

УДК 552.321.6:552.11

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ФОРМИРОВАНИЯ ДУНИТОВ КИНГАШСКОГО УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА (СЕВЕРО-ЗАПАД ВОСТОЧНОГО САЯНА)

Юричев Алексей Николаевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент каф. петрографии
Геолого-географического факультета Национального исследовательского
Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 36. E-mail: juratur@sibmail.com

Чернышов Алексей Иванович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор, заведующий кафедрой петрографии
Геолого-географического факультета Национального исследовательского
Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 36. E-mail: aich@ggf.tsu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью детального петрологического исследования многочисленных потенциально рудоносных ультрамафитовых и мафит-ультрамафитовых массивов Канской глыбы Восточного Саяна с целью совершенствования региональных схем корреляции, а также выявления в них Pt-Cu-Ni оруденения. Один из таких массивов – Кингашский, включающий в себя одноименное крупное Pt-Cu-Ni месторождение, открытое еще в советское время, является объектом настоящего исследования. Однако, несмотря на повышенный интерес исследователей к данному массиву, остаются до конца нерешёнными вопросы глубины его формирования, комагматичности ультраосновных и основных пород, а также условий формирования и локализации в нем руд.

Цель работы: оценка температурного режима формирования кумулятивных дунитов Кингашского ультрамафитового массива путем применения известных в геологической литературе оливин-хромшпинелиевых геотермометров.

Методы исследования: петрографическая характеристика пород на поляризационном микроскопе AxioScope Carl Zeiss, химический состав оливинов и хромшпинелидов по результатам исследования на электронном сканирующем микроскопе Camscan с энергодисперсионной и волнодисперсионной приставками. Расчет температур равновесной кристаллизации с применением версий оливин-хромшпинелиевых геотермометров Джексона-Ирвайна-Родера, Оно, Фабри, О'Нейла-Уолла-Бэллхауза-Берри-Грина (O'NWBBG).

Результаты. С использованием оливин-хромшпинелиевых геотермометров смоделированы температурные режимы формирования кумулятивных дунитов Кингашского ультрамафитового массива. Расчетная равновесная кристаллизация кумулятивных дунитов массива соответствует температурам 1135...1300 °С. При этом полученный пониженный диапазон температур по геотермометрам Джексона-Ирвайна-Родера и Фабри, равный 600...700 °С, отражает температуры наложенного на данные породы среднетемпературного метаморфизма эпидот-амфиболитовой фации, который широко проявился в Канской глыбе Восточного Саяна.

Ключевые слова:

Кингашский массив, геотермометр, оливин, хромшпинелид, равновесная кристаллизация, температурный режим.

Введение

В последние несколько десятилетий стали появляться новые данные по Pt-Cu-Ni оруденению, связанному с различными типами ультрамафит-мафитовых формаций разновозрастных подвижных поясов Центральной и Юго-Восточной Азии, охватывающих обширную территорию Южной Сибири, Казахстана, Монголии и Северного Китая [1–7], что представляет широкий научный и практический интерес. На территории Канской глыбы Восточного Саяна при проведении в 60–80-х гг. XX в. геолого-съёмочных и прогнозно-металлогенических работ были выявлены многочисленные тела ультрамафитовых и мафит-ультрамафитовых интрузий, в которых неоднократно отмечалась рудная минерализация меди, никеля и благородных металлов [2, 8, 9]. Они картируются в виде многочисленных массивов, чаще небольших размеров, и привлекают внимание многих исследователей в

связи с их потенциальной рудоносностью [6, 8–12]. Однако формационная принадлежность и металлогеническая специализация данных объектов часто оказываются дискуссионными и требуют дальнейшего изучения.

Один из таких массивов – Кингашский, включающий в себя одноименное крупное Pt-Cu-Ni месторождение, является объектом настоящего исследования. Однако, несмотря на повышенный интерес исследователей к массиву, остаются до конца нерешёнными вопросы глубины его формирования, комагматичности ультраосновных и основных пород, а также условий формирования и локализации в нем руд.

Целью настоящего исследования явилась оценка температурного режима формирования кумулятивных дунитов массива, путем применения известных в геологической литературе оливин-хромшпинелиевых геотермометров.

Краткая геологическая характеристика исследуемого объекта

Кингашский ультрамафитовый массив (AR₂-PR₁) расположен в пределах зеленокаменного пояса Канской глыбы Восточного Саяна и включает в себя одноименное крупное Pt-Cu-Ni месторождение [13–15, 9]. В плане массив картируется в виде линзовидной интрузии (3×0,7 км), имеющей согласное залегание со структурой пород обрамления, и обнаруживает тектонические контакты с вмещающей толщей (рис. 1). Он сложен ультрамафитами и габброидами, со значительным преобладанием первых. Ультрамафиты представлены преимущественно кумулятивными дунитами, при этом верлиты и пикриты пользуются ограниченным распространением. Они не обнаруживают какого-либо закономерного расположения в массиве, а распределяются хаотично. Можно предположить, что образование ультрамафитового тела осуществлялось в магматической камере в условиях активной тектонической обстановки, когда режим сжатия периодически сменялся растяжением. В моменты растяжения, очевидно, происходило пульсационное внедрение в камеру по образовавшимся в ней ослабленным зонам неоднородных по составу ультраосновных расплавов, которые возникли в результате магматической дифференциации в глубинных промежуточных магматических очагах [15]. Габброиды, перекрывающие ультрамафиты, предположительно, представляют собой последующую, оторванную по времени, фазу внедрения, при этом наблюдаемые на контакте ультрамафитов и габброидов клинопироксениты, вероятно, являются реакционными образованиями [10].

Оценка температур оливин-хромшпинелиевых равновесий

Доказано, что хромшпинелиды – одна из первых минеральных фаз кристаллизации ультраосновных расплавов, из которых они выделяются до или совместно с магнезиальным оливином (намного реже – с другими силикатными минералами). При этом магматогенная природа первых в магматических ультрамафитовых телах подтверждается морфологией зерен, характером их распределения, взаимоотношением с другими минеральными фазами, наличием в них первичных расплавных включений. Поэтому для большинства ультрамафитов наиболее характерен оливин-хромшпинелиевый парагенезис, который, учитывая особенности составов хромшпинелидов, может использоваться в качестве индикатора условий образования ультраосновных пород.

Температуры кристаллизации хромшпинелидов в ультраосновных расплавах могут быть оценены при экспериментальных исследованиях или расчетным путем.

Так, например, экспериментально было установлено [16], что из расплава оливинового базальта с широкими вариациями содержаний хрома шпинель (шпинель-магнетитовый твердый раствор) в

качестве ликвидусной фазы появляется при $T=1275...1058^{\circ}\text{C}$. При этом в более окислительных условиях первой кристаллизуется шпинель, при восстановительном режиме одновременно с ней появляется оливин, клинопироксен и плагиоклаз. Совместная кристаллизация фаз хромшпинелид-оливинового парагенезиса может происходить в широком температурном интервале (от ликвидуса системы до 40...50 % раскristаллизации).

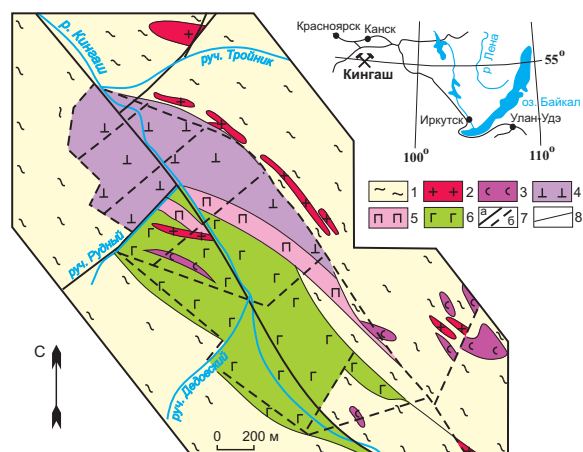


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Кингашского мафит-ультрамафитового массива (составлена Н.А. Третьяковым, В.А. Прохоровой, в редакции авторов): 1 – вмещающие породы: гнейсы, амфиболиты, мраморы; 2 – гранитоиды; 3 – серпентиниты; 4 – ультрамафиты; 5 – клинопироксениты; 6 – габброиды; 7 – тектонические нарушения: а) достоверные, б) предполагаемые; 8 – геологические границы

Fig. 1. Schematic geological map of Kingashsky mafite-ultramafic massif (made by N.A. Tret'yakov, V.A. Prokhorova, ed. by the authors): 1 are the adjacent formations: gneiss, amphibolite, marble; 2 are the granitoids; 3 are the serpentinites; 4 are the ultramafites; 5 are the clinopyroxenites; 6 are the gabbroids; 7 are the tectonic faults: a) proved, b) probable; 8 are the geological boundaries

Для косвенного определения температур кристаллизации ультраосновных расплавов в настоящее время в литературе широко используются главным образом четыре оливин-хромшпинелиевых геотермометра: Джексона-Ирвайна-Родера [17, 18], Оно [19], Фабри [20] и О'Нейла-Уолла-Бэллхауза-Берри-Грина (O'NWBBG) [21].

Как было выяснено ранее [22], расчетные температуры оливин-хромшпинелиевого равновесия отвечают не образованию дунитов и хромититов, а становлению сложенных ими тел. Поэтому все основания предполагать постоянство значений «замороженной» температуры в пределах каждого тела независимо от вариаций состава оливина и хромшпинелида (прежде всего, его железистости). Этот вывод служит надежным индикатором корректности любого, основанного на обменных реакциях, геотермометра.

Для оценки температур формирования ультрамафитов Кингашского массива были использованы образцы неизмененных кумулятивных дунитов. При этом для «чистоты» расчетов авторами выбирались наиболее тесные парагенезисы хромшпинели и оливина, а именно микровключения первого минерала в составе второго (рис. 2). В результате проведенных расчетов полученные температуры с использованием одного геотермометра показывают очень близкие значения. Однако интервал значений температур, полученных по разным геотермометрам, является значительным (табл. 1).

Рассчитанные температуры по оливин-хромшпинелиевым геотермометрам Джексона-Ирвайна-Родера и Фабри характеризуются близкими значениями и отвечают преимущественно температурному интервалу 600...700 °С. Температуры, полученные по версии геотермометра О'Нейла-Уолла-Бэллхауза-Берри-Грина, дают меньший интервал значений и соответствуют 540...565 °С. Однако данный температурный порог представляется авторам несколько заниженным.

Авторы склонны предполагать, что температуры, полученные по данным трем оливин-хромшпинелиевым геотермометрам, отражают температуры наложенного на массив метаморфизма (эпидот-амфиболитовая фация метаморфизма широко проявлена на данной площади [23]), в ходе которого

оливин-хромшпинелиевая ассоциация испытала переуравновешивание. Это, вероятно, обусловлено тем, что разработчики данных геотермометров производили практическую апробацию своих версий на ультрамафитах из офиолитовых комплексов, являющихся реститовыми образованиями.

Однако температурный интервал 1135...1300 °С, полученный по геотермометру Оно, хорошо согласуется с температурами кристаллизации кумулятивных дунитов, предложенных ранее Т.А. Радомской ($T=1100...1260$ °С) [24].

Столь хорошая применимость данной версии геотермометра А. Оно, очевидно, может быть обусловлена введением в формулу расчета значения хромистости (Cr''), которое обнаруживает зависимость от степени метаморфизма и, очевидно, при расчетах температурного режима учитывает его воздействие.

Выводы

Через существующие версии оливин-хромшпинелиевых геотермометров смоделированы температурные режимы формирования кумулятивных дунитов Кингашского массива. Полученные данные указывают на магматический генезис данных пород, осложненный метаморфизмом, и позволяют предположить, что расчетная равновесная кристаллизация кумулятивных дунитов массива соответствует температурам 1135...1300 °С. Эти данные

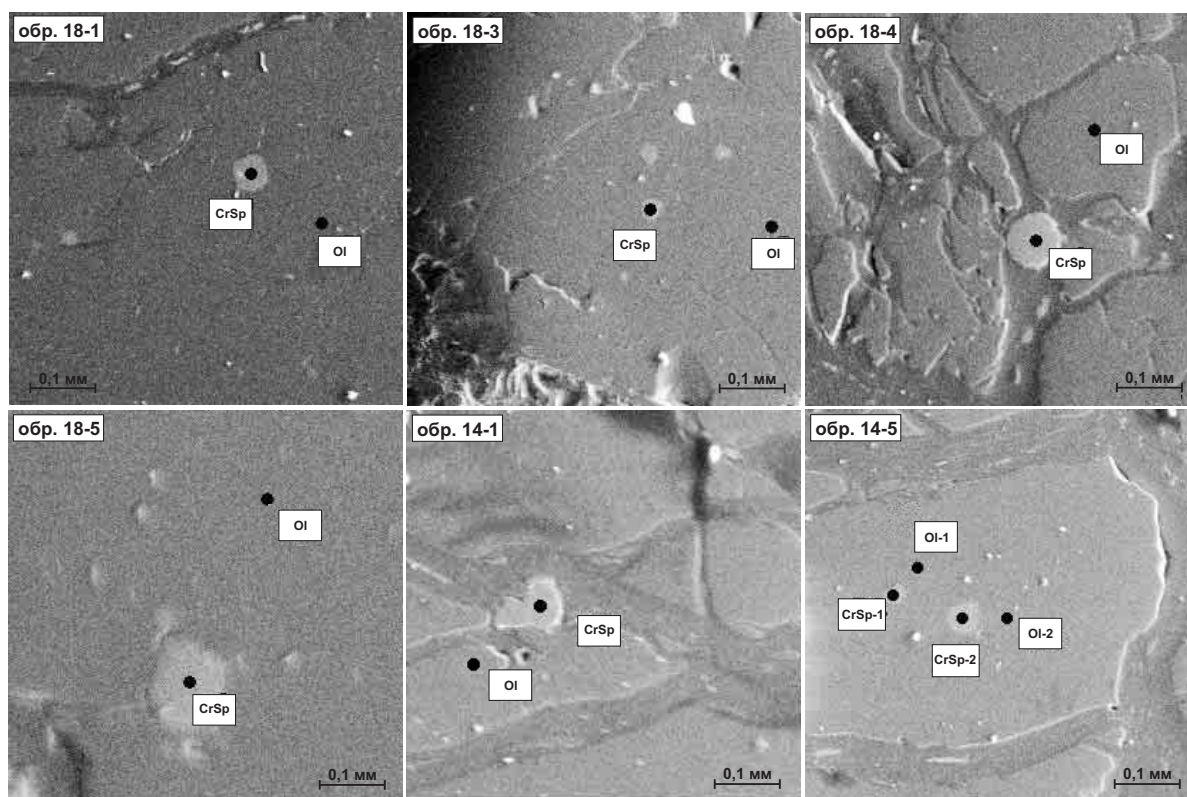


Рис. 2. Примеры оливин-хромшпинелиевых парагенезисов в исследованных образцах кумулятивных дунитов Кингашского массива: Ol – застрел оливина; CrSp – застрел хромшпинели

Fig. 2. Examples of olivine-chrome-spinel paragenesis in the examined samples of cumulative dunites from Kingashsky massif: Ol is the point of analysis of olivine; CrSp is the point of analysis of chrome-spinel

Таблица. Расчет температур оливин-хромшпинелиевого равновесия в образцах кумулятивных дунитов на Кингашском месторождении**Table.** Calculation of temperatures of olivine-chrome-spinel equilibrium in the samples of cumulative dunites in Kingash deposit

Образец/Sample	18-1	18-1	18-2	18-3	18-4	18-4	18-5	18-5	14-1	14-5	14-5
Хромшпинель/Chrome-spinel											
MgO	10,07	10,93	10,19	10,81	10,22	10,25	11,43	11,23	10,19	10,67	10,41
Al ₂ O ₃	31,24	33,61	31,13	33,17	29,91	31,70	35,53	35,45	32,46	31,98	33,31
Cr ₂ O ₃	34,01	30,55	33,76	31,86	35,23	30,36	28,97	29,67	31,43	31,51	30,73
Fe ₂ O ₃	3,32	3,99	3,16	3,66	2,58	6,80	3,77	3,41	3,90	4,91	4,47
FeO	21,25	20,43	21,37	20,87	21,34	21,03	20,09	20,59	21,63	21,16	21,53
MnO	0,44	0,59	0,40	–	–	0,53	0,39	–	–	–	–
TiO ₂	–	0,29	0,31	–	0,34	–	0,20	–	0,36	0,26	–
Оливин/Olivine											
SiO ₂	39,81	40,05	39,87	40,26	39,78	40,24	39,70	40,10	39,88	40,20	40,36
FeO	12,24	12,04	12,64	12,10	12,01	12,26	12,19	12,29	12,61	12,42	12,79
MnO	0,18	–	–	0,24	0,24	0,07	0,25	–	–	–	–
MgO	47,78	47,91	47,49	47,41	47,25	47,14	47,87	47,61	46,92	47,39	46,84
NiO	–	–	–	–	0,34	0,29	–	–	0,58	–	–
Cr ₂ O ₃	–	–	–	–	0,12	–	–	–	–	–	–
Рассчитанные по геотермометрам температуры, °C/Calculated by temperature geothermometer, °C											
1	541	550	551	545	554	563	546	535	538	564	539
2	602	617	616	617	611	610	630	621	603	624	613
3	666	669	676	671	674	690	669	661	662	689	671
4	1143	1233	1170	1213	1134	1187	1301	1276	1185	1209	1218

Примечание: 1–4 – авторские версии геотермометров: 1 – О'Нейла–Уолла–Бэллхауза–Берри–Грина (O'NWBBG) [21], $T, K = [(6530 + 280 \cdot P + 7000 + 108 \cdot P) \cdot (1 - 2 \cdot Fa) - 1960 \cdot (1 - 2 \cdot f) + 16150 \cdot \alpha + 25150 \cdot (\gamma + X_{Cr})] / (R \cdot \ln K_D + 4,705)$; 2 – Джексона–Ирвайна–Родера [17, 18], $T, K = (3480 \cdot 2\alpha + 1018 \cdot \beta + 2400 - 1720 \cdot \gamma) / (2,23 \cdot \alpha + 2,56 \cdot \beta + \ln K_D \cdot 1,987 - 3,08 \cdot \gamma - 1,47)$; 3 – Фабри [20], $T, K = (4250 \cdot \alpha + 1343) / (\ln K_D + 1,825 \cdot \alpha + 0,571)$; 4 – Оно [19], $T, K = (0,057 + 0,34 \cdot 10^4) / (\ln K_D + 0,934 \cdot Cr'' - 0,102)$; P – давление в GPa, для расчетов принято равным 1 GPa; α, β, γ – атомные доли Cr, Al, Fe³⁺ по отношению к их сумме в хромшпинелиде, соответственно; $Cr'' = Cr / (Cr + Al)$ в хромшпинелиде; $Fa = Fe / (Fe + Mg)$ в оливине; $f = Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mg)$ в хромшпинелиде; $K_D = (X_{Mg}^{Ol} \cdot f) / (X_{Mg}^{Sp} \cdot Fa)$, где $X_{Mg}^{Ol} = Mg / (Mg + Fe)$ в оливине и хромшпинелиде, соответственно; $K_D^0 = \ln K_D - 4 \cdot \gamma$; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31 \text{ Дж} / (\text{моль} \cdot K)$.

Note: 1–4 are the author's versions of geothermometers: 1 – O'Neil-Wall-Ballhaus-Berry-Green (O'NWBBG) [21], $T, K = [(6530 + 280 \cdot P + 7000 + 108 \cdot P) \cdot (1 - 2 \cdot Fa) - 1960 \cdot (1 - 2 \cdot f) + 16150 \cdot \alpha + 25150 \cdot (\gamma + X_{Cr})] / (R \cdot \ln K_D + 4,705)$; 2 – Jackson-Irvine-Roeder [17, 18], $T, K = (3480 \cdot 2\alpha + 1018 \cdot \beta + 2400 - 1720 \cdot \gamma) / (2,23 \cdot \alpha + 2,56 \cdot \beta + \ln K_D \cdot 1,987 - 3,08 \cdot \gamma - 1,47)$; 3 – Fabries [20], $T, K = (4250 \cdot \alpha + 1343) / (\ln K_D + 1,825 \cdot \alpha + 0,571)$; 4 – Ono [19], $T, K = (0,057 + 0,34 \cdot 10^4) / (\ln K_D + 0,934 \cdot Cr'' - 0,102)$; P – pressure in GPa, it is accepted equal to 1 GPa for calculation; α, β, γ – atomic fractions of Cr, Al, Fe³⁺ relative to their sum in chrome-spinel, respectively; $Cr'' = Cr / (Cr + Al)$ in chrome-spinel; $Fa = Fe / (Fe + Mg)$ in olivine; $f = Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mg)$ in chrome-spinel; $K_D = (X_{Mg}^{Ol} \cdot f) / (X_{Mg}^{Sp} \cdot Fa)$, where $X_{Mg}^{Ol} = Mg / (Mg + Fe)$ in olivine and in chrome-spinel, respectively; $K_D^0 = \ln K_D - 4 \cdot \gamma$; R – absolute gas constant, $R = 8,31 \text{ J} / (\text{mole} \cdot K)$.

хорошо сопоставляются с ранее сформулированным Т.А. Радомской температурным интервалом, отвечающим $T = 1100 \dots 1260 \text{ } ^\circ\text{C}$.

На последующем этапе геологической истории ультрамафиты Кингашского массива испытали

воздействие наложенного среднетемпературного ($T = 600 \dots 700 \text{ } ^\circ\text{C}$) метаморфизма эпидот-амфиболитовой фации, в результате которого произошло переуравновешивание оливин-хромшпинелиевого парагенезиса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Геология и перспективы сульфидного Pt-Cu-Ni оруденения Восточной части Алтае-Саянской складчатой области / С.С. Сердюк, В.А. Кириленко, Г.Р. Ломаева, В.Е. Бабушкин, А.В. Тарасов, А.И. Зверев. – Красноярск: Изд-во «Город», 2010. – 184 с.
- Платиноносность ультрамафит-мафитов Монголии и Тувы / Л.В. Агафонов, Ж. Лхамсурэн, К.С. Кужугет, Ч.К. Ойдул. – Улаанбаатар: Монгольский государственный университет науки и технологии, 2005. – 224 с.
- Поляков Г.В., Изох А.Э., Кривенко А.П. Платиноносные ультрамафит-мафитовые формации подвижных поясов Центральной и Юго-Восточной Азии // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 12. – С. 1227–1241.
- Юричев А.Н. Мафит-ультрамафитовый магматизм Канской глыбы и его рудный потенциал, Северо-Запад Восточного Саяна // Руды и металлы. – 2013. – № 3. – С. 11–20.
- Юричев А.Н., Чернышов А.И. Рудная минерализация перидотитов и габброидов кулибинского комплекса (северо-запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 64–70.
- Черкасова Т.Ю., Мазуров А.К., Чернышов А.И. Потенциальная рудоносность расслоенных мафит-ультрамафитовых массивов Нижнедербинского комплекса (СЗ Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 20–27.
- Field Relationships and Geochemical Constraints on the Emplacement of the Jinchuan Intrusion and its Ni-Cu-PGE Sulfide Deposit, Gansu, China / J. Lehmann, N. Arndt, B. Windley,

- М.-F. Zhou, C.Y. Wang, C. Harris // *Econ. Geol.* – 2007. – V. 102. – P. 75–94.
8. Платиноносность ультрабазит-базитовых комплексов Юга Сибири / под ред. В.И. Богнибова, А.П. Кривенко, А.Э. Исоха и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 1995. – 151 с.
9. Юричев А.Н. Эволюция сульфидного расплава в процессе образования Кингашского ультрамафитового массива (северо-запад Восточного Саяна) // *Известия Томского политехнического университета.* – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 56–63.
10. Чернышов А.И., Ножкин А.Д., Мишенникова М.А. Петрохимическая типизация ультрамафитов Канского блока (Восточный Саян) // *Геохимия.* – 2010. – № 2. – С. 1–25.
11. Юричев А.Н., Чернышов А.И., Конников Э.Г. Талажинский плагиодунит-троктолит-анортосит-габбровый массив Восточного Саяна: петрогеохимические особенности и проблемы рудоносности // *Геология и геофизика.* – 2013. – Т. 54. – № 2. – С. 219–236.
12. Юричев А.Н., Чернышов А.И. Рудная минерализация идарского дунит-гарцбургитового комплекса (Северо-Запад Восточного Саяна) // *Известия Томского политехнического университета.* – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 69–75.
13. Глазунов О.М., Богнибов В.И., Еханян А.Г. Кингашское платиноидно-медно-никелевое месторождение. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2003. – 192 с.
14. Путеводитель по Кингашскому месторождению медно-никелевых и благороднометалльных руд (Восточный Саян) / Т.Я. Корнев, А.П. Романов, В.Н. Князев, С.К. Шарифулин, Г.И. Шведов, Н.А. Третьяков, И.Г. Резников, В.В. Некос. – Красноярск: КНИИГиМС, 2001. – 72 с.
15. Кингашский мафит-ультрамафитовый массив: геологическое положение, внутреннее строение, вещественный состав и петроструктурный анализ ультрамафитов (Восточный Саян) / А.И. Чернышов, А.Д. Ножкин, С.И. Ступаков, П.А. Балыкин, Н.И. Кузоватов, И.Г. Резников, Н.А. Третьяков, В.А. Прохорова // *Платина России. Проблемы развития, оценки, воспроизводства и комплексного использования минерально-сырьевой базы платиновых металлов: сб. науч. трудов.* Т. V. – М.: ООО «Геоинформмарк», 2004. – С. 152–175.
16. Hill R., Roeder P. The crystallization of spinel from liquid as a function of Oxygen fugacity // *J. of Geol.* – 1974. – V. 92. – № 6. – P. 709–731.
17. Irvine T.N. Chromian spinel as a petrogenetic indicator. 2. Petrologic applications // *Can. J. Earth Sci.* – 1967. – V. 4. – P. 71–103.
18. Roeder P., Campbell I., Jamieson H. A re-evaluation of the olivine-spinel geothermometer // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1979. – V. 68. – P. 325–334.
19. Ono A. Fe-Mg partitioning between spinel and olivine // *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.* – 1983. – V. 78. – P. 115–122.
20. Fabries J. Spinel-olivine Geothermometry in Peridotites from Ultramafic Complexes // *Contrib. Miner. and Petrol.* – 1979. – V. 69. – № 4. – P. 329–336.
21. Ballhaus C., Berry R., Green D. High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implication for the oxidation state of the upper mantle // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1991. – V. 107. – № 1. – P. 27–40.
22. ЯГР-спектроскопия хромшпинелидов и проблемы окситермометрии хромитовых ультрамафитов Урала / И.С. Чашухин, С.Л. Вотяков, С.Г. Уймин, Д.Р. Борисов, В.Н. Быков. – Екатеринбург: Ин-т геологии и геохимии УрО РАН, 1996. – 136 с.
23. Зеленокаменные пояса юго-западного обрамления Сибирской платформы и их металлогения / Т.Я. Корнев, А.Г. Еханян, В.Н. Князев, С.К. Шарифулин. – Красноярск: КНИИГиМС, 2004. – 176 с.
24. Радомская Т.А. Минералогия и геохимия Кингашского платиноидно-медно-никелевого месторождения (В. Саян): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Иркутск, 2012. – 23 с.

Поступила 05.06.2015 г.

UDC 552.321.6:552.11

SIMULATION OF FORMATION TEMPERATURE OF DUNITES FROM KINGASHSKY ULTRAMAFIC MASSIF (NORTH-WESTERN PART OF EASTERN SAYAN)

Alexey N. Yurichev,

National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: juratur@sibmail.com

Alexey I. Chernyshov,

National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: aich@ggf.tsu.ru

Relevance of the work is caused by the need of detailed petrological studies of numerous potentially mineralized ultramafic and mafic-ultramafic massifs of the Kan block of the Eastern Sayan to improve the correlation of regional schemes, and to identify Pt-Cu-Ni mineralization in them. One of these massifs – Kingashsky massif, including eponymous large Pt-Cu-Ni deposit, discovered in Soviet time, is the subject of this study. However, despite the increased interest of researchers to this massif, there are unresolved issues on the depth of its formation, comagmatic ultramafic and mafic rocks and conditions of formation and localization of ore in it.

The main aim of the study is to assess temperatures of formation of cumulative dunites in Kingashsky ultramafic massif applying known in geological literature olivine-chromospinel geothermometers.

The methods used in the study: petrographic characteristics of rocks on the polarizing microscope AxioScope Carl Zeiss, chemical composition of minerals on the scanning electron microscope Camscan, equipped with energy-dispersive and wave-dispersive spectrometers.

The results. Temperature conditions of formation of cumulative dunites in Kingashsky ultramafic massif through existing versions of olivine-chromospinel geothermometers are simulated. The estimated equilibrium crystallization of cumulative dunites from massif corresponds to temperatures 1135...1300 °C. At the same time the calculated range of reduced temperatures on geothermometers of Jackson–Irvine–Roeder and Fabries, equal 600... 700 °C, reflects temperatures of medium-temperature metamorphism of epidote-amphibolite facies, imposed on these rocks, which is widely manifested in the Kan block of Eastern Sayan.

Key words:

Kingashsky massif, geothermometer, olivine, chromospinel, equilibrium crystallization, temperature regime.

REFERENCES

1. Serdyuk S.S., Kirilenko V.A., Lomaeva G.R., Babushkin V.E., Tarasov A.V., Zverev A.I. *Geologiya i perspektivy sulfidnogo Pt-Cu-Ni orudneniya Vostochnoy chasti Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti* [Geology and prospects of sulfide Pt-Cu-Ni mineralization of eastern part of the Altay-Sayan folded area]. Krasnoyarsk, Gorod Publ., 2010. 184 p.
2. Agafonov L.V., Lkhamsuren J., Kuzhuget K.S., Oydup Ch.K. *Platinonosnost ultramafit-mafitov Mongolii i Tuvy* [Ultramafic-mafic PGE of Mongolia and Tuva]. Ulaanbaatar, Mongolian University of Science and Technology, 2005. 224 p.
3. Polyakov G.V., Izokh A.E., Krivenko A.P. *Platinonosnye ultramafit-mafitovy formatii podviznykh pojasov Tsentralnoy i Yugo-Vostochnoy Azii* [Pt-bearing ultramafic-mafic formations of mobile belts in Central and South-Eastern Asia]. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 12, pp. 1227–1241.
4. Yurichev A.N. *Mafit-ultramafitovy magmatizm Kanskoy glyby i ego rudny potentsial, Severo-Zapad Vostochnogo Sayana* [Mafic-ultramafic magmatism of Kansk block and its ore potential, NW Eastern Sayan]. *Rudy i metally*, 2013, no. 3, pp. 11–20.
5. Yurichev A.N., Chernyshov A.I. *Rudnaya mineralizatsiya peridotitov i gabbroidov kulibinskogo kompleksa (severo-zapad Vostochnogo Sayana)* [Ore mineralization of peridotites and gabbros of the Kulibinsky complex (north-west of the Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 64–70.
6. Cherkasova T.Yu., Mazurov A.K., Chernyshov A.I. *Potentsialnaya rudonosnost rassloennykh mafit-ultramafitovykh massivov Nizhnederbinskogo kompleksa* [Potential ore-bearing of layered mafic-ultramafic massifs of the Nizhnederbinsky complex (NW Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 1, pp. 20–27.
7. Lehmann J., Arndt N., Windley B., Zhou M.-F., Wang C.Y., Harris C. *Field Relationships and Geochemical Constraints on the Emplacement of the Jinchuan Intrusion and its Ni-Cu-PGE Sulfide Deposit, Gansu, China*. *Econ. Geol.*, 2007, vol. 102, pp. 75–94.
8. *Platinonosnost ultrabazit-bazitovykh kompleksov Yuga Sibiri* [PGE mafic-ultramafic complexes of South Siberia]. Ed. V.I. Bog-nibova, A.P. Krivenko, A.E. Izokh. Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, Branch «Geo», 1995. 151 p.
9. Yurichev A.N. *Evolutsiya sulfidnogo rasplava v protsesse obrazovaniya Kingashskogo ultramafitovogo massiva (severo-zapad Vostochnogo Sayana)* [Evolution of sulfide liquid during formation of the Kingashsky ultramafic massif (north-west of Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 56–63.
10. Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Mishenina M.A. *Petrokhimicheskaya tipizatsiya ultramafitov Kanskogo bloka (Vostochny Sayan)* [Petrogeochemical typification of the ultramafic rocks from the Idar greenstone belt, Kan block, East Sayan]. *Geochimistry International*, 2010, no. 2, pp. 1–25.
11. Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Konnikov E.G. *Talazhinsky plagiodunit-troktolit-anortozit-gabbrovyy massiv Vostochnogo Sayana: petrogeokhimicheskie osobennosti i problemy rudonosnosti* [The Talazhin plagiodunit-troctolite-anorthosite-gabbro massif (East Sayan): petrogeochemistry and ore potential]. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 2, pp. 219–236.
12. Yurichev A.N., Chernyshov A.I. *Rudnaya mineralizatsiya idarskogo dunit-garzburgitovogo kompleksa (Severo-Zapad Vostochnogo Sayana)* [Ore mineralization of the Idarsky dunit-harzburgite complex (North-west Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 69–75.
13. Glazunov O.M., Bog-nibov V.I., Ekhanin A.G. *Kingashskoe platinoidno-medno-nikelevoe mestorozhdenie* [Kingashsky PGE-copper-nickel deposit]. Irkutsk, IGTU Press, 2003. 192 p.
14. Kornev T.Ya., Romanov A.P., Knyazev V.N., Sharifulin S.K., Shvedov G.I., Tretyakov N.A., Reznikov I.G., Nekos V.V. *Putevoditel po Kingashskomu mestorozhdeniyu medno-nikelevykh i blagorodnometallnykh rud (Vostochnyy Sayan)* [Guide to Kingashsky deposit of copper-nickel and noble metal ores (Eastern Sayan)]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Press, 2001. 72 p.
15. Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Stupakov S.I., Balykin P.A., Kuzovатов N.I., Reznikov I.G., Tretyakov N.A., Prokhorova V.A. *Kingashsky mafit-ultramafitovy massiv: geologicheskoe polozhenie, vnutrennee stroenie, veshchestvennyy sostav i petrostrukturnyy analiz ultramafitov (Vostochny Sayan)*. *Platina Rossii. Problemy razvitiya, otsenki vosproizvodstva i kompleksnogo ispolzovaniya mineralno-syryevoy bazy platinovykh metallov* [Kingashsky mafic-ultramafic massif: geological position, internal structure, material composition analysis and petrostructural analysis of ultramafic (Eastern Sayan). *Platinum of Russia. Problems of development, evaluation of reproduction and complex use of mineral resources base of the platinum metals.*] Moscow, Geoinformmark Publ., 2004, V. V, pp. 152–175.
16. Hill R., Roeder P. *The crystallization of spinel from liquid as a function of Oxygen fugacity*. *J. of Geol.*, 1974, vol. 92, no. 6, pp. 709–731.
17. Irvine T.N. *Chromian spinel as a petrogenetic indicator. 2. Petrologic applications*. *Can. J. Earth Sci.*, 1967, vol. 4, pp. 71–103.
18. Roeder P., Campbell I., Jamieson H. *A re-evaluation of the olivine-spinel geothermometer*. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1979, vol. 68, pp. 325–334.
19. Ono A. *Fe-Mg partitioning between spinel and olivine*. *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, 1983, vol. 78, pp. 115–122.
20. Fabries J. *Spinel-olivine Geothermometry in Peridotites from Ultramafic Complexes*. *Contrib. Miner. and Petrol.*, 1979, vol. 69, no. 4, pp. 329–336.
21. Ballhaus C., Berry R., Green D. *High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implication for the oxidation state of the upper mantle*. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1991, vol. 107, no. 1, pp. 27–40.
22. Chashchukhin I.S., Votyakov S.L., Uimin S.G., Borisov D.R., Bykov V.N. *YaGR-spektroskopiya khromshpinelidov i problemy oksitermobarometrii khromitonosnykh ultramafitov Urala* [Moesbauer spectroscopy of chromospinelides and problems of oxy-termobarometer of chromite-bearing ultramafites of the Ural]. Ekaterinburg, Institute of geology and geochemistry UrO RAN, 1996. 136 p.
23. Kornev T.Ya., Ekhanin A.G., Knyazev V.N., Sharifulin S.K. *Zelenokamennyye poyasa yugo-zapadnogo obramleniya Sibirskoy platformy i ikh metallogeniya* [Greenstone belts of southwestern framing of the Siberian platform and their metallogeny]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Press, 2004. 176 p.
24. Radomskaya T.A. *Mineralogiya i geokhimiya Kingashskogo platinoidno-medno-nikelevogo mestorozhdeniya (V. Sayan)*. Avtoref. Kand. nauk [Mineralogy and geochemistry of the Kingashsky PGE-copper-nickel deposit (E. Sayan). Cand. Sc. Abstract]. Irkutsk, 2012. 23 p.

Received: 05 June 2015.