

УДК 552.13; 549.08

СУЛЬФИДСОДЕРЖАЩИЕ ПОЛИМИНЕРАЛЬНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МАНТИЙНЫХ ГРАНАТАХ ИЗ ЛАМПРОФИРОВ ЧОМПОЛИНСКОГО ПОЛЯ (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЛДАН, СИБИРСКИЙ КРАТОН)

© 2021 г. Е. И. Николенко^{1,2,*,**}, И. С. Шарыгин^{1,3}, Д. И. Резвухин¹, В. Г. Мальковец^{1,2,4},
Н. С. Тычков¹, академик РАН Н. П. Похиленко^{1,4}

Поступило 25.11.2020 г.

После доработки 16.12.2020 г.

Принято к публикации 23.12.2020 г.

Изучены сульфидсодержащие полиминеральные включения в мантийных хромсодержащих пироповых гранатах лерцолитового парагенезиса из лампрофиров Чомполинского поля (Алданский щит, юг Сибирского кратона). Включения состоят либо только из сульфидов, либо из сульфидов в ассоциации с другими минералами (карбонаты, силикаты, оксиды и др.). Сульфидная часть включений представлена как одним минералом, так и несколькими (до четырех), среди которых установлены минералы, богатые Cu и Ni, в то время как железистые сульфиды (пирротин и троилит) отсутствуют. Это отличает изученные включения от преобладающего большинства сульфидных включений в мантийных минералах и алмазах, а также сульфидов мантийных ксенолитов в кимберлитах. Образование полиминеральных включений в хромистых гранатах Чомполинского поля авторы связывают с воздействием на мантийные перидотиты карбонат-содержащего (карбонатно-силикатного или карбонатного) метасоматического расплава/флюида, о чем свидетельствует сопутствующая сульфидам минеральная ассоциация. Результаты исследований указывают на существенные отличия в характере метасоматических процессов, протекавших в литосферной мантии южной и центральной частей Сибирского кратона.

Ключевые слова: сульфиды, минеральные включения, пироп, мантия, перидотит, метасоматоз, Алданский щит, Сибирский кратон

DOI: 10.31857/S2686739721040113

Сульфидные включения в минералах мантийного происхождения широко используются в качестве источника информации о глубинных процессах в мантии Земли. Традиционно объектом исследования выступают мантийные ксенолиты и ксенокристаллы из кимберлитов. Мантийным минералам из других глубинных пород, таких как лампроиты и лампрофиры, уделяется гораздо меньше внимания.

В данном сообщении приводятся результаты исследования коллекции ксенокристаллов мантийных хромсодержащих пироповых гранатов из дайки “Алданская” и трубки “Огонек” Чомполинского поля лампрофиров, расположенного в южной части Сибирского кратона (Алданский щит) [1, 2]. Из более чем 600 изученных зерен гранатов размерностью 2–4 мм, содержащих минеральные включения, сульфиды обнаружены только в 16 (табл. 1). Доминирующим типом включений во всей выборке просмотренных гранатов являются титанистые и хромистые оксидные минералы (рутил, пикроильменит, хромшпинелид, минералы группы кричтонита). В большинстве случаев включения состоят только из 1–3 фаз, хотя отмечаются и более сложные полиминеральные обособления.

Химический состав гранатов и клинопироксенов определяли методом РСМА на микронзонде “Jeol” JXA-8100 по стандартной методике. Элементное картирование сульфидов и анализ состава минералов во включениях проводились на РЭМ (“TescanMIRA” 3 LMU с системой ЭДС-

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Научно-исследовательское геологическое предприятие, Акционерная компания “АЛРОСА” (публичное акционерное общество), Мирный, Россия

³ Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

⁴ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*E-mail: NikolenkoEI@alrosa.ru

**E-mail: nevgeny@igm.nsc.ru

Таблица 1. Минеральный состав включений в пиропсах из лампрофиров Чомполинского поля (А – д. Алданская, О – тр. Огонек)

Образец	Группа	Объект	Минеральная ассоциация
s163	1	А	Pn, Bn _{SS} , Ccp,
s1	1	А	Pn, Ccp, Mss, CuFe ₂ S ₄
s38	1	А	Pn, Ccp, CuFe ₂ S ₄
s296	1	О	Ccp, (Fe,Ni,Cu) _{1±x} S, Mss
1n11	2	А	Ccp, Mgs, Phl, Gr, Fo, Di, Ts, Rt, Ilm, Ap, CGM
s2	2	А	Pn, Bn _{SS} , Hzl, (Fe,Ni,Cu) _{1±x} S, Mss, Cr-Spl, Di, Tlc
sx2	2	А	Ccp, Bn _{SS} , (Fe,Ni,Cu) _{1±x} S, Mss, Ts, Rt, Cr-Spl, En
n6	2	А	Ccp, Di
n7	2	А	Ccp, Fo, Rt
s9	2	А	Pn, Ccp, (Fe,Ni,Cu) _{1±x} S, CuFe ₂ S ₄ , Phl, Rt
s113	2	А	Ccp, (Fe,Ni,Cu) _{1±x} S, Dol, Phl
s115	2	А	Ccp, Mss, Cr-Spl, Di, Chl
s207	2	А	Ccp, Fo, Di, Rt
s213	2	А	Ccp, (Fe,Ni,Cu) _{1±x} S, Dol, Cr-Spl
s291	2	О	Pn, Ccp, Mss, Mgs, Cr-Spl, Phl, Fo, Mkt, CGM
s317	2	О	Bn _{SS} , Mgs, Cr-Spl, Phl, Rt, CGM

Примечание. Ap – апатит; Bn_{SS} – твердый раствор борнита; Ccp – халькопирит; Cr-Spl – хромшпинелид; Chl – хлорит; CGM – минерал группы кричтонита; Dol – доломит; Di – диопсид; En – энстатит; Hzl – хизлевудит; Ilm – ильменит; Fo – форстерит; Mgs – магнезит; Mkt – магнезиокатафорит; Mss – моносльфидный твердый раствор (МТР); Pn – пентландит; Phl – флогопит; Rt – рутил; Ts – чермакит; Tlc – тальк.

микроанализа “INCA Energy” 450+). Для идентификации минералов во включениях также использовалась конфокальная Рамановская спектроскопия (РС). Данные виды исследований проводились в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН. Определение редких и рассеянных элементов в гранатах проводилось методом LA-ICP-MS (Agilent 7900cs с лазерным пробоотборником NewWave 193nm) в “National Key Centre GEMOC/CCFS” в Университете Маккуори (Сидней, Австралия). В настоящей работе использованы данные по содержанию Ni; полные результаты LA-ICP-MS исследований будут опубликованы в другой статье.

По соотношению содержаний CaO и Cr₂O₃ изученные пиропы принадлежат к лерцолитовому парагенезису [3, 4] (рис. 1а). Вариации Mg# [100 × Mg/(Mg + Fe)] и Ca# [100 × Ca/(Ca + Mg + Fe + Mn)] находятся в пределах 74.6–81.0 и 10.9–15.3 соответственно. Концентрация TiO₂ не превышает 0.24 мас. %.

Для пиропов s115, s2, s207, 1n11, содержащих включения хромдиопсида (табл. 1), оценки температуры и давлений, выполненные с помощью минерального клинопироксенового термобарометра [5], составляют 690–790°C и 2.9–3.5 ГПа и согласуются с полученными ранее оценками [2] (рис. 1б). Диапазон температур, полученный с

помощью термометра [6], для пиропов с включениями сульфидов (табл. 1) составляет 670–760°C. Для более представительной выборки пиропов из дайки “Алданская” и трубки “Огонек” Чомполинского поля значения температур имеют более широкий диапазон 640–910°C (рис. 1б).

В исследованных пиропсах не наблюдалось трещин, соединяющих включения с поверхностью зерен, поэтому предполагается мантийный генезис изученных минеральных фаз. О мантийном генезисе также свидетельствуют высокие содержания Cr₂O₃ (до 1 мас. %) во флогопите и минералах-оксидах (напр., до 7.2 мас. % Cr₂O₃ в рутиле) из включений [8], а также оценки температур и давлений для хромдиопсида из включений.

Минеральный набор включений позволяет разделить их на две группы: в первую объединены включения, представленные только сульфидами (табл. 1, рис. 2 а); вторая имеет более сложный фазовый состав и содержит силикаты, карбонаты, оксиды, апатит и графит (табл. 1, рис. 2б). При этом во включениях второй группы сульфидная часть включений всегда обособлена относительно других минералов, следов реакционных отношений не установлено (рис. 2б; также см. рис. 2 в [9]). Включения сульфидов имеют округлую, неправильную или ограниченную форму и размер в диапазоне 5–200 мкм. Они обычно окруже-

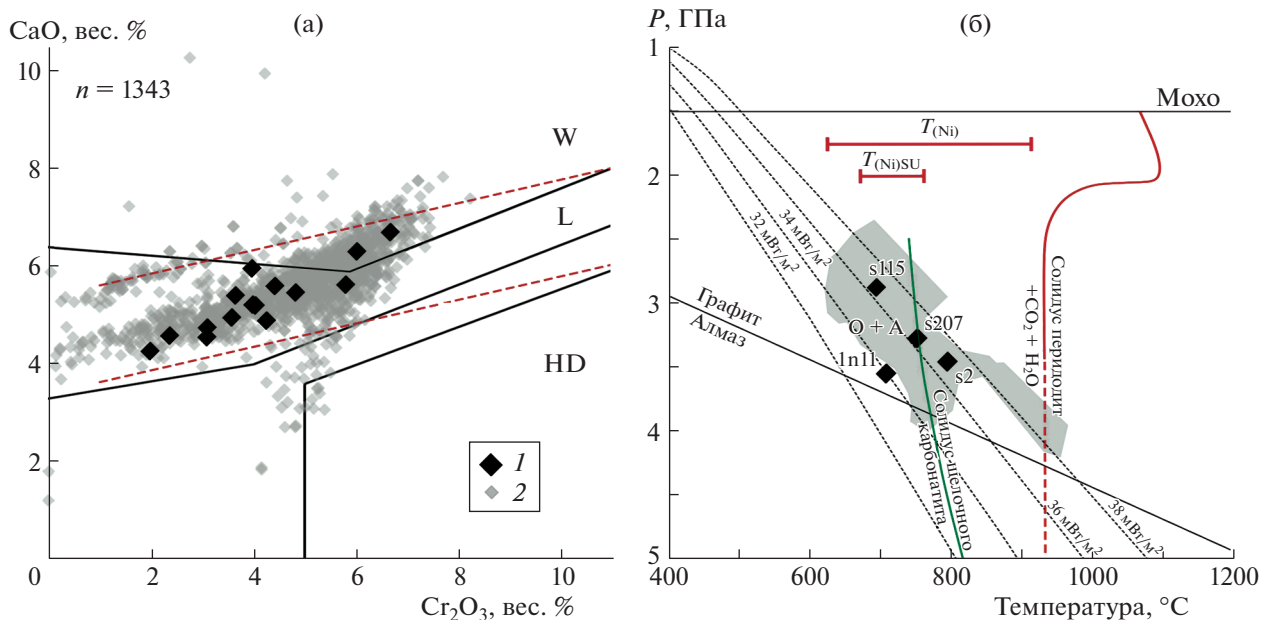


Рис. 1. а – Вариации CaO и Cr₂O₃ в перidotитовых пиропсах с включениями сульфидов (1), на фоне составов гранатов из концентрата тяжелой фракции лампрофиров Чомполинского поля, n = 1343 (2). Мантийные парагенезисы согласно [3]: HD – гарцбургит-дунитовый, L – лерцолитовый, W – верлитовый. Ограниченное пунктиром поле – лерцолитовый парагенезис согласно [4]. б – Оценки P-T-параметров для пиропов с сульфидными включениями из лампрофиров Чомполинского поля (рисунок с изменениями из [2]). Черные ромбы – оценки по включениям хромдиопсида. Отрезками показаны интервалы оценки температур для пиропов с включениями сульфидов (T_{(Ni)SU}) и для более представительной выборки пиропов из дайки “Алданская” и трубки “Огонек” (T_(Ni)), определенных с помощью номинерального термометра Ni-in-Gar [6]. Штриховыми линиями показаны модельные геотермы для разного поверхностного теплового потока [7]. Серым полем показаны P-T-оценки из работы [2].

ны радиальными трещинами. Образование таких трещин традиционно связывается с разной степенью расширения граната и минерального включения при декомпрессии во время подъема транспортирующей магмой [2], что также свидетельствует в пользу мантийного происхождения включений.

Сульфидные включения, как правило, неоднородны и состоят из нескольких минералов, среди которых идентифицированы пентландит, халькопирит, твердый раствор на основе борнита, минерал с предполагаемой формулой CuFe₂S₄, моносульфидный твердый раствор (МТР), хизлевудит и соединение (Fe, Ni, Cu)_{1±x}S (табл. 1; рис. 2). Пентландит (FeNi)₉S₈ является наиболее распространенной фазой и обычно заполняет основной объем включения. Халькопирит (CuFeS₂) локализуется во внешней части включений или образует каймы вокруг него. Твердый раствор на основе борнита (Cu_{5±x}Fe_{1±x}S_{4±y}) и хизлевудит (Ni₃S₂) зафиксированы вместе с пентландитом и МТР (табл. 1).

Fe–Cu-содержащий сульфид с расчетной формулой (Cu,Ni)_{1.10–0.93}(Fe,Co)_{1.90–2.07}S₄ обнаружен в образцах s1, s9 и s38 в ассоциации с пентландитом и халькопиритом. Для него установлено преобла-

дание Fe над Cu с содержанием этих компонентов 33.1–34.9 и 12.0–16.0 мас. % соответственно. Данная фаза содержит Ni (2.4–8.3 мас. %) и примесь Co (1.4–2.2 мас. %). Соотношение Me/S варьирует в диапазоне 0.69–0.75, а содержание S составляет 42.0–44.2 мас. %. Аналогичный сульфид с формулой CuFe₂S₄ описан в рудах месторождения Ловозеро на Кольском полуострове [10].

МТР характеризуется соотношением Ni/(Ni + Fe) = 0.40–0.60 с содержаниями Ni в пределах 21–36 мас. % и Me/S в пределах 0.80–0.93.

Соединение (Fe, Ni, Cu)_{1±x}S характеризуется высоким содержанием Ni (50.0–61.9 мас. %), умеренным Fe (2.0–11.7 мас. %), низким Cu (до 3.4 мас. %), высокими отношениями Ni/(Ni + Fe) = 0.80–0.97 и Me/S = 0.96–1.06.

Валовые составы сульфидной составляющей включений (s1, s2, s9, s291, s38) имеют вариации Ni и Fe в пределах 26.2–37.7 мас. % и 23.5–32.1 мас. % соответственно, и содержания Cu до 7.4 мас. % в относительно обогащенных Ni разновидностях (рис. 3).

Минеральная ассоциация с аналогичными высокими содержаниями Cu и Ni в сульфидах описана в ксенолитах шпинелевых гарцбургитов и дунитов из щелочных пород архипелага Кергелен

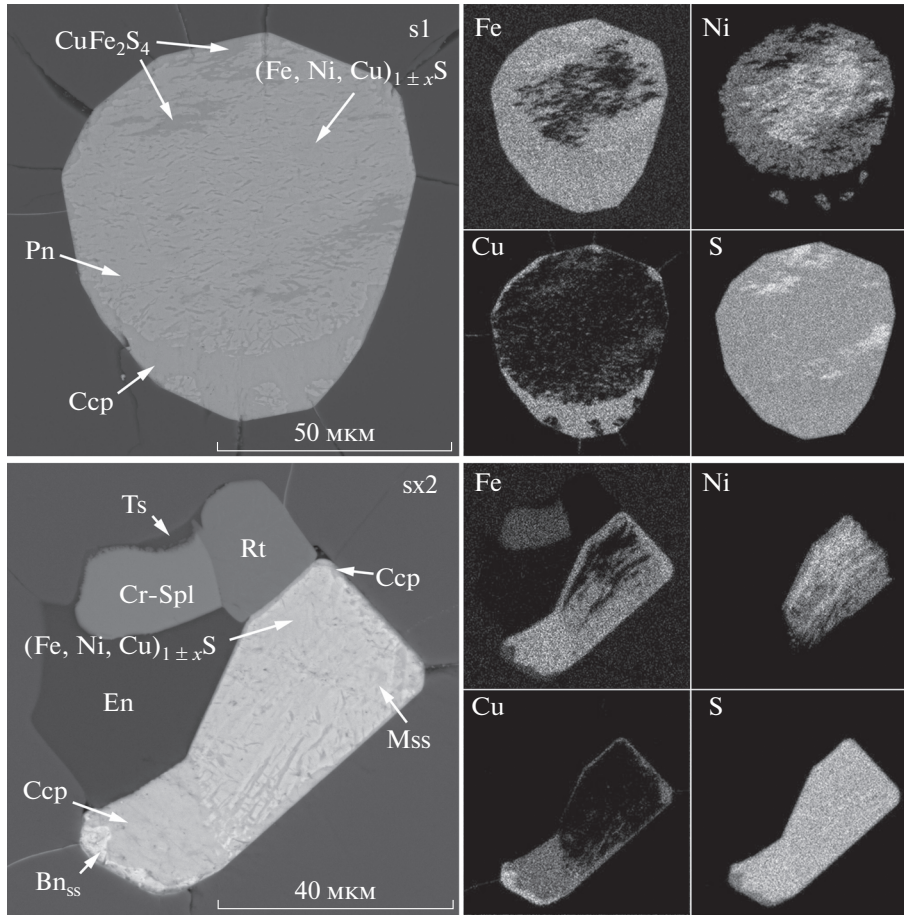


Рис. 2. Взаимоотношения минеральных фаз (BSE-изображение) и карты распределения элементов (Fe, Ni, Cu, S) в полиминеральных включениях пиропов s1 и sx2 из д. “Алданская”. Условные обозначения в табл. 1.

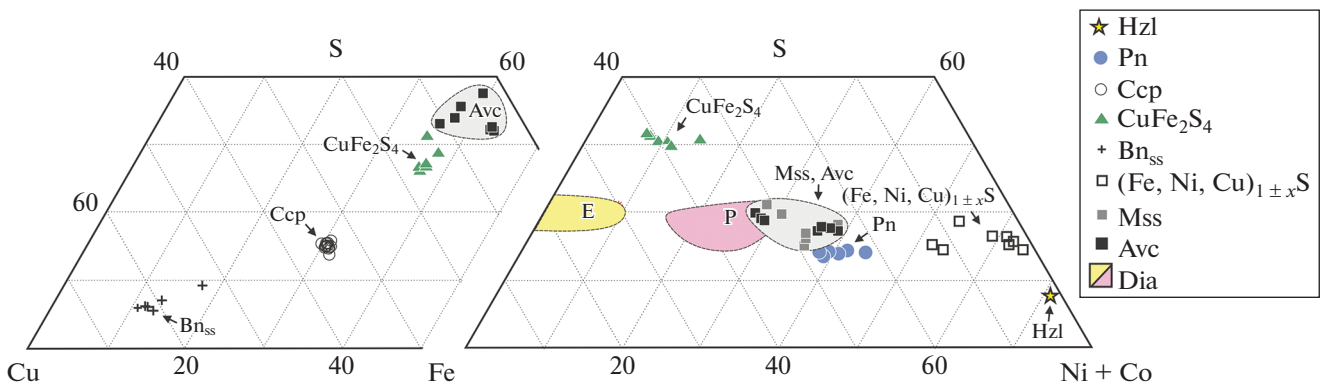


Рис. 3. Состав изученных сульфидов на диаграммах Cu–Fe–S и Fe–(Ni + Co)–S (мас. %). Avc – валовый состав изученных включений; Dia – состав сульфидов из включений в алмазах, P – перидотитовый, E – эклогитовый парагенезис [11].

[12]. Эти ксенолиты имеют следы метасоматического воздействия щелочного карбонат-содержащего расплава, проявленные в виде прожилков и интерстиционных выделений карбонатов (кальцит, доломит, магнезит), амфибола, флогопита,

хромита, ильменита, рутила, апатита и др. Авторы исследования [12] предположили, что такой расплав может эффективно переносить Cu, Ni и S в растворенном виде и распасться на несмешиваемые сульфидный и карбонатный расплавы, способ-

ные мигрировать через перидотитовый матрикс независимо друг от друга. Эксперименты при высоких давлениях показали, что карбонат-содержащие расплавы (карбонатный или силикатно-карбонатный) являются эффективными транспортерами серы, растворимость которой в таких расплавах увеличивается в окисленных условиях, а также зависит от температуры и состава [13, 14]. Таким образом, альтернативным вариантом образования сульфидов может быть их кристаллизация из метасоматизирующего карбонат-содержащего расплава в результате снижения температуры или смещения окислительно-восстановительных условий в более восстановленную область, о чем свидетельствует присутствие включений графита в изученных ксенокристаллах пиропса (табл. 1) [2].

Мы предполагаем, что образование сульфидсодержащих полиминеральных включений в изученных пиропсах связано с воздействием на перидотиты литосферной мантии карбонат-содержащего метасоматического расплава/флюида. Об этом свидетельствуют сопутствующие сульфидам минералы, богатые летучими и несовместимыми элементами (табл. 1), и ранее проведенные исследования полиминеральных включений в хромистых пиропсах из кимберлитов и лампрофиров Сибирского кратона [2, 9, 15]. К сожалению, отсутствие экспериментальных данных при высоких давлениях по фазовым отношениям в богатых Cu системах Fe–Ni–Cu–S, соответствующих валловому составу исследованных сульфидных включений, не позволяет надежно установить, было ли исходное сульфидное вещество включений расплавом.

Высокие концентрации меди и отсутствие богатых Fe минералов (пирротина и троилита) отличают изученные мантийные сульфидные ассоциации Чомполинского поля от преобладающего большинства включений в мантийных минералах и алмазах, а также сульфидов мантийных ксенолитов в кимберлитах Сибирского кратона [11] (рис. 3). Это, вероятно, указывает на существенные отличия в характере метасоматических процессов, протекавших в литосферной мантии южной и центральной частей Сибирского кратона.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Аналитические исследования выполнены за счет грантов Российского научного фонда: № 18-7710062 (РЭМ, РСМА, РС) и № 18-17-00249 (LA-ICP-MS). Полевые работы для отбора образцов выполнены в рамках государственного задания ИГМ СО РАН. Работы по отбору всей выборки гранатов с минеральными включениями поддержаны грантом Президента РФ для молодых кандидатов наук № МК-971.2020.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nikolenko E.I., Lobov K.V., Agashev A.M., Tychkov N.S., Chervyakovskaya M.V., Sharygin I.S., Nikolenko A.M.* ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronology and New Mineralogical and Geochemical Data from Lamprophyres of Chompolo Field (South Yakutia, Russia) // *Minerals*. 2020. 10(10). P. 886.
2. *Nikolenko E.I., Sharygin I.S., Alifirova T.A., Korsakov A.V., Zelenovskiy P.S., Shur V.Y.* Graphite-bearing Mineral Assemblages in the Mantle Beneath Central Aldan Superterrane of North Asian Craton: Combined Confocal Micro-Raman and Electron Microprobe Characterization // *Journal of Raman Spectroscopy*. 2017. V. 48. P. 1597–1605.
3. *Sobolev N.V., Lavrent'ev Y.G., Pokhilenko N.P., Usova L.V.* Chrome-rich Garnets from the Kimberlites of Yakutia and Their Parageneses // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1973. V. 40. P. 39–52.
4. *Grütter H.S., Gurney J.J., Menzies A.H., Winter F.* An Updated Classification Scheme for Mantle-derived Garnet, for Use by Diamond Explorers // *Lithos*. 2004. V. 77. P. 841–857.
5. *Nimis P., Taylor W.R.* Single Clinopyroxene Thermobarometry for Garnet Peridotites. Part I. Calibration and Testing of a Cr-in-Cpx Barometer and an Enstatite-in-Cpx Thermometer // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2000. V. 139(5). P. 541–554.
6. *Ryan C.G., Griffin W.L., Pearson N.J.* Garnet Geotherms: Pressure-temperature Data from Cr-pyrope Garnet Xenocrysts in Volcanic Rocks // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1996. V. 101. P. 5611–5625.
7. *Hasterok D., Chapman D.S.* Heat Production and Geotherms for the Continental Lithosphere // *Earth and Planetary Science Letters*. 2011. V. 307. № 1–2. P. 59–70.
8. *Malkovets V.G., Rezyukhin D.I., Belousova E.A., Griffin W.L., Sharygin I.S., Tretiakova I.G., Logvinova A.M.* Cr-rich Rutile: A Powerful Tool for Diamond Exploration // *Lithos*. 2016. V. 265. P. 304–311.
9. *Alifirova T.A., Rezyukhin D.I., Nikolenko E.I., Pokhilenko L.N., Zelenovskiy P.S., Sharygin I.S., Korsakov A.V., Shur V.* Micro-Raman Study of Crichtonite Group Minerals Enclosed into Mantle Garnet // *J. Raman Spectrosc.* 2020. V. 51. P. 1493–1512.
10. *Орсоев Д.А., Канакин С.В., Пахомовский Я.А., Уцаповская З.Ф., Резницкий Л.З.* Минерал состава CuFe₂S₄ из сульфидных медно-никелевых руд Ловозерского месторождения (Кольский полуостров) // *Зап. Рос. минерал. о-ва*. 2015. Т. 144. № 3. С. 70–81.
11. *Ефимова Э.С., Соболев Н.В., Поспелова Л.Н.* Включения сульфидов в алмазах и особенности их парагенеза // *Зап. Всес. минерал. о-ва*. 1983. Т. 112. № 3. С. 300–310.
12. *Lorand J.P., Delpech G., Grégoire M., Moine B., O'Reilly S.Y., Cottin J.Y.* Platinum-group Elements and the Multistage Metasomatic History of Kerguelen Lithospheric Mantle (South Indian Ocean) // *Chemical Geology*. 2004. V. 208(1–4). P. 195–215.
13. *Woodland A.B., Gurnis A.V., Bulatov V.K., Brey G.P., Höfer H.E.* Experimental Study of Sulfur Solubility in

- Silicate–carbonate Melts at 5–10.5 GPa // *Chemical Geology*. 2019. V. 505. P. 12–22.
14. Chowdhury P., Dasgupta R. Sulfur Extraction via Carbonated Melts from Sulfide-bearing Mantle Lithologies—Implications for Deep Sulfur Cycle and Mantle Redox // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2020. V. 269. P. 376–397.
15. Rezvukhin D.I., Malkovets V.G., Sharygin I.S., Tretiakova I.G., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. Inclusions of Crich-tonite-group Minerals in Cr-pyropes from the Internationalnaya Kimberlite Pipe, Siberian Craton: Crystal Chemistry, Parageneses and Relationships to Mantle metasomatism // *Lithos*. 2018. V. 308. P. 181–195.

SULFIDE-BEARING POLYMINERALIC INCLUSIONS IN MANTLE-DERIVED GARNETS FROM LAMPROPHYRES OF THE CHOMPOLO FIELD (CENTRAL ALDAN, SIBERIAN CRATON)

E. I. Nikolenko^{a,b,#,##}, I. S. Sharygin^{a,c}, D. I. Rezvukhin^a, V. G. Malkovets^{a,b,d},
N. S. Tychkov^a, and Academician of the RAS N. P. Pokhilenko^{a,d}

^a Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

^b Geo-Scientific Research Enterprise ALROSA (PJSC), Mirny, Russian Federation

^c Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

^d Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

[#] E-mail: NikolenkoEI@alrosa.ru

^{##} E-mail: nevgeny@igm.nsc.ru

Sulfide-bearing polymineralic inclusions in mantle-derived chromium pyrope garnets of lherzolite paragenesis from lamprophyres of the Chompolo field (Aldan shield, southern Siberian craton) have been studied. The inclusions are composed of either only sulfides or sulfides in association with other minerals (carbonates, silicates, oxides, etc.). The sulfide part of the inclusions is represented by up to four minerals. Among the sulfides, minerals rich in Cu and Ni have been found, whereas ferrous sulfides (pyrrhotite, troilite) are absent. This distinguishes the studied inclusions from the majority of sulfide inclusions in mantle minerals and diamonds, as well as in mantle xenoliths from kimberlites. The formation of polymineralic inclusions in chromium garnets of the Chompolo field is attributed to the effect of a carbonate-silicate metasomatic melt/fluid on mantle peridotites, as evidenced by the mineral suite associated with the sulfides. The research results indicate significant differences in the nature of metasomatic processes that occurred in the lithospheric mantle of the southern and central parts of the Siberian craton.

Keywords: sulfides, mineral inclusions, pyrope, mantle, peridotite, metasomatism, Aldan shield, Siberian craton