

Особенности структуры и состава сульфидов из зоны минерализации контактового типа в породах Мончегорского комплекса

Пшеницын И. В.¹, Арискин А. А.², Грошев Н. Ю.³, Еремин Д. Д.^{1,2}, Соболев С. Н.¹

¹ Институт геохимии и аналитической химии РАН, Москва, lotecsi@gmail.com

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, ariskin@rambler.ru

³ Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, groshev@ksc.ru

Аннотация. Результаты термодинамических расчетов для ультрамафитов Мончегорского массива из скважин М-1 и М-20 демонстрируют, что в первом случае отсутствуют признаки насыщения исходных магм сульфидом, тогда как плагиогарцбургиты и ортопироксениты из скв. М-20 демонстрируют высокие виртуальные температуры сульфидной ликвации 1360–1420 °С, превышающие температуру исходного расплава ≤ 1324 °С (Арискин и др., 2026). Это указывает на пересыщение протокумулясных систем сульфидной серой при $SCSS \leq 0.11$ мас. % и подтверждается обнаружением гнезда сульфидов в ортопироксените. Особенности минералогии и состава этой вкрапленности сопоставляются с результатами изучения сульфидных руд из шахты № 5 на горе Травяная.

Ключевые слова: Термодинамическое моделирование, силикатно-сульфидная несмесимость, состав сульфидов.

Characteristics of the structure and composition of sulfides attributed to a contact type mineralization in basal rocks of the Monchegorsk Complex

Pshenitsyn I. V.¹, Ariskin A. A.², Groshev N. Yu.³, Eremin D. D.^{1,2}, Sobolev S. N.¹

¹ Vernadsky Institute, Moscow, lotecsi@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, ariskin@rambler.ru

³ Geologicheskoye institut, KSC RAS, Apatity, groshev@ksc.ru

Abstract. The results of thermodynamic calculations for ultramafics of Monchegorsk massif from boreholes M-1 and M-20 show that in the first case there are no signs of sulfide saturation of the parental magmas, whereas plagiogabbros and orthopyroxenites from the borehole M-20 reveal high virtual temperatures of model sulfide liquation of 1360–1420 °C, exceeding the temperature of the initial magmatic melt ≤ 1324 °C (Ariskin et al., 2026). This indicates oversaturation of their protocumulate systems with sulfide sulfur at $SCSS \leq 0.11$ wt. %, and it is confirmed by the discovery of a sulfide nest in one orthopyroxenite. The features of mineralogy and composition of this sulfide-rich domain are compared with the results of the study of sulfide ores from Mine No. 5 on Mount Travyanaya.

Keywords: Thermodynamic modeling, silicate-sulfide immiscibility, sulfide compositions.

Введение

Ранее представлены результаты моделирования равновесной кристаллизации ультрамафитов (Арискин и др., 2026), относящихся к Мончегорскому интрузивному комплексу и вскрытых скважинами М-1 и М-20 (Расслоенные интрузии..., 2004; Чашин и др., 2016; Смолькин и др., 2022) (рис. 1).

Эти расчеты проведены при давлении 1 кбар и условиях буфера WM с использованием обновленной «барической» версии модели КОМАГМАТ-5.3, которая позволяет моделировать совместную кристаллизацию силикатных минералов (Ol, Pl, Орх, Са-Срх, пижонит) одновременно с выделением Al-Cr шпинели и несмесимой сульфидной жидкости FeS-NiS состава (Арискин, Бармина, 2000) было установлено, что несмотря на подобие модельных порядков кристаллизации ($Sp + Ol \rightarrow Sp + Ol + Орх \rightarrow Sp + Ol + Орх \pm Pl \pm Срх \pm$ сульфид) в породах обеих локаций существуют определенные отличия в температурах и составах исходных магм. Для тела ультрамафитов их скважины М-1 наиболее примитивная магма отвечает высокомагнезиальному расплаву (~15 мас. % MgO и 51 мас. % SiO₂) в равновесии с оливином ~ Fo 90.5 при температуре ~ 1380 °С. Ассоциации

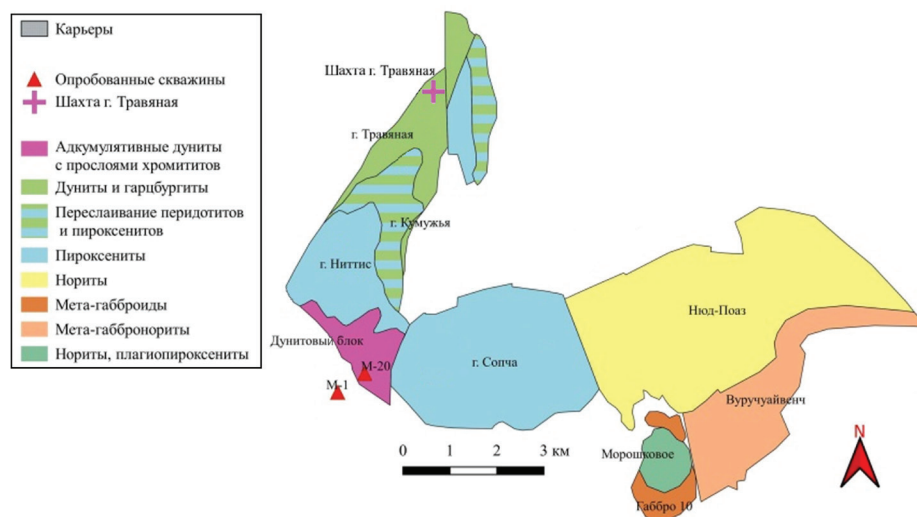


Рис. 1. Схема Мончегорского комплекса (из презентации Соболева С.Н., с упрощениями и дополнениями Пшеницына И. В.). Фиолетовым выделен дунитовый блок, красными треугольниками – скважины М-1 и М-20, фиолетовым крестом – Шахта на горе Травяная (Шахта №5)

Fig. 1. Schematic map of the Monchegorsk complex (from a presentation by S.N. Sobolev, with simplifications and additions by I. V. Pshenitsyn). The dunite block is highlighted in purple, M-1 and M-20 wells are marked with red triangles, and the mine on mount Travyanaya (Mine No. 5) is marked with a purple cross

пород из скв. М-20 несут признаки более кремнекислотной системы: для «линзы дунитов» (Богина и др., 2026) предполагается ~ 19 мас. % MgO и около 56 мас. % SiO₂ в исходном расплаве, отвечающем равновесию с оливином ~ Fo 92 при температуре ~1435 °С; в зоне переслаивания гарцбургитов и ортопироксенитов исходный расплав включал 12.6 мас. % MgO и 57.6 мас. % SiO₂ (оливин ~ Fo 87.5) при температуре 1324 °С.

Важный результат моделирования состоит в том, что плагиогарцбургиты из скв. М1 были недосыщены по сульфидной сере, демонстрируя проявления силикатно-сульфидной несмесимости при температурах ниже ~1200 °С, совпадая или близко началу кристаллизации клинопироксена и плагиоклаза. При этом расчетные оценки SCSS (*Sulfur Concentration at Sulfide Saturation*) варьируют в узком диапазоне 0.05–0.07 мас. % S. Это согласуется с низкими содержаниями серы в породах М-1 (Арискин и др., 2026; табл. 1) и минералогическими исследованиями, которые не позволили обнаружить сколь-нибудь значимых скоплений сульфидов в ультрамафитах М-1.

Результаты моделирования кристаллизации ортопироксенитов и гарцбургитов из скв. М-20 отличаются принципиально. Содержания серы в этих породах вдвое выше, а расчеты траекторий кристаллизации дают высокие температуры начала сульфидной ликвации в диапазоне 1360–1420 °С (рис. 2). При этих максимальных температурах расчетные значения SCSS заметно выше, варьируя от 0.12 до 0.17 мас. % S. В действительности, эти оценки носят виртуальный характер, поскольку реальная температура исходной магмы для этих пород немногим не превышает ~1320 °С (Арискин и др., 2026; табл. 1), что отвечает растворимости сульфидов менее 0.11 мас. % S в расплавах (рис. 2). Эти данные указывают на пересыщение пород сульфидной серой, как результат незначительной, но значимой аккумуляции ранних сульфидных глобуль в интеркумулусном пространстве протокумулусных систем (Пшеницын и др., 2024).

Очевидное подтверждение этому – обнаружение в ортопироксените М-20/723.7 гнезда сульфидов, о котором пойдет речь в данной статье. Другой объект исследований – сульфидные руды из шахты № 5 на г. Травяная (рис. 1). Такое сопоставление интересно в свете аргументов в пользу генетического родства пород из скв. М-20 и базальной зоны северной ветви Мончплутона (Арискин и др., 2026). В том числе, в контексте наблюдений, что сульфидная минерализация контактового типа приурочена к наиболее кремнеземистым породам базальных горизонтов, богатым ортопироксеном – вплоть до ортопироксенитов (Грошев и др., 2022).

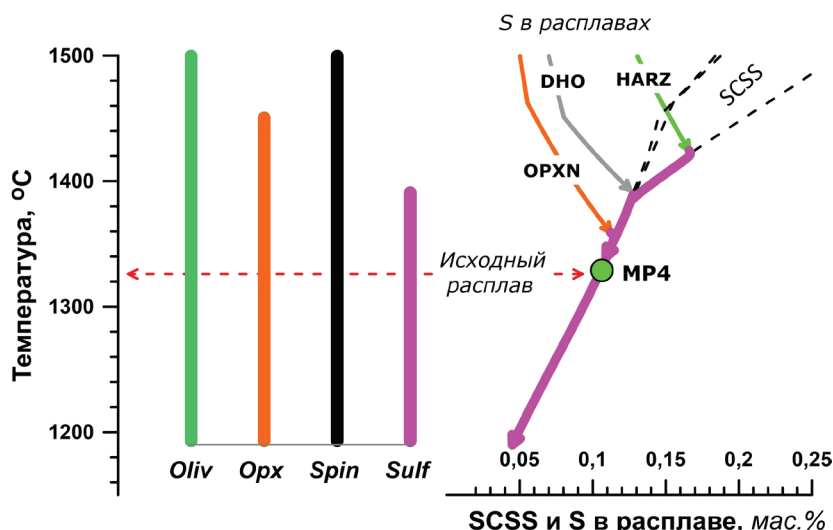


Рис. 2. Последовательность равновесной кристаллизации минералов и температурные зависимости расчетных содержаний серы в расплавах и значений SCSS для гарцбургитов и ортопироксенитов из скважины М-20. Графики отвечают результатам расчетов, приведенных на рис. 2 и в табл. 2 в (Арискин и др., 2026). Соответственно, обозначения OPXN, HARZ и DHO представляют модельные траектории для среднего ортопироксенита, среднего гарцбургита и средневзвешенного состава этих ультрамафитов, подстилающих линзу хромитит-содержащих дунитов. MP4 – вероятный состав магматического расплава в интеркумулусе пород из этой зоны ($T = 1324^\circ\text{C}$, равновесие с оливином $\sim \text{Fo } 87.5$). Последовательность кристаллизации минералов слева относится только составу DHO и результатам при температурах ниже 1500°C

Fig. 2. Mineral crystallization sequence and temperature dependences for S content in melts and SCSS values calculated for harzburgites and orthopyroxenites exposed by the borehole M-20.

The plots are consistent with results of calculations given Fig. 2 and table 2 in (Ariskin et al., 2026). Correspondingly, designations OPXN, HARZ and DHO represent modeled trajectories for the average orthopyroxenite, average harzburgites and the weighted average composition of the whole zone below chromitites-containing lens of dunites. MP4 – probable parental melt in the pore space of the protocumulate system for all rocks from this zone ($T = 1324^\circ\text{C}$, equilibrium with olivine $\sim \text{Fo } 87.5$). Mineral crystallization sequence to the left is attributed only to the DHO composition and the results obtained below 1500°C

Сульфидная минерализация в Дунитовом блоке

В образце М-20/723.7 сульфидная минерализация встречается в массивном среднезернистом ортопироксените (рис. 3 а) в виде небольших межзерновых сегрегаций (до 500 мкм) (рис. 3 б-д), прерывисто связанных между собой тонкой рассеянной сульфидной вкрапленностью (рис. 3 б, д). Значительную роль в составе сульфидов играет пентландит и пирит, которые встречаются в виде взаимных прорастаний (рис. 3 в) различного размера доменов друг в друге. Также встречается пирротин, который больше тяготеет к тонкой вкрапленности, а также изредка халькопирит. С сульфидами ассоциирует биотит, редкие зерна апатита, хромшпинели. В зернах ортопироксена встречаются ламеллы клинопироксена.

Минералогия сульфидных руд из Донной залежи

Изученные образцы отобраны из отвалов шахты № 5 на г. Травяная, которая вскрывает базальную рудоносную зону Северной ветви Мончеплутона (НКТ) мощностью 100 м и входит во вмещающие породы (Расслоенные интрузии..., 2004). В генетическом плане эта зона представляет Краевую группу, сложенную разнообразием плагиоклазсодержащих мафитов и ультрамафитов, включая оливиновые ортопироксениты, безоливиновые плагиоклазовые ортопироксениты, меланократовые нориты, лейкократовые нориты, габбро-нориты и кварц-биотитовые габбронориты (Козлов, 1973).

Сульфидное оруденение крайне неоднородно и подчинено структурным элементам плутона, которые связаны с такситовым характером вмещающей матрицы, переходами одних пород в другие, а также их сложным переслаиванием и развитием пегматоидных разностей. По данным

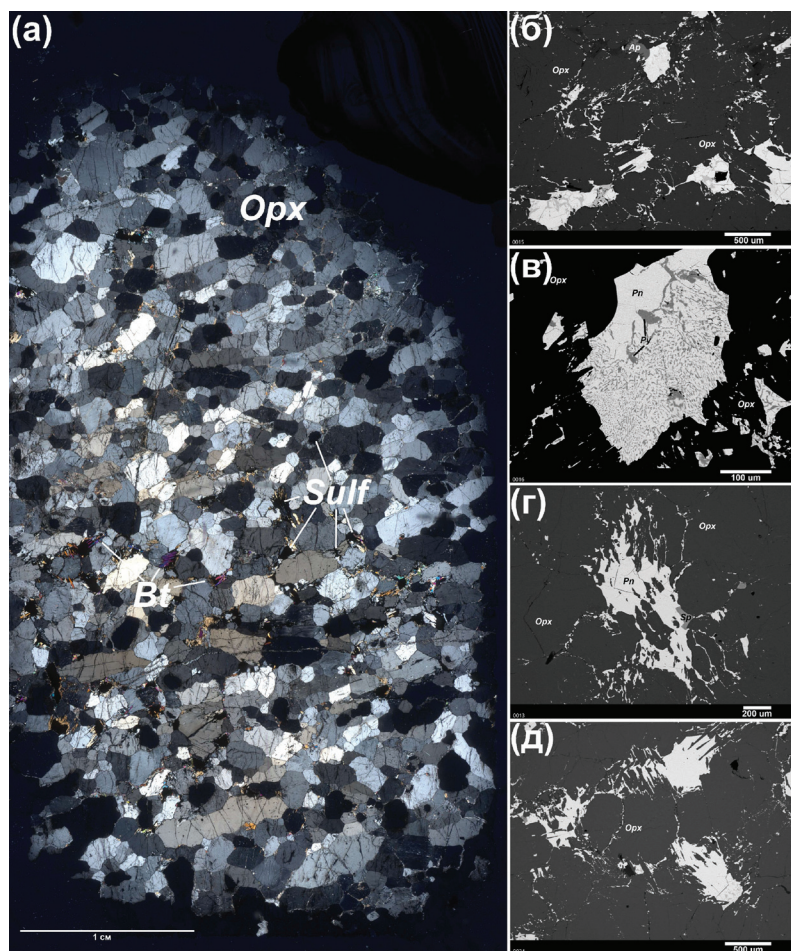


Рис. 3. Сканированное изображение шлифа обр. М-20/723.7 (а) и BSE изображения различных участков с повышенным содержанием сульфидов (б, в, г, д,)

Fig. 3. Scanned image of thin section for the sample M-20/723.7 (a) and BSE images of various areas including elevated amounts of sulfides (b, c, d, e)

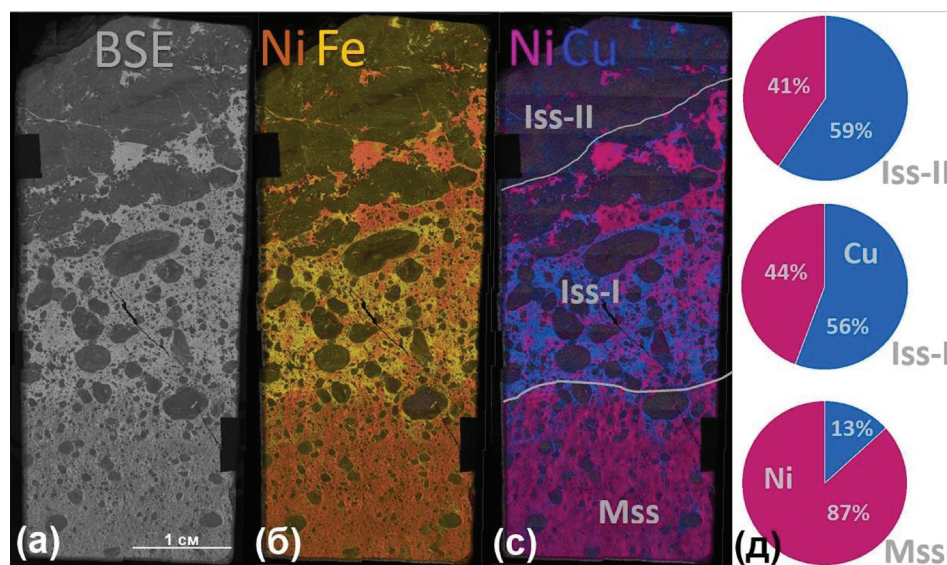


Рис. 4. BSE-изображение аншлифа рудного образца со штольни № 5 (а) и карты распределения элементов в этом участке для никеля и железа (б) и никеля и меди (в); справа – круговые диаграммы для каждого участка руды (д)

Fig. 4. BSE-image of the section of a sulfide ore sample from mine No. 5 (a), and element maps for Ni/Fe (b) and Ni/Cu in the same section ; (c) to the right – three pie charts showing the relative compositions for each ore section (c)

В. С. Докучаевой (Докучаева, 1970), оруденение этого типа сложено главным образом вкрапленностью сульфидов разного размера и густоты, гнездами и жилообразными телами (инъекциями). Размеры вкрапленности варьируют от 0.5–3 до 4–8 мм, гнезд – от 1–5 см до 1.5 м, инъекционных гнездообразных обособлений до нескольких метров по простиранию.

По составу эти руды можно подразделить на два типа: брекчеевидные массивные Mss-руды и прожилково-вкрапленные богатые медью Iss-руды. При этом только в одном образце нами зафиксированы оба типа оруденения в небольшом (аншлиф 1×4 см) объеме породы. Если рассмотреть полную элементную карту данного образца (рис. 4), то по относительным содержаниям Fe, Ni и Cu в нем можно выделяются три зоны: нижняя, наиболее богатая сульфидом (пентландитом и пирротинном) Mss-зона (с соотношением Ni/Cu 87/13 %), средняя, с наиболее крупными ксенолитами пород (где преобладают кубанит, халькопиррит и пентландит) – «Iss-I» зона (с соотношением Ni/Cu 44/56 %), и верхняя зона из бедных прожилково-вкрапленных сульфидов с преобладанием халькопирита, кубанита, пентландита, а также с акцессорным паркеритом ($Ni_3Bi_2S_2$) и ЭПГ – «Iss-II» зона с соотношением Ni/Cu 41/59 %).

Выводы

По результатам термодинамических расчетов в программе КОМАГМАТ для образцов ультрамафитов Мончегорского комплекса из скважин М-1 и М-20 было выяснено, что в первом случае отсутствуют признаки насыщения исходных магм сульфидной серой, в то время как плагиогарцбургиты и ортопироксениты из скважины М-20 демонстрируют высокие виртуальные температуры силикатно-сульфидной несмесимости при 1360–1420 °С, превышающие температуру исходного расплава (≤ 1324 °С). Это указывает на пересыщение протокумулясных систем сульфидной серой при $SCSS \leq 0.11$ мас. % и было подтверждено обнаружением участка вкрапленных сульфидов в ортопироксените. В отличие от данной минерализации, сульфиды донной залежи из Шахты № 5 представляют собой сливные массивно-брекчеевидные руды (преимущественно железо-никелевые) в ассоциации с высокомедистыми прожилково-вкрапленными рудами.

Благодарности

Авторы признательны В. Ф. Смолькину и Г. С. Николаеву за помощь в организации работ на Мончеплутоне и при опробовании кернового материала.

Исследования поддержаны грантом РНФ 25-27-00475 и проведены с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития МГУ им. М. В. Ломоносова. Начальный этап работ по изучению руд г. Травяной реализован в соответствии с госзаданием ГЕОХИ РАН.

Литература

1. Арискин А. А., Бармина Г. С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм / Ред. И. Д. Рябчиков. М. Изд-во: Наука, 2000. 363 с.
2. Арискин А. А., Бычков К. А., Николаев Г. С., Бармина Г. С. Обновленный КОМАГМАТ-5: моделирование эффектов выделения сульфидов при кристаллизации алюмохромистой шпинели // Петрология. 2023. Т. 31, № 5. С. 552–569.
3. Арискин А. А., Еремин Д. Д., Бычков Д. А., Сапегина А. В. Методы моделирования высокобарной кристаллизации мафит-ультрамафитовых магм // Сб.: Материалы IX Всероссийской конференции с международным участием «Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, петрология, рудный потенциал». Екатеринбург. Изд-во: ИГГ УрО РАН: 2025. С. 21–24.
4. Богина М. М., Чистяков А. В., Шарков Е. В., Ковальчук Е. В. Происхождение дунитовой линзы Мончегорского расслоенного ультрамафит-мафитового плутона (Балтийский щит) на основании минералогических и геохимических данных // Петрология. 2026. Т. 34, № 3 (в печати).
5. Грошев Н. Ю., Karykowski В. Т., Арискин А. А., Maier W. D., Barnes S.-J., Припачкин П. В., Рундквист Т. В., Степенников Д. Г., Чернявский А. В., Компанченко А. А., Каулина Т. В., Сущенко А. М. Платинометалльное оруденение контактового типа: от генетических моделей к новым рудным объектам // Тр. Ферсмановской науч. сессии ГИ КНЦ РАН. Апатиты. Изд-во: ГИ КНЦ РАН: 2022. № 19. С. 69–73.

6. Докучаева В. С. Особенности строения и формирования придонной зоны Мончегорского плутона // Материалы по геологии и металлогении Кольского полуострова: Тр. науч. сессии ин-та. Вып. 1. Апатиты. 1970. С. 167–173.
7. Козлов Е. К. Естественные ряды никеленосных интрузий и их металлогения. Л. Изд-во: Наука, 1973. 288 с.
8. Пшеницын И. В., Арискин А. А., Соболев С. Н. Геохимическая термометрия рудоносных габброноритов из апофиза Йоко-Довыренского массива: состав, количество оливина и условия сульфидного насыщения исходной магмы // Петрология. 2024. Т. 32, № 1. С. 119–136.
9. Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение / Ред. Ф. П. Митрофанов, В. Ф. Смолькин. Апатиты. Изд-во: КНЦ РАН, 2004. Ч. 1. 177 с.; Ч. 2. 177 с.
10. Смолькин В. Ф., Мокрушин А. В., Баянова Т. Б., Серов П. А., Арискин А. А. Магмоподводящий палеоканал в Мончегорском рудном районе: геохимия, изотопный U-Pb и Sm-Nd анализ Кольский регион, Россия // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 1–14.
11. Чашин В. В., Баянова Т. Б., Серов П. А. Малосульфидные платинометальные руды палеопротерозойского Мончегорского плутона и массивов его южного обрамления (Кольский полуостров, Россия): Геологическая характеристика и изотопно-геохронологические свидетельства полихронности и рудно-магматических систем // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58, № 1. С. 41–63.