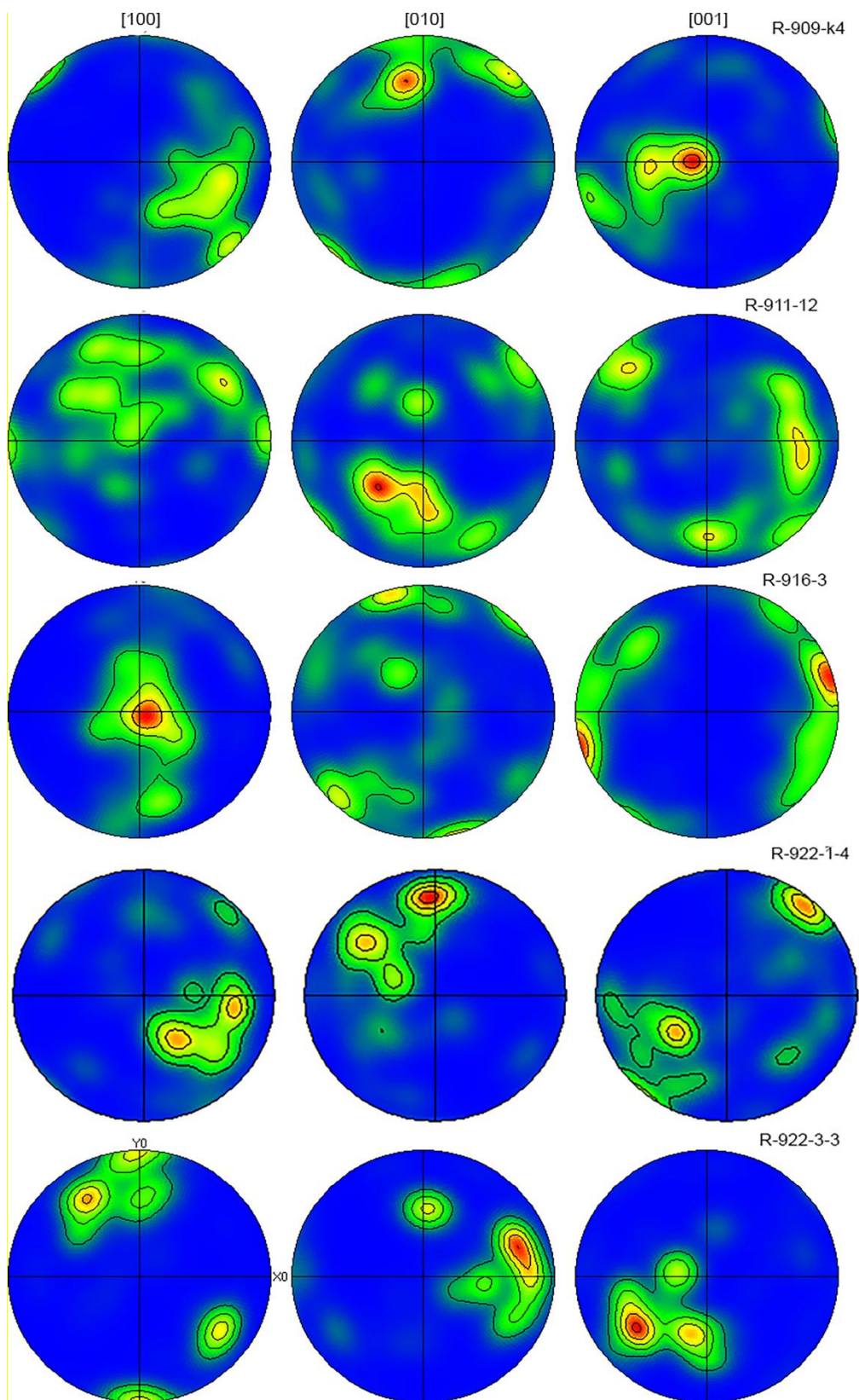


Рисунок 4 – Интегральные (синоптические) круговые диаграммы для главных кристаллографических направлений оливина изученных образцов

Наличие от умеренной до сильной предпочтительной кристаллографической ориентировки в оливиновых агрегатах указывает на пластическую деформацию в режиме дислокационной ползучести [16, 19]. Основным механизмом деформации являлось трансляционное скольжение, но также проявлена и динамическая рекристаллизация, что отражено в присутствии необластов и усложнении петроструктурных узоров на интегральных диаграммах. При этом в разных образцах проявлены различные системы трансляционного скольжения. Только в образце R-909-k4 проявлена наиболее типичная для офиолитов система (010)[100] или тип А, здесь и далее типизация проводится по работе [15]. Во всех остальных образцах направлением предпочтительного скольжения являлась ось [001], а плоскости скольжения изменялись: R-916-3 и R-922-3 – система (010)[001] или тип В, R-911-12 и R-922-1 – система (100)[001], тип С. Считается, что направление [001] становится более легким в более «влажных» условиях, тогда как направление [100] является предпочтительным в «сухой» обстановке [15, 17]. Кроме того, направление [001] становится более предпочтительным при более низкой температуре [14, 18]. В целом, предлагаемая нами интерпретация близка к таковой, предложенной в работе [2], где разнообразие наблюдаемых микроструктурных типов оливина связывается с длительной метаморфической эволюцией массива.

**Заключение.** В результате изучения микроструктурных особенностей ультрамафитов Юго-Западного рудного поля массива Рай-Из выявлена сильная предпочтительная кристаллографическая ориентировка оливина в гарцбургитах, дунитах и вкрапленных хромититах, что обусловлено интенсивной пластической деформацией в режиме дислокационной ползучести. Вероятно, она играла определяющую роль в становлении ультрамафитового разреза и образовании хромититов. Переход основного направления течения от оси [100] к [001] может быть связан с глубинным уровнем перехода от верхней мантии к нижней коре. Для более точной оценки РТ-условий, окислительно-восстановительного и флюидного режима деформации необходимо проведение более детальных исследований.

**Финансирование.** Исследования выполнены за счет гранта РФФ (Соглашение № 22–17–00019). Аналитические исследования проведены на базе ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов» и в Ресурсном центре СПбГУ «Геомодель». Автор признателен И.И.Мусабинову и Н.Власенко за проведение аналитических работ методом EBSD.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Вахрушева Н.В., Ширяев П.Б., Степанов А.Е., Богданова А.Р. Петрология и хромитоносность ультраосновного массива Рай-Из (Полярный Урал). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. 265 с.
2. Гончаренко А.И., Чернышов А.И., Шмелев В.Р. Петроструктурные особенности гипербазитов и габбро / Строение, эволюция и минерагения гипербазитового массива Рай-Из. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 228 с.
3. Даниленко В.Н., Миронов С.Ю., Беляков А.Н., Жиляев А.П. Применение EBSD анализа в физическом материаловедении (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2012. Т. 78. №2. С. 28–46.
4. Добрецов Н.Л., Молдаванцев Ю.Е., Казак А.П., Пономарева Л.Г., Савельева Г.Н., Савельев А.А. Петрология и метаморфизм древних офиолитов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 220 с.
5. Добржинецкая Л.Ф. Деформации магматических пород в условиях глубинного тектогенеза. М.: Наука, 1989. 288 с.
6. Заварицкий А.Н. Перидотитовый массив Рай-Из в Полярном Урале. М.: ГОНТ ГРИ, 1932. 221 с.
7. Казаков А.Н. Динамический анализ микроструктурных ориентировок минералов. Л.: Наука, 1987. 272 с.
8. Кашинцев Г.Л., Кузнецов И.Е., Рудник Г.Б. Типы пространственной ориентировки оливинов в гипербазитах массива Рай-Из (Полярный Урал) // Вестник МГУ. Сер. геол., 1971, №2. С.195–199.
9. Макеев А. Б., Брянчанинова Н. И. Топоминералогия ультрабазитов Полярного Урала. СПб.: Наука, 1999. 252 с.
10. Перевозчиков Б.В., Булыкин Л.Д., Попов И.И., Орфаницкий В.Л., Андреев М.И., Сначев В.И., Даниленко С.А., Черкасов В.Л., Ченцов А.М., Жарикова Л.Н., Ключко А.А. Реестр хромитопоявлений в альпинотипных гипербазитах Урала. Пермь: КамНИИКИГС. 2000. 474 с.
11. Саранчина Г.М., Кожевников В.Н. Фёдоровский метод (определение минералов, микроструктурный анализ). Л., Недра, 1985. 208 с.
12. Строение, эволюция и минерагения гипербазитового массива Рай-Из /отв ред. В.Н.Пучкова, Д.С.Штейнберг. – Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 228 с.
13. Bunge H. Texture Analysis in Materials Science: Mathematical Models. London: Butterworths, 1982. 593 p.
14. Carter N.L. Steady state flow of rocks. Rev. Geophys. and Space Phys. 1976, V.14, Pp. 301–360.
15. Jung H. Crystal preferred orientations of olivine, orthopyroxene, serpentine, chlorite, and amphibole, and implications for seismic anisotropy in subduction zones:

a review. *Geosciences Journal*, 2017, V. 21. Pp. 985–1011.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s12303-017-0045-1>

16. Karato S. *Deformation of Earth Materials. An Introduction to the Rheology of Solid Earth*. Cambridge University Press. 2008. 463 p.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511804892>

17. Karato S., Jung H., Katayama I., Skemer P. Geodynamic significance of seismic anisotropy of the upper mantle: new insights from laboratory studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2008, V. 36. Pp. 59–95.

18. Nicolas A., Poirier J.P. *Crystalline plasticity and solid state flow in metamorphic rocks*. Wiley – Interscience, London, 1976. 444 p.

19. Poirier J.-P. *Creep of crystals. High-temperature deformation processes in metals, ceramics and minerals*. London, Cambridge University Press, 1985. 287 p.

20. 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. The application of electron backscattered and orientation contrast imaging in the SEM to textural problems in rocks. *American Mineralogist*, 1999, V.84. Pp. 1741-1749.

21. Prior D.J., Mariani E., Wheeler J. 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. 2009. ISBN-13: 978-0387881355.432p. Chapter 29. Pp. 345-357.

22. Schwartz J., Kumar M., Adams B.L., Field D.P. *Electron backscattered diffraction in Material Science*. Springer Science+Business Media. 2009. 528 p.

23. 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*, 2005, V. 411. Pp. 157–167.

## REFERENCES

1. Vakhrusheva N.V., Shiryaev P.B., Stepanov A.E., Bogdanova A.R. *Petrology and chromite content of the Rai-Iz ultramafic massif (Polar Urals)*. Ekaterinburg: IGG UB RAS, 2017. 265 p. (in Russian)

2. Goncharenko A.I., Chernyshov A.I., Shmelev V.R. *Petrostructural features of hyperbasites and gabbro / Structure, evolution and minerageny of the Rai-Iz hyperbasite massif*. Sverdlovsk: Ural Branch of the USSR Academy of Sciences, 1990. 228 p. (in Russian)

3. Danilenko V.N., Mironov S.Yu., Belyakov A.N., Zhilyaev A.P. Application of EBSD analysis in physical materials science (review). *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostirovanie materialov*. [Factory laboratory. Diagnostics of materials], 2012. V. 78 (2). P. 28–46.

4. Dobretsov N.L., Moldavantsev Yu.Ye., Kazak A.P., Ponomareva L.G., Savel'yeva G.N., Savel'yev A.A. Petrology and metamorphism of ancient ophiolites. Novosibirsk: Nauka. SB AS USSR, 1977. 220 p. (in Russian)
5. Dobrzhinetskaya L.F. Deformations of igneous rocks at the condition of deep tectogenesis. Moscow: Nauka, 1989. 288 p. (in Russian)
6. Zavaritskiy A.N. Rai-Iz peridotite massif in the Polar Urals. M.: GONT GRI, 1932. 221 p. (in Russian)
7. Kazakov A.N. Dynamical analysis of microstructural orientation of minerals. Leningrad: Nauka, 1987. 272 p. (in Russian)
8. Kashintsev G.L., Kuznetsov I.E., Rudnik G.B. Types of spatial orientation of olivines in hyperbasites of the Rai-Iz massif (Polar Urals) // Bulletin of Moscow State University. Geological Series, 1971, No. 2. P. 195–199. (in Russian)
9. Makeev A. B., Bryanchaninova N. I. Topominerology of ultramafic rocks of the Polar Urals. SPb: Nauka, 1999. 252 p. (in Russian)
10. Perevozchikov B.V., Bulykin L.D., Popov I.I., Orfanitskiy V.L., Andreev M.I., Snachev V.I., Danilenko S.A., Cherkasov V.L., Chentsov A.M., Zharikova L.N., Klochko A.A., 2000. The register shows of chrome in the alpine-type peridotites of Urals. Ed. Perevozchikov B.V. KamaRICSDI, Perm. 474 p. (in Russian).
11. Saranchina G.M., Kozhevnikov V.N. Fedorov's method (mineral definition, microstructural analysis). Leningrad: Nedra, 1985. 208 p. (in Russian)
12. Structure, evolution and minerageny of the Rai-Iz hyperbasite massif / edited by V.N.Puchkova, D.S.Shteinberg. – Sverdlovsk: Ural Branch of the USSR Academy of Sciences, 1990. 228 p. (in Russian)
13. Bunge H. Texture Analysis in Materials Science: Mathematical Models. London: Butterworths, 1982. 593 p.
14. Carter N.L. Steady state flow of rocks. Rev. Geophys. and Space Phys. 1976, V.14, Pp. 301–360.
15. Jung H. Crystal preferred orientations of olivine, orthopyroxene, serpentine, chlorite, and amphibole, and implications for seismic anisotropy in subduction zones: a review. Geosciences Journal, 2017, V. 21. Pp. 985–1011. <http://dx.doi.org/10.1007/s12303-017-0045-1>
16. Karato S. Deformation of Earth Materials. An Introduction to the Rheology of Solid Earth. Cambridge University Press. 2008. 463 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511804892>
17. Karato S., Jung H., Katayama I., Skemer P. Geodynamic significance of seismic anisotropy of the upper mantle: new insights from laboratory studies. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2008, V. 36. Pp. 59–95.
18. Nicolas A., Poirier J.P. Crystalline plasticity and solid state flow in metamorphic rocks. Wiley – Interscience, London, 1976. 444 p.
19. Poirier J.-P. Creep of crystals. High-temperature deformation processes in metals, ceramics and minerals. London, Cambridge University Press, 1985. 287 p.

20. 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. The application of electron backscattered and orientation contrast imaging in the SEM to textural problems in rocks. *American Mineralogist*, 1999, V.84. Pp. 1741-1749.

21. Prior D.J., Mariani E., Wheeler J. 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. 2009. ISBN-13: 978-0387881355.432p. Chapter 29. Pp. 345-357.

22. Schwartz J., Kumar M., Adams B.L., Field D.P. *Electron backscattered diffraction in Material Science*. Springer Science+Business Media. 2009. 528 p.

23. 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*, 2005, V. 411. Pp. 157–167.

#### ***Сведения об авторе:***

***Савельев Дмитрий Евгеньевич***, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН). 450006, г. Уфа, Российская Федерация ул. Карла Маркса, д. 16/2. E-mail: sav171@mail.ru. ORCID ID: 0000-0001-8910-6992.

#### ***Author's personal details***

***Savelyev Dmitry Evgenievich***, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Researcher, Institute of Geology - a separate structural unit of the Federal State Budgetary Scientific Institution of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IG UFIC RAS). 450006, Ufa, Russian Federation st. Karla Marksa, 16/2. E-mail: sav171@mail.ru. ORCID ID: 0000-0001-8910-6992.

© Савельев Д.Е.