УДК 553.48+553.21/24

Условия образования благороднометальной минерализации в сульфидных кобальт-медно-никелевых рудах Камчатки (на примере рудопроявления Аннабергитовая Щель)

Р.М.НОВАКОВ[1]✉, **В.Е.КУНГУРОВА**[1], **С.В.МОСКАЛЕВА**[2]
[1] *Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия*
[2] *Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Новаков Р.М. Условия образования благороднометальной минерализации в сульфидных кобальт-медно-никелевых рудах Камчатки (на примере рудопроявления Аннабергитовая Щель) / Р.М.Новаков, В.Е.Кунгурова, С.В.Москалева // Записки Горного института. 2021. Т. 248. С. 209-222. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.5

Аннотация. Представлены результаты исследований, целью которых является изучение особенностей благороднометальной минерализации и ее генезиса в сульфидных кобальт-медно-никелевых рудах Камчатской никеленосной провинции. Статья посвящена одному из ее многочисленных рудопроявлений под названием Аннабергитовая Щель. Исследован вещественный состав минералов платиноидов, серебра, золота, висмута и теллура, а также сульфоарсенидов в рудах этого проявления. На основе данных о последовательности минералообразования, с привлечением геосенсоров сделаны выводы о генезисе благороднометальной минерализации. Формирование минералов платиноидов, серебра и золота на рудопроявлении Аннабергитовая Щель в основном связано с эпигенетическим воздействием пострудных гранитоидов на породы рудоносной интрузии дукукского комплекса кортландит-норитовой формации и сингенетические руды. Ранняя ассоциация минералов благородных металлов представлена сперрилитом, ирарситом и редкими неназванными фазами Pt + Ir + Te. Ирарсит и фазы Pt + Ir + Te сформировались на контактово-метасоматическом этапе. Для сперрилита можно предполагать магматическое происхождение. На позднем, гидротермально-метасоматическом этапе образовались сульфиды и теллуриды серебра, висмутотеллуриды серебра и палладия, а также самородное золото. Условия возникновения минеральных парагенезисов, связанных с благороднометальной минерализацией, соответствуют формированию метасоматических пород малых глубин (≤5 км). Неполнопроявленные кварц-полевошпатовые метасоматиты, с которыми связано образование ранних арсенидов и сульфоарсенидов платиноидов, равновесны с растворами, близкими к нейтральным (pH 4,5-6,5) при температурах 350-600 °С. Поздняя гидротермальная ассоциация с минералами Pd, Ag и Au близка к пропилитам и формировалась при pH 4,5-6,5 и температуре 150-350 °С.

***Ключевые слова*:** Камчатка; кортландит-норитовая формация; сульфидные медно-никелевые руды; условия минералообразования; элементы платиновой группы; золото

Введение. Сульфидные медно-никелевые руды представляют собой не только сырье для производства цветных металлов, но и являются одним из важных источников платиноидов [10, 13, 14, 33]. На Камчатке многочисленные рудопроявления и среднее по масштабам Шанучское месторождение сульфидных кобальт-медно-никелевых руд расположены в пределах Камчатской никеленосной провинции (КНП), которая оконтуривает крупный блок метаморфических пород – Камчатский срединный массив [15, 23]. Он расположен в Срединном хребте и простирается на 200 км в меридиональном направлении при ширине 30-40 км (рис.1). Никеленосные объекты связаны с развитыми здесь интрузиями дукукского комплекса норит-кортландитовой формации (или формации роговообманковых базитов по [7]). Сульфидные руды содержат минералы благородных металлов, которые представлены сперрилитом, ирарситом, теллуровисмутидами палладия, меренскитом, антимонидами палладия, самородной платиной, изоферроплатиной и самородным золотом [11, 13, 15, 20, 22].

Сегодня остаются актуальными проблемы, касающиеся генезиса сульфидных медно-никелевых руд и механизмов фракционирования металлов, соотношений рудных минералов, форм нахождения и распределения в рудных телах элементов платиновой группы (ЭПГ) и золота [3, 4, 16, 24, 28, 29]. Вопросы генезиса кобальт-медно-никелевых руд КНП дискуссионны. По мнению большинства исследователей, их формирование определяется магматическими процессами [8, 11,17-19, 22]. Например, для рудопроявлений Квинум I и II предполагается, что формирование

DOI: 10.31897/PMI.2021.2.5

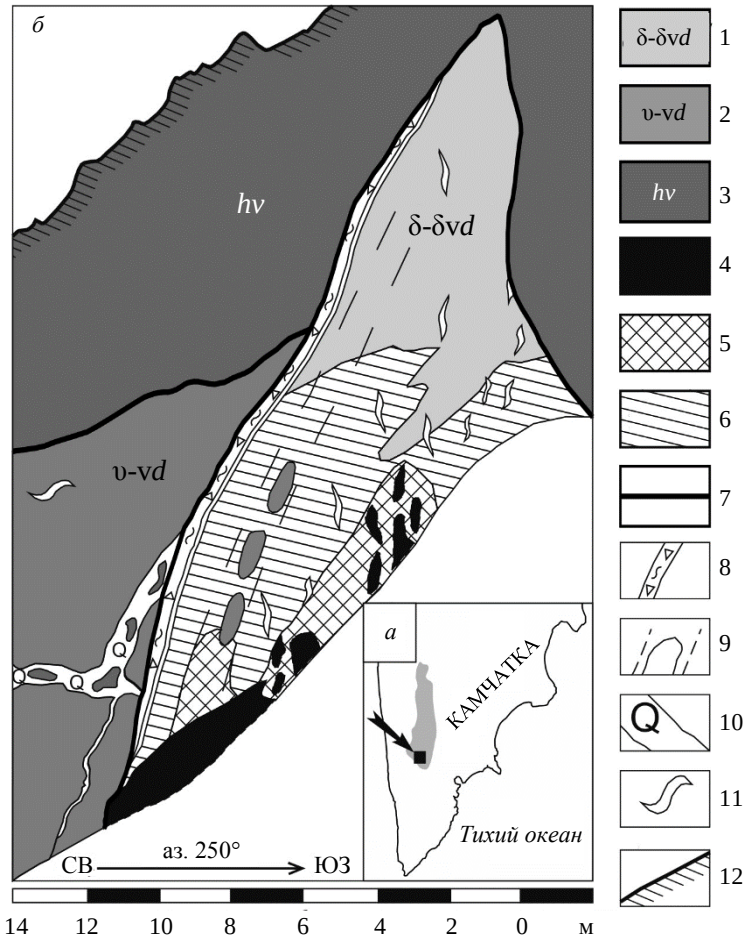

Рис.1. Геологическое строение рудопроявления Аннабергитовая Щель: *а* – обзорная схема, стрелкой указано местоположение рудопроявления Аннабергитовая Щель, серая заливка – КНП; *б* – зарисовка обнажения (по [20], с изменениями)

1, 2 – интрузивные образования дукукского комплекса (эоцен): гибридные породы, преимущественно меланократовые диориты и диориты (1), ультрамафиты, габбронориты, нориты, диориты (2); 3 – сланцы хейванской свиты (нижний-верхний мел); 4-6 – типы руд: массивные (4), прожилково-вкрапленные и гнездовые (5), вкрапленные (6); 7 – разрывные нарушения; 8 – зоны дробления и рассланцевания; 9 – зоны будинажа; 10 – зоны брекчирования с кварц-полевошпатовым цементом; 11 – кварц-полевошпатовые прожилки с вкрапленностью сульфидов; 12 – край обрывистого борта ручья

сульфидной и благороднометальной минерализации определяется магматической дифференциацией и сульфуризацией под воздействием флюидов. При этом продуктивность в отношении ЭПГ возрастает с усилением во флюидах роли Te, As, Sb и Bi [11, 22]. Вместе с тем, многие исследователи указывают на метаморфические, метасоматические и гидротермальные преобразования медно-никелевых руд КНП [5, 12, 15].

В настоящей статье рассмотрено одно из многочисленных рудопроявлений КНП – Аннабергитовая Щель. Его геологическое строение, химический и минеральный состав руд охарактеризованы в ряде публикаций [5, 9, 15, 20]. Рудные минеральные ассоциации, установленные на проявлении Аннабергитовая Щель, ранее были выделены на Шануческом месторождении [13] и сходны с ассоциациями Дамбукинского никеленосного района Верхнего Приамурья [21]. Состав минералов платиноидов, серебра и золота близок к благороднометальной минерализации рудного тела № 1 Шануча [13], а также рудопроявлений в южной части КНП – Квинум I [11] и Квинум II [21].

Цель наших исследований в рамках данной статьи состояла в выявлении особенностей вещественного состава и генезиса благороднометальной минерализации рудопроявления Аннабергитовая Щель. Были получены новые данные о составе и соотношениях минералов, позволяющие сделать выводы о генезисе минералов ЭПГ, серебра и золота.

Методы исследований. В процессе изучения руд проявления Аннабергитовая Щель были получены данные об их химическом составе [20], проведены минералогические исследования с использованием электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии. Для оценки условий формирования минералов благородных металлов привлечены геотермометры, известные данные по термодинамическим свойствам ассоциирующих минералов и результаты обобщающих работ [1].

Определение Ni, Cu, Co и Au проведено атомно-абсорбционным методом на спектрометре Shumadzu AA-6300 в Научно-исследовательском геотехнологическом центре Дальневосточного отделения Российской академии наук; Pt, Pd – методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре IRIS Intrepid Duo в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского Российской академии наук; Ag – методом спектрального анализа в Институте минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов.

Исследования химического состава минералов и микрофотографирование выполнены в Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3, оснащенном энергодисперсионным спек-

трометром Oxford Instruments X-Max 80 mm^2 с программным обеспечением AZtec. В качестве эталонов на ЭПГ были использованы чистые металлы, полученные в Московском государственном институте стали и сплавов; на Au, Ag, Ni и Fe – соответствующие металлы. Искусственные соединения FeAsS и FeS_2 применялись для определения As и S; синтетические CdTe, $CuSbS_2$, Bi_2S_3, PbS, ZnS, $CuFeS_2$ – для Te, Sb, Bi, Pb, Zn, Cu; сплав Fe-Co-Ni известного состава – для Co. Анализы проводились с использованием ускоряющего напряжения 20 кВ и токе образца на контрольном эталоне никеля 700 pA.

Отдельные образцы порошков руд и пород были изучены в НИГТЦ ДВО РАН на порошковом рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV с горизонтальным закреплением образца. В качестве подложки при съемке использовалась стеклянная кювета. Съемка дифрактограмм порошков проб проводилась с использованием D/tex детектора в диапазоне углов 2Θ 10-100 град, со скоростью 1,0 град/мин, режим съемки – стандартный. При идентификации кристаллических фаз использовалась база данных порошковой дифрактометрии ICDD PDF-2 (версия 2012), дополненная в 2019 г., и программный комплекс PDXL-2.

Результаты исследований. ***Геологическое строение рудопроявления, минералогия и геохимия руд.*** Проявление богатых сульфидных кобальт-медно-никелевых руд Аннабергитовая Щель расположено в южной части КНП (рис.1, *а*), в верховьях р. Степановой (53°24′56,1″ с.ш. и 157°4′3,4″ в.д.). Рудное тело вскрывается в узком распадке, который сформирован по зоне разрывного нарушения. Длина выхода руд по тальвегу составляет 18 м, высота западного вертикального края 11 м (рис.1, *б*). Рудное тело сложено массивными, прожилково-вкрапленными, гнездовыми и вкрапленными сульфидными рудами. Контакты с вмещающими породами тектонические, характерны зоны дробления, участки будинажа и рассланцевания [20]. Массивные неокисленные руды в среднем содержат, мас.%: 4,82 Ni, 1,95 Cu и 0,13 Co, а также 0,036 г/т Pt и 1,12 г/т Pd. Содержание Au достигает 0,085 г/т, концентрация Ag в среднем составляет 6,66 г/т [20].

Руды связаны с интрузией дукукского комплекса, которая представляет собой деформированное силлообразное тело мощностью первые десятки метров в апотерригенных сланцах хейванской свиты, метаморфизованных в условиях зеленосланцевой и амфиболитовой фаций [5]. Интрузия сложена преобладающими сильно измененными ультрамафитами (вероятно, оливиновыми вебстеритами [15]), а также габброноритами, норитами и диоритами (рис.1, *б*). Эти породы и сингенетические с ними руды на проявлении преобразованы в результате контактового метаморфизма и метасоматоза под влиянием расположенных поблизости пострудных интрузий гранитоидов [12], которые на геологической карте 1:1000000 отнесены ко второй фазе кольского плагиогранит-грандиоритового комплекса [5]. На рудопроявлении широко представлены гибридные породы, состав которых изменяется от меланократовых диоритов до биотит-роговообманковых плагиогранитов. Рудное тело и вмещающие сланцы пересекают связанные с гранитоидами кварцевые, кварц-полевошпатовые, иногда с мусковитом прожилки мощностью первые сантиметры. Для гибридных пород, гранитоидов и прожилков характерны кварц-полевошпатовые участки с микропегматитовой структурой.

Главные рудные минералы представлены пирротином (преобладает моноклинный, 6C), халькопиритом и пентландитом. Обычны пирит и марказит. Распространены гипергенные минералы – гидроокислы железа, моренозит, ретгерсит, малахит и азурит. Из редких минералов в рудах установлены сульфоарсениды никеля и кобальта, галенит, сфалерит, соединения висмута и теллура [20]. В результате рентгеноструктурных исследований в рудах выявлено присутствие кобальтпентландита, никелистого пирита, борнита, ковеллина, колусита и шеелита. Минералы благородных металлов представлены преимущественно сперрилитом [15] и ирарситом. В меньшей степени развиты гессит и волынскит [20]. Изредка встречаются самородное золото и аргентопентландит [20], а также майченерит [15].

Минеральные ассоциации. Рудные минералы образуют три минеральные ассоциации (или парагенезиса по [9]), которые характерны также для Шануческого рудного поля [13]: пентландит-пирротиновую, пирротин-пентландит-халькопиритовую и пирит-марказитовую [9]. Ассоциации выделены по особенностям минерального состава руд с учетом количественных соотношений рудных минералов и их морфологии. Частично они характеризуют последовательность рудообразования и отражают первичную зональность сульфидных руд, которая формируется на магматическом этапе в процессе дифференциации сульфидного расплава [10].

Пентландит-пирротиновая ассоциация, образование которой связывают с магматическим этапом, представлена сульфидами ранней генерации (I): порфировыми выделениями пентландита и пирротина с петельчатым пентландитом [9]. В состав этой ассоциации, выделяемой на Шануч-ском рудном поле, кроме того, включают ранний халькопирит I [13]. На изученном рудопроявлении ассоциация проявлена слабо, что, возможно, отражает первичную зональность сульфидных руд, сформированную в процессе магматической дифференциации сульфидного расплава.

Пирротин-пентландит-халькопиритовая ассоциация представлена пирротином с пламеневидными и пластинчатыми выделениями пентландита II, халькопиритом II, сульфоарсенидами никеля и кобальта (I), сперрилитом и ирарситом. Ассоциация формируется в результате сингенетических процессов и последующих преобразований под влиянием пострудных гранитоидов кольского комплекса. Контактовые изменения магматических пород интрузии дукукского комплекса выражены в замещении основного плагиоклаза альбитом; чермакитов, паргаситов, пироксенов и оливинов – магнезиальной роговой обманкой, антофиллитом, куммингтонитом, а также агрегатами этих амфиболов, включающими выделения сфена и рутила. В результате контактово-метасоматических преобразований (неполнопроявленный кварц-полевошпатовый метасоматоз) на отдельных участках в рудном теле развит агрегат олигоклаза, калиевого полевого шпата и кварца, отмечено замещение флогопита биотитом, а ранних амфиболовых агрегатов – кварцем и полевыми шпатами.

Пирит-марказитовая ассоциация сформировалась в ходе последующих гидротермально-метасоматических преобразований минералов ранних сульфидных ассоциаций: пентландит замещался виоларитом, пирротин – пиритом и марказитом. При этом для пирротина, находящегося в парагенезисе с пиритом и марказитом, характерен более сернистый состав. В результате перераспределения халькопирита I и II генераций формировалась его поздняя разновидность (халькопирит III [13, 21]). Кроме того, образовались галенит, самородное золото, волынскит, гессит, аргентопентландит и теллуридно-висмутовая минерализация. По силикатам развивались клинохлор, эпидот, актинолит, сфен, участками – тальк и карбонат.

Особенности благороднометальной минерализации. На рудопроявлении выделяются ранняя и поздняя благороднометальная минерализации. Ранняя входит в состав пирротин-пентландит-халькопиритовой ассоциации и представлена сперрилитом, ирарситом, а также неназванным соединением Pt, Ir и Te. Ранние минералы благородных металлов пространственно и генетически связаны с сульфоарсенидами группы кобальтина, в которых нередко отмечается изоморфная примесь платиноидов. Наличие герсдорфита подтверждается данными рентгеновской дифрактометрии. Поздняя минерализация относится к пирит-марказитовой ассоциации и представлена майченеритом, волынскитом, гесситом, аргентопентландитом, самородным золотом и содержащим Ag теллуровисмутитом (табл.1).

Таблица 1

Минералы благородных металлов и содержащие благородные металлы в изоморфной форме, установленные на рудопроявлении Аннабергитовая Щель

№ п/п	Название минерала	Химическая формула
	Минералы платиноидов	
1	Сперрилит	$PtAs_2$
2	Ирарсит	IrAsS
3	Майченерит	PdBiTe
	Минералы серебра и золота	
4	Волынскит	$AgBiTe_2$
5	Аргентопентландит	$Ag(Fe, Ni)_8S_8$
6	Гессит	Ag_2Te
7	Самородное золото	Au, Ag
	Минералы, содержащие благородные металлы в изоморфной форме	
8	Сульфоарсениды (ряд кобальтина-герсдорфита)	NiAsS, примеси Co, Fe, Ir, Pt, Rh, Pd
9	*Теллуровисмутит*	Bi_2Te_3, примеси Ag, Pb

Ранняя благороднометальная минерализация. Сперрилит и ирарсит образуют включения округлой или пластинчатой формы в сульфоарсенидах (промежуточных членах ряда кобальтина-

герсдорфита). Размер выделений сперрилита от 2,5 до 25 мкм, состав близок к теоретической формуле (табл.2). Размер включений ирарсита от 2 до 5 мкм (рис.2, *г*). Минерал обычно содержит примесь Pt (в среднем 5,22 мас.%) и Rh (в среднем 1,85 мас.%).

Таблица 2

Составы сперрилита и ирарсита (в пересчете на 100 мас.%)

№ п/п	Pt	Rh	Ir	Pd	As	S	Сумма	Эмпирическая формула
1	53,88	–	–	–	46,12	–	100,00	$Pt_{0,93}As_{2,07}$
2	58,73	–	–	–	41,27	–	100,00	$Pt_{1,06}As_{1,94}$
3	56,96	–	–	–	43,04	–	100,00	$Pt_{1,01}As_{1,99}$
4	55,88	–	–	–	44,12	–	100,00	$Pt_{0,98}As_{2,02}$
5	56,15	–	–	–	43,85	–	100,00	$Pt_{0,99}As_{2,01}$
6	52,15		4,49	–	43,36	–	100,00	$Pt_{0,92}Ir_{0,08}As_{2,00}$
Среднее значение (n = 15)								
	56,00	–	0,30	–	43,71	–	100,00	$Pt_{0,99}Ir_{0,01}As_{2,01}$
7	7,57	1,68	51,13	–	29,69	9,92	100,00	$(Ir_{0,75}Pt_{0,11}Rh_{0,05})_{0,91}As_{1,12}S_{0,88}$
8	–	7,80	50,61	–	30,93	10,66	100,00	$(Ir_{0,71}Rh_{0,2})_{0,91}As_{1,11}S_{0,89}$
9	6,39	2,84	51,62	–	27,94	11,22	100,00	$(Ir_{0,74}Pt_{0,09}Rh_{0,08})_{0,91}As_{1,03}S_{0,97}$
10	7,24	1,01	51,72	0,76	28,85	10,42	100,00	$(Ir_{0,76}Pt_{0,10}Rh_{0,03}Pd_{0,02})_{0,91}As_{1,08}S_{0,92}$
Среднее значение (n = 10)								
	4,82	2,64	53,16	0,08	28,36	10,95	100,00	$(Ir_{0,77}\ Rh_{0,07}Pt_{0,07})_{0,91}As_{1,05}S_{0,95}$

Примечание. 1-6 – сперрилит; 7-10 – ирарсит. При расчете формульных коэффициентов ирарсита использована эмпирическая формула $(Pt, Rh, Ir)_{0.91}AsS$. Вследствие малого размера фаз МПГ в процессе микрозондового анализа происходил «прихват» матрицы герсдорфита и, вероятно, тонких микровключений: герсдорфита и ирарсита в сперрилите и герсдорфита – в ирарсите. При пересчете анализов на 100 мас.% и расчете формул «прихваченные» фазы исключены.

Связанные с платиноидами сульфоарсениды образуют идиоморфные кристаллы размером до 0,1-0,5 мм, которые обычно приурочены к краевым частям зерен основных рудообразующих сульфидов и часто имеют изометричную шестиугольную форму сечения (рис.2, *б*, *ж*). Мелкие зерна сульфоарсенидов обычно наблюдаются в халькопирите, а более крупные – в пирротине. Реже их включения отмечаются в пентландите, пирите и виоларите. Для кристаллов сульфоарсенидов в пирротине характерно обрастание по краю пламеневидными выделениями пентландита (рис.2, *а*).

Соотношения и последовательность выделения сперрилита, ирарсита и Fe-Co-Ni сульфоарсенидов исследованы в эпитаксиальном срастании этих минералов, расположенном на границе зерна виоларита (рис.3, *а-г*). Внутри шестиугольного кристалла Fe-Co-Ni сульфоарсенида находится кристалл сперрилита вытянутой формы, обрастающий по краю ирарситом, в котором отмечена неназванная фаза соединения Te, Ir и Pt (рис.3, *в-е*). Идиоморфный, вероятно, кубический минерал ряда кобальтина-герсдорфита с платиноидами (далее по тексту сульфоарсенид I), закономерно обрастает сульфоарсенидом второй генерации (сульфоарсенид II) с повышенным содержанием Co. Его ромбовидный срез также имеет идиоморфные очертания. Возможно, он представляет собой никельсодержащий глаукодот (ромбический).

На профиле через это срастание (рис.3, *ж*) можно отметить отсутствие зональности и относительное постоянство составов сульфоарсенидов I и II. При близком содержании As и S для сульфоарсенидов обеих генераций различия в их составах выражены в изменении соотношений Ni и Co при незначительных вариациях содержаний Fe (рис.3, *ж*). Сульфоарсенид I помимо включений минералов платиноидов может содержать их примеси (табл.3), вероятно в результате изоморфного замещения, мас.%: Rh – до 0,83, Pd – до 0,53 Pt – до 0,54, Ir – до 2,56. Кроме того, отмечаются Cu (до 1,67 мас.%), а также Se (до 0,32 мас.%) и Te (до 0,32 мас.%). Сульфоарсенид II отличается отсутствием платиноидов, повышенным содержанием Co (около 17 мас.%) и имеет близкое к постоянному отношение содержаний Ni/Fe (рис.4).

DOI: 10.31897/PMI.2021.2.5

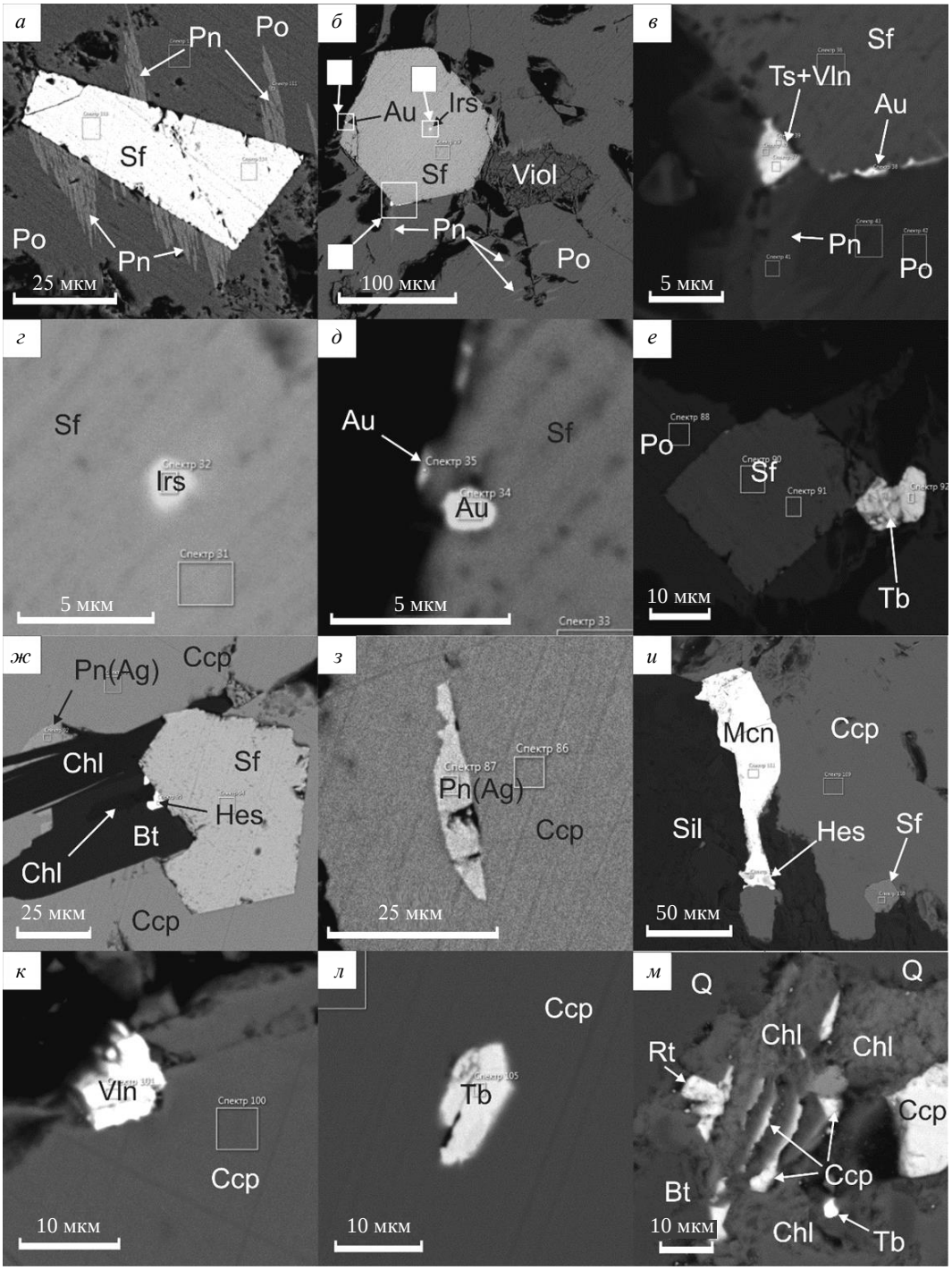

Рис.2. Соотношения минералов благородных металлов и теллуровисмутитов с сульфоарсенидами, главными сульфидами, виоларитом, биотитом, кварцем и клинохлором (все изображения в обратно-отраженных электронах):
а – пламеневидные выделения пентландита (Pn) в пирротине (Po) вдоль граней кристалла сульфоарсенида (Sf); *б* – идиоморфный кристалл сульфоарсенида с тонким включением ирарсита (Irs) в пирротине, содержащем пламеневидные вростки пентландита и участок, замещенный виоларитом (Viol); *в* – увеличенное изображение краевой части кристалла сульфоарсенида, вдоль которой развиваются тонкие агрегаты соединений висмута и теллура, вероятно, волынскита и цумоита (Ts + Vln), а также самородное золото (Au); *г* – увеличенный фрагмент кристалла сульфоарсенида с включением ирарсита; *д* – увеличенный фрагмент краевой части кристалла сульфоарсенида с выделениями золота; *е* – пирротин (состав близок к Fe_6S_7), включает идиоморфный кристалл сульфоарсенида, вдоль одной из граней которого развивается зерно теллуровисмутита (Tb); *ж* – халькопирит (Ccp) включает кристалл сульфоарсенида, ксеноморфный в отношении биотита (Bt) и идиоморфный в отношении хлорита (Chl) и халькопирита, вдоль одной из граней сульфоарсенида вблизи контакта с хлоритом наблюдается тонкий агрегат гессита (Hes), на контакте с силикатами (Sil) в халькопирите развивается аргентопентландит (Pn(Ag)); *з* –включение аргентопентландита в халькопирите (вероятно, вдоль залеченной трещины); *и* – майченерит (Mcn) с тонкими включениями гессита, развивается вдоль краевой части зерна халькопирита; *к* – волынскит (Vln) в халькопирите; *л* – идиоморфный кристалл теллуровисмутита в халькопирите; *м* – биотит (Bt) в срастании с кварцем (Q), замещается агрегатом клинохлора, который содержит пластинчатые выделения халькопирита поздней генерации, тонкие включения теллуровисмутита и рутил (Rt)

DOI: 10.31897/PMI.2021.2.5

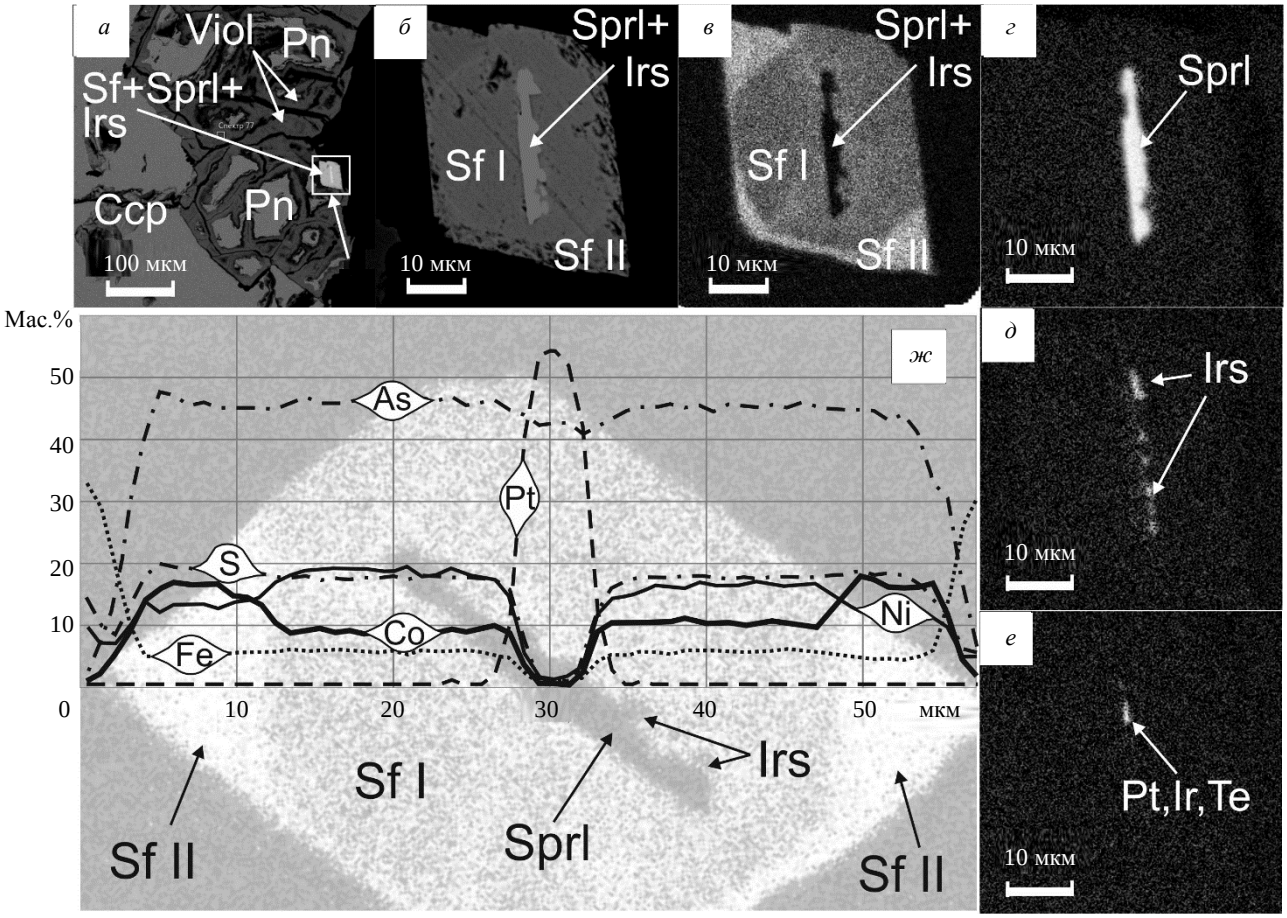

Рис.3. Эпитаксиальное срастание кристаллов сперрилита, ирарсита и Fe-Co-Ni сульфоарсенидов (все изображения в обратно-отраженных электронах):
а – соотношение сростка сульфоарсенидов, сперрилита и ирарсита (Sf+Sprl+Irs) с халькопиритом (Ccp), пентландитом (Pn), виоларитом (Viol); *б* – увеличенный фрагмент со сростком сульфоарсенидов и сперрилита, где кристалл сульфоарсенида II (Sf II, глаукодот) обрастает идиоморфным сульфоарсенидом I (Sf I, ряд кобальтина-герсдорфита), в центральной части которого находится сросток сперрилита и ирарсита (Sprl + Irs); *в, г, д, е* – сросток в лучах кобальта (контуры кристаллов сульфоарсенида I, сульфоарсенида II и минералов платиновой группы, *в*), платины (сперрилит, *г*), иридия (ирарсит, *д*), теллура (неназванная фаза, соединение теллура, платины и иридия, *е*); *ж* – профиль через сросток сульфоарсенидов и сперрилита. В качестве подложки для профиля использован снимок в лучах кобальта. Содержания S, As, Fe, Co, Pt, Ni в массовых процентах.

Таблица 3

Составы сульфоарсенидов (мас.%)

№ п/п	S	As	Fe	Co	Ni	Cu	Rh	Pd	Pt	Ir	Сумма	Эмпирическая формула
1	17,80	47,53	5,23	5,86	23,71	–	–	–	–	–	100,13	$(Ni_{0,68}Co_{0,17}Fe_{0,16})_{1,00}As_{1,06}S_{0,93}$
2	18,20	46,92	6,17	7,67	21,16	–	–	–	–	–	100,11	$(Ni_{0,60}Co_{0,22}Fe_{0,18})_{1,00}As_{1,05}S_{0,95}$
3	17,88	46,62	6,81	9,00	19,55	–	–	–	–	–	99,85	$(Ni_{0,56}Co_{0,26}Fe_{0,20})_{1,02}As_{1,04}S_{0,94}$
4	18,34	46,61	6,16	10,42	17,77	–	–	–	–	–	99,30	$(Ni_{0,51}Co_{0,30}Fe_{0,18})_{0,99}As_{1,05}S_{0,96}$
5	18,38	44,94	6,41	11,32	17,30	1,67	–	–	–	–	100,02	$(Ni_{0,49}Co_{0,32}Fe_{0,19}Cu_{0,04})_{1,05}As_{1,00}S_{0,95}$
6	18,14	46,74	6,29	8,93	19,01	–	0,41	–	–	–	99,53	$(Ni_{0,55}Co_{0,26}Fe_{0,19}Rh_{0,01})_{1,00}As_{1,05}S_{0,95}$
7	17,90	45,94	5,92	9,26	18,44	–	0,82	–	–	–	98,28	$(Ni_{0,54}Co_{0,27}Fe_{0,18}Rh_{0,01})_{1,00}As_{1,05}S_{0,95}$
8	18,34	46,15	5,86	10,79	16,63	–	0,83	0,34	0,54	–	99,46	$(Ni_{0,48}Co_{0,31}Fe_{0,18}Pt_{0,01}Rh_{0,01}Pd_{0,01})_{0,99}As_{1,04}S_{0,97}$
9	17,31	45,26	4,92	6,21	22,29	–	0,51	0,53	–	2,56	99,60	$(Ni_{0,66}Co_{0,18}Fe_{0,15}Rh_{0,01}Ir_{0,02}Pd_{0,01})_{1,03}As_{1,04}S_{0,93}$
10	18,79	46,07	4,89	17,07	13,08	–	–	–	–	–	99,91	$(Ni_{0,37}Co_{0,48}Fe_{0,15})_{1,00}As_{1,02}S_{0,98}$
11	18,86	44,68	4,89	16,87	12,89	–	–	–	–	–	98,2	$(Ni_{0,37}Co_{0,48}Fe_{0,15})_{1,00}As_{1,01}S_{0,99}$

Примечание. 1-9 – сульфоарсенид I (ряд кобальтина-герсдорфита); 10, 11 – сульфоарсенид II (глаукодот).

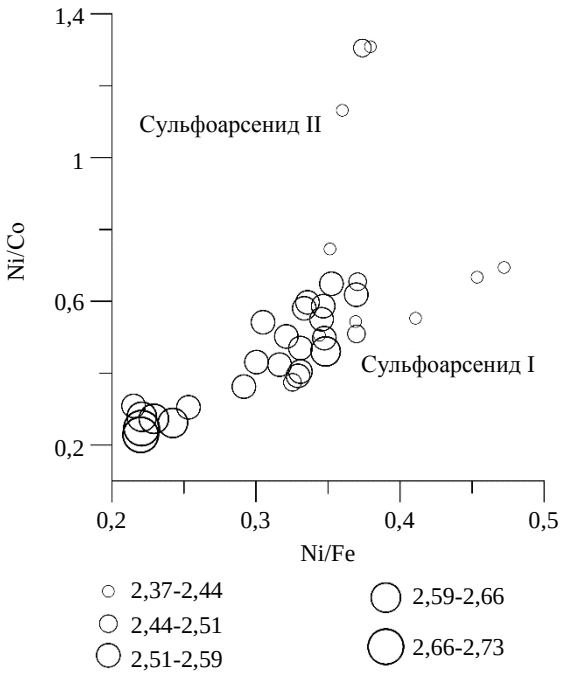

Рис.4. Соотношения Ni/Co и Ni/Fe в сульфоарсенидах I и II. Значения Ni/Co, Ni/Fe рассчитаны по содержаниям элементов в массовых процентах. Представлены данные 35 анализов, в том числе составы из табл.3. Размер значка пропорционален отношению As/S

Поздняя благороднометальная минерализация (табл.4). Агрегаты соединений висмута и теллура, в том числе гессита, отмечаются в халькопирите и в агрегатах клинохлора, обрастают краевые части идиоморфных кристаллов сульфоарсенида I (см. рис.2, *б*, *в*, *е*, *ж*). Размер выделений гессита составляет 1-10 мкм. Гессит, кроме того, отмечен в виде включений в майченерите, единичное выделение которого имеет вытянутую форму размером 120×25 мкм и развивается вдоль краевой части зерна халькопирита (рис.2, *ж*).

Помимо гессита, минералы Ag представлены аргентопентландитом и волынскитом. Аргентопентландит образует выделения размером 15-30 мкм, развивается по трещинам в халькопирите и в краевых частях его зерен (рис.2, *ж*, *з*). Содержание Ag в аргентопентландите составляет от 8,91 до 12,98 мас.%, в среднем – 11,61 мас.% (n = 8). Волынскит представлен единичными мелкими (до 10 мкм) включениями в халькопирите (рис.2, *к*), а также образует тонкие агрегаты с цумоитом (?), обрастающие с краю сульфоарсенид I (рис.2, *в*). Незначительное количество Ag (от 0,55 до 6 мас.%) входит в состав теллуровисмутита, образующего идиоморные кристаллы размером около 15 мкм в халькопирите (рис.2, *л*) и включения в хлорите размером около 3 мкм (рис.2, *м*).

Таблица 4

Составы поздних минералов благородных металлов (мас.%)

№ п/п	S	Fe	Co	Ni	Cu	As	Ag	Te	Pd	Pb	Bi	Сумма	Эмпирическая формула
1	31,64	32,93	–	22,33	1,05	–	12,03	–	–	–	–	99,98	$(Ag_{0,91}Cu_{0,14})_{1,05}(Fe_{4,81}Ni_{3,10})_{7,91}S_{8,04}$
2	31,67	34,7	–	23,11	1,75	–	8,91	–	–	–	–	100,14	$(Ag_{0,67}Cu_{0,23})_{0,89}(Fe_{4,99}Ni_{3,17})_{8,16}S_{7,95}$
3		0,32	–	–	0,85	–	60,81	36,81	–	–	–	98,78	$Ag_{1,99}Te_{1,01}$
4	4	4,68	1,81	1,52	–	8,13	49,21	31,17	–	–	–	100,51	$Ag_{1,95}Te_{1,05}$
5	–	1,75	–	–	2,5	–	16,3	42,74	–	–	35,87	99,17	$(Ag_{0,71}Cu_{0,26})_{0,97}Bi_{1,10}Te_{1,87}$
6	–	2,11	–	–	2,81	–	13,12	40,97	–	1,8	39,49	100,31	$(Ag_{0,87}Cu_{0,22})_{1,09}Bi_{0,99}Te_{1,92}$
7	–	0,92	–	–	–	–	0,55	48,61	–	–	48,95	99,04	$(Bi_{1,89}Ag_{0,04}Pb_{0,00})_{1,93}Te_{3,07}$
8	–	2,54	–	–	–	–	1,53	46,21	–	3,3	45,19	98,76	$(Bi_{1,78}Ag_{0,12}Pb_{0,13})_{2,02}Te_{2,98}$
9	–	2,37	–	–	–	–	6,00	47,02	–	2,39	43,21	100,99	$(Bi_{1,61}Ag_{0,44}Pb_{0,09})_{2,14}Te_{2,86}$
10	–	–	–	–	–	–	–	31,58	24,42	–	39,57	98,95	$Pd_{0,99}(Sb_{0,12},Bi_{0,82})_{0,94}Te_{1,07}$

Примечание. 1, 2 – аргентопентландит; 3, 4 – гессит; 5, 6 – волынскит; 7-9 – теллуровисмутит; 10 – майченерит. Формулы волынскита (на 4 атома), теллуровисмутита (на 5 атомов) рассчитаны без железа, которое, вероятно, входит в состав гидроокислов.

Отдельные микровключения высокопробного самородного золота (~93,6 мас.% Au) размером менее 2 мкм отмечены в халькопирите (табл.5). Золото (~80 мас.% Au) в виде выделений и тонкой каймы обрастает краевую часть кристаллов сульфоарсенида I (табл.5, рис.2, *в*, *д*). Выделение относительно низкопробного золота (~71,5 мас.% Au) размером 6-7 мкм встречено в виоларите (табл.5).

Оценка температур образования благороднометальной минерализации. Условия формирования ранних платиноидов оценены по парагенетически связанным с ними сульфоарсенидам I с использованием диаграммы NiAsS-FeAsS-CoAsS (рис.5, *а*), на которой приведены изотермы температур сольвуса по [31]. По этим данным сульфоарсениды I формировались при температурах порядка 400-500 °С.

Таблица 5

Представительные составы самородного золота (мас. %)

Компонент	1	3	4	5	6
Au	91,10	79,24	80,93	70,83	72,12
Ag	–	20,76	19,07	29,17	27,88
Cu	5,62	–	–	–	–
Fe	3,28	–	–	–	–
Сумма	100	100	100	100	100
Проба золота, ‰	~ 936	~800		~715	
Примечание	Включение в халькопирите	Включение в герсдорфите		Включение в виоларите	

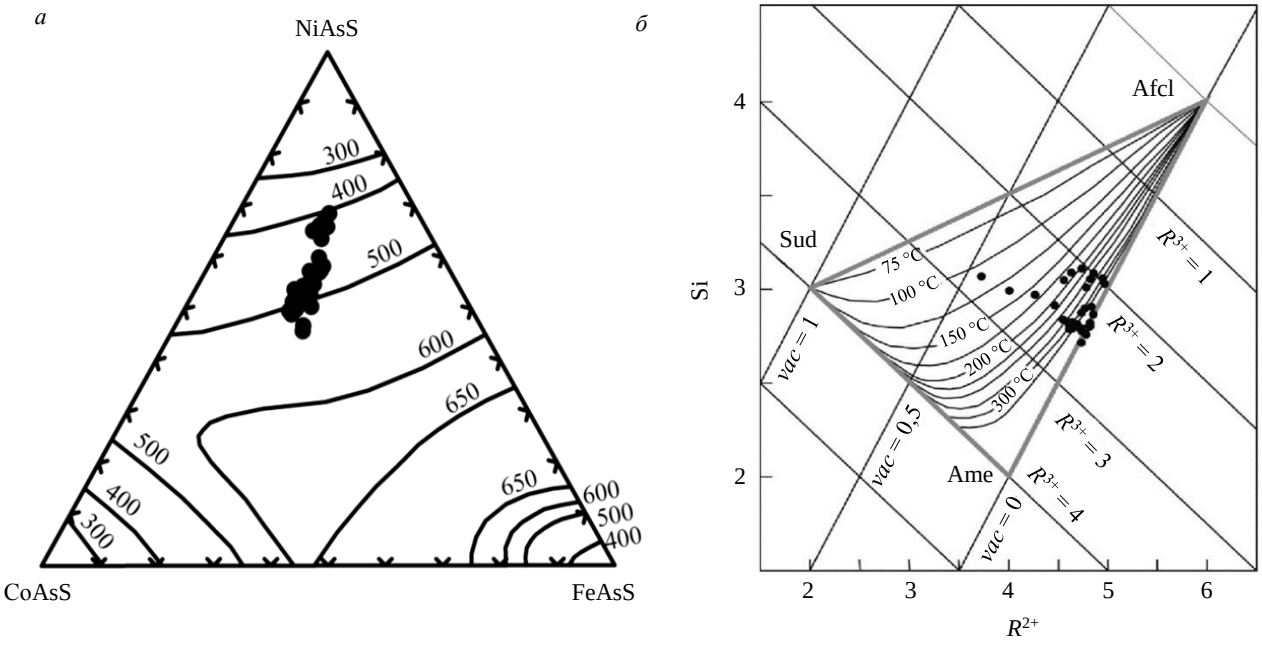

Рис.5. Диаграммы геотермометров по сульфоарсенидам NiAsS-FeAsS-CoAsS (*а*) и хлоритам R^{2+} (сумма Fe^{2+} и Mg^{2+}) – Si (*б*):
а – положение фигуративных точек составов сульфоарсенида I, линии сольвуса при разных температурах (°С) приведены по [31]; *б* – диаграмма полуэмпирический хлоритовый геотермометр по [26]; использованы данные 31 анализа, в том числе из табл.6; Sud – судоит, Ame – амезит, Afcl – хлорит, не содержащий Al, R^{3+} –трехвалентные катионы (Fe^{3+}, Al^{3+}), vac – вакансия в октаэдрической позиции

Для соединений Te и Bi и ассоциирующих с ними халькопирита и пирита отмечаются срастания с клинохлором (см. рис.2, *м*). Это дает возможность оценить условия формирования поздней благороднометальной минерализации с использованием хлоритовых и пирит-пирротиновых геотермометров. Температура образования клинохлора оценена с использованием эмпирических хлоритовых геотермометров по [27] и по [30], полуэмпирического [26]. Геотермометры по [27, 30] основаны на линейной корреляции T °C-Al_{IV} в хлоритах. Полученные оценки температуры по [27] варьируют от 119 до 337, по [30] – от 124 до 335°С (табл.6).

Таблица 6

Составы клинохлора (мас. %)

Компонент	A107-1		A113-7	A113-5		GR7
	1	2	3	4	5	6
SiO_2	27,51	28,18	28,30	29,60	30,35	32,17
TiO_2	–	–	–	–	–	–
Al_2O_3	20,15	18,81	20,88	17,42	16,78	12,77
Cr_2O_3	0,68		0,25	–	–	–
FeO	17,23	18,80	13,10	18,00	17,19	24,21

DOI: 10.31897/PMI.2021.2.5

Окончание табл.6

Компонент	A107-1		A113-7	A113-5		GR7
	1	2	3	4	5	6
V_2O_3	–	–	–	–	0,36	–
MnO	–	–	–	–	–	–
MgO	21,90	20,57	24,35	21,54	21,30	14,49
NiO	0,50	0,40	0,30	0,56	0,61	1,34
K_2O	0,23	–	–	–	–	–
Сумма	88,19	86,76	87,35	87,12	86,59	84,98
Количество катионов в формуле на 14 O						
Si	2,763	2,901	2,797	3,013	3,094	3,439
Ti	–	–	0,013	–	–	–
Al_{IV}	1,238	1,100	1,204	0,988	0,907	0,561
Al_{VI}	1,154	1,177	1,230	1,101	1,115	1,062
Cr	0,054	–	0,020	–	–	–
Fe^{3+}	0,000	–	0,034	0,034	0,100	0,265
Fe^{2+}	1,470	1,586	1,045	1,477	1,353	1,887
Mn	–	–	–	–	–	–
Mg	3,278	3,157	3,587	3,268	3,237	2,310
Ni	0,041	0,033	0,024	0,046	0,050	0,115
K	0,059	–	–	–	–	–
OH	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
$Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$	0,31	0,33	0,23	0,31	0,29	0,45
T, °C [27]						
	337	292	326	256	230	119
T, °C [31]						
	335	292	322	256	230	124

Примечание. Отношение Fe^{2+}/Fe^{3+} и количество OH рассчитаны при условии полного заполнения позиций.

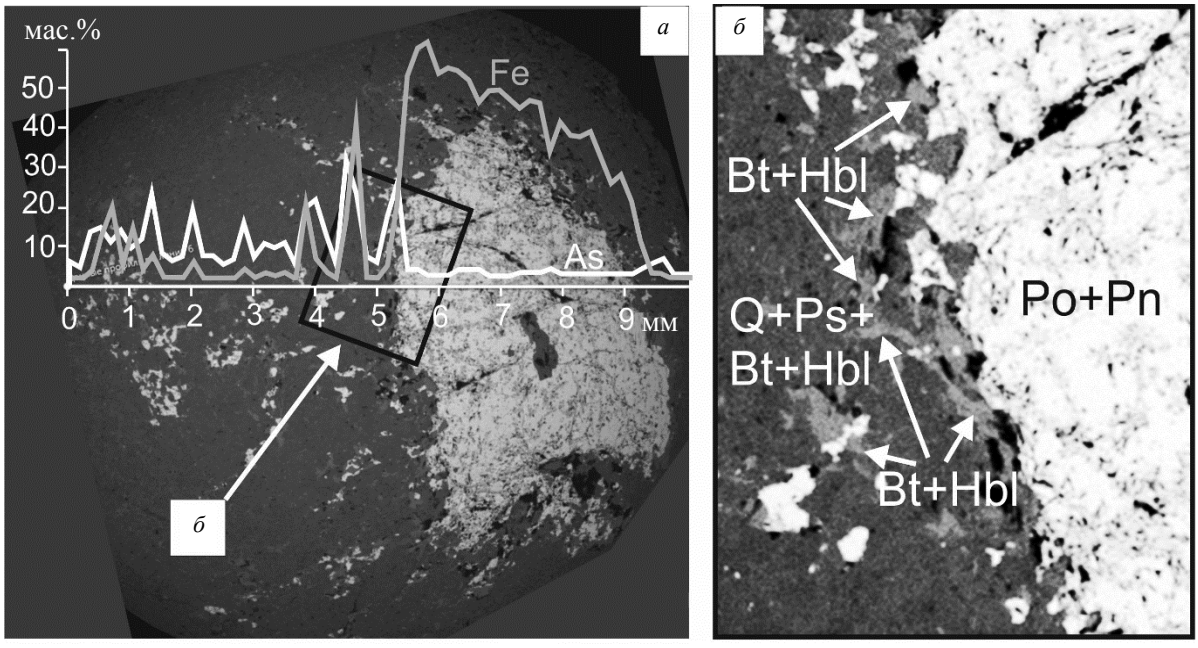

Рис.6. Характер распределения арсенидов и сульфоарсенидов в обрамлении крупного вкрапленника, сложенного пирротином и пентландитом в массе пострудных гранитоидов: *а* – выделение пирротина с врастками пентландита (светло-серое) размером около 5 мм в прожилке плагиогранита (темно-серый фон), который сложен кварцем и полевым шпатом (преобладают), а также биотитом и роговой обманкой. Крупное сульфидное зерно окружено «сыпью» мелких сульфидных обломков, размером десятые-сотые доли миллиметра, а также биотитом и роговой обманкой; *б* – увеличенный фрагмент контакта крупного сульфидного вкрапленника (Po + Pn) и плагиогранита, хорошо заметно обрастание зерен сульфидов биотитом (Bt) и роговой обманкой (Hbl) в кварц-полевошпатовой основной массе (Q + Ps)

Полуэмпирический хлоритовый геотермометр по [26] представляет собой диаграмму в координатах R^{2+} (сумма Fe^{2+} и Mg^{2+}) – Si (см. рис.5, *б*). Расчет формул проведен на 14 атомов кислорода, все железо при этом принято двухвалентным. По этой диаграмме оценки температур образования клинохлоров варьируют от ~ 110 до более 300 °С.

Пирротин с повышенным содержанием серы, состав которого близок к Fe_6S_7, входит в пирит-марказитовую минеральную ассоциацию. Он образует парагенезис с пиритом, формирующимся в равновесных термодинамических условиях при гидротермальных преобразованиях. Этому не противоречат наблюдаемые соотношения никеля и кобальта в пиритах и пирротинах, что дает возможность оценить температуры с использованием геотермометра по [2], основанного на распределении Co между этими минералами (табл.7). Расчетные температуры, полученные с использованием уравнения по содержаниям Co, варьируют от 263 до 323°С (табл.7, в среднем ~ 296 °С) [2]. Оценка по Ni в данном случае некорректна, так как его концентрации в пиритах превышают 1,5 мас.%. В результате этого изотермы распределения Ni между пиритом и пирротином отклоняются от прямолинейной зависимости [2].

Таблица 7

Распределение Co между пирротином и пиритом и температура образования пирит-пирротинового парагенезиса по [2] (пирит-марказитовая минеральная ассоциация)

Номер образца	Содержание Co, мас.%		(Co, ат.%/Fe, ат.%) $\cdot 10^{-2}$		K_D^{Co}	*T*, °C
	Пирротин	Пирит	Пирротин	Пирит		
A113-7	0,38 (*n* = 6)	0,70	0,920	1,700	0,375	323
GR10	0,32 (*n* = 6)	0,48 (*n* = 4)	0,690	1,050	0,493	301
GR7	0,52 (*n* = 2)	0,45	1,170	1,010	0,837	263

Примечание. Для оценки содержаний Co в пирите и пирротине приняты средние значения по измерениям в разных точках в одном образце; *n* – количество измерений; K_D^{Co} – коэффициент распределения Co между пиритом и пирротином.

Обсуждение результатов. Выделение ранних минералов благородных металлов и парагенетически связанного с ними сульфоарсенида I происходит в следующей последовательности: сперрилит → ирарсит → фаза Pt + Ir + Te → сульфоарсенид I (с примесью платиноидов). Наиболее ранним платиновым минералом является сперрилит. Возможно, он имеет магматическое происхождение, а его выделения выступали в качестве центров кристаллизации для других минералов платиноидов и Fe-Co-Ni сульфоарсенидов. Контактово-метасоматическое происхождение сульфоарсенида I обусловлено внедрением пострудных гранитоидов. Это доказывается соотношениями минералов, которые проиллюстрированы на рис.6. На рис.6, *а* вкрапленник пирротина размером около 5 мм заключен в прожилке плагиогранита, который сложен ортоклаз-олигоклаз-кварцевым агрегатом с включениями биотита и роговой обманки. Крупное выделение сульфидов обрамлено цепочками более мелких, остроугольных сульфидных вкраплений. Все зерна рудных минералов в кварц-полевошпатовом агрегате окружены реакционными каймами биотита и магнезиальной роговой обманки (рис.6, *б*). Наблюдаемые соотношения указывают на дробление крупного сульфидного зерна при внедрении гранитоидов, при этом в результате контактово-метасоматических процессов вокруг сульфидов образовались темноцветные силикаты.

На графике содержаний As по профилю, заданному через крупное сульфидное зерно и включающий его плагиогранит (рис.6, *а*), видно, что арсениды и сульфоарсениды тяготеют к скоплениям биотита и роговой обманки, обрастающим мелкие рудные зерна в плагиограните, при этом само крупное сульфидное выделение фаз с As не содержит. Соответственно, образование сульфоарсенидов, как и кайм темноцветных минералов вокруг сульфидов, связано с контактово-метасоматическими процессами. При этом происходит и перераспределение ЭПГ, сопровождавших сингенетические сульфидные руды, в результате чего формировались парагенетически связанные с сульфоарсенидом I ирарсит и фазы Pt + Ir + Te.

Отсутствие признаков оплавления руд в приконтактовой части пострудной интрузии гранитоидов коррелирует с экспериментальными и оценочными данными. Плавление сульфидных минеральных ассоциаций происходит в интервале температур от 850 до 1200 °С [10]. При этом

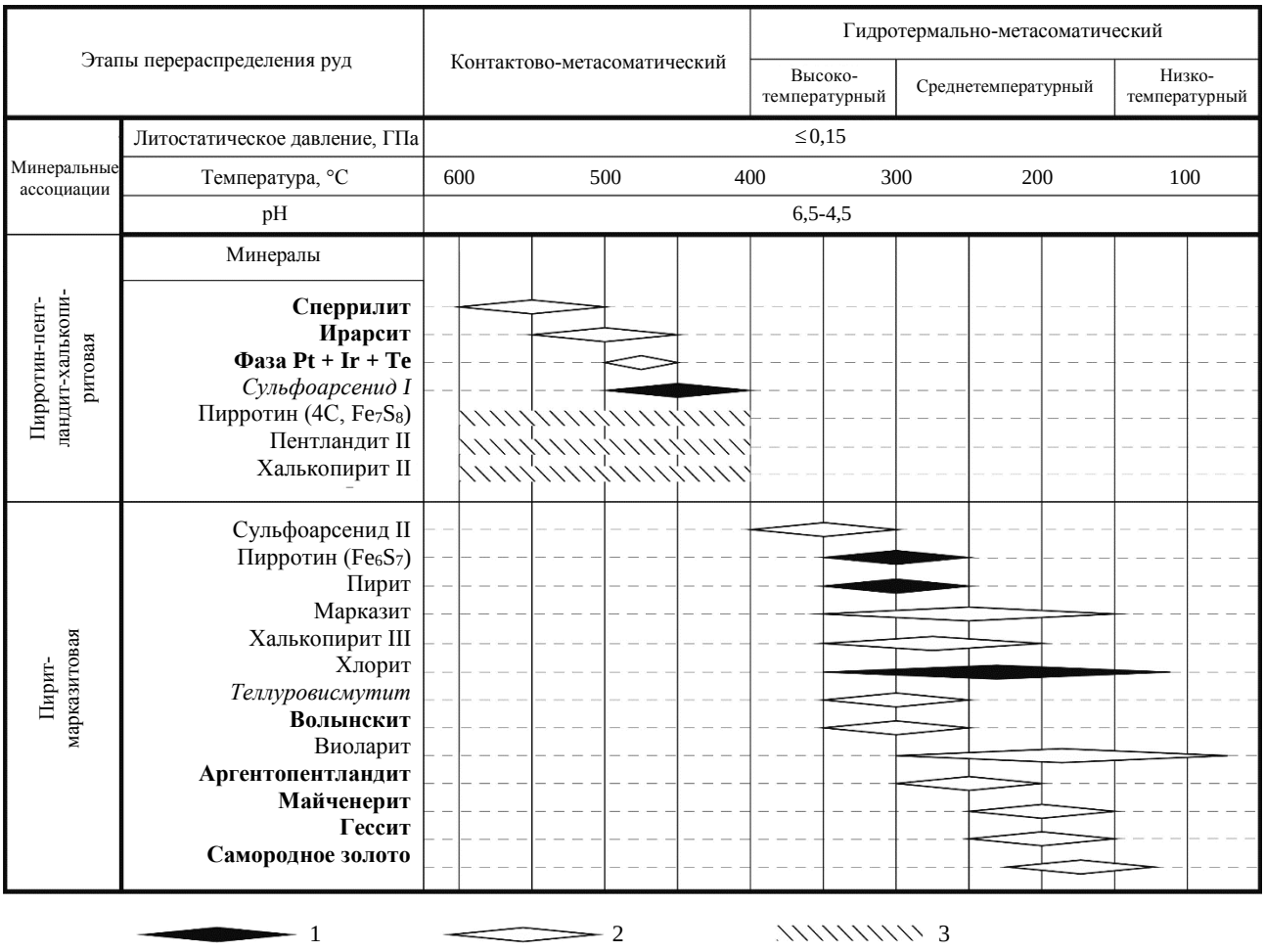

Рис.7. Схема последовательности и условий образования минералов благородных металлов (жирный шрифт), минералов с изоморфными примесями благородных металлов (курсив), ассоциирующих с ними главных и распространенных сульфидов, хлоритов на рудопроявлении Аннабергитовая Щель (с использованием данных [13])

1 – условия формирования определены с использованием геотермометров и по соотношениям минералов; 2 – только по соотношениям минералов и косвенным данным; 3 – твердофазные превращения без итогового образования новых минеральных видов

оценки условий формирования роговиков петротипического массива гранитоидов кольского комплекса менее экстремальны: 513-552 °С при давлении 0.17-0.21 ГПа [22]. Эти условия соответствуют оценкам температур формирования сульфоарсенида I и связанных с ним ранних сульфоарсенидов платиноидов (400-500 °С, рис.5, *а*), а также температурам захвата флюидных включений в кварце из руд Шанучского месторождения (~400-500 °С) [8]. В целом, все эти данные согласуются с условиями формирования кварц-полевошпатовых метасоматитов [1], которые равновесны с растворами, близкими к нейтральным (pH 4.5-6.5) при температуре 350-600 °С на глубинах ≤5 км при давлении менее ~0.15 ГПа (рис.7).

На позднем, гидротермально-метасоматическом этапе прослеживается следующая последовательность образования минералов благородных металлов: теллуровисмутит → волынскит (агрегат цумоита (?) и волынскита) → аргентопентландит → майченерит + гессит. Образование самородного золота, вероятно, происходило не раньше формирования теллуридов. К этой же стадии минералообразования, возможно, относится и глаукодот (сульфоарсенид II), который известен как высокотемпературный гидротермальный минерал. По причине гидротермального происхождения глаукодота к нему неприменима диаграмма по [31], разработанная для «сухих» систем [6].

Гидротермально-метасоматические преобразования руд, с которыми связана поздняя благороднометальная минерализация, пирит, марказит и клинохлор-эпидот-актинолитовый парагенезис, близки к процессам пропилитизации при pH 4.5-6.5 и температурах 150-350 °С на глубинах ≤5 км [1]. Это подтверждают оценки температур образования хлоритов (от 110 до 340 °С), пиритов

и поздних пирротинов (около 296 °С). Связь клинохлор-эпидот-актинолитового парагенезиса с соединениями Bi и Te подчеркивает его средне- низкотемпературный характер: температуры образования теллуридов составляют менее 350 °С, обычно менее 250 °С [25], а гессит является одним из характерных минералов низкотемпературных гидротермальных ассоциаций. Исключение в данном случае составляют фазы Pt + Ir + Te, выделявшиеся вместе с сульфоарсенидом I (рис.7).

Заключение. Содержащие благородные металлы сульфидные кобальт-медно-никелевые руды КНП сформировались в результате магматической диффренциации в процессе становления интрузий дукукского комплекса норит-кортландитовой формации и дальнейших эпимагматических преобразований. В результате проведенных исследований были уточнены особенности вещественного состава минералов платиноидов, серебра, золота, висмута, теллура, а также тесно связанных с ними сульфоарсенидов в рудах одного из рудопроявлений КНП – Аннабергитовой Щели. Выявление последовательности минералообразования и применение геосенсоров позволили оценить условия формирования минералов ЭПГ, серебра и золота.

Образование минералов благородных металлов на рудопроявлении Аннабергитовая Щель в основном обусловлено эпигенетическими процессами, а магматическое происхождение можно предполагать только для сперрилита.

Ранний, контактово-метасоматический этап связан с внедрением пострудных гранитоидов. При этом образовалась ассоциация сперрилита, ирарсита, редких неназванных фаз Pt + Ir + Te и сульфоарсенида I. Температура образования сульфоарсенида I по [31] составляет 400-500 °С. Это согласуется с оценками условий образования кварц-полевошпатовых метасоматитов при температурах 350-600 °С на глубинах ≤5 км (давление ~ ≤0,15 ГПа) в равновесии с растворами, близкими к нейтральным (pH 4,5-6,5) [1].

Аргентопентландит, волынскит, самородное золото, майченерит и гессит образовались в результате поздних высоко-среднетемпературных гидротермально-метасоматических преобразований. Ассоциация гидротермальных минералов, с которыми они парагенетически связаны, близка к пропилитам. Условия пропилитизации на глубинах ≤5 км (~ ≤0,15 ГПа) при pH 4,5-6,5 и температуре 150-350 °С [1] согласуются с оценками температур по пирит-пирротиновому (около 296 °С) и хлоритовым геотермометрам (от 110 до 340 °С).

Благодарности. *Авторы выражают признательность В.М.Чубарову, В.А.Степанову за полезное обсуждение статьи, а также Н.В.Горбач за критические замечания по тексту.*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бардина Н.Ю.* Систематика метасоматических горных пород и фаций метасоматизма малых глубин / Н.Ю.Бардина, В.С.Попов // Советская геология. 1991. № 6. С. 48-56.

2. *Безмен Н.И.* Пирит-пирротиновый геотермометр: распределение никеля и кобальта / Н.И.Безмен, В.И.Тихомирова, В.П. Косогова // Геохимия. 1975. № 5. С. 700-715.

3. Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в норильских сульфидных рудах / Э.М.Спиридонов, Э.А.Кулагов, А.А.Серова и др. // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 5. С. 445-476. DOI: 10.7868/S0016777015050068

4. Геохимия и минералогия элементов платиновой группы в рудах Кингашского месторождения (Восточный Саян) / Т.А.Радомская, О.М.Глазунов, В.Н.Власова, Л.Ф.Суворова // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 5. С. 363-384. DOI: 10.7868/S0016777017050057

5. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000 000 (третье поколение). Лист N-57. Петропавловск-Камчатский. Объяснительная записка / Б.И.Сляднев, В.Н.Шаповаленко, Н.Ф.Крикун и др. СПб: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2007. 187 с.

6. *Гриценко Ю.Д.* Сульфоарсениды и сульфоантимониды никеля, кобальта, железа и крутовит метаморфогенно-гидротермальных карбонатных жил Норильского рудного поля / Ю.Д.Гриценко, Э.М.Спиридонов // Новые данные о минералах. 2006. № 41. С. 46-55.

7. *Зимин С.С.* Формация никеленосных роговообманковых базитов Дальнего Востока. Новосибирск: Наука, 1973. 90 с.

8. *Конников Э.Г.* Состав флюидных включений в интрузивных породах норит-кортландитового комплекса Камчатки / Э.Г.Конников, О.Н.Васюкова // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 3. С. 227-237. DOI: 10.1134/S1075701507030063

9. *Кунгурова В.Е.* Медно-никелевое рудопроявление Аннабергитовая Щель Камчатской никеленосной провинции / В.Е.Кунгурова, В.А.Степанов, Ю.П.Трухин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № S2. С. 324-333.

10. *Лихачев А.П.* Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан, 2006. 495 с.

11. Медно-никелевое рудопроявление Квинум-I в кортландитах южной части Срединного хребта Камчатки / В.М.Чубаров, Е.К.Игнатьев, С.В.Москалева и др. // Доклады Академии наук. 2005. Т. 403. № 2. С. 1-6.

12. Медно-никелевые руды участка Восточно-Геофизический (Шанучское рудное поле, Камчатка) / Р.М.Новаков, Ю.П.Трухин, В.Е.Кунгурова и др // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебный научный центр». Науки о Земле. 2017. Вып. 33. № 1. С. 34-45.

13. Минералы благородных и редких металлов в рудах Шанучского медно-никелевого месторождения (Камчатка) / В.А.Степанов, В.И.Гвоздев, Ю.П.Трухин и др. // Записки Российского минералогического общества. 2010. Т. 139. № 2. С. 43-58.

14. Платиноиды: ресурсы, производство, рынки, перспективы / Ф.Д.Ларичкин, В.Д.Новосельцева, Ю.Г.Глущенко, М.В.Наумова // Записки Горного института. 2013. Т. 201 С. 39–42.

15. *Полетаев В.А.* Сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения и рудопроявления перидотит-пироксенит-норитовой формации Центральной Камчатки / Платина России. Т. III. Кн. 2. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999. С. 191-199.

16. *Рахимов И.Р.* Сульфидно-платинометальная минерализация изменённых габбро массива Малютка худолазовского комплекса: влияние гидротермальных процессов на тип минеральной ассоциации / И.Р.Рахимов, Д.Е.Савельев, А.В.Вишневский // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2019. № 7(295). С. 15-24. DOI: 10.19110/2221-1381-2019-7-15-24

17. *Селянгин О.Б.* Контаминация магмы, особенности петрогенезиса и распределение рудного вещества в породах никеленосной формации Срединно-Камчатского массива (часть третья) // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебный научный центр». Науки о Земле. 2018. Вып. 4. № 40. С. 5-22. DOI: 10.31431/1816-5524-2018-4-40-5-22

18. *Селянгин О.Б.* Петрология никеленосных базитов Шанучского рудного поля // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебный научный центр». Науки о Земле. 2003. № 2. С. 33-55.

19. *Симакин А.Г.* Оценка условий кристаллизации кортландитов Камчатки по составам амфиболов / А.Г.Симакин, О.Ю.Закревская, Т.П.Салова // Вестник Отделения наук о Земле Российской академии наук. 2012. Т. 4. № NZ9001 DOI:10.2205/2012NZ_ASEMPGR40

20. Состав руд сульфидного медно-никелевого проявления Аннабергитовая Щель (Камчатка) / В.Е.Кунгурова, В.А.Степанов, Ю.П.Трухин, Р.М.Новаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № S31. С. 42-55.

21. *Степанов В.А.* Никеленосность Верхнего Приамурья / В.А.Степанов, А.В.Мельников. Владивосток: Дальнаука, 2010. 217 с.

22. *Тарарин И.А.* Петрология и рудоносность метаморфических и магматических комплексов Центральной и Восточной Камчатки / И.А.Тарарин, З.Г.Бадрединов, В.М.Чубаров. Владивосток: Дальнаука, 2015. 302 с.

23. *Трухин Ю.П.* Камчатская никеленосная провинция / Ю.П.Трухин В.А.Степанов, М.Д.Сидоров // Доклады Академии наук. 2008. Т. 418. № 6. С. 802–806.

24. *Чернышов Н.М.* Особенности распределения и модель механизма фракционирования металлов платиновой группы в сульфидных никелевых рудах еланского типа месторождений. Ст. 2. Геолого-генетическая природа рудномагматической системы еланского типа и механизм фракционирования в рудах металлов платиновой группы / Н.М.Чернышов, М.Н.Чернышова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2011. № 2. С. 148–167.

25. *Afifi A.M.* Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides; Pt. II, Applications to telluride-bearing ore deposits / A.M.Afifi, W.C.Kelly, E.J.Essene // Economic Geology. 1988. Vol. 83(2). P. 395-404. DOI: 10.2113/gsecongeo.83.2.395

26. *Bourdelle F.* Low-temperature chlorite geothermometry: A graphical representation based on a T-R^{2+}-Si diagram / F.Bourdelle, M.Cathelineau // European Journal of Mineralogy. 2015. Vol. 27(5). P. 617-626. DOI: 10.1127/ejm/2015/0027-2467

27. *Cathelineau M.* Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature // Clay Miner. 1988. Vol. 23. Iss. 4. P. 471-485. DOI: 10.1180/claymin.1988.023.4.13

28. Chalcophile and platinum-group element (PGE) concentrations in the sulfide minerals from the McCreedy East deposit, Sudbury, Canada, and the origin of PGE in pyrit / S.A.S.Dare, S.-J.Barnes, H.M.Prichard, P.C.Fisher // Mineralium Deposita. 2011. Vol. 46. P. 381-407. DOI: 10.1007/s00126-011-0336-9

29. Distribution of platinum-group and chalcophile elements in the Aguablanca Ni-Cu sulfide deposit (SW Spain): Evidence from a LA-ICP-MS study / R.Piña, F.Gervilla, S.-J.Barnes, L.Ortega, R.Lunar // Chemical Geology. 2012. Vol. 302-303. P. 61-75. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2011.02.010

30. *Jowett E.C.* Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer. GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting. Toronto. May 27-29. 1991. Program with Abstracts 16. A62.

31. *Klemm D.D.* Syntheses and analyzes in the triangle diagrams FeAsS-CoAsS-NiAsS and FeS_2-CoS_2-NiS_2 // Neues Jahrb. Mineral. 1965. Abh. 103. P. 205-255.

32. Mineralogy, geochemistry and stratigraphy of the Maslovsky Pt-Cu-Ni-sulfide deposit, Noril'sk Region, Russia: Implications for relationship of ore bearing intrusions and lavas / N.A.Krivolutskaya, A.V.Sobolev, S.G.Snisar et al. // Mineralium Deposita. 2012. Vol. 47. P. 69-88. DOI: 10.1007/s00126-011-0372-5

33. *Naldrett A.J.* Magmatic sulfide deposits – Geology, Geochemistry, and Exploration. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 727 p.

Авторы: **Р.М.Новаков,** *канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, 6rom6@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2388-6425* (*Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия*), **В.Е.Кунгурова,** *канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, kunwe@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-6565-9808* (*Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия*), **С.В.Москалева,** *научный сотрудник, svemos@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-8494-6332* (*Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.09.2020.
Статья принята к публикации 29.03.2021.