



ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Краткое сообщение

УДК 552.16:552.4:552.13

EDN: JECNPC

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-1-35-43



Сульфидная минерализация в орогенных эклогитах Северо-Муйского блока (северо-восточное Забайкалье): генезис и первые данные об изотопном составе серы

С.Ю. Скузоватов^{a✉}, Ю.И. Тарасова^b

^{a,b}Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия

^bИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Процессам субдукции сопутствуют гидротермальные проявления, в том числе крупные месторождения золота и переходных металлов островодужного и задугового происхождения, а вулканические дуги вмещают большую часть мировых запасов ряда металлических полезных ископаемых. Вместе с тем роль надсубдукционного переноса металлов и сопутствующая роль окислительно-восстановительных процессов в их формировании до сих пор не представляется однозначной и требует прямых исследований сульфидных минералов в высокобарических комплексах, стадийности формирования и сохранности сульфидов в процессе прогрессивного и пикового метаморфизма. С целью характеристики поведения халькофильных элементов в палеозонах континентальной субдукции нами выполнены предварительные минералогические (SEM-EDX) и изотопные (S) исследования сульфидов из эклогитов Северо-Муйского блока (северо-восточное Забайкалье). Сульфидная минерализация пирит-халькопирит-пирротинового состава имеет метасоматическое происхождение, связанное с процессами ретроградного флюидного преобразования исходно «сухих» эклогитовых парагенезисов на стадии эксгумации на ниже-средне-коровые уровни после или синхронно с декомпрессией и формированием плагиоклаз-диопсид±амфиболовых симплектитов (ниже 10–12 Кбар). Крайне неоднородный изотопный состав серы ($\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$) пирита обусловлен разными источниками флюидов, которые могли иметь метаосадочное происхождение (от -8,2 до -6 ‰) в парагенезисовых сегментах Северо-Муйского блока, но могли преимущественно буферироваться гидротермально измененными метабазитами в других (от +0,7 до +7,1 ‰). Альтернативным механизмом могло быть участие единого преимущественно окисленного (сульфатсодержащего) флюида с существенным изотопным фракционированием (до ~15–20 ‰).

Ключевые слова: субдукция, эклогит, флюид, метасоматоз, сульфидная минерализация, изотопный состав серы

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-77-10038, <https://rscf.ru/project/21-77-10038>).

Для цитирования: Скузоватов С.Ю., Тарасова Ю.И. Сульфидная минерализация в орогенных эклогитах Северо-Муйского блока (северо-восточное Забайкалье): генезис и первые данные об изотопном составе серы // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 1. С. 35–43. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-35-43>. EDN: JECNPC.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

Brief report

Sulfide mineralization in orogenic eclogites of the North Muya block (northeastern Transbaikalia): genesis and the first data on the isotopic composition of sulfur

Sergei Yu. Skuzovatov^{a✉}, Yulia I. Tarasova^b

^{a,b}A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

© Скузоватов С.Ю., Тарасова Ю.И., 2024



Abstract. Subduction processes are accompanied by the sites of hydrothermal activity including large deposits of gold and transitional metals of island-arc or back-arc origin, whereas volcanic arcs host most part of the worldwide resources of metallic minerals. However, the role of suprasubduction metal transfer and the associated role of redox processes in their formation are still ambiguous and require direct studies of sulfide mineralization in high-pressure rocks, as well as their formation stages and sulfide preservation during progressive and peak metamorphism. In order to describe the behavior of chalcophile elements in the paleozones of continental subduction we performed preliminary mineralogical (SEM-EDX) and isotope (S) studies of sulfides in the North Muya block eclogites (northeastern Transbaikalia). Sulfide mineralization of pyrite-chalcopyrite-pyrrhotite composition has a metasomatic origin associated with the retrograde fluid transformation of initially “dry” eclogite assemblages during exhumation to lower- or mid-crust levels after or synchronously to the decompression and formation of plagioclase-diopside±amphibole symplectites (below 10-12 kbar). Extremely heterogeneous isotopic composition of pyrite sulfur ($\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$) was caused by various sources of fluids of presumably metasedimentary origin (from -8.2 to -6 ‰) in the paragneiss segments of the North Muya block. But they also could be predominantly buffered by hydrothermally altered metabasites (from +0.7 to +7.1 ‰). An alternative mechanism could be the participation of a single predominantly oxidized (sulfate-containing) fluid with the significant isotopic fractionation (up to ~15–20‰).

Keywords: subduction, eclogite, fluid, metasomatism, sulfide mineralization, sulfur isotopic composition

Funding: The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 21-77-10038, <https://rscf.ru/project/21-77-10038>).

For citation: Skuzovatov S.Yu., Tarasova Yu.I. Sulfide mineralization in orogenic eclogites of the North Muya block (northeastern Transbaikalia): genesis and the first data on the isotopic composition of sulfur. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(1):35-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-35-43>. EDN: JECNPC.

Введение

Зоны субдукции представляют собой обстановки длительного химического рециклинга между геосферами Земли. Метаморфогенные флюиды, являющиеся результатом прогрессивной регидратации погружающегося слэба, играют ключевую роль в массопереносе при рециклировании корового субстрата и летучих компонентов в мантию и инициацию над-субдукционного вулканизма [1]. В частности, процессам субдукции сопутствуют гидротермальные проявления, в том числе крупных месторождений золота и переходных металлов островодужного и задугового происхождения, а вулканические дуги вмещают большую часть мировых запасов основных (медь, олово, сурьма, молибден) и благородных (золото, серебро) металлов [2, 3]. Вместе с тем роль над-субдукционного переноса металлов и сопутствующая роль окислительно-восстановительных агентов (к примеру, серы) в формировании месторождений и рудопроявлений до сих пор представляются однозначными. В связи с этим в последние десятилетия значительно вырос объем данных изучения состава сульфидных минералов [4–10] и изотопных характеристик серы сульфидов, наблюдаемых в высокобарических комплексах (метаосадочные породы, метабазиты, серпентиниты), стадийности формирования и сохранности сульфидов в процессе прогрессивного и пикового метаморфизма. В то же время большинство подобных работ посвящено хорошо изученным палеоокеаническим комплексам (например, исследования [9, 10]).

С целью характеристики поведения халькофильных элементов и ряда иных металлов и неметаллов, свойственных для сульфидных фаз в высокобарических комплексах континентального происхождения, выполнены предварительные минералогические (SEM-EDX) и изотопные (S) исследования сульфидов из эклогитов Северо-Муйского блока (северо-восточное Забайкалье) [11, 12].

Материалы и методы исследования

Предварительные минералого-петрографические исследования показали, что значимые количества сульфидных фаз наблюдаются в эклогитах участка р. Илеир (южная часть Северо-Муйского блока), в различной степени затронутой ретроградной амфиболизацией, хлоритизацией и окварцеванием [12], тогда как наиболее свежие и амфиболизированные эклогиты основного эклогитового пояса (участок р. Илеир) обнаруживают лишь следовые количества сульфидных фаз или вовсе их отсутствие. Для исследования были выбраны шесть образцов метабазитов: три образца типичных симплектитовых эклогитов с первичным омфацитом, полностью замещенным плагиоклаз-диопсид-амфиболовым симплектитовым агрегатом, и локальным развитием ретроградной амфиболизации; два образца эклогитов схожего типа, но с значительной степенью амфиболизации (порфиробластовый кальциево-натриевый и кальциевый амфибол, кальциевые амфиболы в симплектите



и в каймах обрастания граната), один образец эклогита, ретроградно преобразованного до состояния эпидотового амфиболита (таблица).

Петрографические характеристики в полированных шлифах исследованы с использованием поляризационного микроскопа Zeiss Axiolab, детальный анализ ассоциаций сульфидных минералов и микроструктур – с использованием микроскопа Olympus BX-53. Идентификация фаз и их полуколичественный анализ выполнены с применением сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMH, оснащенного системой энергодисперсионного анализа AztecLive Advanced Ultim Max 40 system (Oxford Instruments Analytical Ltd.) в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) [13].

Для исследования изотопного состава серы были отобраны минеральные монофракции пирита максимальной крупности для каждого образца (преимущественно 0,16–0,25 мм в симплектитовых эклогитах, до 0,5 мм в существенно преобразованных метабазах). Исследования навесок ~10 мг проведены в Центре коллективного пользования «Мульти-элементных исследований» Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск) на масс-спектрометре Finnigan MAT Delta V Advantage. Точность и воспроизводимость результатов контролировались повторными измерениями стандартов IAEA-S-1 (сульфид серебра, $\delta^{34}\text{S} = -0,3$), IAEA-S-2 (сульфид серебра, $\delta^{34}\text{S} = +22,7$), IAEA-S-3 (сульфид серебра, $\delta^{34}\text{S} = -32,3$) и NBS-123 (сфалерит, $\delta^{34}\text{S} = +17,4$). Воспроизводимость результатов по неизвестным образцам – в пределах 0,1 ‰ (2 σ), данные приведены в величинах $\delta^{34}\text{S}$ относительно стандарта CDT (Canyon Diablo Troilite).

Результаты исследования и их обсуждение

Сульфидная минерализация в эклогитах представлена преимущественно рассеянным

пиритом в виде отдельных зерен размером от первых десятков-сотни микрон до первых миллиметров, от ксеноморфных и округлых выделений (прежде всего в симплектитовых эклогитах) до идиоморфных крупных кристаллов (наиболее характерно для амфиболитизированных эклогитов и амфиболита), зачастую с обильными пойкилитовыми включениями (рис. 1, 2). Рассеянная минерализация пространственно приурочена к интерстициям между породообразующими силикатами и часто ассоциирует с титан-содержащими фазами эклогитов (рутилом, ильменитом и титанитом), в ряде случаев – со структурами их замещения (рутил-ильменит, ильменит-титанит; см. рис. 1, *d*; 2, *b–g*). В амфиболите по эклогу крупные идиобласты пирита наблюдаются в карбонатных (кальцитовых) обособлениях (см. рис. 2, *j*). В качестве самостоятельной фазы и в виде сростаний с пиритом присутствует ксеноморфный интерстициальный халькопирит (см. рис. 1, *a, d, h*; 2, *a*), который, однако, чаще наблюдается в виде включений и вростков (?) в пирите-хозяине (см. рис. 1, *b, d, e, f*; 2, *d, f, g, i, j*), причем при частичном замещении/разложении пирита характерные структуры халькопирита в пирите сохраняются (см. рис. 2, *f*). Более редок в качестве самостоятельной фазы пирротин (см. рис. 1, *a, h*; 2, *a, b, h*); в наименее амфиболитизированных симплектитовых эклогитах он наблюдается в качестве отдельных субидиоморфных зерен и ксеноморфных выделений (см. рис. 1, *a, h*), а также реликтов среди продуктов замещения с сидеритом (см. рис. 2, *e*), а в существенно измененных эклогитах не обнаружен. Единожды, в образце симплектитового эклогита Му-12-6, обнаружен сфалерит/вюрцит (см. рис. 2, *b*). По первичным сульфидам (прежде всего пириту) развиваются гидроокислы железа (см. рис. 1, *c*; 2, *l*), нукундамит (см. рис. 2, *g, h*), смитит. Крупные субидиоморфные и идиоморфные зерна пирита повсеместно содер-

Изотопный состав серы пирита из эклогитов Северо-Муйского блока Isotopic composition of pyrite sulfur from the North Muya block eclogites

Образец	Структурно-текстурный тип	$\delta^{34}\text{S}$, ‰
Му-12-6	Симплектитовый, слабо амфиболитизированный эклогит	-7,4
Му-12-9		-6
Му-12-10		-8,2
Му-13-3'	Умеренно амфиболитизированный эклогит	+1,6
Му-13-5b		+0,7
Му-13-21	Апоэклогитовый амфиболит	+7,1



жат включения силикатных, прежде всего водосодержащих ретроградных фаз (амфибол, эпидот), реже – граната, а также титаносодержащих фаз (преимущественно титанита, реже – рутила) (к примеру, см. рис. 2, *к*), а также барит (см. рис. 2, *с*), распространение которого фиксируется на EDX-картах пирита.

Полученные значения $\delta^{34}\text{S}$ для шести монофракций пирита обнаруживают значительную неоднородность по изотопному составу (см. таблицу). Для трех образцов симплектитовых эклогитов слабой степени амфиболизации получены единообразные отрицательные величины $\delta^{34}\text{S}$ в диапазоне от -8,2 до -6‰, тогда как для заметно регидратированных разностей

значения $\delta^{34}\text{S}$ варьируются от слабо положительных (+0,7 и +1,8‰) до умеренно высоких (+7,1‰).

В условиях дефицита метаморфогенных флюидов сульфиды (в частности, пирит) способны сохранять элементный и изотопный состав вплоть до условий эклогитовой и гранулитовой фации [6, 14, 15]. Однако отсутствие ассоциаций сульфидных или сульфидно-силикатных фаз во включениях в гранате [4], а также характер выделения сульфидной минерализации (преимущественно крупный идиоморфный пирит в ассоциации с халькопиритом/пирротинном, с нукундамитом, смититом, окислами и гидроокислами железа)

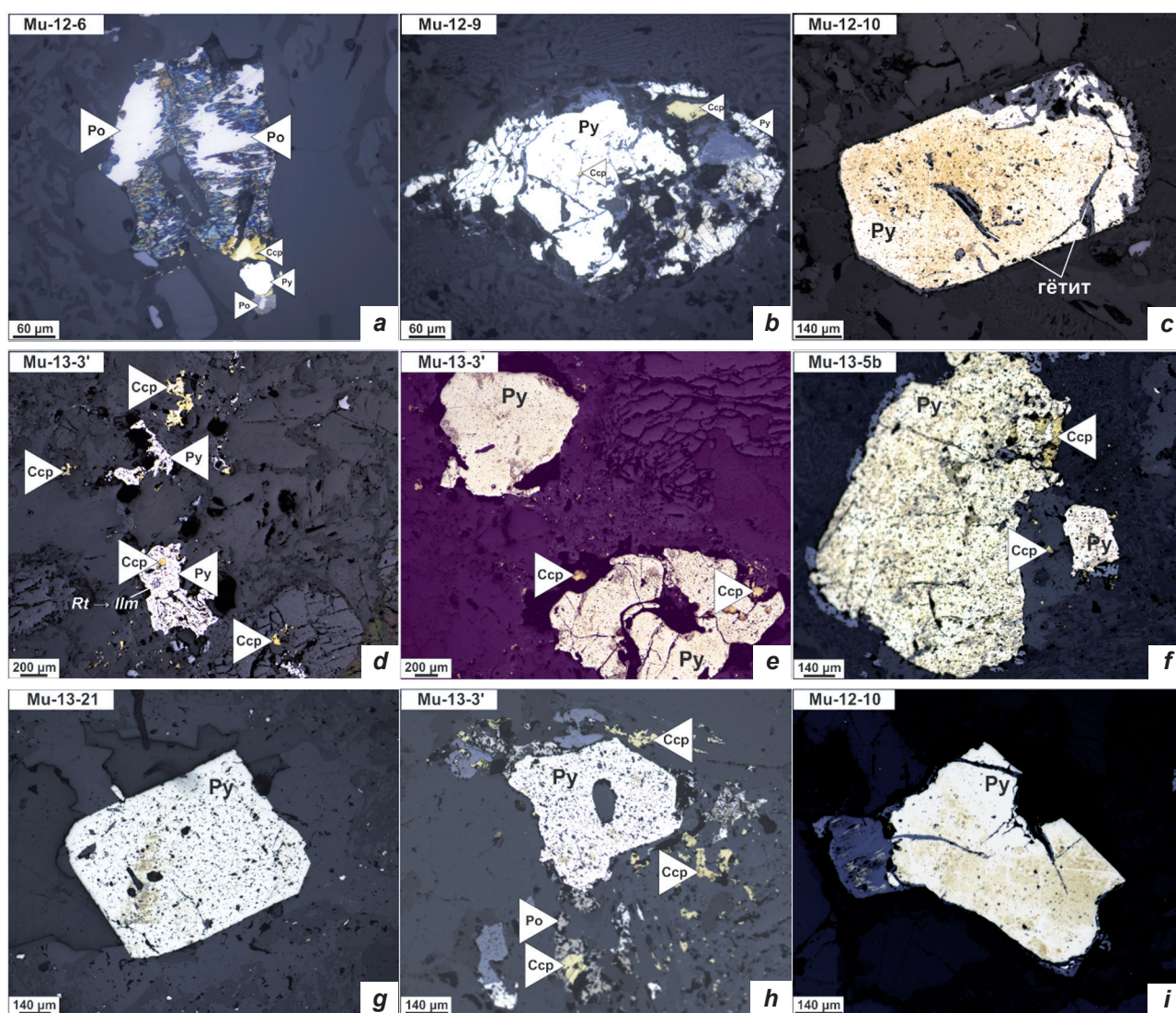


Рис. 1. Типовые ассоциации сульфидных минералов в симплектитовых и амфиболизированных эклогитах и их взаимоотношения с породообразующими силикатами и акцессорными оксидными минералами (фотографии в отраженном свете)

Po – пирротин; *Ccp* – халькопирит; *Py* – пирит; *Rt* – рутил; *Ilm* – ильменит

Fig. 1. Typical assemblages of sulfide minerals in symplectitic and amphibolized eclogites and their relationships with rock-forming silicates and accessory oxide phases (reflected-light photomicrographs)

Po – pyrrhothite; *Ccp* – chalcopyrite; *Py* – pyrite; *Rt* – rutile; *Ilm* – ilmenite

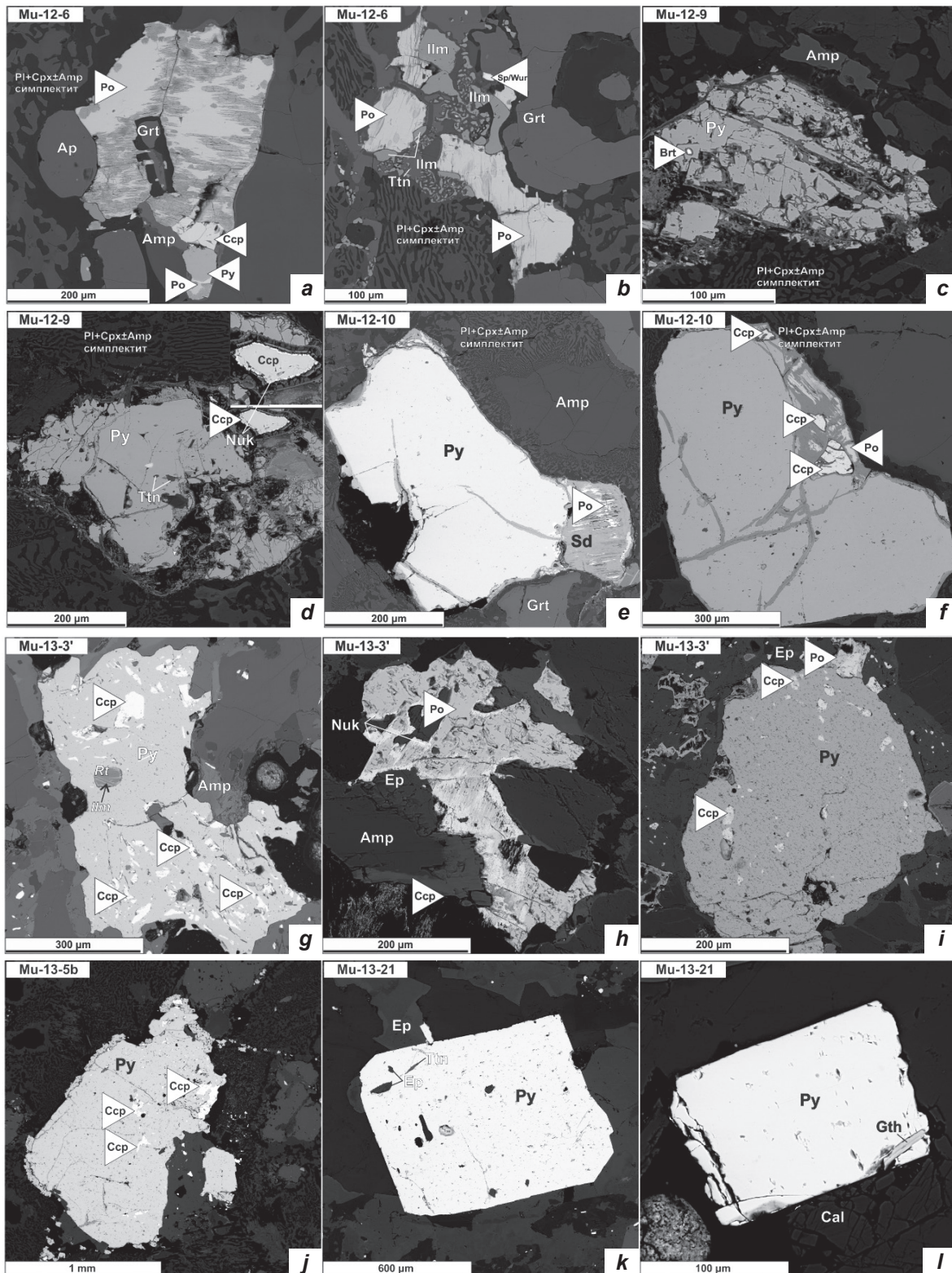


Рис. 2. Типовые ассоциации сульфидных минералов в симплектитовых и амфиболизированных эклогитах и их взаимоотношения с породообразующими силикатами и акцессорными оксидными минералами (микрофотографии в режиме обратно рассеянных электронов)

Po – пирротин; Ccp – халькопирит; Py – пирит; Rt – рутил; Ilm – ильменит; Ap – апатит; Grt – гранат; Amp – амфибол; Ttn – титанит; Sp/Wur – сфалерит/вюрцит; Pl-Cpx – плагиоклаз-клинопироксеновый симплектит; Brt – барит; Nuk – нукундамит; Sd – сидерит; Ep – эпидот; Gth – гетит; Cal – кальцит

Fig. 2. Typical assemblages of sulfide minerals in symplectitic and amphibolized eclogites and their relationships with rock-forming silicates and accessory oxide phases (backscattered electron images)

Po – pyrrhothite; Ccp – chalcopyrite; Py – pyrite; Rt – rutile; Ilm – ilmenite; Ap – apatite; Grt – garnet; Amp – amphibole; Ttn – titanite; Sp/Wur – sphalerite/wurtzite; Pl-Cpx – plagioclase-clinopyroxene symplectite; Brt – barite; Nuk – nukundamite; Sd – siderite; Ep – epidote; Gth – goethite; Cal – calcite



указывают на ретроградный и, таким образом, гидротермально-метасоматический генезис сульфидов в эклогитах. Парагенезис минеральных включений (пиковые рутил и гранат, ретроградные эпидот, амфибол и титанит), обнаруженный в пирите и других сульфидах, а также отсутствие ассоциаций зеленосланцевой фации как в самих сульфидах, так и в матриксе пород, предполагают формирование сульфидов после достижения пика метаморфизма. Нукундамит наряду с ковеллином может быть частью проградных парагенезисов (к примеру, лавсонитовых голубых сланцев и эклогитов [4]), однако устойчив в ограниченном диапазоне фугитивности серы ($\sim 0,4$ логарифмических единицы f_{S_2}) и не устойчив в более высокоградных условиях (диапазон $\sim 430\text{--}500$ °C) и при высоких давлениях, подвергаясь десульфидизации до пирита и борнита/халькопирита. Образование нукундамита, таким образом, дополнительно ограничивает условия основной пирит-халькопирит-пирротиновой минерализации температурами от ~ 600 °C (ниже максимума при погружении пород и максимальная температура устойчивости пирита [16]) до ~ 430 °C и при декомпрессии как минимум до 10–12 Кбар. Не исключается, однако, что часть сульфидов, прежде всего пирротин-халькопиритовых парагенезисов, имеет первичное (проградное происхождение) и могла не претерпеть рекристаллизацию в силу ограниченной доступности флюидов [12]. В общем случае флюиды в равновесии с типичными метабазами, генерируемые при дегидратации водосодержащих фаз (лавсонита, эпидота, амфибола), могут содержать не более 1 % S [17, 18] и, таким образом, должны иметь незначительный эффект на первичные сульфиды.

В различной степени положительные значения $\delta^{34}\text{S}$ ранее неоднократно приводились для метаморфогенных сульфидов из высокобарических метабазитов [5, 6, 9], однако значения от нулевых до отрицательных наблюдались ранее прежде всего для сульфидов из метаосадочных пород. Дж.Б. Уолтерс с соавторами [9] предложил, что такой значительный диапазон, включающий сильно отрицательные величины $\delta^{34}\text{S}$, должен быть продуктом метасоматического, нежели метаморфогенного, происхождения сульфидов из эволюционирующего, преимущественно окисленного (сульфатсодержащего), флюида. Дан-

ное предположение согласуется с нашими наблюдениями включений (а также потенциально более распространенных микровключений того же барита) в сульфидах, но не исключает возможности участия восстановленных (содержащих H_2S и/или HS^-) флюидов, буферизуемых субстратом метабазитов. На данном этапе представляется более вероятным, что неоднородный изотопный состав серы контролируется разными источниками флюидов, которые вероятно имели метаосадочное происхождение ($-8,2$ до -6 ‰) в преимущественно парагенезисовых сегментах Северо-Муйского блока, но могли иметь смешанную природу или преимущественно локально буферизовались метабазами в других ($+0,7$ и $+1,8$ ‰) до умеренно высоких ($+7,1$ ‰). Возможность участия в формировании минерализации контрастных по составу флюидов могла в таком случае определяться их генерацией на разных уровнях литосферы [19] или тектоническим совмещением различных по литологии сегментов континентальной коры.

Заключение

Сульфидная минерализация в орогенных эклогитах континентального типа Северо-Муйского блока имеет метасоматическое происхождение, связанное с процессами ретроградного флюидного преобразования исходно «сухих» эклогитовых парагенезисов на стадии эксгумации на ниже-среднекоровые уровни после или синхронно с декомпрессией и формированием плагиоклаз-диопсид±амфиболовых симплектитов (ниже 10–12 Кбар). Сульфидная минерализация в эклогитах имеет пирит-халькопиритовый состав с подчиненным количеством пирротина. Крайне неоднородный изотопный состав серы ($\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$) пирита контролируется разными источниками флюидов, которые вероятно имели метаосадочное происхождение (от $-8,2$ до -6 ‰) в преимущественно парагенезисовых сегментах Северо-Муйского блока, но могли преимущественно буферизоваться составом гидротермально измененных метабазитов в других (от $+0,7$ до $+7,1$ ‰). Альтернативным механизмом, объясняющим вариации $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$, может быть участие единого эволюционирующего по составу преимущественно окисленного (сульфатсодержащего) флюида, для которого факторы изотопного фракционирования в паре сульфат-сульфид при ~ 500 °C могут достигать $\sim 15\text{--}20$ ‰. Таким образом, изотопный состав



серы может быть прямым индикатором неоднородного строения Северо-Муйского блока на глубинных уровнях с различными пропор-

циями эксгумированного метабазитового субстрата или степени эволюции состава флюидов.

Список источников

1. Bebout G.E. The impact of subduction-zone metamorphism on mantle-ocean chemical cycling // *Chemical Geology*. 1995. Vol. 126. Iss. 2. P. 191–218. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00118-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00118-5).
2. Cooke D.R., Simmons S.F. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits // *Society of Economic Geologists*. 2000. Vol. 13. P. 221–244. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.06>.
3. Sillitoe R.H. Major gold deposits and belts of the North and South American Cordillera: distribution, tectonomagmatic settings, and metallogenic considerations // *Economic Geology*. 2008. Vol. 103. Iss. 4. P. 663–687. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.103.4.663>.
4. Brown J.L., Christy A.G., Ellis D.J., Arculus R.J. Prograde sulfide metamorphism in blueschist and eclogite, New Caledonia // *Journal of Petrology*. 2014. Vol. 55. Iss. 3. P. 643–670. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu002>.
5. Crossley R.J., Evans K.A., Jeon H., Kilburn, M.R. Insights into sulfur cycling in subduction zones from in-situ isotope analysis of sulphides in high-pressure serpentinites and 'hybrid' samples from Alpine Corsica // *Chemical Geology*. 2018. Vol. 493. P. 359–378. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.06.014>.
6. Evans K.A., Tomkins A.G., Cliff J., Fiorentini M.L. Insights into subduction zone sulfur recycling from isotopic analysis of eclogite-hosted sulfides // *Chemical Geology*. 2014. Vol. 365. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.11.026>.
7. Li J.-L., Klemd R., Huang G.-F., Ague J.J., Gao J. Unravelling slab $\delta^{34}\text{S}$ compositions from in-situ sulphide $\delta^{34}\text{S}$ studies of high-pressure metamorphic rocks // *International Geology Review*. 2021. Vol. 63. Iss. 1. P. 109–129. <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1827305>.
8. Li J.L., Schwarzenbach E.M., John T., Ague J.J., Huang F., Gao J., et. al. Uncovering and quantifying the subduction zone sulfur cycle from the slab perspective // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. P. 514. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14110-4>.
9. Walters J.B., Cruz-Uribe A.M., Marschall H.R. Isotopic compositions of sulfides in exhumed high-pressure terranes: implications for sulfur cycling in subduction zones // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2019. Vol. 20. <https://doi.org/10.1029/2019GC008374>.
10. Walters J.B., Cruz-Uribe A.M., Marschall H.R., Boucher B. The role of sulfides in the chalcophile and siderophile element budget of the subducted oceanic crust // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2021. Vol. 304. P. 191–215. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.04.016>.
11. Skuzovатов S.Yu., Shatsky V.S., Wang K.-L. Continental subduction during arc-microcontinent collision in the southern Siberian craton: constraints on protoliths and metamorphic evolution of the North Muya complex eclogites (Eastern Siberia) // *Lithos*. 2019. Vol. 342–343. P. 76–96. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.022>.
12. Skuzovатов S.Yu. Differential fluid activity in a single exhumed continental subduction unit from local P-T-M(H_2O) records of zoned amphiboles (North Muya, Eastern Siberia) // *Minerals*. 2022. Vol. 12. Iss 2. P. 217. <https://doi.org/10.3390/min12020217>.
13. Скузоватов С.Ю., Белозерова О.Ю., Васильева И.Е., Зарубина О.В., Канева Е.В., Сокольникова Ю.В. [и др.]. Центр коллективного пользования «изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН: современное состояние методов изучения вещества на микро- и макроуровне // *Геодинамика и тектонофизика*. 2022. Т. 13. № 2. С. 585. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0585>. EDN: JWAGUK.
14. Craig J.R., Vokes F.M. The metamorphism of pyrite and pyritic ores: an overview // *Mineralogical Magazine*. 1993. Vol. 57. P. 3–18. <https://doi.org/10.1180/minmag.1993.057.386.02>.
15. Acken D.V., Su W., Gao J., Creaser R.A. Preservation of Re-Os isotope signatures in pyrite throughout low-T, high-P eclogite facies metamorphism // *Terra Nova*. 2014. Vol. 26. P. 402–407. <https://doi.org/10.1111/ter.12113>.
16. Hill R.E.T. Experimental study of phase relation at 600C in a portion of the Fe-Ni-Cu-S system and its application to natural sulphide assemblages // *Sulphide deposits in mafic and ultramafic rocks* / eds D.L. Buchanan, M.J. Jones. London: The Institution of Mining and Metallurgy, 1984. P. 14–21.
17. Connolly J.A.D., Cesare B. C-O-H-S fluid composition and oxygen fugacity in graphitic metapelites // *Journal of Metamorphic Geology*. 1993. Vol. 11. P. 379–388. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1993.tb00155.x>.
18. Tomkins A.G. Windows of metamorphic sulfur liberation in the crust: implications for gold deposit genesis // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2010. Vol. 74. P. 3246–3259. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.03.003>.
19. Tomkins A.G., Evans K.A. Separate zones of sulfate and sulfide release from subducted mafic oceanic crust // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. Vol. 428. P. 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.07.028>.

References

1. Bebout G.E. The impact of subduction-zone metamorphism on mantle-ocean chemical cycling. *Chemical Geology*. 1995;126(2):191-218. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00118-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00118-5).
2. Cooke D.R., Simmons S.F. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. *Society of Economic Geologists*. 2000;13:221-244. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.06>.



3. Sillitoe R.H. Major gold deposits and belts of the North and South American Cordillera: distribution, tectonomagmatic settings, and metallogenic considerations. *Economic Geology*. 2008;103(4):663-687. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.103.4.663>.
4. Brown J.L., Christy A.G., Ellis D.J., Arculus R.J. Prograde sulfide metamorphism in blueschist and eclogite, New Caledonia. *Journal of Petrology*. 2014;55(3):643-670. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu002>.
5. Crossley R.J., Evans K.A., Jeon H., Kilburn, M.R. Insights into sulfur cycling in subduction zones from in-situ isotope analysis of sulphides in high-pressure serpentinites and 'hybrid' samples from Alpine Corsica. *Chemical Geology*. 2018;493:359-378. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.06.014>.
6. Evans K.A., Tomkins A.G., Cliff J., Fiorentini M.L. Insights into subduction zone sulfur recycling from isotopic analysis of eclogite-hosted sulfides. *Chemical Geology*. 2014;365:1-19. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.11.026>.
7. Li J.-L., Klemm R., Huang G.-F., Ague J.J., Gao J. Unravelling slab $\delta^{34}\text{S}$ compositions from in-situ sulphide $\delta^{34}\text{S}$ studies of high-pressure metamorphic rocks. *International Geology Review*. 2021;63(1):109-129. <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1827305>.
8. Li J.L., Schwarzenbach E.M., John T., Ague J.J., Huang F., Gao J., et. al. Uncovering and quantifying the subduction zone sulfur cycle from the slab perspective. *Nature Communications*. 2020;11:514. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14110-4>.
9. Walters J.B., Cruz-Urbe A.M., Marschall H.R. Isotopic compositions of sulfides in exhumed high-pressure terranes: implications for sulfur cycling in subduction zones. *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2019;20. <https://doi.org/10.1029/2019GC008374>.
10. Walters J.B., Cruz-Urbe A.M., Marschall H.R., Boucher B. The role of sulfides in the chalcophile and siderophile element budget of the subducted oceanic crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2021;304:191:215. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.04.016>.
11. Skuzovatov S.Yu., Shatsky V.S., Wang K.-L. Continental subduction during arc-microcontinent collision in the southern Siberian craton: constraints on protoliths and metamorphic evolution of the North Muya complex eclogites (Eastern Siberia). *Lithos*. 2019;342-343:76-96. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.022>.
12. Skuzovatov S.Yu. Differential fluid activity in a single exhumed continental subduction unit from local P-T-M(H_2O) records of zoned amphiboles (North Muya, Eastern Siberia). *Minerals*. 2022;12(2):217. <https://doi.org/10.3390/min12020217>.
13. Skuzovatov S.Yu., Belozerova O.Yu., Vasil'eva I.E., Zarubina O.V., Kaneva E.V., Sokolnikova Yu.V., et. al. Centre of isotopic and geochemical research (IGC SB RAS): current state of micro- and macroanalysis. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2022;13(2):585. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0585>. EDN: JWAGUK.
14. Craig J.R., Vokes F.M. The metamorphism of pyrite and pyritic ores: an overview. *Mineralogical Magazine*. 1993;57:3-18. <https://doi.org/10.1180/minmag.1993.057.386.02>.
15. Acken D.V., Su W., Gao J., Creaser R.A. Preservation of Re-Os isotope signatures in pyrite throughout low-T, high-P eclogite facies metamorphism. *Terra Nova*. 2014;26:402-407. <https://doi.org/10.1111/ter.12113>.
16. Hill R.E.T. Experimental study of phase relation at 600C in a portion of the Fe-Ni-Cu-S system and its application to natural sulphide assemblages. In: Buchanan D.L., Jones M.J. (eds). *Sulphide deposits in mafic and ultramafic rocks*. London: The Institution of Mining and Metallurgy; 1984, p. 14-21.
17. Connolly J.A.D., Cesare B. C-O-H-S fluid composition and oxygen fugacity in graphitic metapelites. *Journal of Metamorphic Geology*. 1993;11:379-388. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1993.tb00155.x>.
18. Tomkins A.G. Windows of metamorphic sulfur liberation in the crust: implications for gold deposit genesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2010;74:3246-3259. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.03.003>.
19. Tomkins A.G., Evans K.A. Separate zones of sulfate and sulfide release from subducted mafic oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*. 2015;428:73-83. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.07.028>.

Информация об авторах / Information about the authors



Скузоватов Сергей Юрьевич,

кандидат геолого-минералогических наук,
заместитель директора по научной работе,
старший научный сотрудник лаборатории геохимии изотопов,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,

✉ skuzovatov@igc.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2253-6020>

Sergei Yu. Skuzovatov,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Deputy Director for Research,
Senior Researcher of the Laboratory of Isotope Geochemistry,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,

✉ skuzovatov@igc.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2253-6020>



Тарасова Юлия Игоревна,

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования
и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
старший научный сотрудник департамента рудной геологии,
Институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
j.tarasova84@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8741-9645>

Yulia I. Tarasova,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation
and Geochemical Prospecting Methods,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Senior Researcher of the Ore Geology Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
j.tarasova84@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8741-9645>

Вклад авторов / Contribution of the authors

С.Ю. Скузоватов – получение грантовой поддержки, планирование и проведение исследований, подготовка и редактирование материалов статьи.

Ю.И. Тарасова – проведение исследований, подготовка и редактирование материалов статьи.

Sergei Yu. Skuzovатов was responsible for funding acquisition, planning and carrying out the research, manuscript preparation and revision.

Yulia I. Tarasova carried out the research, prepared and edited the manuscript.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article / Информация о статье

Статья поступила в редакцию 26.02.2024; одобрена после рецензирования 11.03.2024; принята к публикации 22.03.2024.

The article was submitted 26.02.2024; approved after reviewing 11.03.2024; accepted for publication 22.03.2024.