



УДК 548.4: 549.5

DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-1-2

УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОЛИВИНА В ДУНИТАХ ГУЛИНСКОГО МАССИВА (СИБИРСКАЯ ПЛАТФОРМА)

В.А. Симонов, А.В. Котляров, В.В. Шарыгин, Ю.Р. Васильев

*Институт геологии и минералогии СО РАН, пр. Академика Коптюга 3, г. Новосибирск,
630090 Россия; kotlyarov@igm.nsc.ru*

Статья поступила в редакцию 04.12.2023 г., после доработки 30.01.2024 г., принята к печати 01.02.2024 г.

Аннотация. Условия кристаллизации оливина в дунитах Гулинского массива (Сибирская платформа) установлены с помощью петролого-геохимических, минералогических и термобарогеохимических методов. Образование оливина и хромшпинелидов из пикрит-меймечитовых ультраосновных магм сменялось фракционированием клинопироксенов из базальтовых систем с формированием остаточных высокощелочных расплавов. Расчеты на основе данных по составам включений и минералов с помощью программ PETROLOG и COMAGMAT, а также с использованием оливин-шпинелевого геотермометра показали, что магматическая система, сформировавшая дуниты Гулинского массива, развивалась по мере кристаллизации оливина в широком диапазоне температур (1520–1250 °C) в магматической камере на глубине около 17 км.

Ключевые слова: оливин, условия кристаллизации, расплавные включения, дуниты Гулинского массива, Сибирская платформа.

Финансирование. Работа выполнена по государственным заданиям Института геологии и минералогии СО РАН (№ 122041400057-2 и № 122041400312-2).

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

Вклад авторов. В.А. Симонов, Ю.Р. Васильев – разработка концепции, исследование; В.В. Шарыгин – аналитические/экспериментальные работы; В.А. Симонов, А.В. Котляров, В.В. Шарыгин – написание черновика рукописи; В.А. Симонов, А.В. Котляров – визуализация, редактирование финального варианта рукописи. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Симонов В.А., Котляров А.В., Шарыгин В.В., Васильев Ю.Р. Условия кристаллизации оливина в дунитах Гулинского массива (Сибирская платформа). Минералогия, 10(1), 16–31. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-1-2.

CRYSTALLIZATION CONDITIONS OF OLIVINE IN DUNITES THE GULI MASSIF, SIBERIAN PLATFORM

V.A. Simonov, A.V. Kotlyarov, V.V. Sharygin, Yu.R. Vasiliev

Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, pr. Akademika Koptugyuga 3, Novosibirsk, 630090 Russia; kotlyarov@igm.nsc.ru

Received 04.12.2023, revised 30.01.2024, accepted 01.02.2024

Abstract. Crystallization conditions of olivine in dunites of the Guli massif (Siberian Platform) are established using petrological, geochemical, mineralogical and thermobarogeochemical methods. The formation of olivine and chromite from picrite-meimechite ultramafic magmas was followed by the fractionation of clinopyroxenes from basaltic systems with the formation of residual high-alkaline melts. The calculations in PETROLOG and COMAGMAT programs based on the compositions of inclusions and minerals, as well as using olivine-spinel geothermometer, showed that a magmatic system, which was responsible for the formation of dunites of the Guli massif, evolved during the crystallization of olivine in a wide temperature range of 1520–1250 °C in a magma chamber at a depth of about 17 km.

Keywords: olivine, crystallization conditions, melt inclusions, dunite, Guli massif, Siberian Platform.

Funding. This work was supported by state contracts of the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, projects nos. 122041400057-2 and 122041400312-2.

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

Author contribution. V.A. Simonov, Yu.R. Vasiliev – conceptualization, investigation; V.V. Sharygin – analytical/experimental works; V.A. Simonov, A.V. Kotlyarov, V.V. Sharygin – writing – original draft; V.A. Simonov, A.V. Kotlyarov – visualization, writing – review & editing. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

For citation: Simonov V.A., Kotlyarov A.V., Sharygin V.V., Vasiliev Yu.R. Crystallization conditions of olivine in dunites the Guli massif, Siberian platform. *Mineralogy*, 10 (1), 16–31. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-1-2.

ВВЕДЕНИЕ

Гулинский массив (Маймеча-Котуйская провинция на севере Сибирской платформы) привлекает к себе внимание исследователей своими масштабами, ассоциацией с меймечитами (являющимися продуктами кристаллизации глубинных мантийных ультраосновных магм), а также повышенными содержаниями платиноидов. В то же время, несмотря на значительный объем информации о массиве, отсутствует единая точка зрения на его генезис. При этом важное значение имеют вопросы происхождения дунитов, слагающих основной объем Гулинского массива. Существуют две основные модели их формирования. Одни исследователи считают, что дуниты образовались в результате магматических процессов (Васильев, Золотухин, 1975; Соболев и др., 2009; Симонов и др., 2015, 2016, 2017, 2022; Исакова и др., 2022; Sharygin et al., 2019), другие связывают их формирование с процессами твердопластического перемещения мантийного вещества и образованием дунитового рестита (Малич, 1991; Малич и др., 1992; Гончаренко и др., 1996; Малич, Лопатин, 1997; Баданина и др., 2013; Thalhammer et al., 2006; Pink, 2008).

В последнее время исследования расплавных включений в аксессуарных хромшпинелидах позволили получить дополнительные свидетельства о магматогенном происхождении дунитов Гулинского массива (Симонов и др., 2016, 2017; Sharygin et al., 2019). При этом, учитывая то, что основной объем дунитов сложен оливином, оставались вопросы об участии магматических систем при его кристаллизации. В результате исследования ультрабазитов, в хромшпинелидах которых ранее были изучены расплавные включения (Симонов и др., 2016, 2017), в оливине из дунитов Гулинского массива обнаружены и изучены расплавные включения (Sharygin et al., 2019; Исакова и др., 2022; Симонов и др., 2022).

В настоящей статье на основе результатов изучения расплавных включений в оливине с использованием компьютерных программ, а также с учетом информации о химическом составе дунитов и слагающих их минералов представлены новые данные об условиях формирования дунитов Гулинского массива и *PT*-параметрах кристаллизации оливина. Основной задачей наших работ стал поиск перспективных расплавных включений в минералах дунитов и их исследование термобарогеохимическими методами.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования образцов ультраосновных пород Гулинского массива проводились в Институте геологии и минералогии СО РАН и в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Исследованы дуниты, собранные Ю.Р. Васильевым на юго-западном и северо-восточном участках массива из внутренних частей дунитовых тел вне зон контакта с другими породами, включая меймечиты (рис. 1). Детально изучено 11 образцов, в трех из которых ранее были найдены расплавные включения в аксессуарных хромшпинелидах (Симонов и др., 2016). Расплавные включения присутствуют в дунитах независимо от местоположения этих пород в массиве. Они были изучены в хромшпинелидах из дунитов на юго-западе (где широко представлены меймечиты), а также северо-востоке (где меймечиты практически отсутствуют). В оливине расплавные включения наиболее детально изучены в образце № 426а.

Состав фаз во включениях в оливине определен на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding), оснащенный системой микроанализа INCA Energy 450+ XMax 80 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd) при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе электронного пучка 1.5 нА и живом времени набора спектров 20 с. При

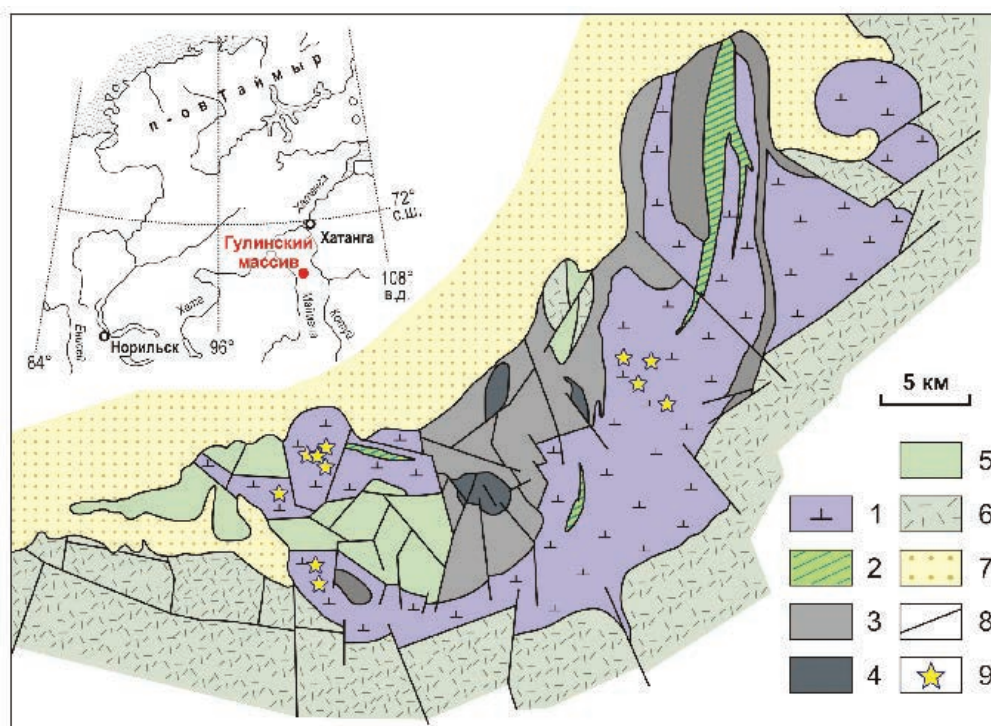


Рис. 1. Схема геологического строения Гулинского массива по (Егоров, 1991; Симонов и др., 2016).

1 – дуниты; 2 – клинопироксениты; 3 – щелочные породы; 4 – карбонатиты; 5 – меймечиты; 6 – пермо-триасовые вулканические породы; 7 – мезо-кайнозойские и четвертичные отложения Енисей-Хатангской впадины; 8 – тектонические нарушения; 9 – места отбора образцов исследованных дунитов.

Fig. 1. Scheme of geological structure of the Guli massif after (Egorov, 1991; Simonov et al., 2016).

1 – dunite; 2 – clinopyroxenite; 3 – alkaline rocks; 4 – carbonatite; 5 – meimechite; 6 – Permian-Triassic volcanic rocks; 7 – Meso-Cenozoic and Quaternary deposits of the Yenisei-Khatanga depression; 8 – faults; 9 – sampling places of studied dunites.

данных условиях анализа погрешность определения основных компонентов ($C \geq 10\text{--}15$ мас. %) не превышает 1 отн. %. Погрешность определения компонентов с концентрациями 1–10 мас. % лежит в диапазоне 2–6 отн. % и обычно не превышает 10 отн. %.

При определении состава расплавных включений в оливине учитывались особенности их внутреннего строения. В случае многофазных включений анализ отдельных кристаллов и стекол позволил рассчитать валовый состав по соотношениям площадей, занимаемых этими фазами. Для этого в программе ArcGis 10.3, которая обычно применяется как ГИС-система, работающая с географическими координатами, были рассчитаны суммарные площади, занимаемые микрозернами каждой из отмеченных фаз и вычислены соотношения этих площадей. Валовый состав включения определялся исходя из химического состава фаз и соотношения занимаемых ими площадей. В случае микрозернистой закалочной структуры проводился анализ по площади включения. Состав стекловатых включений установлен путем прямых анализов гомогенных стекол.

Состав оливина и хромшпинелидов проанализирован с помощью микрорентгеноспектрального анализатора JEOL JXA-8100 SuperProbe. Пределы обнаружения элементов данным методом находятся в диапазоне от 78 г/т (TiO_2) до 358 (SiO_2) г/т. Предел обнаружения Al_2O_3 , компонента важного для расчетов PT -параметров оливина, составляет 138 г/т (0.014 мас. %).

Физико-химические условия формирования минералов из дунитов Гулинского массива определены с помощью расчетного моделирования данных по расплавным включениям в оливине (в сравнительном анализе с включениями в хромшпинелидах) в программах PETROLOG (Danyushevsky, Plechov, 2011) и COMAGMAT (Ariskin, Barmina, 2004). Температуры образования минералов из дунитов оценены с помощью минералогического оливин-шпинелевого (Ol-Sp) геотермометра (Coogan et al., 2014), а также в программах PETROLOG и COMAGMAT.

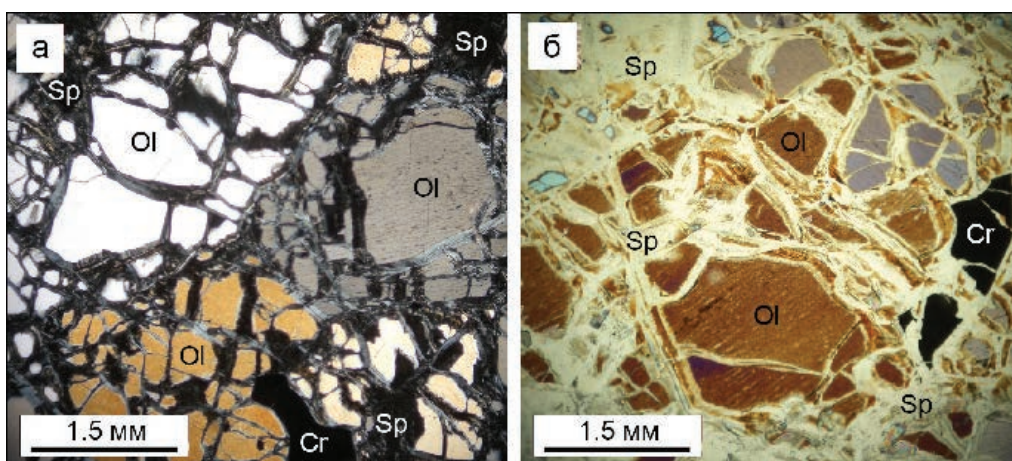


Рис. 2. Дуниты Гулинского массива.

Ol – оливин, Cr – хромшпинелид, Sp – серпентин. Проходящий свет с анализатором (а) и поляризатором (б).

Fig. 2. Dunites of the Guli massif.

Ol – olivine, Cr – chromite, Sp – serpentine. Transmitted light with analyzer (a) and polarizer (b).

ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДУНИТОВ ГУЛИНСКОГО МАССИВА

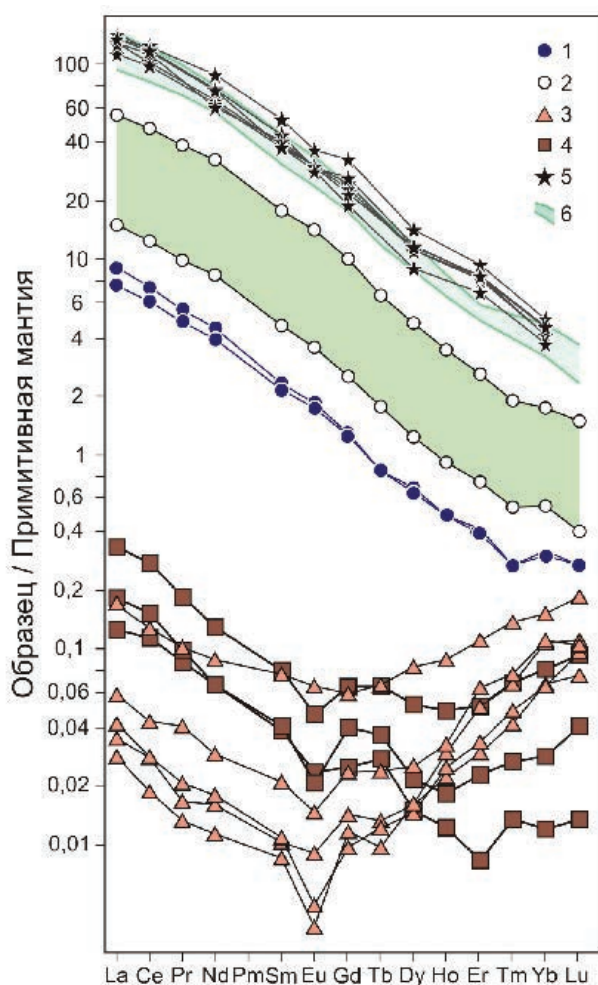
Гулинский массив сложен разнообразными породами от ультраосновного до щелочного состава с преобладанием дунитов (90–95 %), а также карбонатитами (рис. 1). Массив контактирует с пермо-триасовыми вулканическими комплексами Маймеча-Котуйской провинции, а также с меймечитами (Васильев, Золотухин, 1975; Егоров, 1991; Васильев, Гора, 2012; Васильев и др., 2017; Vasiliev, Zolotukhin, 1995). Массив можно разделить на две части (юго-западную и северо-восточную), которые отделены друг от друга комплексом щелочных пород и карбонатитов (рис. 1). Для юго-запада характерна тесная пространственная ассоциация дунитов с многочисленными телами меймечитов. В северо-восточной части массива кроме дунитов значительную роль играют клинопироксениты и практически отсутствуют меймечиты.

В большинстве случаев, дуниты представлены полнокристаллическими относительно равномернозернистыми породами, состоящими из оливина, серпентина и хромшпинелида (рис. 2а). Часто дуниты сильно изменены и содержат существенное количество развивающегося по оливину серпентина (рис. 2б). В дунитах присутствуют порфировидные структуры с относительно крупными кристаллами оливина и располагающимися между ними мелкими зёрнами клинопироксена и рудных минералов, что свидетельствует о кумулятивных процессах формирования дунитов (Симонов и др.,

2016). Порфировидная структура дунитов отмечалась ранее другими исследователями (Васильев, Золотухин, 1975; Соболев и др., 2009).

Большое значение для выяснения особенностей генезиса ультрабазитов имеют редкоземельные элементы (РЗЭ). В связи с этим, был проведен сравнительный анализ РЗЭ состава дунитов Гулинского массива с таковым для реститовых ультрабазитов Чаган-Узунского массива (офиолиты Горного Алтая) (Симонов и др., 2021) и ультраосновных пород из офиолитов Восточного Саяна (Андиферова, 2006). Спектры РЗЭ в дунитах Гулинского массива обладают отрицательным наклоном с накоплением легких лантаноидов и совпадают по форме с таковыми меймечитов, резко отличаясь от реститовых ультрабазитов из офиолитов Горного Алтая и Восточного Саяна, содержащих минимальные количества элементов и имеющих U-образную форму (рис. 3).

Анализ состава оливина (табл. 1) Гулинского массива показал резкое отличие содержания MnO и CaO от истощенных этими элементами минералов из ультраосновных реститов Чаган-Узунского массива. На диаграммах MnO–Fo и CaO–Fo (рис. 4) состав оливина из изученных дунитов практически совпадает с данными по минералам из меймечитов. В то же время, в отличие от меймечитов (с широким диапазоном Fo от 83 до 92), оливин из дунитов Гулинского массива (также как и данные по дунитам других исследователей) обладает более устойчивыми значениями форстеритового компонента и заметными вариациями содержания CaO с образованием на диаграмме отдельных локальных полей (рис. 4).



РАСПЛАВНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В ОЛИВИНЕ ИЗ ДУНИТОВ ГУЛИНСКОГО МАССИВА

Оливин из дунитов Гулинского массива содержит микровключения силикатов, сульфидов, хромитов или флюидных фаз размером 1–50 мкм. Детально исследованы включения размером 5–40 мкм, имеющие наибольшее сходство с типичными включениями расплавов. Часть изученных включений равномерно располагается в зерне оливина (рис. 5а, б), другие включения формируют полосы и прямолинейные зоны, обычно ориентированные параллельно граням минерала (рис. 5в). Местами включения трассируют залеченные трещины. Судя по этим признакам, включения частично являются первичными, а частично – мнимо-вторичными. Независимо от этих признаков, включения содержат микропорции расплавов, захваченные оливином во время формирования дунитов.

Форма включений в оливине – округлая (рис. 5г, д, е), часто с элементами негативной огранки. Обычно включения содержат силикатное стекло,

Рис. 3. Спектры РЗЭ в дунитах Гулинского массива, нормализованные к примитивной мантии (McDonough, 1992).

1 – дуниты; 2 – поле меймечитов; 3, 4 – реститовые ультрабазиты Чаган-Узунского массива (Горный Алтай, 3) и Восточного Саяна (4); 5, 6 – расплавные включения в хромшпинелиде (5) из дунитов в оливине из меймечитов (6) Гулинского массива. Значения элементов нормированы. Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием информации из работ (Анциферова, 2006; Соболев и др., 2009; Симонов и др., 2021).

Fig. 3. REE patterns of dunite of the Guli massif normalized to primitive mantle (McDonough, 1992).

1 – dunite; 2 – meimechite field; 3, 4 – restite ultramaficrocks of the Chagan-Uzun massif (Gorny Altai, 3) and East Sayan (4); 5, 6 – melt inclusions in chromite from dunites (5) and olivine from meimechites (6) of the Guli massif. The figure is based on original data and information from (Antsiferova, 2006; Sobolev et al., 2009; Simonov et al., 2021).

флюидные фазы, силикаты (клинопироксен, флогопит, нефелин, реже лейцит, калиевый полевой шпат, амфибол), микрокристаллы хромита, ильменита, титанита, фторapatита, Ti-магнетита и капли сульфидов (пирротин + пентландит + халькопирит).

Особый интерес представляют включения, заполненные преимущественно кристаллами клинопироксена с интерстициальным стеклом (рис. 5г), свидетельствующие о присутствии пироксенообразующих расплавов на определенной стадии эволюции магматической системы, ответственной за формирование Гулинского ультраосновного массива.

Составы наиболее часто встречающихся во включениях фаз приведены в таблице 2. Поскольку размеры большинства фаз не превышают первые микрометры (рис. 5г, д, е), матрица оказывает влияние и, соответственно, составы фаз могут не полностью отвечать реальному содержанию химических компонентов в минералах.

По особенностям соотношения отдельных фаз можно выделить несколько типов включений: 1) с мелкозернистыми закалочными структура-

Таблица 1

Представительные анализы оливина из дунитов Гулинского массива (мас. %)

Table 1

Representative analyses of olivine from dunites of the Guli massif (wt.%)

№ п/п	№ ан.	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Сумма	Fo
1	8-5 Ol	40.91	0.04	0.13	0.043	8.38	0.14	49.55	0.47	0.34	99.99	90.34
2	8-9 Ol	40.72	0.04	0.12	0.053	7.95	0.14	50.13	0.38	0.37	99.89	90.91
3	8-18 Ol	40.60	0.03	0.11	0.036	8.22	0.13	49.88	0.38	0.34	99.73	90.65
4	9-7 Ol	40.52	0.04	0.11	0.058	8.89	0.15	49.24	0.39	0.34	99.74	89.89
5	9-14 Ol	40.43	0.04	0.12	0.050	8.23	0.13	49.95	0.44	0.36	99.74	90.57
6	9-17 Ol	40.74	0.03	0.10	0.044	8.40	0.14	49.54	0.36	0.35	99.70	90.43
7	9-23 Ol	40.73	0.04	0.12	0.045	8.15	0.14	49.76	0.38	0.35	99.71	90.68
8	9-32 Ol	40.64	0.03	0.12	0.059	9.24	0.15	48.67	0.41	0.33	99.64	89.44
9	10-4 Ol	40.60	0.04	0.12	0.049	8.20	0.13	49.30	0.40	0.35	99.18	90.54
10	10-8 Ol	40.30	0.05	0.08	0.041	10.51	0.17	47.82	0.46	0.32	99.74	88.04
11	10-9 Ol	40.23	0.03	0.07	0.046	10.40	0.16	47.88	0.44	0.33	99.59	88.17
12	10-11 Ol	40.18	0.06	0.07	0.038	10.44	0.17	47.91	0.44	0.32	99.61	88.15
13	10-14 Ol	40.48	0.04	0.10	0.047	9.39	0.15	48.17	0.42	0.33	99.13	89.20
14	10-20 Ol	40.56	0.03	0.10	0.039	8.63	0.14	49.31	0.40	0.34	99.54	90.14
15	10-29 Ol	40.61	0.04	0.11	0.051	8.47	0.14	49.39	0.40	0.33	99.54	90.30
16	11-4 Ol	40.61	0.04	0.11	0.050	8.33	0.13	49.50	0.41	0.35	99.52	90.45
17	11-9 Ol	40.25	0.04	0.08	0.041	10.59	0.17	47.69	0.44	0.34	99.64	87.94
18	11-18 Ol	40.58	0.04	0.10	0.038	8.80	0.14	49.04	0.41	0.35	99.49	89.91
19	11-27 Ol	40.44	0.04	0.10	0.038	9.25	0.14	48.64	0.39	0.35	99.38	89.45
20	12-13 Ol	40.58	0.04	0.08	0.047	9.09	0.16	48.74	0.40	0.31	99.45	89.61
21	14-5 Ol	40.55	0.03	0.12	0.057	8.07	0.13	49.76	0.38	0.36	99.46	90.75
22	14-9 Ol	40.87	0.04	0.10	0.038	7.92	0.14	49.61	0.38	0.37	99.47	90.86
23	14-15 Ol	40.45	0.04	0.08	0.036	10.55	0.18	47.75	0.46	0.32	99.86	87.98
24	15-8 Ol	40.64	0.03	0.09	0.042	9.74	0.16	48.58	0.42	0.33	100.02	88.95
25	10-24 Ol	40.90	0.02	0.10	0.046	8.93	0.14	49.02	0.39	0.34	99.90	89.81

Примечание. Fo – содержание форстеритового компонента в оливине (мол. %).

Note. Fo – the amount of the forsterite end-member (mol. %).

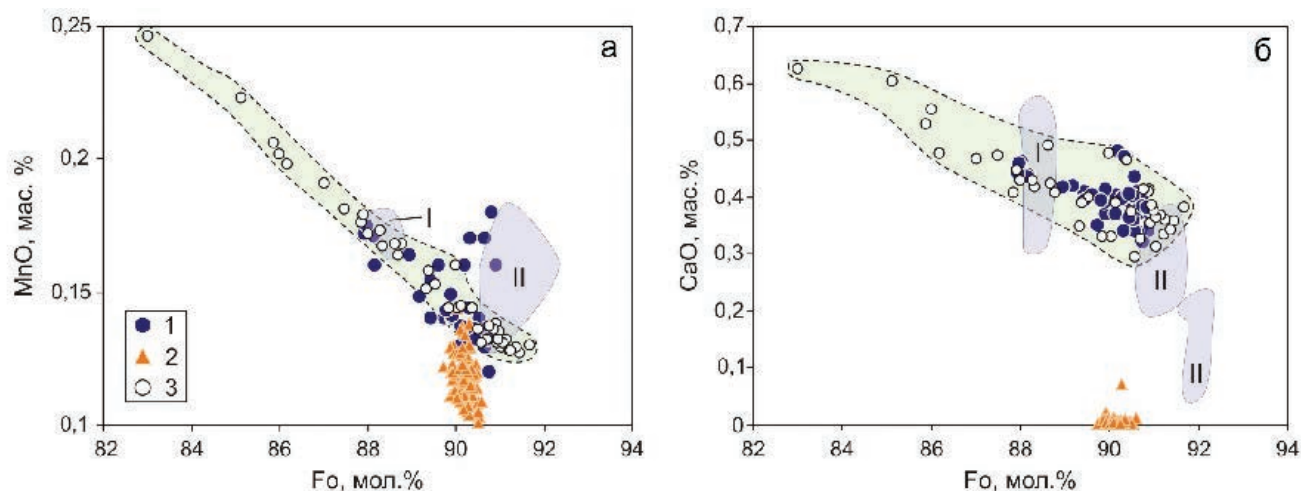


Рис. 4. Диаграммы MnO–Fo и CaO–Fo для оливина из дунитов Гулинского массива.

а – оливин из дунитов Гулинского (1), ультрабазитов Чаган-Узунского (2) массивов и меймечитов Гулинского массива (3). б – поля составов оливина из дунитов Гулинского массива по данным: I – (Соболев и др., 2009), II – (Pink, 2008). Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием информации из работ (Соболев и др., 2009; Симонов и др., 2021; Pink, 2008).

Fig. 4. MnO–Fo and CaO–Fo diagrams for olivine from dunites of the Guli massif.

а – olivine from dunites of the Guli (1) and ultramafic rocks of the Chagan-Uzun (2) massifs and meimechites of the Guli massif (3). б – compositional fields of olivine from dunites of the Guli massif after: I – (Sobolev et al., 2009), II – (Pink, 2008). The figure is based on original data and information from (Sobolev et al., 2009; Simonov et al., 2021; Pink, 2008).

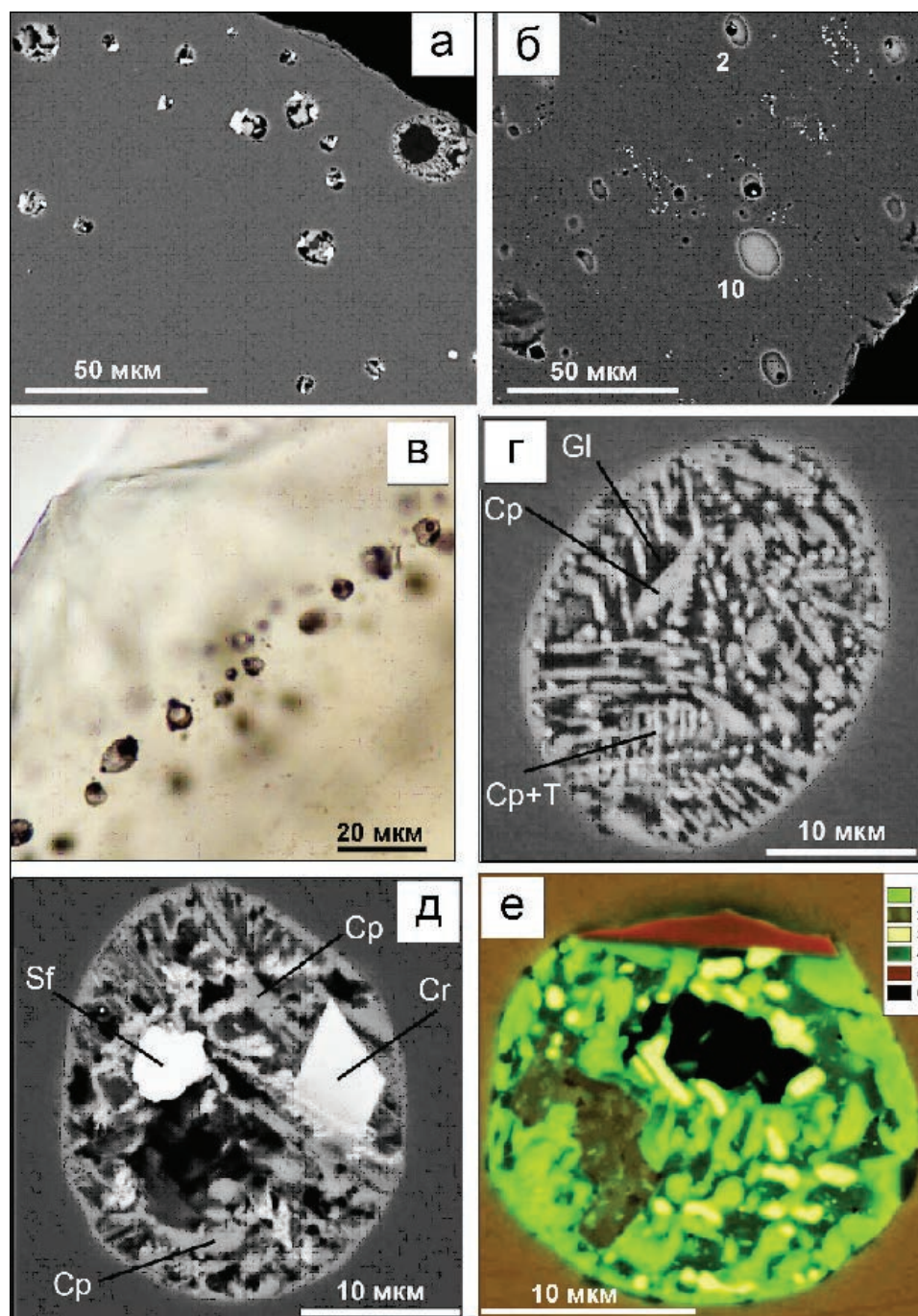


Рис. 5. Расплавные включения в оливине из дунитов Гулинского массива: а, б, в – распределение многофазных (а, в) и стекловатых (б) включений; г, д, е – внутреннее строение включений.

Ср – клинопироксен, Т – титанит, Гл – стекло, Сг – хромшпинелид, Sf – сульфид. 1–4 – распределение по площади включения использованных для расчета валового состава включения фаз: клинопироксен (1), флогопит (2), обогащенная титаном (16.25 мас. %) фаза (3), стекло (4); 5 – хромшпинелид; 6 – место флюидной фазы. Рис. а, б, г, д, е – изображения во обратно-рассеянных электронах; в – изображение в проходящем свете.

Fig. 5. Melt inclusions in olivine from dunites of the Guli massif: а, б, в – distribution of multiphase (а, в) and glassy (б) inclusions; г, д, е – internal structure of inclusions.

Cp – clinopyroxene, T – titanite, Gl – glass, Cr – chromite, Sf – sulfide. 1–4 – distribution of phases used for the calculation of bulk composition of the inclusion: clinopyroxene (1), phlogopite (2), Ti-rich (16.25 wt. %) phase (3), glass (4); 5 – chromite; 6 – place of the fluid phase. Figs. а, б, г, д, е – BSE images; в – transmitted light.

Таблица 2

Представительные анализы фаз в расплавных включениях в оливине из дунитов Гулинского массива (мас. %)

Table 2

Representative analyses of phases in olivine-hosted melt inclusions from dunites of the Guli massif (wt. %)

№ п/п	№ ан.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	F	Сумма
1	11_1_3	50.47	3.32	2.04	0.31	3.10	16.80	22.46	0.63	0.00	0.00	0.00	99.13
2	11_1_5	50.36	3.30	1.95	0.13	3.47	16.28	22.56	0.65	0.00	0.00	0.00	98.70
3	14_1_15	37.87	13.61	12.38	0.00	6.32	16.23	1.08	0.69	8.82	0.00	0.70	97.70
4	5_12_5	29.82	34.06	1.80	0.00	1.66	3.22	25.56	0.00	0.00	0.64	0.00	96.76
5	11_2_9-11	48.26	3.95	16.37	0.00	1.88	2.62	8.91	5.69	4.02	0.92	0.00	92.63
6	2_1	50.87	5.77	13.53	0.18	1.97	3.75	9.49	4.77	5.51	0.21	0.00	96.04
7	2_3_2	47.09	6.86	12.62	0.00	3.11	4.69	13.63	4.95	3.82	1.28	0.00	98.05
8	5_1_3	43.41	8.81	11.07	0.00	4.44	5.12	16.69	4.38	3.19	1.17	0.00	98.28
9	3-1_2-2	56.80	0.57	5.37	0.00	6.01	5.70	4.56	12.89	3.69	0.00	0.00	95.59
10	3-1_2-9	60.03	0.45	4.44	0.00	6.39	4.23	4.60	13.01	5.28	0.18	0.00	98.61
11	3-1_2-11	64.80	0.32	4.67	0.00	4.93	4.16	5.99	13.08	1.83	0.00	0.00	99.78
12	3-1_3-4	53.66	1.92	4.65	0.00	6.78	4.68	4.11	16.00	4.34	0.39	0.00	96.53
13	3-1_5-13	58.43	3.22	7.86	0.00	3.76	2.39	6.34	8.61	6.47	0.57	0.00	97.65
14	3-1_3	59.41	0.52	4.63	0.00	6.42	4.21	4.59	12.62	5.31	0.00	0.00	97.71

Примечание. 1, 2 – клинопироксен; 3 – флогопит; 4 – титанит; 5 – стекло; 6–8 – анализ по площади микрозернистых расплавных включений; 9–14 – стекловатые включения.

Note. 1, 2 – clinopyroxene; 3 – phlogopite; 4 – titanite; 5 – glass; 6–8 – analysis by the area of microgranular melt inclusions; 9–14 – glassy inclusions.

ми спинифекс (рис. 5г), практически аналогичными структурам, отмеченным ранее для включений в хромшпинелиде из дунитов Гулинского массива (Симонов и др., 2016, 2017); 2) с относительно равномерным заполнением мелкими кристаллическими фазами и стеклом (рис. 5д, е) и 3) стекловатые включения, состоящие полностью из стекла, либо содержащие флюидные пузырьки в стекле (рис. 5б). Округлые равновесные формы включений, а также присутствие закалочных структур спинифекс и полностью стекловатых включений свидетельствуют о захвате оливином гомогенного расплава.

Анализ состава различных фаз (табл. 2) позволил оценить состав расплавных включений в оливине (табл. 3). В зависимости от внутренней структуры включения валовый состав многофазных включений оценивался на основе состава отдельных фаз и соотношения этих фаз. В случае микрозернистой структуры включения проводился анализ по его площади. Составы полностью стекловатых включений установлены путем прямых анализов стекла. Достоверность данных о валовом составе многофазных включений должна быть подтверждена независимыми методами.

Одним из таких методов может служить коррекция состава расплавных включений в оливине в программе PETROLOG. В расчете задавались параметры, полученные при изучении дунитов Гулинского массива ранее (Васильев, Золотухин,

1975; Симонов и др., 2016, 2017), а также в ходе исследований расплавных включений. Содержание воды составляло 0.5 мас. % (согласно данным по включениям в хромшпинелиде). Состав оливина определялся путем анализа около каждого рассматриваемого включения и варьировал в диапазоне Fo = 87.22–90.77. Содержание FeO* во включениях (13.2 мас. %) отвечает среднему составу дунитов с изученными включениями. Использована плотностная модель из работы (Lange, Carmichael, 1987), буфер QFM. Учитывая расчетное моделирование условий формирования ультрабазитов Гулинского массива на основе данных по включениям в оливине с помощью программы COMAGMAT, коррекция проводилась по модели (Ariskin et al., 1993). Подобным способом пересчитаны все составы расплавных включений в оливине из дунитов Гулинского массива, полученные тремя отмеченными выше способами: по соотношению фаз, площадным сканированием и анализом гомогенных стекол. Установлено, что модель (Ariskin et al., 1993) хорошо работает (с попаданием полученных параметров в диапазоны реальных характеристик природных магм) для многофазных включений, а в случае стекловатых включений получаются аномальные результаты с температурами >2000 °C. В то же время, модель (Danyushevsky, 2001) для стекловатых включений показывает реалистичные температуры 1337–1435 °C. В целом, подавляющее большинство всех

Таблица 3

Состав расплавных включений в оливине из дунитов Гулинского массива (мас. %)

Table 3

Composition of melt inclusions in olivine from dunites of the Guli massif (wt. %)

№ п/п	№ ан.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Сумма
1	5_12	41.10	5.11	7.27	1.46	0.06	11.88	0.03	20.07	11.08	0.42	0.89	0.18	99.55
2	8_2	42.32	3.87	6.41	1.80	0.01	11.59	0.01	18.98	10.83	2.25	1.30	0.34	99.71
3	11_1	44.59	2.10	3.37	1.86	0.08	11.53	0.03	21.84	12.16	0.59	1.39	0.11	99.65
4	11_2	42.92	4.29	7.15	1.72	0.05	11.66	0.01	17.92	9.30	1.96	1.97	0.72	99.67
5	2_32	44.29	4.01	7.98	1.84	0.01	11.84	0.01	14.19	11.48	2.34	1.83	0.11	99.93
6	5_13	41.37	4.03	7.45	1.79	0.01	11.60	0.01	18.18	10.52	2.99	1.51	0.45	99.91
7	14_1	40.99	6.70	6.96	1.54	0.02	11.82	0.01	17.69	10.11	1.95	2.00	0.06	99.85
8	2_1	46.19	3.49	8.18	1.91	0.11	11.48	0.01	16.25	5.74	2.88	3.33	0.13	99.70
9	2_32_1	44.16	4.58	8.44	1.85	0.01	11.54	0.01	13.92	9.11	3.31	2.55	0.19	99.67
10	5_13_1	42.07	5.06	5.86	1.73	0.01	11.65	0.01	18.85	9.47	1.28	3.52	0.21	99.72
11	5_13_2	41.62	5.19	6.52	1.70	0.01	11.67	0.01	18.61	9.83	2.58	1.88	0.10	99.72
12	3_12_2	52.47	0.42	3.96	3.44	0.05	10.11	0.07	13.37	3.51	9.50	2.72	0.01	99.63
13	3_12_3	52.26	0.36	4.73	3.69	0.04	9.89	0.07	11.94	2.44	12.49	1.67	0.01	99.59
14	3_12_9	53.03	0.31	3.06	3.60	0.05	10.01	0.09	13.44	3.34	8.96	3.64	0.12	99.65
15	3_12_10	53.16	0.28	3.12	3.60	0.05	9.97	0.09	13.34	3.41	8.97	3.66	0.01	99.66
16	3_1_3	53.19	0.37	3.27	3.54	0.05	10.01	0.09	13.04	3.41	8.91	3.75	0.01	99.64
17	3_1_4	53.44	0.34	3.16	3.50	0.05	10.08	0.09	13.38	3.39	8.51	3.71	0.01	99.66
18	3_1_5	53.58	0.29	3.19	3.47	0.05	10.07	0.09	13.48	3.36	8.37	3.67	0.01	99.63
19	3_13_4	49.95	1.42	3.43	3.63	0.05	10.01	0.07	12.62	3.17	11.79	3.20	0.29	99.63
20	3-1 3_5	50.31	1.44	3.46	3.49	0.05	10.15	0.07	13.38	3.21	10.72	3.12	0.22	99.62
21		42.85	3.61	5.32	1.66	0.07	11.71	0.03	20.96	11.62	0.51	1.14	0.15	99.63

Примечание. 1–7 – валовый состав раскристаллизованных включений; 8–11 – анализ по площади микрозернистых расплавных включений; 12–20 – состав стекловатых включений; 21 – средний состав наиболее магнезиальных включений в оливине (анализы №№ 5_12 и 11_1), использованный при расчетах РТ-параметров расплавов по программе COMAGMAT (Ariskin, Barmina, 2004). Все составы расплавных включений в оливине пересчитаны в программе PETROLOG (Danyushevsky, Plechov, 2011).

Note. 1–7 – bulk composition of multiphase inclusions; 8–11 – analysis by the area of fine-grained melt inclusions; 12–20 – composition of glassy inclusions; 21 – average composition of Mg-richest inclusions in olivine (analyses 5_12 and 11_1) used in calculations of PT- parameters of melts in the COMAGMAT program (Ariskin, Barmina, 2004). All compositions of melt inclusions in olivine are recalculated in the PETROLOG program (Danyushevsky, Plechov, 2011).

пересчитанных составов показывает температуры в диапазоне 1335–1435 °С, но получены и достаточно низкие значения – 1120–1040 °С.

При корректировке составов включений в оливине в программе PETROLOG для некоторых многофазных и стекловатых включений с помощью обеих моделей (Ariskin et al., 1993; Danyushevsky, 2001) получены аномальные результаты и, соответственно, эти включения далее не рассматриваются. При построении диаграмм и расчетном моделировании условий формирования ультрабазитов Гулинского массива использовались только скорректированные данные по составу включений в оливине (табл. 3).

Соотношение содержаний суммы щелочей и кремнезема практически во всех включениях в оливине свидетельствует об участии щелочных магм в формировании дунитов Гулинского массива. Обращает на себя внимание близость скорректированных

составов многофазных включений в оливине из дунитов к пересчитанным составам расплавных включений в оливине из меймечитов. Полностью стекловатые включения в оливине максимально насыщены щелочами и образуют группу, оторванную от основного объема расплавов, ответственных за кристаллизацию оливинов и хромшпинелидов из дунитов (рис. 6а).

На диаграмме MgO–SiO₂ отчетливо видна эволюция расплавов от пикритов до андезибазальтов, характеризующаяся падением содержаний MgO и ростом содержаний SiO₂. Состав раскристаллизованных включений в оливине из дунитов соответствует пикритам и располагается в поле пересчитанных составов расплавных включений в оливине из меймечитов. Тренд расплавных включений в оливине находится в поле включений в хромшпинелидах из дунитов (рис. 6б).

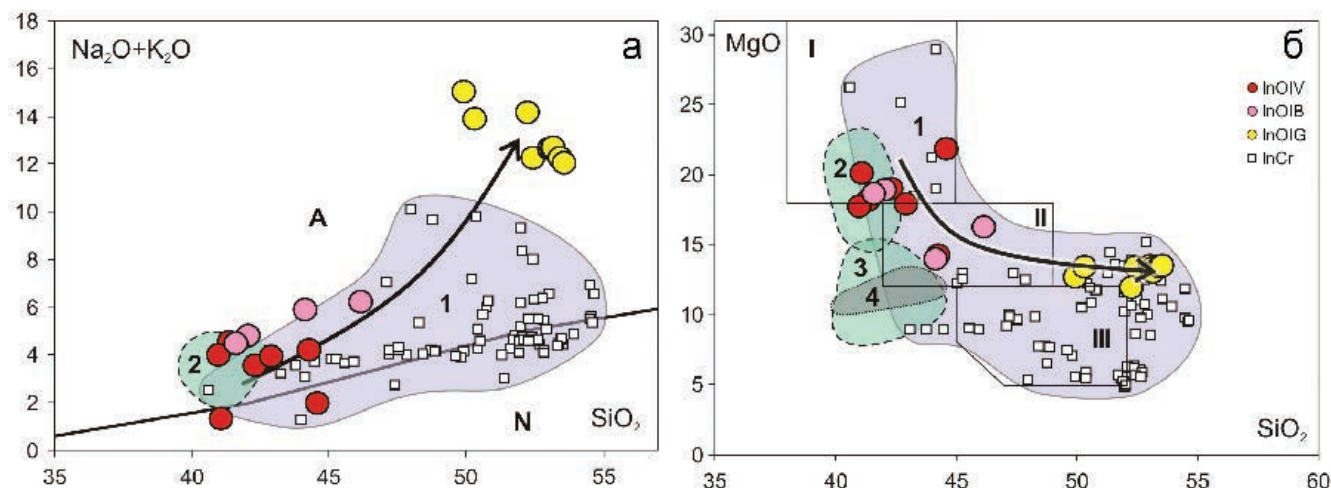


Рис. 6. Диаграммы $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{--SiO}_2$ (а) и MgO--SiO_2 (б) (мас. %) для расплавных включений в оливине из дунитов Гулинского массива.

Все составы расплавных включений в оливине пересчитаны по программе PETROLOG (Danyushevsky, Plechov, 2011) (табл. 3). Данные по включениям в оливине: InOIV – валовый состав; InOIB – анализ по площади; InOIG – состав гомогенных стекловатых включений; InCr – составы расплавных включений в аксессуарных хромшпинелидах из дунитов Гулинского массива. Поля составов на рис. а, б: 1 – расплавные включения в хромшпинелидах из дунитов Гулинского массива; 2 – захваченные расплавы в оливинах меймечитов – пересчитанные составы расплавных включений до равновесия с оливином-хозяином (Соболев и др., 2009); на рис. б: 3 – расплавные включения в оливине меймечитов (Соболев и др., 2009); 4 – расплавные включения в оливинах из дунитов Гулинского массива (Исакова и др., 2022). Рис. а, б – построено по данным (Петрографический..., 2009): рис. а – щелочные (А) и нормальные (N) серии пород; рис. б – поля составов пород: I – пикриты, II – пикробазальты, III – базальты. Рисунок построен на основе данных (Симонов и др., 2015, 2016, 2017).

Fig. 6. Diagrams $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{--SiO}_2$ (a) and MgO--SiO_2 (б) (wt. %) for melt inclusions in olivine from dunites of the Guli massif.

All compositions of melt inclusions in olivine were recalculated using the PETROLOG program (Danyushevsky, Plechov, 2011) (Table 3). Data on the inclusions in olivine: InOIV – bulk composition; InOIB – analysis by the area; InOIG – composition of homogeneous glassy inclusions; InCr – compositions of melt inclusions in accessory chromite from dunites of the Guli massif. Composition fields in Figs. а, б: 1 – melt inclusions in chromite from dunites of the Guli massif; 2 – melts trapped by meimechite olivines – recalculated compositions of melt inclusions before the equilibrium with host olivine (Sobolev et al., 2009); in fig. б: 3 – melt inclusions in meimechite olivines (Sobolev et al., 2009); 4 – melt inclusions in olivine from dunites of the Guli massif (Isakova et al., 2022). Figs. а, б – composed after (Petrographic..., 2009): fig. а – alkaline (A) and normal (N) series of rocks; fig. б – composition fields of rocks: I – picrite, II – picrobasalt, III – basalt. The figure is based on data from (Simonov et al., 2015, 2016, 2017).

Общие закономерности эволюции состава расплавов, принимавших участие в кристаллизации оливинов из дунитов Гулинского массива, иллюстрируются вариационными диаграммами (рис. 7). По соотношению всех рассмотренных компонентов (рис. 6б, 7) составы многофазных включений в оливине из дунитов образуют отчетливую группу, перекрывающуюся с данными по захваченным расплавам в оливине меймечитов и располагающуюся среди наиболее примитивных (с минимумом содержаний SiO_2 и щелочей и максимумом содержаний MgO) включений в хромшпинелидах из дунитов. С этой группой по большинству элементов согласуются данные по включениям в оливине из дунитов

Гулинского массива (рис. 7) других исследователей (Исакова и др., 2022).

Дальнейшие пути эволюции расплавов, фиксируемые включениями в оливине и хромшпинелидах из дунитов Гулинского массива по большинству компонентов близки, резко расходясь в случае CaO , содержание которого заметно падает в стеклах включений в оливине. Учитывая наличие включений, содержащих стекло и клинопироксен (рис. 5г), падение содержаний CaO в расплаве (стекле) имеет связь с фракционированием этого минерала.

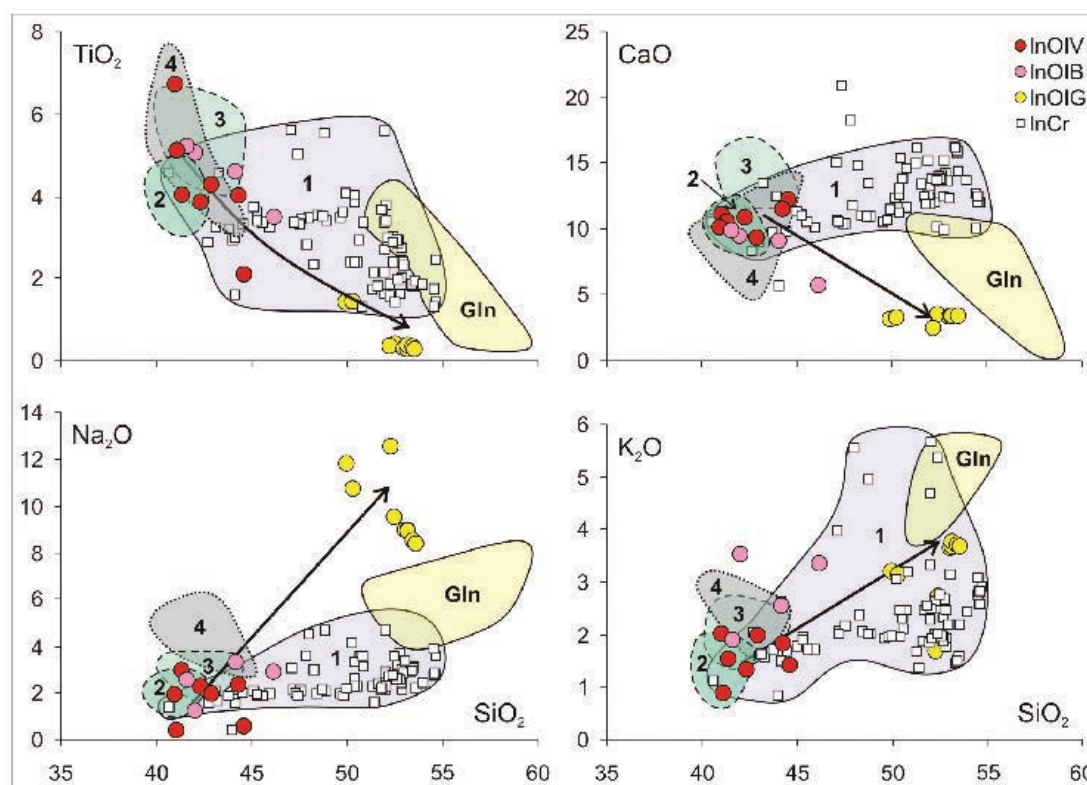


Рис. 7. Вариационные диаграммы (мас. %) для расплавных включений в оливине из дунитов Гулинского массива. Gln – состав стекол многофазных включений в оливине из дунитов Гулинского массива. Остальные условные обозначения см. на рис. 6.

Fig. 7. Variation diagrams (wt. %) for melt inclusions in olivine from dunites of the Guli massif.

Gln – glass composition of multiphase inclusions in olivine from dunites of the Guli massif. For other symbols, see Fig. 6.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для решения проблемы генезиса ультрабазитов Гулинского массива необходим комплексный подход с использованием петролого-геохимических, минералогических и термобарогеохимических методов, а также расчетного моделирования, который учитывает преобладание оливина в дунитах, поэтому особенности генезиса ультрабазитов определяются условиями кристаллизации этого минерала.

Петрографические данные, опубликованные ранее (Васильев, Золотухин, 1975; Соколов и др., 2009; Симонов и др., 2016), а также наши последние наблюдения, свидетельствуют о присутствии порфиризовидных структур в дунитах Гулинского массива, что является определенным доказательством кумулятивной кристаллизации оливина при формировании ультрабазитов. В то же время, ультраосновные породы массива содержат деформационные структуры (Гончаренко и др., 1996), свидетельствующие о твердопластических деформациях. Подобная ситуация была рассмотрена нами ранее.

В частности, на примере дунитов из офиолитов Кузнецкого Алатау показано, что нет оснований противопоставлять модели магматического и деформационного происхождения ультрабазитов, так как они отражают последовательную эволюцию процессов формирования ультраосновных пород. В ходе первого этапа минералы ультрабазитов кристаллизовались из пикритовых расплавов. В дальнейшем при снижении температуры происходила субсолидусная рекристаллизация уже сформировавшегося преимущественно твердого субстрата, который неизбежно подвергался внешнему воздействию, приводящему к пластическим деформациям и твердофазному течению ультрабазитов Кузнецкого Алатау (Симонов и др., 2020).

Геохимический анализ способен выявить особенности распределения редких элементов в ультрабазитах различного происхождения. В частности, ультраосновные рститы, являясь остатком после частичного плавления мантии и удаления подвижных расплавов, должны быть истощенными породами, что видно по минимальному содержанию

РЗЭ в реститовых ультрабазитах Горного Алтая и Восточного Саяна. Как дуниты, так и меймечиты Гулинского массива обогащены РЗЭ (рис. 3), что свидетельствует об их генетической связи, а также о магматогенном происхождении ультрабазитов. Оливин из дунитов Гулинского массива обогащен марганцем и кальцием по сравнению с оливином из реститовых ультрабазитов Чаган-Узунского массива в Горном Алтае (рис. 4). В оливине (Sharygin et al., 2019; Исакова и др., 2022; Симонов и др., 2022) и хромшпинелидах (Симонов и др., 2015, 2016, 2017) из дунитов Гулинского массива присутствуют расплавные включения, что является прямым доказательством их магматогенного происхождения.

Состав расплавных включений в оливине из дунитов свидетельствует о его кристаллизации из примитивных высокомагнезиальных пикритовых магм, практически совпадающих по составу с расплавами, захваченными оливинами из меймечитов. В ходе эволюции расплава в последовательности пикрит – пикробазальты происходила кристаллизация оливинов и хромшпинелидов. Хромшпинелиды формировались в базальтовой магме и появлялись обогащенные щелочами расплавы, участвовавшие в кристаллизации клинопироксенов. Процесс фракционирования клинопироксена с образованием остаточного расплава зафиксирован захваченными оливином многофазными включениями, содержащими кристаллы пироксена и остаточное стекло (рис. 5г).

По соотношению всех рассмотренных химических компонентов (рис. 6б, 7) составы многофазных включений в оливине из дунитов Гулинского массива образуют отчетливую группу, перекрывающуюся с составами захваченных расплавов в оливинах меймечитов. О сходстве расплавов, формировавших ультрабазиты массива, с меймечитовыми свидетельствует распределение РЗЭ во включениях в хромшпинелиде из дунитов, спектры которых перекрываются графиками включений в оливине из меймечитов (рис. 3). Таким образом, состав расплавных включений в оливине и хромшпинелиде свидетельствует об участии меймечитового расплава в формировании дунитов.

Расчетное моделирование физико-химических условий магматических систем, участвовавших в кристаллизации оливинов из дунитов, проведено на основе данных по составам расплавных включений и минералов. По мнению ряда исследователей, тесная связь массива с меймечитовым магматизмом, свидетельствует о том, что дуниты являются фактически кумулятами меймечитового расплава (Васильев, Золо-

тухин, 1975; Соболев и др., 2009; Симонов и др., 2016). Это подтверждается сходством состава расплавных включений в оливине и хромшпинелиде из дунитов Гулинского массива и включений в оливине из меймечитов (рис. 3, 6б, 7).

Для выяснения условий формирования ультрабазитов Гулинского массива интерес представляют данные о происхождении и развитии меймечитовых магм. Первичный расплав для меймечитов образовался в результате плавления перидотитовой мантии на глубинах >200 км при температурах ~1640 °С. Родоначальный расплав для меймечитов (с содержанием MgO 24 мас. %) начал кристаллизоваться при температуре ~1570 °С (Соболев и др., 2009). Этот расплав, являясь источником оливиновых кумулятов в меймечитах, может служить исходной магмой и для кумулятивных дунитов Гулинского массива. Расчеты в программе PETROLOG показали, что температуры ликвидусной кристаллизации оливина из этого расплава в присутствии воды в зависимости от давления могли быть ~1600 °С (20 кбар), ~1570 °С (14 кбар) и ~1550 °С (10 кбар). Расчеты в программе PETROLOG на основе состава родоначального расплава меймечитов с использованием термобарометров (Ariskin et al., 1993; Danyushevsky, 2001) показали, что температуры кристаллизации оливина составляют 1520–1460 °С при давлении 5 кбар. Учитывая установленные ранее ликвидусные температуры кристаллизации оливина из дунитов Гулинского массива (1520–1420 °С, Симонов и др., 2017), для расчетов в программе COMAGMAT взяты значения давления 5 кбар, отвечающие магматической камере на глубине около 17 км.

Основой расчетного моделирования в программе COMAGMAT послужили составы расплавных включений в оливине из дунитов Гулинского массива. В качестве параметров исходного расплава использованы средние данные по включениям в оливине с максимальными содержаниями MgO (20.07 и 21.84 мас. %; № 21 в табл. 3). Рассматривалась равновесная изобарическая кристаллизация при 5 кбар (см. выше), буфер QFM. Содержание воды задавалось согласно скорректированным составам расплавных включений в оливине в программе PETROLOG – 0.39 мас. %. Учитывая, что Гулинский массив формировался в тесной ассоциации с эффузивным меймечитовым магматизмом, интрузивная камера, где кристаллизовались дуниты, вряд ли могла быть идеально изолированной, и, соответственно, необходимо рассмотреть деком-

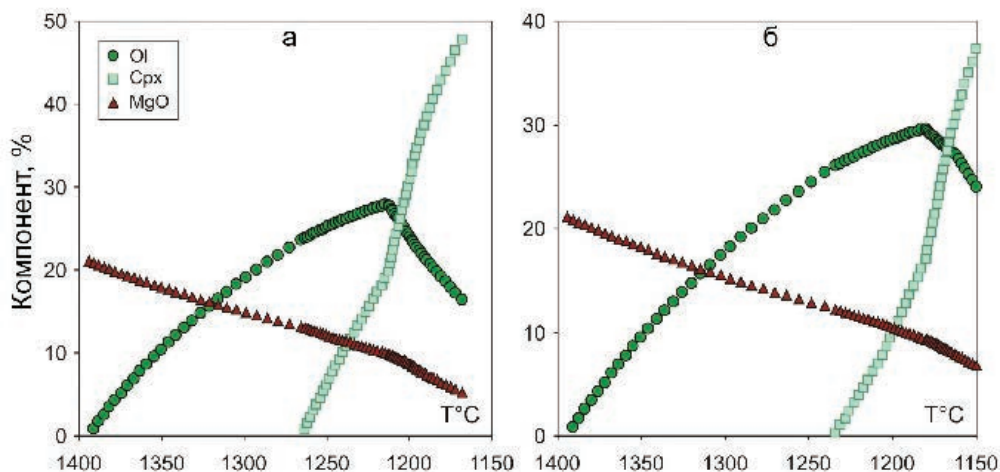


Рис. 8. Кристаллизация пикритового расплава, участвовавшего в образовании дунитов Гулинского массива: а – изобарическая; б – декомпрессионная.

По оси у показаны изменения содержания минералов (Ol – оливин, Cpx – клинопироксен, %) и MgO (мас. %) в расплаве при снижении температуры.

Fig. 8. Crystallization of picritic melt involved in the formation of dunites of the Guli massif: а – isobaric; б – decompression.

Axis y shows the changes in the content of minerals (Ol – olivine, Cpx – clinopyroxene, %) and MgO (wt. %) in melt upon decreasing temperature.

прессионную модель, при расчетах которой были использованы те же исходные параметры, что и для изобарической кристаллизации (см. выше), но при уменьшении давления от 5 до 1 кбар.

В результате расчетов установлено, что кристаллизация оливина в изобарических условиях (5 кбар) происходила в интервале температур 1390–1265 °С. Начиная с температуры 1265 °С, образуется клинопироксен, кристаллизующийся совместно с оливином до 1210 °С. При дальнейшем снижении температуры до 1170 °С кристаллизуется только клинопироксен (рис. 8а). Расчеты декомпрессионной кристаллизации в камере показали формирование оливина в интервале температур 1390–1235 °С. Начиная с температуры 1235 °С, образуется клинопироксен, кристаллизующийся совместно с оливином до 1180 °С. При дальнейшем снижении температуры образуется только клинопироксен (рис. 8б). Таким образом, температуры кристаллизации минералов дунитов Гулинского массива практически не зависят от режима давления (при 5–1 кбар), показывая широкий интервал кристаллизации оливина: 1390–1250 °С.

Температуры кристаллизации оливина из дунитов Гулинского массива, рассчитанные при помощи Ol-Sp геотермометра (Coogan et al., 2014), составили 1515–1375 °С. Содержания Al_2O_3 в оливине (0.036–0.059 мас. %) в 2–3 раза превышают предел обнаружения (0.014 мас. %) использованного метода, что позволяет обоснованно применять данный геотермометр.

Таким образом, разными методами установлено несколько интервалов температур кристаллизации дунитов Гулинского массива. Наиболее высокие значения определены с помощью Ol-Sp геотермометра (1515–1375 °С) и программы PETROLOG (1520–1460 °С). Эти данные хорошо согласуются с установленными ранее ликвидусными температурами кристаллизации оливина из дунитов Гулинского массива – 1520–1420 °С (Симонов и др., 2017). Более низкие температуры получены при коррекции состава включений в оливине в программах PETROLOG (1435–1335 °С) и COMAGMAT (1390–1250 °С). Обобщение полученных расчетных данных дает температурный интервал кристаллизации оливина дунитов от 1520 °С до 1390–1250 °С.

ВЫВОДЫ

В результате петролого-геохимических, минералогических и термобарогеохимических исследований подтверждено, что дуниты Гулинского массива имеют кумулятивное магматогенное происхождение. Анализ расплавных включений свидетельствует о кристаллизации оливинов, составляющих основной объем этих ультрабазитов, из высокомагнезиальных пикрит-меймечитовых магм. Согласно данным по расплавным включениям и расчетному моделированию формирование дунитов Гулинского массива происходило в результате кристаллизации оливина и хромшпинелидов из щелочных ультраосновных магм, сменяемой по-

следующим фракционированием клинопироксенов из базальтовых систем с образованием остаточных высокощелочных расплавов. Расчетное моделирование показало, что магматические системы, сформировавшие дуниты Гулинского массива, развивались в ходе кристаллизации оливина в широком диапазоне температур 1520–1250 °С в магматической камере на глубине около 17 км.

ЛИТЕРАТУРА

- Анциферова Т.Н. (2006) Петролого-минералогические особенности гипербазитов Оспинского массива (Восточный Саян). Дисс. на соиск. степ. канд. геол.-мин. наук. Улан-Удэ, ГИН СО РАН, 172 с.
- Баданина И.Ю., Малич К.Н., Мурзин В.В., Хиллер В.В., Главатских С.П. (2013) Минералого-геохимические особенности платиноидной минерализации Верх-Нейвинского дунит-гарцбургитового массива (Средний Урал, Россия). *Труды ИГГ УрО РАН*, 160, 188–192.
- Васильев Ю.Р., Гора М.П. (2012) Геология меймечитов севера Сибирской платформы и некоторые проблемы их генезиса. *Доклады Академии наук*, 445 (3), 299–302.
- Васильев Ю.Р., Гора М.П., Кузьмин Д.В. (2017) Меймечит-фюидитовый вулканизм Полярной Сибири. Новосибирск, СО РАН, 80 с.
- Васильев Ю.Р., Золотухин В.В. (1975) Петрология ультрабазитов севера Сибирской платформы и некоторые проблемы их генезиса. Новосибирск, Наука, 272 с.
- Гончаренко А.И., Чернышов А.И., Федорова Н.В., Киричек О.А., (1996) Оптическая ориентировка оливина в ультрамафитах Гулинского плутона. *Материалы научного семинара «Динамометаморфизм и петроструктурная эволюция пород мафит-ультрамафитовой ассоциации»*. Томск, ТГУ, 75–78.
- Егоров Л.С. (1991) Ийолит-карбонатитовый плутоизм. Л., Недра, 260 с.
- Исакова А.Т., Панина Л.И., Рокосова Е.Ю. (2022) Генезис дунитов Гулинского плутона: данные изучения гомогенизированных расплавных включений в оливине. *Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции по термобарогеохимии*. Новосибирск, НГУ, 37–38.
- Малич К.Н. (1991) О формационной принадлежности платиноносных ультрабазитов концентрических массивов Сибирской платформы. *Доклады РАН*, 318 (6), 1452–1457.
- Малич К.Н., Лопатин Г.Г. (1997) Геология и формационная принадлежность ультрамафитов Гулинского интрузива. *Недра Таймыра*, 2, 86–103.
- Малич К.Н., Авдонцев С.Н., Лазаренков В.Г. (1992) Об образовании платиноносных ультраосновных мантийных диапиров Сибирской платформы. *Тезисы докладов к 8 Съезду Всероссийского минералогического общества «Современные проблемы минералогии и смежных наук»*. СПб, 153–154.
- Петрографический кодекс России (2009) Издание третье / Гл. ред. О.А. Богатиков, О.В. Петров, А.Ф. Морозов. Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, 200 с.
- Симонов В.А., Васильев Ю.Р., Ступаков С.И., Котляров А.В., Карманов Н.С. (2015) Физико-химические параметры кристаллизации дунитов Гулинского ультраосновного массива (Маймеча-Котуйская провинция). *Доклады Академии наук*, 464 (3), 341–345. <https://doi.org/10.7868/S0869565215270201>
- Симонов В.А., Васильев Ю.Р., Ступаков С.И., Котляров А.В., Карманов Н.С. (2016) Петрогенезис дунитов Гулинского ультраосновного массива (север Сибирской платформы). *Геология и геофизика*, 57 (12), 2153–2177. <https://doi.org/10.15372/GiG20161204>
- Симонов В.А., Куликова А.В., Котляров А.В., Колотилина Т.Б. (2021) Палеогеодинамика магматических и метаморфических процессов формирования ультрамафитов Чаган-Узунского массива (офиолиты Горного Алтая). *Геодинамика и тектонофизика*, 12 (4), 826–850. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-4-0557>
- Симонов В.А., Приходько В.С., Васильев Ю.Р., Котляров А.В. (2017) Физико-химические условия кристаллизации пород ультраосновных массивов Сибирской платформы. *Тихоокеанская геология*, 36 (6), 56–79.
- Симонов В.А., Чернышов А.И., Котляров А.В. (2020) Физико-химические параметры формирования ультрамафитов из офиолитов Кузнецкого Алатау. *Геосферные исследования*, 3, 34–49. <https://doi.org/10.17223/25421379/16/3>
- Симонов В.А., Шарыгин В.В., Васильев Ю.Р., Котляров А.В. (2022) Физико-химические условия петрогенезиса ультрабазитов Гулинского массива (Полярная Сибирь) – результаты исследования расплавных включений в оливине. *Материалы научной конференции «Петрология и рудоносность магматических формаций»*. Новосибирск, НГУ, 173–175.
- Соболев А.В., Соболев С.В., Кузьмин Д.В., Малич К.Н., Петрунин А.Г. (2009) Механизм образования Сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимберлитами. *Геология и геофизика*, 50 (12), 1293–1334.
- Ariskin A.A., Barmina G.S. (2004) COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications. *Geochemistry International*, 42 (Suppl. 1), S1–S157.
- Ariskin A.A., Frenkel M.Y., Barmina G.S., Nielsen R. (1993) COMAGMAT: A FORTRAN program to model magma differentiation processes. *Computer Geosciences*, 19, 1155–1170. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(93\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0098-3004(93)90020-6)
- Coogan L.A., Saunders A.D., Wilson R.N. (2014) Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: Evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces. *Chemical Geology*, 368, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.01.004>
- Danyushevsky L.V. (2001) The effect of small amounts of H₂O on crystallisation of mid-ocean ridge and backarc basin magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal*

Resources, 110, 265–280. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00213-X](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00213-X)

Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu. (2011) Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12 (7), Q07021. <https://doi.org/10.1029/2011GC003516>

Lange R.A., Carmichael I.S.E. (1987) Densities of Na_2O - K_2O - CaO - MgO - FeO - Fe_2O_3 - Al_2O_3 - TiO_2 - SiO_2 liquids: New measurements and derived partial molar properties. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 2931–2946. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90368-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90368-1)

McDonough W.F. (1992) K, Rb and Cs in the earth and moon and the evolution of the earth's mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, 1001–1012. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90043-I](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90043-I)

Pink J.F. (2008) The genesis and development of the Guli dunite core complex of the Guli Massif, northern Siberia, Russia. A multi-disciplinary study. PhD Thesis. Austria, University of Leoben, 305 p.

Sharygin V.V., Simonov V.A., Vasiliev Yu.R., Kotlyarov A.V. (2019) Can dunites of the Guli massif be a cumulate of olivine-nephelinite magma? Melt inclusions study. *Proceedings of XXXVI International Conference "Magmatism of the Earth and Related Strategic Metal Deposits"*, Moscow, GEOKNI RAN, 36, 277–280.

Thalhammer O.A.R., MacKelson J.F., Loidl G.Ch. (2006) The Guli dunite complex, Taimyr Province, northern Siberia, Russia: a highly metasomatised asthenospheric mantle portion? *12 Quadrennial IAGOD Symposium "Understanding the Genesis of Ore Deposits to meet the Demands of 21st Century"*. Moscow, 386–389.

Vasiliev Yu.R., Zolotukhin V.V. (1995) The Maimecha-Kotui alkaline-ultramafic province of the northern Siberian Platform, Russia. *Episodes*, 18, 155–164. <https://doi.org/10.18814/epiugs/1995/v18i4/002>

REFERENCES

Antsiferova T.N. (2006) *Petrological-mineralogical features of ultramafic rocks of the Ospinsky massif (East Sayan)* (Candidate dissertation). Ulan-Ude, GIN SO RAN, 172 p. (in Russian).

Ariskin A.A., Barmina G.S. (2004) COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications. *Geochemistry International*, 42 (Supp. 1), S1–S157.

Ariskin A.A., Frenkel M.Y., Barmina G.S., Nielsen R. (1993) COMAGMAT: A FORTRAN program to model magma differentiation processes. *Computer Geosciences*, 19, 1155–1170. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(93\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0098-3004(93)90020-6)

Badanina I.Yu., Malitch K.N., Murzin V.V., Hiller V.V., Glavatskikh S.P. (2013) Mineralogical-geochemical features of PGE mineralization of the Verkh-Neivinsk dunite-harzburgite massif (Central Urals, Russia). *Trudy Instituta geologii i geokhimii UrO RAN (Proceedings of the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS)*, 160, 188–192. (in Russian)

Coogan L.A., Saunders A.D., Wilson R.N. (2014) Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: Evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces. *Chemical Geology*, 368, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.01.004>

Danyushevsky L.V. (2001) The effect of small amounts of H_2O on crystallisation of mid-ocean ridge and backarc basin magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Resources*, 110, 265–280. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00213-X](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00213-X)

Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu. (2011) Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12 (7), Q07021. <https://doi.org/10.1029/2011GC003516>

Egorov L.S. (1991) *Ijolite-carbonatite plutonism*. Leningrad, Nedra, 260 p. (in Russian)

Goncharenko A.I., Chernyshov A.I., Fedorova N.V., Kirichuk O.A. (1996). Optical orientation of olivine in ultramafic rocks of the Guli pluton. *Materialy nauchnogo seminara "Dinamometamorfizm i petrostrukturnaya evolyutsiya porod mafit-ul'tramafitovoy assotsiatsii" (Proceedings of Scientific Seminar "Dynamometamorphism and Petrostructural Evolution of Rocks of Mafic-Ultramafic Association")*. Tomsk, TGU, 75–78. (in Russian)

Isakova A.T., Panina L.I., Rokosova E.Yu. (2022). Genesis of dunites of the Guli pluton: data from the study of homogenized melt inclusions in olivine. *Tezisy dokladov XIX Vserossiyskoy konferentsii po termobarogeokhimii (XIX Russian Conference on Thermobarogeochemistry)*. Novosibirsk, NGU, 37–38. (in Russian)

Lange R.A., Carmichael I.S.E. (1987) Densities of Na_2O - K_2O - CaO - MgO - FeO - Fe_2O_3 - Al_2O_3 - TiO_2 - SiO_2 liquids: New measurements and derived partial molar properties. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 2931–2946. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90368-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90368-1)

Malich K.N. (1991) Formation affiliation of PGE-bearing ultramafic rocks of concentrically zoned massifs of the Siberian Platform. *Doklady Akademii nauk (Doklady Academy of Sciences)*, 318 (6), 1452–1457. (in Russian)

Malich K.N., Lopatin G.G. (1997). Geology and affinity of ultramafic rocks of the Guli intrusion. *Nedra Taimyra (Taimyr Interiors)*, 2, 86–103. (in Russian)

Malich K.N., Avdontsev S.N., Lazarenkov V.G. (1992) Formation of Pt-bearing ultrabasic mantle diapirs of the Siberian Platform. *Tezisy dokladov k 8 s'ezdy RMO "Sovremennyye problemy mineralogii i sopredel'nykh nauk" (Proceedings of the 8th Congress of the Russian Mineralogical Society "Modern Problems of Mineralogy and Related Sciences")*. St. Petersburg, 153–154. (in Russian)

McDonough W.F. (1992) K, Rb and Cs in the earth and moon and the evolution of the earth's mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, 1001–1012. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90043-I](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90043-I)

Pink J.F. (2008) *The genesis and development of the Guli dunite core complex of the Guli Massif, northern*

Siberia, Russia. A multi-disciplinary study (PhD Thesis). Austria, University of Leoben, 305 p.

Petrographic Code of Russia (2009) Eds. O.A. Bogatikov, O.V. Petrov, and A.F. Morozov. St. Petersburg, VSEGEI, 200 p. (in Russian)

Sharygin V.V., Simonov V.A., Vasiliev Yu.R., Kotlyarov A.V. (2019) Can dunites of the Guli massif be a cumulate of olivine-nephelinite magma? Melt inclusions study. *Proceedings of XXXVI International Conference "Magmatism of the Earth and Related Strategic Metal Deposits"*. Moscow, GEOKHI RAN, 36, 277–280.

Simonov V.A., Chernyshov A.I., Kotlyarov A.V. (2020). Physical and chemical parameters of formation of ultramafic rocks from Kuznetsky Alatau ophiolites. *Geosfernyye issledovaniya (Geosphere Research)*, 3, 34–49. (in Russian) <https://doi.org/10.17223/25421379/16/3>

Simonov V.A., Kulikova A.V., Kotlyarov A.V., Kolotilina T.B. (2021). Paleogeodynamics of magmatic and metamorphic processes of formation of ultramafic rocks of Chagan-Uzun massif (ophiolites of Gorny Altai). *Geodynamics & Tectonophysics*, 12 (4), 826–850. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-4-0557>

Simonov V.A., Prikhod'ko V.S., Vasiliev Yu.R., Kotlyarov A.V. (2017). Physicochemical Conditions of Crystallization of Rocks from Ultrabasic Massifs of the Siberian Platform. *Russian Journal of Pacific Geology*, 11 (6), 447–468. <https://doi.org/10.1134/S1819714017060057>

Simonov V.A., Sharygin V.V., Vasiliev Yu.R., Kotlyarov A.V. (2022) Physicochemical conditions of petrogenesis of ultramafic rocks of the Guli massif (Polar Siberia) – results of melt inclusion study in olivine. *Materialy konferentsii "Petrologiya i rudonosnost magmaticheskikh formatsiy" (Proceedings of Conference "Petrology and Ore Potential of Igneous Complexes")*. Novosibirsk, NGU, 173–175. (in Russian)

Simonov V.A., Vasiliev Yu.R., Stupakov S.I., Kotlyarov A.V., Karmanov N.S. (2015) Physicochemical parameters of crystallization of dunite from the Guli ultrabasic massif (Maimecha Kotui province). *Doklady Earth Sciences*, 464(1), 979–982. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15090214>

Simonov V.A., Vasil'ev Yu.R., Stupakov S.I., Kotlyarov A.V., Karmanov N.S. (2016) Petrogenesis of dunites of the Guli ultrabasic massif (northern Siberian Platform). *Russian Geology and Geophysics*, 57(12), 1696–1715. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.04.009>

Sobolev A.V., Sobolev S.V., Kuzmin D.V., Malitch K.N., Petrunin A.G. (2009) Siberian meimechites: origin and relation to flood basalts and kimberlites. *Russian Geology and Geophysics* 50, 999–1033. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.11.002>

Thalhammer O.A.R., MacKelson J.F., Loidl G.Ch. (2006) The Guli dunite complex, Taimyr Province, northern Siberia, Russia: a highly metasomatised asthenospheric mantle portion? *12 Quadrennial IAGOD Symposium "Understanding the Genesis of Ore Deposits to meet the Demands of 21st Century"*. Moscow, 386–389.

Vasil'ev Yu.R., Gora M.P. (2012). Geology of meimechites in the Northern Siberian Platform. *Doklady Earth Sciences*, 445(1), 802–805. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1207029X>

Vasil'ev Yu.R., Gora M.P., Kuz'min D.V. (2017) *Meymechitic and foiditic volcanism in the Polar Siberia*. Novosibirsk, SO RAN, 80 p. (in Russian)

Vasil'ev Yu.R., Zolotukhin V.V. (1975) *Petrology of ultramafic rocks of the Northern Siberian Platform and some problems of their genesis*. Novosibirsk, Nauka, 272 p. (in Russian)

Vasil'ev Yu.R., Zolotukhin V.V. (1995) The Maimecha-Kotui alkaline-ultramafic province of the northern Siberian Platform, Russia. *Episodes*, 18, 155–164. <https://doi.org/10.18814/epiugs/1995/v18i4/002>

Информация об авторах

Симонов Владимир Александрович – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, kotlyarov@igm.nsc.ru.

Котляров Алексей Васильевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, kotlyarov@igm.nsc.ru.

Шарыгин Виктор Викторович – доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, sharygin@igm.nsc.ru.

Васильев Юрий Романович – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, kotlyarov@igm.nsc.ru.

Information about the authors

Vladimir A. Simonov – Doctor of Geological–Mineralogical Sciences, Key Researcher, Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, kotlyarov@igm.nsc.ru.

Aleksey V. Kotlyarov – Candidate of Geological–Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, kotlyarov@igm.nsc.ru.

Viktor V. Sharygin – Doctor of Geological–Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, sharygin@igm.nsc.ru.

Yury R. Vasiliev – Doctor of Geological–Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, kotlyarov@igm.nsc.ru.