

Петроструктурные и геохимические особенности ультрамафитов на примере реститовых метаморфитов Кузнецкого Алатау (Западная Сибирь), оливиновых кумулатов Йоко-Довыренского расслоенного массива (Северное Прибайкалье) и их аналогов из ксенолитов ультрабазитов Канарского архипелага (Испания)*

В. А. Крылова¹, Г. Гутиеррез-Алонсо^{1,2},
И. Ф. Гертнер¹, Т. С. Краснова¹

¹ Томский государственный университет,
Российская Федерация, 634050, Томск, пр. Ленина, 36

² Университет Саламанки,
Испания, 37008, Саламанка, Патио де Эскуэлас, 1

Для цитирования: Крылова, В. А., Гутиеррез-Алонсо, Г., Гертнер, И. Ф., Краснова, Т. С. (2021). Петроструктурные и геохимические особенности ультрамафитов на примере реститовых метаморфитов Кузнецкого Алатау (Западная Сибирь), оливиновых кумулатов Йоко-Довыренского расслоенного массива (Северное Прибайкалье) и их аналогов из ксенолитов ультрабазитов Канарского архипелага (Испания). *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Науки о Земле*, 66 (4), 706–722. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.404>

В статье представлены результаты петроструктурных и минералогических исследований зерен оливина из ультраосновных и основных пород разного генезиса, в частности соответствующих кумулятивным дунитам Йоко-Довыренского расслоенного массива (Северное Прибайкалье), реститовым гипербазитам Бархатного массива (Кузнецкий Алатау) и ксенолитам перидотитов из базальтов Канарских островов (Испания). Показана взаимосвязь петроструктурных и минералогических особенностей ультраосновных пород, что позволяет идентифицировать их кумулятивные и реститовые разновидности. Важным элементом петроструктуры ультрабазитов является ориентация оливина, которая отражает либо условия формирования первичных кристаллов в магматическом расплаве, либо условия их рекристаллизации в результате пластических деформаций во время эксгумации на поверхность Земли. Минеральный состав горных пород является дополнительным признаком, отражающим реальные условия образования. При наличии плагиоклаза основного состава говорить о реститовой природе этих ультраосновных пород уже достаточно сложно. С другой стороны, пластические деформации оливина характерны для реститовых гипербазитов, в составе которых плагиоклаз отсутствует. Результаты минералогических исследований в ультрабазитовых ксенолитах Канарских островов показали присутствие основного плагиоклаза (лабрадора), а также оливина типа хризолита (12–16 Fa), что соответствует признакам ультрабазитов расслоенных интрузий типа Йоко-Довыренского дунит-троктолит-габбрового плутона. Для реститовых гипербазитов (на примере Кузнецкого Алатау) железистость

* Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № 0721-2020-0041).

оливина не превышает 9–10 % фаялитового минала, а плагиоклаз и клинопироксен отсутствуют. Характерным признаком ксенолитов Канарских островов выступает наличие эндиопсида, который присутствует в расслоенных интрузиях, но отсутствует в реститованных фрагментах верхней и нижней мантии. Предполагается, что ксенолиты в базальтах Канарских островов имеют не мантийную природу, а представляют собой фрагменты глубинной магматической камеры. Проведенные исследования оптической ориентировки оливина ксенолитов пород острова Лансароте подтверждают данные выводы. Геохимические параметры ультрабазитовых ксенолитов острова Тенерифе могут вполне соответствовать более глубинным образованиям.

Ключевые слова: петроструктурные особенности, химический состав, ксенолиты, базальты, перидотиты, оливин, породообразующие минералы, микрорентгеноспектральный анализ, EBSD-анализ, геохимические параметры.

1. Введение

Одним из важных элементов диагностики генезиса ультраосновных пород являются их петрохимические и геохимические параметры. Однако недавно собранные данные позволяют усомниться в таком выводе, так как некоторые параметры распределения редкоземельных элементов в типичных кумулятивных дунитах Йоко-Довыренского расслоенного плутона и предполагаемых реститовых гипербазитов Восточного Саяна обладают сходными характеристиками. Многие геохимические параметры встречаются как в реститовых, так и в кумулятивных ультрабазитах. В основном это связано с влиянием флюидов в зонах субдукции или при взаимодействии вещества мантийного и корового субстратов, результатом которого может выступать воздействие мантийных плюмов (Ernst, 2014). Одним из критериев является концентрация наиболее инертных редкоземельных элементов. Как правило, низкие концентрации этих элементов отражают максимальную степень деплетирования мантийного вещества, которая характерна для продуктов верхней мантии.

Микроструктурный анализ оливина позволяет зафиксировать деформации оливина и других породообразующих минералов при формировании мантийного рестита, захвате мантийных фрагментов ранних кристаллов оливина и пироксена магматическими расплавами и их транспортировке в верхние горизонты земной коры или наложении деформаций при орогенных процессах. В этой ситуации желательно использовать комплексный подход к определению генезиса ультрабазитов, включая геохимические, минералогические и петроструктурные характеристики горных пород.

В качестве примеров для сравнения были выбраны три контрастных комплекса: Йоко-Довыренский расслоенный дунит-троктолит-габбровый массив в Северном Забайкалье, Бархатный дунит-гарцбургитовый массив (реститовые ультраосновные породы Кузнецкого Алатау) и ксенолиты ультраосновных пород из базальтов Канарских островов. Выбор данных объектов обусловлен поставленной задачей изучения особенностей вещественной и структурной организации ультрабазитов разных формационных и генетических типов с целью оценки вероятного влияния наложенных деформаций и процессов рекристаллизации.

Для изучения пород мы провели геохимический, минералогический и петроструктурный анализы. Учитывая контрастный генезис исследуемых объектов,

можно оценить вклад отдельных факторов для диагностики генезиса гипербазитов. Кроме того, очень важен анализ химического состава оливина, так как он является основным минералом изученных пород. Примеси в составе этого минерала также выступают важным моментом для диагностики генезиса. Содержание оксида кальция может отражать глубину образования геологических объектов (Simkin and Smith, 1970), тогда как содержание никеля, скорее всего, указывает на минерагенический потенциал для поиска залежей никеля и драгоценных металлов (Рябов, 1992).

2. Методика исследований

Для точной диагностики природы ксенолитов перидотитового состава, которые присутствуют в базальтах Канарского архипелага, был проведен дополнительный анализ оптической ориентировки оливина методом EBSD (Electron Back Scattered Detector), т.е. на основе детектора обратно отраженных электронов. Аналогичные исследования были проведены для реститовых гипербазитов горы Бархатной в Кузнецком Алатау и оливиновых кумулатов Йоко-Довыренского расщепленного плутона. Для последних двух объектов также была проведена диагностика ориентировки зерен оливина традиционным стереографическим методом Е. С. Федорова. Результаты сопоставления данных исследований позволяют говорить о вероятном сходстве этих методов анализа структурной организации зерен оливина. Сканирование при проведении методом EBSD выполнено при ускоряющем напряжении (HV) 20 кВ и токе пучка 20 нА. На образцы было нанесено углеродное токопроводящее покрытие в установке Quorum Technologies EMITECH K450X (Quorum Technologies, Laughton, UK). Данный метод исследования оптической ориентировки оливина выступает своеобразным аналогом исследований на «федоровском столике» (Лукашова, 2016). Анализ вещественного состава породообразующих минералов, а также качественные изображения характера взаимоотношений минеральных ассоциаций и индивидов проводились методом рентгеноспектрального микроанализа в режиме обратно рассеянных электронов (BSE) на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II LMU, оборудованном энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 (с детектором Si (Li) Standart). Ошибка определения концентраций главных оксидов составляет 0.05–0.1%. Для определения рассеянных и редких элементов был применен метод ISP-MS на масс-спектрометре Agilent-7500 в Центре коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Томского государственного университета.

3. Петрографическая характеристика изученных пород

В данном разделе рассмотрены основные характеристики горных пород исследуемых объектов. Главным признаком их генезиса выступают особенности петрохимического, минералогического и геохимического составов, а также петроструктуры. Исследуемые объекты обладают сходными особенностями вещественного состава, что не позволяет полностью диагностировать их генетические особенности, но в комплексе с особенностями микроструктурного узора ориентировки оливина и его деформаций дает более полную картину.

3.1. Базальты и ксенолиты Канарского архипелага

Петрографическая характеристика изученных пород — вулканитов — отвечает основным типам пород, распространенных в Канарском архипелаге (Gurenko et al., 2009; Krylova and Gertner, 2017). Образец А-1685 с о. Ла-Пальма представлен порфиroidным базальтом (рис. 1, а, б). Вкрапленники (1–3 мм) представляют собой идиоморфные кристаллы оливина и клинопироксена. Основная масса раскриталлизована (до 0.3 мм), имеет интергранулярную структуру, обусловленную более крупными лейстами плагиоклаза и агрегатом пироксена, оливина, плагиоклаза и рудного минерала. Отмечаются также слабо раскриталлизованные разновидности с порфировыми выделениями плагиоклаза (обр. 3138). Образец А-1688 с о. Ла-Пальма соответствует пироксеновому порфириту с обильными миндалинами, заполненными анальцимом (рис. 1, в, г), которые по размеру сопоставимы с самими вкрапленниками (0.5 мм). Также фиксируются крупные (до 0.5 мм) чешуйки бурой слюды. Основная масса содержит лейсты плагиоклаза, зерна пироксена и рудного минерала. Частично наблюдаются фрагменты с пилотакситовой структурой (Крылова и Гертнер, 2020).

Образец А-3 с о. Лансароте представлен перидотитовым ксенолитом в амигдалоидном базальте. Вмещающий вулканит изобилует мелкими миндалинами, заполненными анальцимом, что позволяет его сопоставлять с предыдущей породой (рис. 1, е). Собственно ксенолит характеризуется резкими границами без признаков взаимодействия со вмещающим субстратом (рис. 1, д, е). Перидотит сложен крупными (до 3–4 мм) кристаллами оливина с характерными признаками внутрикристаллических деформаций (полосы излома или структуры kink band) и ортопироксеном со следами распада твердого раствора «пижонитового» типа. Структура перидотита протогранулярная с элементами порфирикластовой (рис. 1, ж, з). В составе крупнозернистой перидотитовой фракции постоянно присутствует хромшпинелид с характерным вишневым оттенком в параллельных николях (Крылова и Гертнер, 2020).

3.2. Дуниты Йоко-Довыренского плутона

Йоко-Довыренский расслоенный плутон является одним из самых изученных массивов в Северном Прибайкалье (Гурулев, 1965; Гурулев и Трунева, 1981; Ярошевский и др., 1982; Ионов и др., 1984; Конников, 1986; Кислов, 1998). Однако следует отметить, что петроструктурные особенности горных пород были изучены впервые нами (Гертнер, 1994). Основной структурной особенностью дунитов данного объекта выступает идиоморфизм ранних кристаллов оливина относительно плагиоклаза и клинопироксена, зерна которых выполняют интерстициальные пространства, предполагающий типичную кумулятивную природу (рис. 2). Этот вариант отражает типичный процесс фракционной кристаллизации ультрабазитовой магмы. Состав оливина соответствует высокомагнезиальному хризолиту (12–14 % Fa), клинопироксен отвечает диопсиду, а плагиоклаз — андезин-лабрадору (Гертнер, 1994; Ariskin et al., 2018). Отдельным аспектом выступает присутствие в нижней части дунитового горизонта твердого раствора диопсида и энстагита, что отражает вероятное присутствие пижонита на ранней стадии дифференциации. Структуры распада пижонита были определены в краевых зонах плутона (Гертнер и др., 1996). Отдельные математические модели фракционной кристаллизации в данном объ-

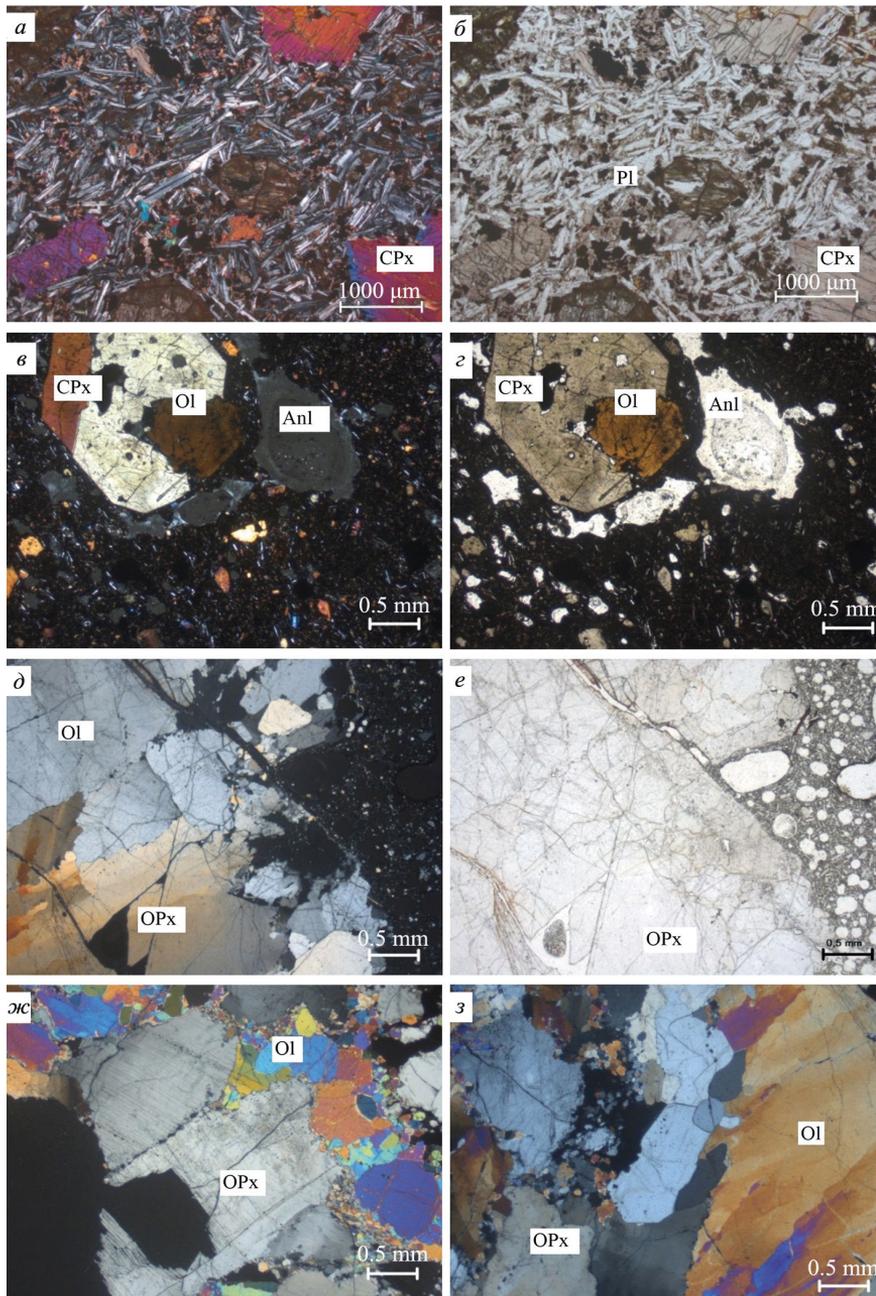


Рис. 1. Особенности микроструктуры базальтов и перidotитового ксенолита изученных образцов Канарских островов

a, б — порфировидный долерит, обр. А-1685 (*a* — николи скрещены, *б* — николи параллельны); *в, з* — пироксеновый амигдалоидный порфирит, обр. А-1688 (*в* — николи скрещены, *з* — николи параллельны); *д, е* — контакт перidotитового ксенолита со вмещающим миндалекаменным базальтом, обр. А-3 (*д* — николи скрещены, *е* — николи параллельны); *ж, з* — протогранулярная с элементами порфирокластической структура перidotитового ксенолита, обр. А-3 (*ж* — николи скрещены, *з* — николи параллельны).

CPx — клинопироксен; Pl — плагиоклаз; Anl — анальцим; Ol — оливин; OPx — ортопироксен.

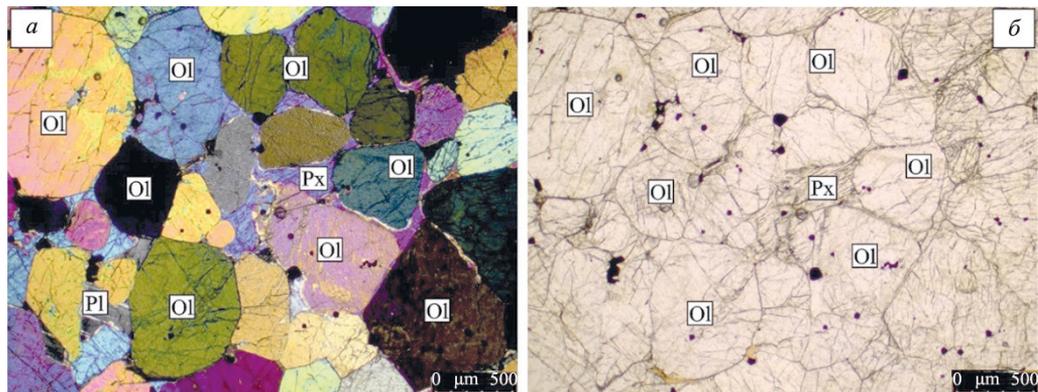


Рис. 2. Дунит Йоко-Довыренского массива
а — николи скрещены, *б* — николи параллельны. Клинопироксен и плагиоклаз выполняют интерстициальные пространства.
 Ol — оливин, Px — клинопироксен, Pl — плагиоклаз.

екте разрабатывались в последние годы (Арискин и др., 2003). В рамках экспериментальных и математических исследований была предложена модель внедрения кашеобразного расплава с присутствием ранних фрагментов оливина (Ariskin et al., 2018). Возраст пород Йоко-Довыренского массива определен разными геохронологическими методами и соответствует отметке примерно от 74–20 до 740 млн лет (Amelin et al., 1996; Кислов, 1998; Ernst et al., 2012).

Вместе с тем даже в этих ультрабазитах фиксируются признаки пластических деформаций с формированием лейстовых и порфирокластовых типов оливина. Как правило, они приурочены к локальным зонам динамометаморфизма, но не имеют широкого распространения в отличие от реститовых гипербазитов альпинотипного типа. Особенности структуры и состава таких пород рассмотрены в следующем разделе. Тем не менее следует отметить, что пластические деформации и признаки рекристаллизации имеют ограниченное развитие и связаны со складчатыми процессами при формировании Северо-Байкальского орогенного пояса. Именно этим объясняется вертикальное залегание пород данного массива. Вверх по разрезу идиоморфизм плагиоклаза и пироксенов становится приблизительно одинаковым, что отвечает уже троктолитам и оливиновым габброидам. Химический состав оливина в дунитах характеризуется повышенным содержанием CaO, что подтверждает гипабиссальную природу данного объекта (Simkin and Smith, 1970). Вместе с тем при анализе отдельных деформационных типов оливина, приуроченных к локальным зонам скольжения в присутствии сульфидной фазы, было установлено пониженное содержание никеля, что подтверждает вероятную миграцию цветных и благородных металлов в процессе рекристаллизации (Гертнер, 1994).

Главной особенностью химического состава оливина данных пород, претерпевших минимальные деформации, является повышенное содержание никеля в составе оливина. При наложенных пластических деформациях или метаморфических преобразованиях наблюдается перераспределение никеля между силикатной и сульфидной фазами. Это один из вариантов ремобилизации никеля и благородных металлов с формированием самостоятельных минералов (Гертнер, 1994).

3.3. Реститовые ультрабазиты Кузнецкого Алатау

Данный тип пород изучен на примере Бархатного дунит-гарцбургитового массива, который представляет собой фрагмент литосферной мантии, эксгумированной в верхние слои земной коры, а также гарцбургитов горы Северной в Кузнецком Алатау (Гертнер и др., 1996). Особенностью вещественного состава пород выступает ассоциация высокомагнезиального оливина и аналогичного ортопироксена, часто с проявлением хромитовой минерализации (рис. 3). Структурными особенностями породообразующих минералов являются деформации, отвечающие структурам пластического излома типа *kink band*. Как правило, они отражают рекристаллизацию ультрамафитов в процессе реститования или при их тектонических преобразованиях в процессе продвижения в верхние слои земной коры или обусловлены вероятным термическим воздействием со стороны более поздних интрузий (Nicolas and Poirier, 1976; Гончаренко, 1986; 1989).

4. Результаты петроструктурных исследований

В качестве эталонов были выбраны ксенолиты перидотитов из базальтов Канарского архипелага, кумулятивные дуниты Йоко-Довыренского расслоенного плутона и реститовые перидотиты Кузнецкого Алатау (дуниты из зоны хромитовой минерализации Бархатного массива и горы Северной). Анализ методом EBSD ориентировок зерен оливина исследованного ксенолита из базальтов Канарского архипелага фиксирует четкий максимум оси [001], т. е. Nm, которая соответствует максимальному удлинению кристалла оливина и отражает ориентировку его ранних кристаллов в магматическом расплаве (рис. 4, а). При этом максимумы других осей имеют тенденцию к поясовому рассеиванию. Одним из признаков кумулятивной природы оливина выступает четко выраженный максимум оси [001] и поясовое рассеивание двух других кристаллографических осей, которое зафиксировано в дуните Йоко-Довыренского плутона (рис. 4, б) и прослеживается в ксенолите из базальтов Канарских островов (рис. 5). Представленный тип петроструктурного рисунка обусловлен достаточно хаотичной ориентировкой зерен оливина в магматическом расплаве. Вместе с тем внедрение потока магмы предполагает ориентировку ранних кристаллов оливина по направлению самого потока, т. е. ориентировку максимального удлинения зерен в направлении оси [001]. Другие оси, имея близкие параметры кристаллической решетки, характеризуются «размытыми» поясами, которые отражают вероятное вращения зерен вдоль двух плоских поверхностей (рис. 4, б).

Главным отличием реститовых гипербазитов выступает эффект пластических деформаций, который определяется более четкими максимумами кристаллических осей [100] и [010], соответствующих оптическим осям Ng и Np. В зависимости от механизма пластического течения и температурного режима реализуются разные направления внутрикристаллического скольжения, которые обеспечивают соответствующие петроструктурные характеристики и собственно рисунок оптической ориентировки оливина (Ave Lallemand, 1975; Nicolas and Poirier, 1976; Гончаренко, 1989).

Как правило, четкий максимум осей [100] отражает высокотемпературную систему скольжения по направлению (0kl) [100], а максимум осей [010] (Np) более

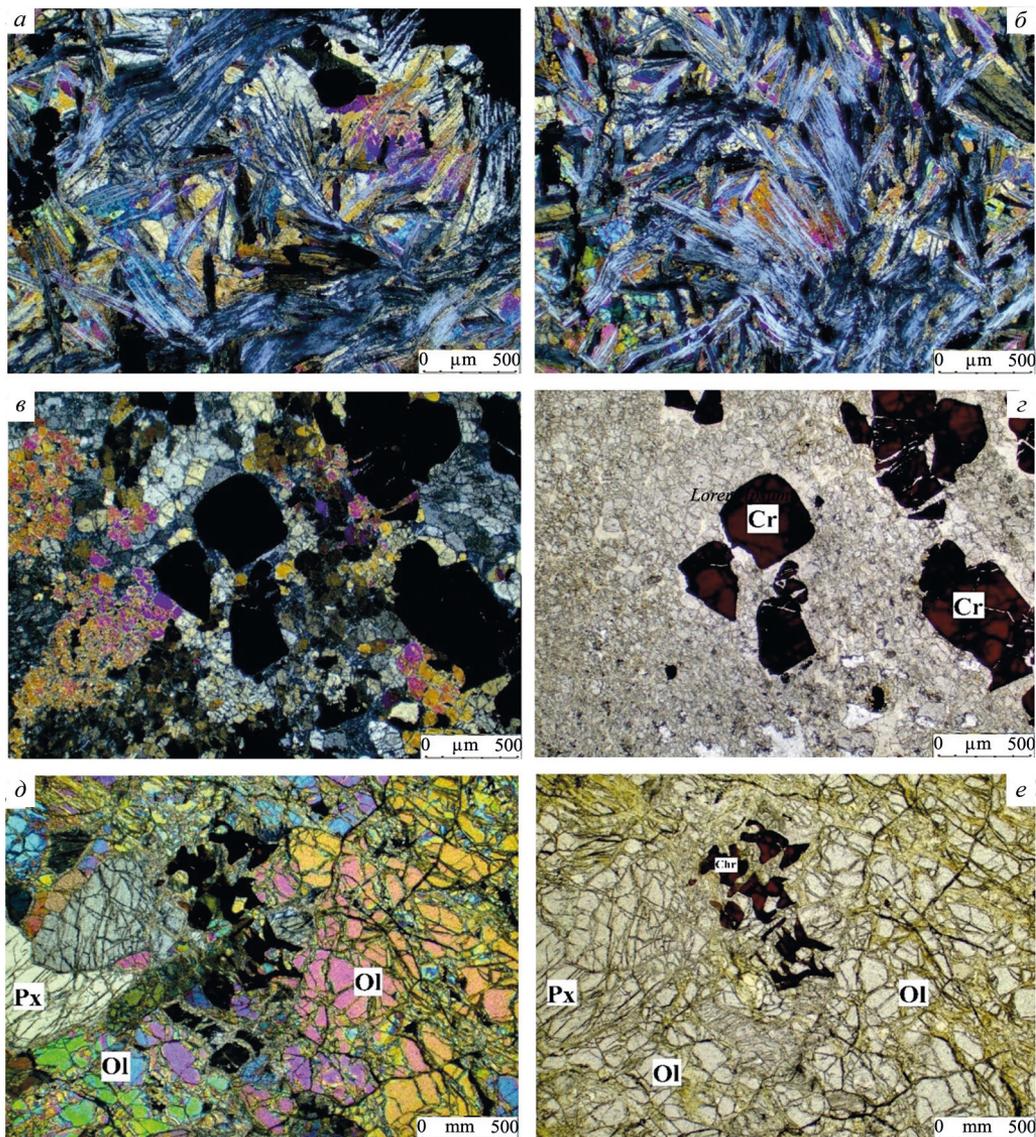


Рис. 3. Особенности микроструктуры пород Кузнецкого Алатау

a, б — дунит гор Северная и Зеленая (*a, б* — николи скрещены); *в, г* — дунит с хромитовой минерализацией, массив Бархатный и горы Северная и Зеленая (*в* — николи скрещены, *г* — николи параллельны); *д, е* — гарцбургиты гор Северная и Зеленая (*д* — николи скрещены, *е* — николи параллельны).

Px — пироксен; Ol — оливин; Cr — хромит.

низкотемпературные системы типа (100) [010] и (101) [010]) (Гончаренко, 1989). На рис. 6 представлен вариант перехода к более низкотемпературной системе пластических деформаций с переходом скольжения по системе (001) [010] и (100) [001] (рис. 6, в). В этом отношении петроструктурный узор «реститовых» гипербазитов (рис. 6, б) для ультрамафитов горы Бархатной (Краснова, 2005) заметно отличается

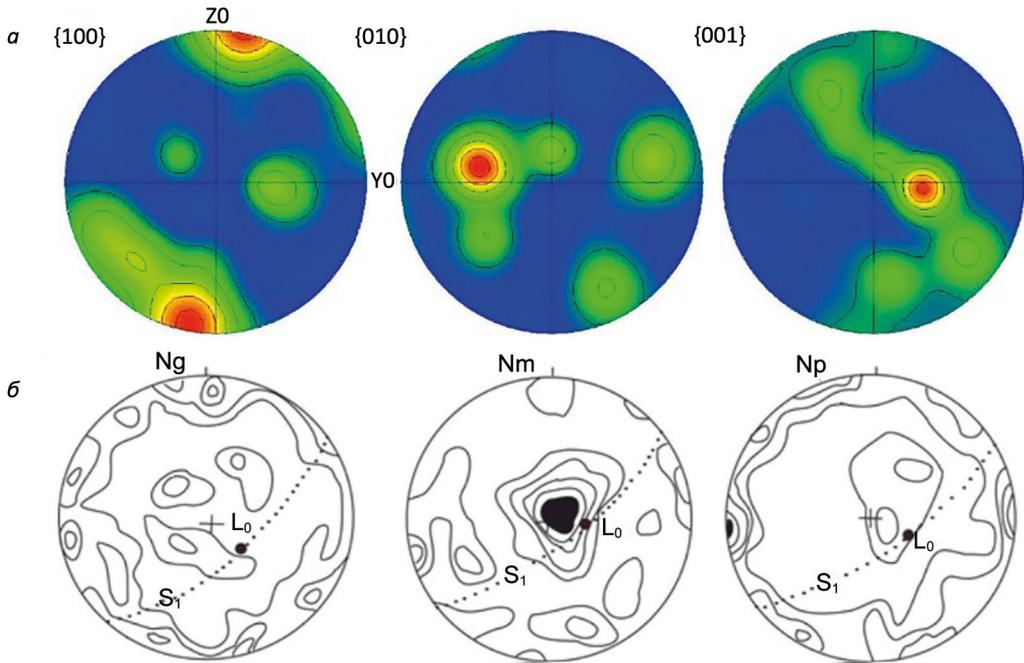


Рис. 4. Диаграммы оптической ориентировки оливина из дунита Йоко-Довыренского плутона
 а — метод EBSD-анализа; б — «федоровский» метод (Гертнер, 1994).

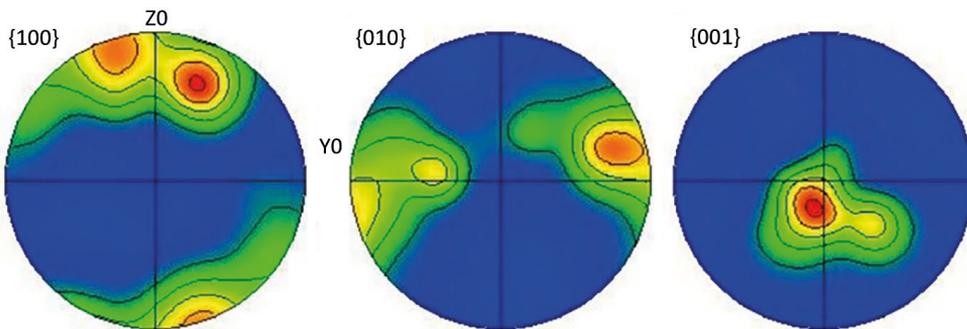


Рис. 5. Диаграмма оптической ориентировки оливина из ксенолита Канарских островов

от его аналогов из ксенолитов Канарских островов и более сопоставим с оптической ориентировкой оливина из дунитов Йоко-Довыренского плутона (Гертнер, 1994). Учитывая данные параметры петроструктуры оливина, можно допускать кумулятивную природу ксенолитов перидотитового состава в изученных базальтах Канарских островов, которые формировались в промежуточных камерах и могли содержать в своем составе ксеногенные кристаллы оливина или пироксена мантийного происхождения.

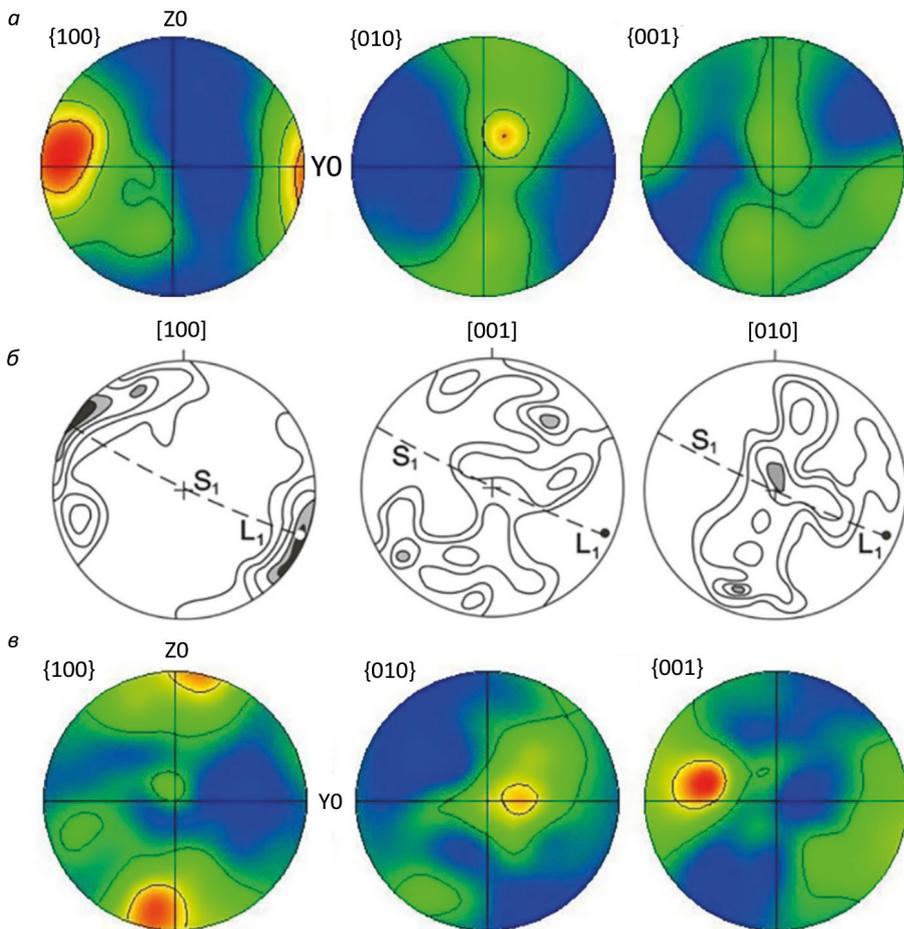


Рис. 6. Диаграмма оптической ориентировки оливина в гипербазитах Кузнецкого Алатау

a, в — метод EBSD-анализа; *б* — «федоровский» метод (Краснова, 2005).

5. Геохимические особенности пород изученных объектов

Геохимические параметры могут отражать вероятные взаимоотношения мантийного плюма с коровым субстратом. В частности, повышенные концентрации легких редкоземельных элементов (РЗЭ) и обогащение LIL-элементами в реститовых гипербазитах Кузнецкого Алатау свидетельствуют об их формировании в задуговых бассейнах при влиянии субдукционных процессов. Для Йоко-Довыренского расслоенного плутона предполагается более сложная модель с учетом наложенных складчатых деформаций и вероятного процесса трансвапоризации со стороны нижних горизонтов вмещающих толщ (Кислов, 1998). Процессы формирования базальтов Канарского архипелага предполагают внутриплитную обстановку в условиях формирования океанических островов, т. е. под воздействием горячих точек или мантийных плюмов. Однако это не исключает вариант контаминации

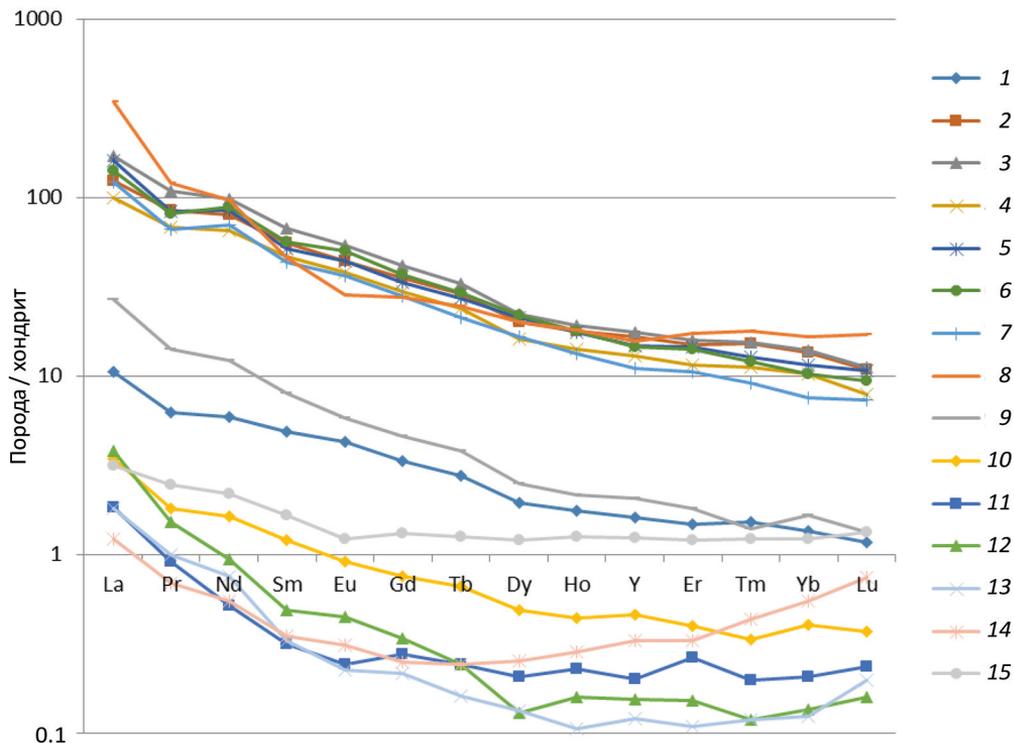


Рис. 7. Спектры распределения редкоземельных элементов в породах Канарских островов, Йоко-Довыренского плутона, Кузнецкого Алатау

1 — ксенолит Канарских островов (Лансароте); 2–8 — базальты Канарских островов; 9, 10 — перидотиты Канарских островов (Тенерифе); 11 — дунит Кузнецкого Алатау; 12 — хромитит Кузнецкого Алатау; 13 — гарцбургит Кузнецкого Алатау; 14 — плагиодунит Йоко-Довыренского плутона; 15 — дунит Йоко-Довыренского плутона.

Содержание элементов нормировано по составу хондрита CI (Sun and McDonough, 1989).

материалом нижней коры. Чтобы разобраться с деталями вероятного взаимодействия мантийного и корового материалов, предлагается рассмотреть особенности геохимических характеристик исследуемых объектов. Геохимические особенности базальтов островов Лансароте и Тенерифе по распределению редкоземельных элементов практически полностью соответствуют базальтам океанических островов, что вполне адекватно их геодинамической позиции. Однако для ксенолитов этих двух островов наблюдаются геохимические различия (рис. 7). Для о. Лансароте характерны достаточно высокие показатели содержания РЗЭ, превышающие даже подобные параметры оливиновых кумулатов Йоко-Довыренского плутона, а для одного ксенолита о. Тенерифе эти параметры более соответствуют реститовым гипербазитам Кузнецкого Алатау. Данный аспект предполагает более сложную модель формирования базальтов Канарского архипелага и их ксенолитов. Характеристики отдельных ксенолитов более соответствуют реститовым продуктам литосферной мантии, а возможно, и ее подастеносферному слою.

Подобная картина прослеживается и на мультиэлементных диаграммах (рис. 8). Два ксенолита с о. Лансароте вполне сопоставимы по своим спектрам с ку-

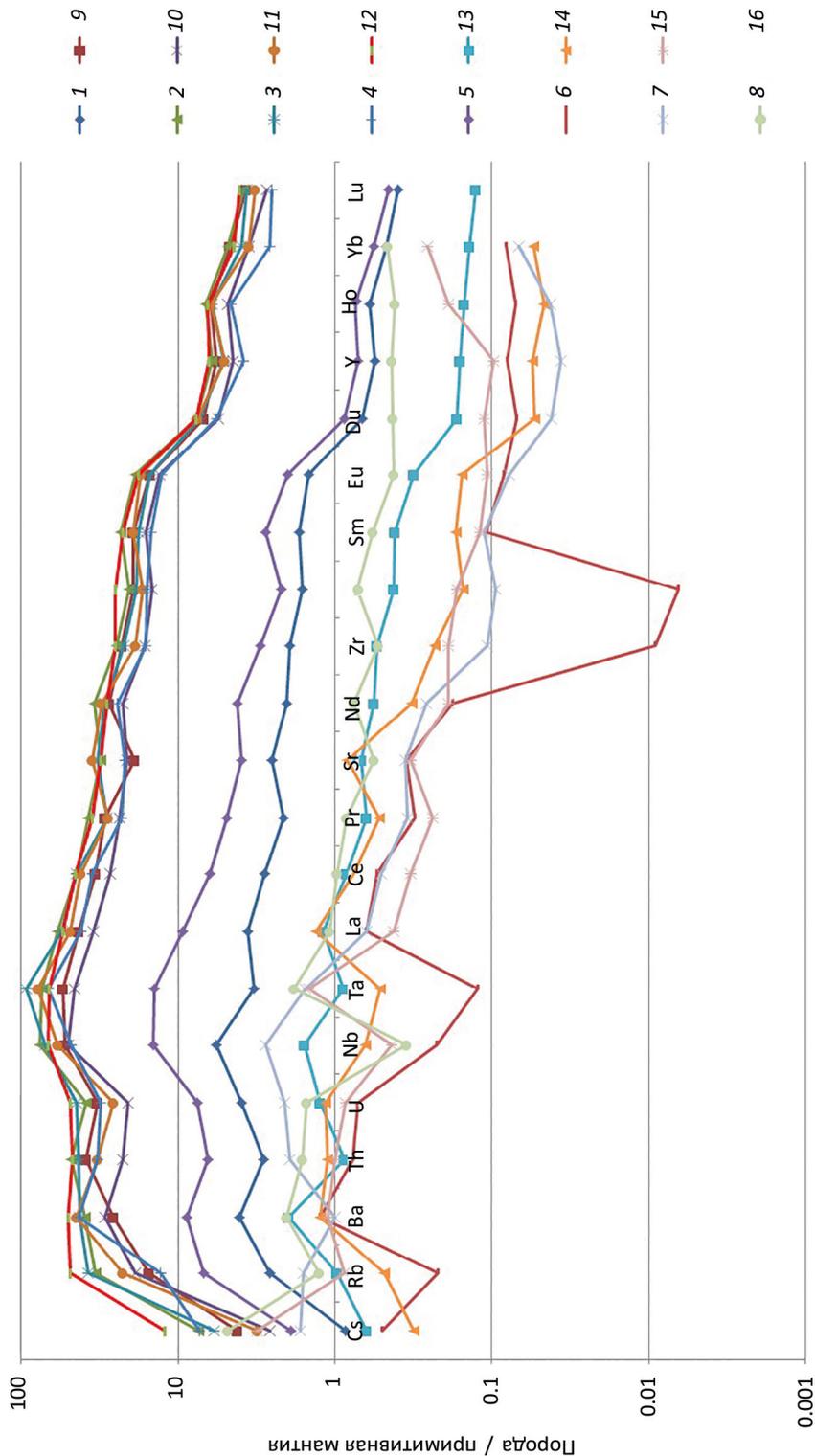


Рис. 8. Мультиэлементная диаграмма пород представленных объектов

1 — ксенолит Канарских островов (Лансароте); 2-7 — базальты Канарских островов (Тенерифе); 11 — дунит Кузнецкого Алагау; 12 — хромитит Кузнецкого Алагау; 13 — гарцбургит Кузнецкого Алагау; 14 — плагиодунит Йоко-Довыренского плутона; 15 — дунит Йоко-Довыренского плутона.

Содержание элементов нормировано по составу «примитивная мантия» (Sun and McDonough, 1989).

мулятивными образованиями Йоко-Довыренского плутона, тогда как один из ксенолитов о. Тенерифе близок к реститам Кузнецкого Алатау. Определенные отличия все-таки наблюдаются. Для реститового дунита Бархатного массива резко проявлены отрицательные аномалии ниобия и тантала, циркония и гафния. В наиболее деплетированных перидотитах из ксенолитов Тенерифе они остаются слабо выраженными. Одним из вариантов интерпретации нам представляется не субдукционная обстановка пород офиолитов Кузнецкого Алатау, а локальное взаимодействие магматических расплавов с материалом нижней коры или с материалом частично деплетированной мантии. Реальным ответом на данные вопросы послужит изучение конкретных изотопов неодима, стронция, кислорода и других элементов, которые планируются в дальнейшем.

6. Заключение

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Состав породообразующих минералов является важным диагностическим признаком для определения генезиса ультраосновных пород. Наличие в составе пород плагиоклаза предполагает, скорее всего, магматическую природу ультрамафитов, т. е. отвечает кумулятивным образованиям в промежуточной глубинной камере.
2. Петрохимические и геохимические параметры ультраосновных пород изученных объектов отражают особенности генезиса и геодинамической обстановки формирования, что показало сопоставление их вещественного состава из разных формационных комплексов. Однако есть моменты, не позволяющие определить их вероятный генезис. В данном случае необходимы дополнительные исследования изотопного состава для пополнения аналитических данных. Предполагается отдельное изучение как перидотитовых ксенолитов, так и вмещающих их базальтов на примере приморского региона.
3. Проведенные методом EBSD петроструктурные исследования крупных зерен оливина в исследуемых объектах являются важным элементом, который может быть сопоставим с классическими методами микроструктурного анализа.
4. Внутрикристаллические деформации крупных зерен оливина, его высокомагнезиальный состав и присутствие энстатита могут подтверждать мнение о мантийной природе ксенолитов о. Лансароте. Многие аспекты могут быть решены при анализе изотопов Nd, Sr, O и других элементов.
5. Следует отметить, что петроструктурный анализ породообразующих элементов выступает в комплексе с детальным исследованием вещественного состава горных пород и слагающих их минералов важным критерием для оценки генезиса ультрамафитов разных формационных типов. Однако на примере реститовых гипербазитов горы Северной было показано, что пластические деформации в данных породах могут быть связаны с процессом их тектонической эксгумации в верхние горизонты земной коры (Краснова и Гертнер, 1999).

Таким образом, для точной диагностики генезиса ультрамафитов необходим комплексный подход, предполагающий диагностику их минералогического состава, анализ петрохимических, геохимических и изотопных характеристик.

Литература

- Арискин, А. А., Конников, Э. Г., Кислов, Е. В. (2003). Моделирование равновесной кристаллизации ультрамафитов в приложении к проблемам формирования фазовой расслоенности Довыренского плутона (Северное Прибайкалье, Россия). *Геохимия*, 2, 131–155.
- Гертнер, И. Ф. (1994). *Петрология Йоко-Довыренского расслоенного ультрамафит-мафитового плутона (Северное Прибайкалье)*. Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск.
- Гертнер, И. Ф., Гончаренко, А. И., Федорова, Н. А., Чернышов, А. И. (1996). Динамометаморфизм и петроструктурные особенности ультрамафитов массива гор Северной-Зеленой (Кузнецкий Алатау). В: *Динамометаморфизм и петроструктурная эволюция пород мафит-ультрамафитовой ассоциации. Материалы семинара*. Томск, 101–107.
- Гончаренко, А. И. (1986). *Петрология и петроструктурная эволюция альпийских гипербазитов*. Дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Томск.
- Гончаренко, А. И. (1989). *Деформация и петроструктурная эволюция альпийских гипербазитов*. Томск: Изд-во ТГУ.
- Гурулев, С. А. (1965). *Геология и условия формирования Йоко-Довыренского габбро-перидотитового массива*. Москва: Наука.
- Гурулев, С. А., Трунева, М. Ф. (1981). Генетические типы медно-никелевых месторождений Северного Прибайкалья и физико-химические условия их формирования. В: *Проблемы петрологии в связи с сульфидным медно-никелевым рудообразованием*. Москва: Наука, 97–109.
- Ионов, Д. А., Киреев, Б. С., Ярошевский, А. А. (1984). Вариации состава плагиоклаза и генезис анортозитовых обособлений в Йоко-Довыренском расслоенном массиве. *Геохимия*, 4, 434–503.
- Кислов, Е. В. (1998). *Йоко-Довыренский расслоенный массив*. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН.
- Конников, Э. Г. (1986). *Дифференцированные гипербазит-базитовые комплексы докембрия Забайкалья (петрология и рудообразование)*. Новосибирск: Наука.
- Краснова, Т. С. (2005). *Петрология ультрамафитовых массивов гор Северной, Зеленой и Бархатной*. Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск.
- Краснова, Т. С., Гертнер, И. Ф. (1999). Структура пластического излома в оливине как индикатор межслоевого излома в ультрамафитах гг. Северной-Зеленой (Кузнецкий Алатау). *Структурный анализ кристаллических комплексов. Материалы между. семинара и Республиканской школы молодых ученых*. Томск: ЦНТИ, 29–32.
- Крылова, В. А., Гертнер, И. Ф. (2020). Особенности состава главных породообразующих минералов базальтов и ксенолита Канарского архипелага (Испания). *Вестник геонаук*, 4 (304), 3–8.
- Лукашова, М. В. (2016). *Универсальный способ пробоподготовки для микротекстурного и фазового анализа EBSD-методом. Заводская лаборатория*. Москва: Тест-ЗЛ.
- Рябов, В. В. (1992). *Оливины сибирских траппов как показатели петрогенезиса и рудообразования*. Новосибирск: Наука.
- Ярошевский, А. А., Ионов, Д. А., Миронов, Ю. В., Коптев-Дворников, Е. В., Абрамов, А. В., Кривоплясов, Г. С. (1982). Петрография и геохимия Йоко-Довыренского дунит-троктолит-габбро-норитового расслоенного массива (Северное Прибайкалье). В: *Петрология и рудоносность природных ассоциаций горных пород*. Москва: Наука, 86–117.
- Amelin, Yu. V., Neymark, L. A., Ritsk, E. Yu. and Nemchin, A. A. (1996). Enriched Nd-Sr-Pb isotopic signatures in Dovyren layered intrusion (Eastern Siberia, Russia): Evidence for source contamination by ancient upper-crustal material. *Chemical geology*, 129, 39–69.
- Ariskin, A., Danyushevsky, L., Nikolaev, G., Kislov, E., Fiorentini, M., McNeill, A., Kostitsyn, Yu., Goemann, K., Feig, S. T. and Malyshev, A. (2018). The Dovyren Intrusive Complex (Southern Siberia, Russia): Insights into dynamics of an open magma chamber with implications for parental magma origin, composition, and Cu-Ni-PGE fertility. *Lithos*, 302–308, 242–262. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.01.001>
- Ave Lallemand, H. G. (1975). Mechanisms of preferred orientations of olivine in tectonite peridotite. *Geology*, 3 (11), 653–656.

- Ernst, R. E. (2014). *Large Igneous Provinces*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ernst, R. E., Hamilton, M. A. and Soderlund, U. (2012). A proposed 725 Ma Dovyren–Kingash lip of southern Siberia, and possible reconstruction link with the 725–715 Ma Franklin lip of northern Laurentia. *Abstracts, Geological Association of Canada (GAC) — Mineralogical Association of Canada (MAC) Joint Annual Meeting, Geoscience at the Edge, St. John's, Newfoundland and Labrador*, 35, 42.
- Gurenko, A. A., Sobolev, A. V., Hoernle, K. A., Hauff, F. and Schmincke, H. U. (2009). Enriched, HIMU-type peridotite and depleted recycled pyroxenite in the Canary plume: a mixed-up mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 277 (3–4), 514–524.
- Krylova, V. A. and Gertner, I. F. (2017). Sedimentary deposits and petrography of the basalts of the island of Tenerife of the Canary archipelago (Spain). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 110, 1–7. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/110/1/012012>
- Nicolas, A. and Poirier, J. P. (1976). Crystalline Plasticity and Solid-State Flow in Metamorphic Rocks. *Mineralogical Magazine*, 41 (319), 422.
- Simkin, T. and Smith, G. (1970). Minor element distribution of olivine. *J. Geol.*, 78 (3), 304–325.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A. D. Saunders, M. J. Norry, ed., *Magmatism in the ocean basins*. Geol. Soc. Spec. Publ., 42, 313–345.

Статья поступила в редакцию 24 марта 2021 г.
Статья рекомендована к печати 19 октября 2021 г.

Контактная информация:

Крылова Вера Алексеевна — krylova.vera1994@yandex.ru
Гутьеррес-Алонсо Габриэль — gabi@usal.es
Гертнер Игорь Федорович — labspm@ggf.tsu.ru
Краснова Татьяна Семеновна — science@mail.tsu.ru

Petrofabric and geochemical features of ultramafic rocks on the example of restite metamorphites of the Kuznetsk Alatau (Western Siberia), olivine cumulates of the Yoko-Dovyren layered massif (Northern Cisbaikalia) and their analogues from ultrabasic xenoliths of the Canary Islands (Spain)*

V. A. Krylova¹, G. Gutierrez-Alonso^{1,2}, I. F. Gertner¹, T. S. Krasnova¹

¹ Tomsk State University,
36, pr. Lenina, Tomsk, 634050, Russian Federation

² Salamanca University,
1, Patio de Escuelas, Salamanca, 37008, Spain

For citation: Krylova, V. A., Gutierrez-Alonso, G., Gertner, I. F., Krasnova, T. S. (2021). Petrofabric and geochemical features of ultramafic rocks on the example of restite metamorphites of the Kuznetsk Alatau (Western Siberia), olivine cumulates of the Yoko-Dovyren layered massif (Northern Cisbaikalia) and their analogues from ultrabasic xenoliths of the Canary Islands (Spain). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 66 (4), 706–722. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.404> (In Russian)

The article presents the results of petrostructural and mineralogical studies of olivine grains from ultrabasic and basic rocks of different genesis. In particular, they correspond to cumulative dunites of the Yoko-Dovyren layered massif (Northern Cisbaikalia), restite hyperba-

* The research was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (project No. 0721-2020-0041).

sites of the Velvet massif (Kuznetskiy Alatau), and xenoliths of peridotites from basalts of the Canary Islands (Spain). The relationship between the petrostructural and mineralogical features of ultrabasic rocks is shown, which makes it possible to identify their cumulative and restite varieties. An important element of the petrostructure of ultrabasites is the orientation of olivine, which reflects either the conditions for the formation of primary crystals in the magmatic melt, or the conditions for its recrystallization as a result of plastic deformations during exhumation to the Earth's surface. The mineral composition of rocks is an additional feature that reflects the real conditions of formation. In the presence of basic plagioclase, it is already quite difficult to speak about the restitic nature of these ultrabasic rocks. On the other hand, plastic deformations of olivine are characteristic of restitic hyperbasites, in which plagioclase is absent. The results of mineralogical studies in ultrabasic xenoliths of the Canary Islands showed the presence of basic plagioclase (labradorite), as well as chrysolite-type olivine (12–16 Fa), which corresponds to the attributes of ultrabasic layered intrusions such as the Yoko-Dovyren dunite-troctolite-gabbro pluton. For restitic hyperbasites (by the example of the Kuznetsk Alatau), the iron content of olivine does not exceed 9–10% of the fayalite end, while plagioclase and clinopyroxene are absent. A characteristic feature of the xenoliths of the Canary Islands is the presence of endiopside, which is present in layered intrusions, but is absent in the restrained fragments of the upper and lower mantle. It is assumed that the xenoliths in the basalts of the Canary Islands are not of a mantle nature, but are fragments of a deep magma chamber. The studies of the optical orientation of olivine in xenoliths of the rocks of Lanzarote Island confirm these conclusions. The geochemical parameters of ultramafic xenoliths on Tenerife Island may well correspond to deeper formations.

Keywords: petrofabric features, chemistry, xenolith, basalts, peridotite, olivine, rock-forming minerals, X-ray microanalysis, EBSD analysis, geochemical parameters.

References

- Amelin, Yu. V., Neymark, L. A., Ritsk, E. Yu. and Nemchin, A. A. (1996). Enriched Nd-Sr-Pb isotopic signatures in Dovyren layered intrusion (Eastern Siberia, Russia): Evidence for source contamination by ancient upper-crustal material. *Chemical geology*, 129, 39–69.
- Ariskin, A., Danyushevsky, L., Nikolaev, G., Kislov, E., Fiorentini, M., McNeill, A., Kostitsyn, Yu., Goe-mann, K., Feig, S. T. and Malyshev, A. (2018). The Dovyren Intrusive Complex (Southern Siberia, Russia): Insights into dynamics of an open magma chamber with implications for parental magma origin, composition, and Cu-Ni-PGE fertility. *Lithos*, 302–308, 242–262. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.01.001>
- Ariskin, A. A., Konnikov, E. G. and Kislov, E. V. (2003). Modeling of equilibrium crystallization of ultramafic rocks as applied to the problems of phase stratification formation in the Dovyren pluton (Northern Cisbaikalia, Russia). *Geokhimiia*, 2, 131–155. (In Russian)
- Ave Lallemand, H. G. (1975). Mechanisms of preferred orientations of olivine in tectonite peridotite. *Geology*, 3 (11), 653–656.
- Ernst, R. E., Hamilton, M. A. and Soderlund, U. (2012). A proposed 725 Ma Dovyren–Kingash lip of southern Siberia, and possible reconstruction link with the 725–715 Ma Franklin lip of northern Laurentia. *Abstracts, Geological Association of Canada (GAC) — Mineralogical Association of Canada (MAC) Joint Annual Meeting, Geoscience at the Edge, St. John's, Newfoundland and Labrador*, 35, 42.
- Gertner, I. F. (1994). *Petrology of the Yoko-Dovyren stratified ultramafic-mafic pluton (Northern Baikal region)*. PhD thesis. Tomsk. (In Russian)
- Gertner, I. F., Goncharenko, A. I., Fedorova, N. A. and Chernyshov, A. I. (1996). Dynamometamorphism and petrostructural features of ultramafic rocks of the Severnaya Zelenaya Mountain massif (Kuznetsk Alatau). In: *Dynamometamorphism and petrostructural evolution of rocks of the mafic-ultramafic association*. *Proceedings*. Tomsk, 101–107. (In Russian)
- Goncharenko, A. I. (1986). *Petrology and petrostructural evolution of alpine-type hyperbasites*. Dr. Sci. thesis. Tomsk. (In Russian)

- Goncharenko, A. I. (1989). *Deformation and petrostructural evolution of alpine-type hyperbasites*. Tomsk: Tomsk State University Press. (In Russian)
- Gurenko, A. A., Sobolev, A. V., Hoernle, K. A., Hauff, F. and Schmincke, H. U. (2009). Enriched, HIMU-type peridotite and depleted recycled pyroxenite in the Canary plume: a mixed-up mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 277 (3–4), 514–524.
- Gurulev, S. A. (1965). *Geology and conditions of formation of the Ioko-Dovyren gabbro-peridotite massif*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- Gurulev, S. A. and Truneva, M. F. (1981). Genetic types of copper-nickel deposits in the Northern Baikal region and physicochemical conditions of their formation. In: *Problems of petrology in connection with sulfide copper-nickel ore formation*. Moscow: Nauka Publ., 97–109. (In Russian)
- Ionov, D. A., Kireev, B. S. and Yaroshevsky, A. A. (1984). Variations in the composition of plagioclase and the genesis of anorthosite segregations in the Yoko-Dovyren layered massif. *Geokhimiia*, 4, 434–503. (In Russian)
- Kislov, E. V. (1998). *Yoko-Dovyrenskiy layered massif*. Ulan-Ude: Buryat Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. (In Russian)
- Konnikov, E. G. (1986). *Differentiated hyperbasite-basic complexes of the Precambrian Transbaikalia (petrology and ore formation)*. Novosibirsk: Nauka Publ. (In Russian)
- Krasnova, T. S. (2005). *Petrology of ultramafic massifs of the Severnaya, Zelenaya and Velvetnaya mountains*. PhD thesis. Tomsk. (In Russian)
- Krasnova, T. S. and Gertner, I. F. (1999). Plastic fracture structure in olivine as an indicator of interlayer fracture in ultramafic rocks Severnaya-Zelenoi (Kuznetsk Alatau). *Structural analysis of crystalline complexes. Proceedings of the International Seminar and the Republican School of Young Scientists*. Tomsk: Scientific and Technical Information Center Publ., 29–32. (In Russian)
- Krylova, V. A. and Gertner, I. F. (2017). Sedimentary deposits and petrography of the basalts of the island of Tenerife of the Canary archipelago (Spain). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 110, 1–7. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/110/1/012012>
- Krylova, V. A. and Gertner, I. F. (2020). Features of the composition of the main rock-forming minerals of basalts and xenoliths of the Canary archipelago (Spain). *Bulletin of Geosciences*, 4 (304), 3–8.
- Lukashova, M. V. (2016). *A universal sample preparation method for microtextural and phase analysis by the EBSD method. Factory laboratory*. Moscow: Test-ZL Publ. (In Russian)
- Nicolas, A. and Poirier, J. P. (1976). Crystalline Plasticity and Solid-State Flow in Metamorphic Rocks. *Mineralogical Magazine*, 41 (319), 422.
- Ernst, R. E. (2014). *Large Igneous Provinces*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ryabov, V. V. (1992). *Olivines of Siberian traps as indicators of petrogenesis and ore formation*. Novosibirsk: Nauka Publ. (In Russian)
- Simkin, T. and Smith, G. (1970). Minor element distribution of olivine. *J. Geol.*, 78 (3), 304–325.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A. D. Saunders, M. J. Norry, ed., *Magmatism in the ocean basins*. Geol. Soc. Spec. Publ., 42, 313–345.
- Yaroshevsky, A. A., Ionov, D. A., Mironov, Yu. V., Koptev-Dvornikov, E. V., Abramov, A. V. and Krivopliasov, G. S. (1982). Petrography and geochemistry of the Yoko-Dovyren dunite-troctolite-gabbro-norite layered massif (Northern Cisbaikalia). In: *Petrology and ore content of natural associations of rocks*. Moscow: Nauka Publ., 86–117. (In Russian)

Received: March 24, 2021
Accepted: October 19, 2021

Contact information:

Vera A. Krylova — krylova.vera1994@yandex.ru
Gabriel Gutierrez-Alonso — gabi@usal.es
Igor F. Gertner — labspm@ggf.tsu.ru
Tatiyana S. Krasnova — science@mail.tsu.ru