

УДК 549:553.41

ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ СИНИЛЬГА, ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ

С.К. Кузнецов¹, М.Б. Тарбаев², Н.В. Сокерина¹, Т.П. Майорова^{1,3},
В.Н. Филиппов¹, С.Н. Шанина¹

¹Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, 167982, Россия

²Отдел геологии и лицензирования департамента по недропользованию по северо-западному федеральному округу по Республике Коми (КОМИНЕДРА),
г. Сыктывкар, 167982, Россия

³Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина,
г. Сыктывкар, 167005, Россия

Аннотация

Проведено исследование золоторудного проявления Синильга, находящегося в Кожимском районе Приполярного Урала. Установлено, что золото-сульфидная минерализация наложена на относительно молодые кварцевые жилы, выполняющие крутопадающие трещины отрыва, ориентированные вкрест сланцеватости пород. Сульфиды в рудах представлены в основном крупнокристаллическим галенитом, образующим гнезда, прожилки и вкрапления в жильном кварце. В незначительном количестве отмечаются пирит, пирротин, арсенопирит, халькопирит. Золото находится в тесной ассоциации с сульфидами, главным образом с галенитом, нередко наблюдается в участках развития гипергенных минералов, в трещинах в жильном кварце, нарастает на мелкие кристаллы горно-хрустала. Кристаллизация жильного кварца происходила в гидротермальных хлоридно-натриево-калиевых растворах при значительной роли углекислоты в температурном интервале приблизительно от 390 °С до 270 °С. Золото-сульфидная минерализация отвечает наиболее поздним стадиям минералообразования. Сера галенита имеет преимущественно утяжеленный изотопный состав (значения $\delta^{34}\text{S}$ галенита изменяются от +2.9‰ до +10‰ и в основном находятся в интервале 7.3–10‰), свидетельствующий о ее первично осадочном происхождении при подчиненном значении магматогенных источников. Предполагается, что важнейшую роль в формировании рудопроявления Синильга играли гидротермальные процессы, обусловленные проявлением позднепалеозойского регионального метаморфизма зеленосланцевой фации.

Ключевые слова: золото, состав руд, изотопия серы, генезис, рудопроявление Синильга, Приполярный Урал

На Приполярном Урале известны гидротермальные проявления золота, связанные в основном с сульфидно-кварцевыми жилами и зонами прожилково-вкрапленной сульфидной минерализации. Их изучение представляет большой интерес для развития существующих представлений о региональных закономерностей рудообразования. На западном склоне Приполярного Урала выделяется

Кожимский рудно-россыпной район, охватывающий территорию верховьев р. Кожим с притоками Балбан-Ю, Каталамби-Ю, Кузь-Пуа-Ю, Николай-Шор и др. В этом районе расположен ряд золоторудных проявлений и месторождений, в частности Чудное, Караванное, Синильга, Каталамбинское, открытых в 70–90-е годы XX в. в ходе геологических работ, проводившихся ПГО Полярноуралгеология (г. Воркута), ЦНИГРИ (г. Москва), ИГ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар), ИГТ УрО РАН (г. Екатеринбург) и другими производственными и научно-исследовательскими организациями. Сведения о золотоносности Кожимского района изложены в работах Л.В. Акимова, Г.И. Бойчевского, В.П. Володазской, Л.И. Ефановой, А.Ф. Карчевского С.К. Кузнецова, А.И. Ладыгина, А.А. Малюгина, В.В. Мурзина, В.С. Озерова, С.А. Онищенко, Н.М. Риндзюнской, М.Б. Тарбаева и других геологов. Несмотря на значительный объем исследований, многие геолого-генетические вопросы остаются дискуссионными.

Рудопроявление Синильга открыто в 1984 г. в верховьях р. Сурасть-Рузь-Вож (бассейн р. Балбан-Ю). Здесь при проведении геолого-съёмочных работ Э.Н. Озеровой (ПГО Полярноуралгеология) в делювиальных отложениях обнаружены развалы кварцевых жил с галенитом, пиритом и видимым золотом. Позднее изучение рудопроявления Синильга проводилось сотрудниками Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Были, в частности, получены сведения о минеральном составе руд, золоте, флюидных включениях в жильном кварце (см., например, [1–4] и др.). В последнее время нами выполнены более детальные исследования, впервые определен изотопный состав серы в сульфидах, уточнены условия рудообразования.

Геологическое строение

В геологическом строении Кожимского района принимают участие осадочные, вулканогенно-осадочные и магматические породы разного состава и возраста от раннего протерозоя до ордовика. Этот район характеризуется сложной историей геологического развития, включающей неоднократное проявление тектоно-магматических, метаморфических, гидротермальных процессов, обусловивших широкое развитие разнообразной жильной минерализации [5–7].

Золоторудное проявление Синильга расположено в южной части Кожимского района на пологом участке правобережья р. Сурасть-Рузь-Вож в непосредственной близости от ранее разрабатывавшейся золотоносной россыпи (рис. 1). Оно приурочено к северо-восточному экзоконтакту Народинского гранитного массива. Вмещающие породы представлены хлорит-мусковит-кварцевыми сланцами пуйвинской свиты среднего рифея. В сланцах отмечаются маломощные тела metabазитов верхнекожимского комплекса и плагиогранитов. Метаморфизм пород соответствует мусковит-хлоритовой субфации фации зеленых сланцев. Прослеживаются многочисленные разрывные нарушения различной ориентировки. Основными являются нарушения север-северо-восточного и субширотного простирания.

В пределах проявления в делювии наблюдается большое количество развалов кварцевых жил. Величина глыб жильного кварца достигает 0.8–1 м. Многие жилы вскрыты канавами в коренном залегании. Наиболее широко распространены кварцевые, карбонат-кварцевые, карбонат-хлорит-кварцевые жилы и прожилки,

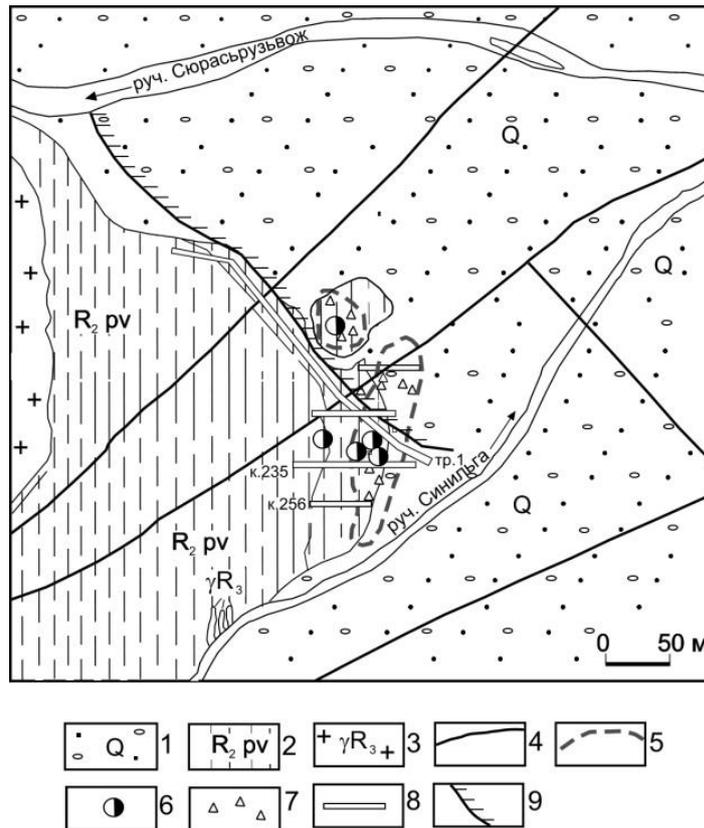


Рис. 1. Схема геологического строения золоторудного проявления Синильга: 1 – четвертичные отложения; 2 – верхняя и средняя толщи пуйвинской свиты среднего рифея: темно-серые, серо-зеленые серицит-кварцевые, серицит-альбит-кварцевые сланцы; 3 – гранитоиды Народинского массива; 4 – разрывные нарушения; 5 – золоторудные участки; 6, 7 – золото-сульфидно-кварцевые жилы и их развалы; 8 – горные выработки (канавы и траншеи); 9 – контур золотоносной россыпи

залегающие в трещинах, согласных сланцеватости вмещающих пород (согласные жилы). Жилы имеют линзовидную, линзовидно-четковидную, плитовидную форму. Мощность их колеблется от нескольких сантиметров до 1.5–2 м. Контакты жил с вмещающими породами резкие, нарушенные. Породы около жил обычно сильно рассланцованы, иногда гидротермально изменены: хлоритизированы, мусковитизированы. Жильный кварц гигантозернистый молочно-белый. В основной массе молочно-белого кварца иногда видны прозрачные участки. Некоторые жилы (линзы) сложены почти полностью прозрачным слабодымчатым кварцем. При изучении кварца в шлифах обнаруживаются признаки пластических деформаций и начальных стадий перекристаллизации (грануляции).

Наряду с согласными кварцевыми жилами для проявления Синильга характерны жилы, выполняющие крутопадающие трещины отрыва субширотного простирания. Важным обстоятельством является то, что именно с этими жилами связана золоторудная (золото-сульфидная) минерализация. Рудные жилы вскрыты в коренном залегании траншеей и одной из канав. Кроме того, подобные жилы обнаружены нами в контурах золотоносной россыпи в ее плотике.

Поперечные, в том числе рудные, жилы имеют плитовидную форму, их мощность составляет 0.3–0.5 м, иногда достигает 0.8 м. Контакты жил с вмещающими породами резкие, породы обычно гидротермально изменены, что проявляется в их осветлении, серицитизации, повышенной пористости (рыхлости). Жильный кварц гигантозернистый молочно-белый. Нередко в нем отмечаются трещины и небольшие полости с мелкими хорошо ограненными кристаллами горного хрусталя. Сульфиды, преимущественно галенит и пирит, наложены на жильный кварц по трещинам и образуют прожилки, вкрапления единичных зерен или их скопления. В зальбандах кварцевых жил присутствуют пустоты, образованные при выщелачивании карбонатов. В большом количестве развиты бурые, красновато-бурые охристые оксиды и гидроксиды железа.

Золото-сульфидная минерализация

В рудных кварцевых жилах золото находится в тесной ассоциации с галенитом, пиритом, пирротином, арсенопиритом, халькопиритом. Содержание золота в участках скопления сульфидов по данным атомно-абсорбционного анализа 40 штуфных проб колеблется от 0.2 до 825 г/т и составляет в среднем 68.1 г/т.

Галенит является основным минералом руд, образует вкрапления, прожилки и крупные гнезда до 10–15 см в поперечнике в жильном кварце (рис. 2). Величина кристаллов галенита достигает 1.5–2 см. Галенит нарастает на зерна пирита, арсенопирита, кристаллы горного хрусталя. Нередко наблюдается развитие галенита по трещинам в пирите. Галенит часто замещается англезитом и церусситом.

Пирит встречается довольно часто, но в незначительном количестве. Представлен единичными крупными кристаллами кубической формы и их сростками, находящимися в жильном кварце. Величина кристаллов колеблется от 0.01 мм до 0.5–1.5 см. По периферии зерен пирита и по трещинам в нем довольно часто наблюдается развитие гетита, гидрогетита. Отмечаются сростки зерен пирита с арсенопиритом.

Пирротин встречается редко в виде единичных пластинчатых зерен размерами от 0.01 до 0.03 мм обычно в сростаниях с пиритом.

Арсенопирит также относится к числу редко встречающихся сульфидов. Представлен ромбовидными зернами размером 0.5–3 мм в сростаниях и в виде включений в пирите. Арсенопирит нередко в значительной степени замещен скородитом.

Халькопирит встречается редко и находится в сростаниях с другими сульфидами, в трещинах в пирите. Выделения халькопирита характеризуются незначительными размерами от 0.005 до 0.025 мм и неправильной сложной формой.

Согласно данным спектрального анализа мономинеральных проб сульфидов в пирите в небольшом количестве присутствует As (вероятно, за счет включений и примазок арсенопирита), в галените – Bi, Sb, Cd [1].

Из гипергенных минералов методом микросондового анализа наряду с гетитом, гидрогетитом, англезитом, церусситом, скородитом обнаруживаются точно не диагностированные минеральные фазы более сложного непостоянного состава близкие к ярозиту – $KFe_3[SO_4]_2(OH)_6$, плюмбоярозиту – $PbFe_6[SO_4]_4(OH)_{12}$, бедантиту – $PbFe_3[AsO_4](SO_4)(OH)_6$, миметиту – $Pb_5[AsO_4]_3Cl$. Из элементов-примесей в них иногда устанавливаются Cu, Se, Zn.

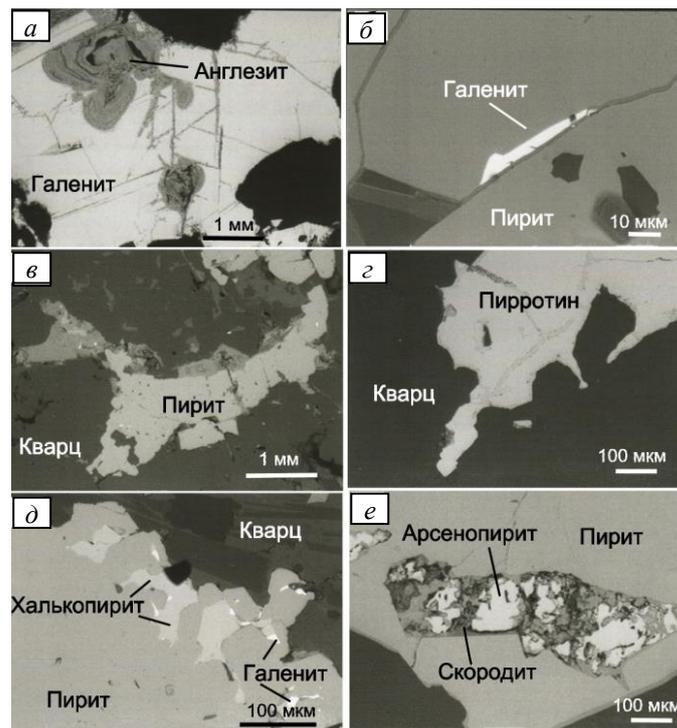


Рис. 2. Сульфиды в золоторудных жилах проявления Синильга: *а* – галенит в кварце, частично замещенный англезитом; *б* – галенит в пирите; *в* – пирит с развивающимися по нему гидроксидами железа; *г* – пирротин в кварце; *д* – халькопирит и галенит в пирите; *е* – арсенопирит в пирите, частично замещенный скородитом

Золото, как отмечалось выше, сосредоточено преимущественно в участках скопления сульфидов, в охристых массах гипергенных минералов (гетит, гидрогетит, ярозит, плюмбоярозит и др.), развивающихся по пириту, галениту, арсенопириту, в трещинах в жильном кварце, в том числе в трещинах и полостях с мелкими кристаллами горного хрусталя (рис. 3). Основным концентратором золота является галенит, а также продукты его изменения. По данным нейтронно-активационного анализа [1] содержание Au в галените составляет 1.1–5.2 г/т (в отдельных пробах оно значительно выше и достигает 718 г/т). В пирите Au устанавливается не всегда, его содержание составляет 1.4–4.9 г/т (в отдельных пробах до 18 г/т).

При изучении ашлифов и протолок штучных проб устанавливается, что величина частиц золота варьирует от 0.1 до 4 мм. Преобладают мелкие частицы золота величиной от 0.25 до 0.9 мм. Форма частиц золота разнообразная. Наиболее часто отмечаются уплощенно-комковатые и изометричные частицы. Нередко встречаются золотины сложной формы с ответвлениями и выступами, а также пластинчатые, чешуйчатые и удлиненные частицы гантелевидной, изогнутой, крючковатой формы. Коэффициент удлинения колеблется от 3.5 до 5.5. Иногда частицы золота образуют сложные ажурные агрегаты. Обращают на себя внимание пленочные выделения золота, наблюдаемые на стенках пустот выщелоченного пирита. На многих частицах золота хорошо выражены гранные поверхности. Более того, около 14% частиц золота в изученных нами пробах

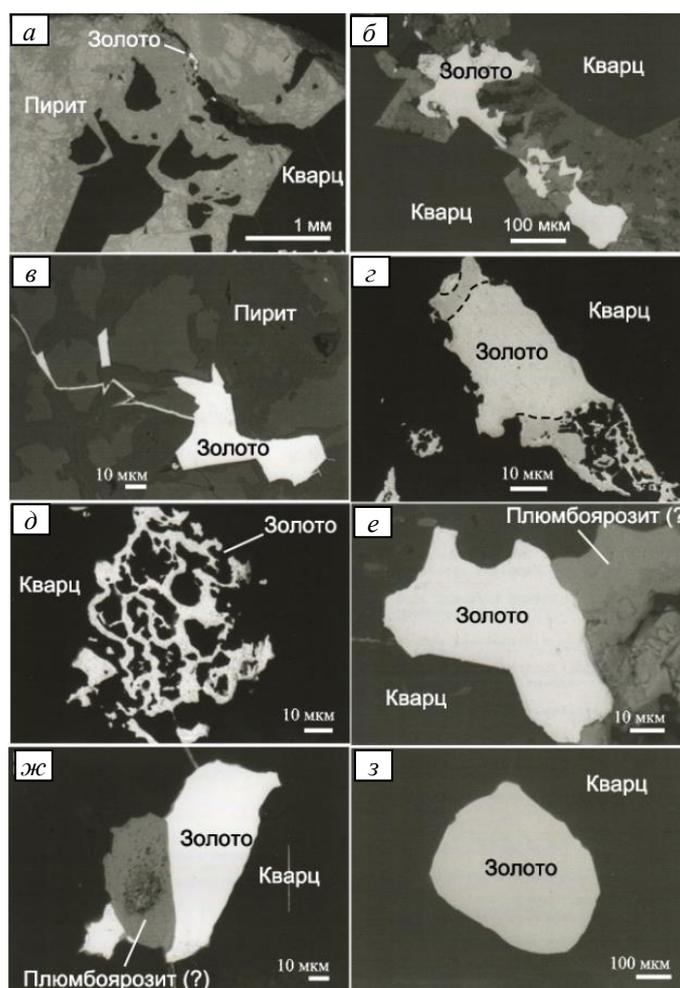


Рис. 3. Золото рудопроявления Синильга: *a-d* – золото в пирите и продуктах замещения сульфидов гипергенными минералами; *z* – частица золота с неравномерным распределением примесей (пунктирной линией выделены участки с повышенным содержанием Ag); *д* – фрагмент частицы золота сложной ажурной формы; *e-z* – золото в жильном кварце

представлены достаточно полно ограниченными кристаллами величиной до 1 мм, нарастающими на стенки открытых трещин, на кристаллы горного хрусталя. Гониометрические исследования показали, что основными гранными формами являются октаэдр, куб, ромбододекаэдр, реже отмечаются грани пентагондодэкаэдра, тетрагонтриоктаэдра.

Поверхность частиц золота ямчатая, кавернозная. Нередко обнаруживаются отпечатки зерен других минералов, отпечатки стенок трещин, в которых происходило отложение золота, ступени роста. В углублениях, кавернах и на относительно ровных участках наблюдаются скопления и пленки бурых, красновато-бурых гидроксидов железа, в основном гетита и гидрогетита. Отмечаются серые, светло-серые скопления мелких (до 10 мкм) кристаллов церуссита таблитчатого облика, единичные кристаллы самородной серы. На нескольких частицах золота М.Б. Тарбаевым [1] обнаружены пленочные образования (толщиной 2–5 мкм)

Табл. 1

Химический состав золота рудопроявления Синильга по данным микронзондового анализа, мас. %

№ обр.	Au	Ag	Сумма	Пробность
533	93.56	6.07	99.63	939
	95.81	6.38	102.19	938
	91.17	6.86	98.03	930
	90.94	8.54	99.48	914
	91.29	7.43	98.72	925
533/7	90.28	9.37	99.65	906
	91.52	9.52	101.04	906
	89.82	9.47	99.29	905
534	95.62	5.86	101.48	942
	92.78	6.19	98.97	937
	92.51	8.21	100.72	918
	95.71	5.93	101.11	941
724	93.51	6.54	100.05	935
	90.28	8.05	98.33	918
	94.12	6.78	100.90	933
	92.37	9.05	101.42	911
4572-1a	74.47	21.43	95.90	777
	96.08	2.92	98.94	971
4572-13	77.83	23.56	101.39	768
	65.70	36.39	102.09	644
	72.65	26.51	99.16	733
Среднее	88.95	11.00	99.93	890

Примечание. Анализы выполнены в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН на электронном микроскопе JSM-6400 с энергетическим рентгеновским спектрометром фирмы Link. Оператор В.Н.Филиппов.

диагностированные как гематофанит – $Pb_4Fe_3O_8(OH,Cl)$. В виде включений в золоте иногда присутствуют мелкие зерна пирита, арсенопирита, теннанита (?).

Из элементов примесей в золоте устанавливается Ag, содержание которого варьирует в широких пределах, но в большинстве случаев не превышает 10 мас. % (табл. 1). Содержание Ag в частицах золота, находящихся в сростаниях с сульфидами обычно выше, чем в частицах, локализованных в трещинах в жильном кварце. В основном золото относится к умеренно высокопробному и высокопробному. В одной из частиц золота нами обнаружено весьма неравномерное распределение серебра, содержание которого в основном объеме составляет 8–10 мас. %, а в отдельных периферийных участках достигает 40 мас. % (рис. 3, з). Такие участки достаточно хорошо выражены и имеют вид нарастаний (кайм?) или прожилок.

Условия рудообразования

Формирование рудной минерализации связано с гидротермальными процессами, проявление которых было длительным и стадийным. Сначала в трещинах, согласных сланцеватости вмещающих пород, произошло образование многочисленных линзовидных, линзовидно-четковидных, плитовидных кварцевых жил. Эти жилы претерпели воздействие тектонических подвижек, и в результате

сдавливающих деформаций жильный кварц подвергся частичной перекристаллизации (грануляции). Затем после перерыва образовались жилы поперечной по отношению к сланцеватости пород ориентировки, пересекающие согласные жилы. И те, и другие жилы являются телами выполнения, кристаллизация кварца происходила в гидротермальных растворах в полостях. Кварцевые индивиды зарождались на стенках трещин и росли, тесно соприкасаясь друг с другом и постепенно заполняя пустотное пространство. На заключительных стадиях минералообразования на поперечные кварцевые жилы по трещинам наложилась хрусталеносная и золото-сульфидная минерализация. Учитывая наблюдаемые в штуфах и аншлифах взаимоотношения минералов, можно полагать, что первыми из сульфидов отлагались пирит, арсенопирит, пирротин, затем халькопирит и галенит. Отложение основной массы золота, вероятнее всего, началось одновременно с галенитом и продолжалось после его кристаллизации. При этом отмечают признаки того, что галенит и золото являются более поздними не только по отношению к другим сульфидам, но и кристаллам горного хрусталя, на которые они нарастают.

Ранее для оценки физико-химических параметров минералообразования нами проведено изучение флюидных включений в жильном кварце и горном хрустале, определен изотопный состав углерода, кислорода и водорода [4]. Судя по температурам гомогенизации включений формирование жильного кварца, в том числе кварца рудных жил, происходило при температурах около 290–390 °С. Температуры кристаллизации горного хрусталя были несколько ниже (270–290 °С). Вероятно, отложение золота происходило при близких температурах. Гидротермальные растворы имели преимущественно хлоридно-натриево-калиевый состав. При этом, как свидетельствуют результаты изучения флюидных включений методами газовой хроматографии и рамановской спектроскопии, образование золото-сульфидных кварцевых жил происходило при активном участии углекислоты, что, в общем, является характерным и отмечалось многими авторами для различных золоторудных месторождений [8, 9]. Изотопный состав углерода, кислорода и водорода из флюидных включений в жильном кварце указывает на то, что вода гидротермальных растворов, вероятнее всего, является поверхностной метеогенной, а обогащение растворов углекислотой происходило за счет разложения карбонатов из осадочных пород.

В табл. 2 приведены полученные нами результаты определения изотопного состава серы галенита. Анализы выполнены в ЦИИ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) и в лаборатории стабильных изотопов ЦКП ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (Thermo Scientific, Германия) с использованием двойной системы напуска [10]. Соотношение изотопов серы представлено относительно стандарта CDT (троилитовая фаза метеорита Каньон-Дьябло). Погрешность определения $\delta^{34}\text{S}$ составляет $\pm 0.2\%$.

Значения $\delta^{34}\text{S}$ галенита изменяются от +2.9‰ до +10‰ и в основном находятся в интервале 7.3–10 ‰. При расчетах по методике Х. Омото и Р.О. Рай [17] с учетом вероятных температур минералообразования по данным изучения флюидных включений в жильном кварце получены значения изотопного состава серы флюида ($\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$), равновесного с галенитом, варьирующие от +4.5‰ до +12.9‰. Очевидно, сера галенита и сера сероводорода рудообразующих флюидов проявления Синильга имеет явно утяжеленный изотопный состав. Это свойственно

Табл. 2

Изотопный состав серы галенита рудопоявления Синильга и расчет изотопного состава серы сероводорода флюида в диапазоне температур 350–200 °С

№ обр.	$\delta^{34}\text{S}$, ‰ CDT	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$, ‰ CDT			
		350 °С	300 °С	250 °С	200 °С
С-1	2.9	4.5	4.8	5.2	5.7
С-2	8.6	10.2	10.5	10.9	11.4
С-3	8.5	10.3	10.4	10.8	11.3
Т-724-1	7.3	8.9	9.2	9.6	10.1
Т-724	9.2	10.8	11.1	11.5	12.0
Т-724А	9.0	10.6	10.9	11.3	11.8
Т-4206А-1	7.7	9.3	9.6	10.0	10.5
Т-4206Ф	10.0	11.6	11.9	12.3	12.8

Примечание. Для расчета $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ во флюиде использованы коэффициенты разделения изотопов по [17].

большинству рудопоявлений Приполярного Урала, характеризующихся вариациями $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов от +2.9‰ до +15.7‰ [11].

Согласно результатам исследований ряда авторов, изотопный состав серы сульфидов гидротермальных золоторудных месторождений изменяется в достаточно широких пределах. Утяжеленный изотопный состав серы сульфидов установлен, в частности, для золото-сульфидного месторождения Сухой Лог [12, 13], некоторых золото-сульфидных и золото-кварцевых месторождений Южного Урала [14] и других регионов [15]. Такие месторождения, как золото-сульфидное месторождение Майское, золото-кварцевые месторождения Нежданинское, Школьное и другие месторождения Верхоянского, Яно-Колымского, Чукотского рудных поясов, характеризуются облегченным изотопным составом серы сульфидов, значения $\delta^{34}\text{S}$ изменяются от –10‰ до +0.8‰ [8, 16]. Вариации изотопного состава серы обусловлены особенностями формирования золоторудных месторождений, различной природой гидротермальных растворов, различными источниками серы, возрастом месторождений и другими факторами.

Как известно, изотопный состав магматогенной серы обычно колеблется в достаточно узких пределах от –3‰ до +3‰ [17]. Хотя в гранитах иногда отмечаются сульфиды с утяжеленным изотопным составом серы, что объясняется захватом серы осадочного генезиса. Изотопный состав серы водно-морских и осадочных сульфатов колеблется от +10 до +30‰, а осадочных сульфидов – от –70‰ до +70‰. Утяжеленный изотопный состав серы галенита проявления Синильга, заметно отличающийся от изотопного состава типичной магматогенной серы, позволяет предположить участие в рудообразовании преимущественно осадочной серы, заимствованной гидротермальными флюидами из вмещающих рифейских пород. В какой-то мере это подтверждается тем, что согласно полученным нами данным сера пирита, наблюдающегося в виде вкраплений в тех же породах, что и золото-сульфидно-кварцевые жилы проявления Синильга на значительном удалении от этого проявления и вне связи с зонами гидротермального минералообразования, также характеризуется утяжеленным составом ($\delta^{34}\text{S}$ варьирует от +13.0‰ до +13.7‰). Вместе с этим установленный в одном из анализов галенита проявления Синильги сравнительно более облегченный изотопный состав серы ($\delta^{34}\text{S} = +2.9\text{‰}$, $\delta^{34}\text{S}_{\text{флюида}} = +4.5\text{‰}$) может рас-

смагиваться как признак присутствия в составе флюидов не только осадочной, но и магматогенной серы. Существенное отличие рудопроявления Синильга и других подобных месторождений от месторождений с облегченным изотопным составом серы сульфидов, возможно, связано с более молодым возрастом последних и особенностями изменения изотопного состава серы сульфата морской воды в ходе геологического времени [12].

Рассматривая условия формирования рудопроявления Синильга, следует заметить, что кварцевые жилы, залегающие согласно сланцеватости вмещающих пород, весьма характерны для Приполярного Урала. Подобные жилы развиты в породах разного состава и возраста и являются гидротермально-метаморфогенными. Что касается золоторудных кварцевых жил, то обращают на себя внимание такие их особенности, как залегание в трещинах, секущих сланцеватость пород, пересечение ими согласных жил, присутствие наложенных хрусталеносных прожилков. По этим особенностям золоторудные жилы проявления Синильга подобны хрусталеносным кварцевым жилам, также широко развитым на Приполярном Урале, сведения о которых изложены во многих работах [18–21]. Образование хрусталеносных жил происходило в позднепалеозойское (пермское) время при проявлении гидротермальных процессов, обусловленных главным образом региональным метаморфизмом зеленосланцевой фации. На основе результатов изучения изотопного состава гелия и неона из включений в горном хрустале отмечается участие в этих процессах мантийных флюидов [20]. Хрусталеносные жилы, минеральный состав которых сильно зависит от состава вмещающих пород, обычно не несут рудную минерализацию, однако сульфиды в них в небольшом количестве нередко присутствуют, известны единичные находки золота [19]. Рядом авторов показано, что формирование хрусталеносной и рудной, в том числе золоторудной, минерализации взаимосвязано [20, 22, 23]. Правомерно допустить, что кварцевые жилы проявления Синильга, с наложенной золото-сульфидной минерализацией, выполняющие поперечные трещина отрыва, близки по времени и условиям образования к хрусталеносным кварцевым жилам и также являются позднепалеозойскими гидротермально-метаморфогенными. Региональный метаморфизм зеленосланцевой фации способствовал широкому развитию гидротермальных и гидротермально-метасоматических процессов с мобилизацией воды, серы и, возможно, других компонентов из вмещающих пород, о чем, в частности, свидетельствуют результаты изучения изотопного состава кислорода и водорода флюидных включений в жильном кварце и серы галенита. Отмечающееся присутствие в составе галенита относительно облегченной магматогенной серы позволяет считать, что состав рудообразующих растворов определялся не только осадочными, но и в какой-то степени магматическими породами либо компонентами последних, находящимися в осадочных породах. Генетическая связь гидротермальных растворов и, соответственно, золото-сульфидно-кварцевых жил проявления Синильга с магматическими процессами, в том числе со становлением Народинского гранитоидного массива, маловероятна, тем более, что возраст магматических образований Кожимского района в последнее время оценивается как доордовикский. Вместе с этим нельзя полностью исключать возможность частичного притока магматогенных растворов в связи с активизацией в позднем палеозое

как тектонических и метаморфических процессов, так и глубинных магматических процессов.

Заключение

Важной особенностью рудопроявления Синильга является то, что золото-сульфидная минерализация наложена на относительно молодые кварцевые жилы, выполняющие крутопадающие трещины отрыва, ориентированные вкрест сланцеватости вмещающих пород, тогда как более ранние кварцевые жилы, согласные сланцеватости пород, являются безрудными. При этом большинство других золотосульфидных проявлений Кожимского района связано преимущественно с субмеридианальными зонами развития прожилково-вкрапленной и вкрапленной сульфидной минерализации, согласными сланцеватости пород. Следовательно, в региональном плане золотосульфидная минерализация контролируется не только субмеридианальными, но и широтными и субширотными разрывными нарушениями.

Сульфиды в рудах проявления Синильга представлены в основном крупнокристаллическим галенитом, образующим гнезда, прожилки и вкрапления в жильном кварце. В незначительном количестве присутствуют пирит, пирротин, арсениопирит, халькопирит. Широко развиты гипергенные минералы: гетит, гидрогетит, англезит, ярозит, церуссит, скородит. Золото находится в тесной ассоциации с сульфидами, главным образом, с галенитом, нередко наблюдается в участках развития гипергенных минералов, в трещинах в жильном кварце, нарастает на мелкие кристаллы горного хрусталя. Из элементов примесей в золоте отмечается серебро (до 10 мас. %).

Кристаллизация рудоносного жильного кварца происходила в гидротермальных хлоридно-натриево-калиевых растворах при значительной роли углекислоты в температурном интервале приблизительно от 390 °С до 270 °С. Золото отлагалось на поздних стадиях минералообразования. Сера галенита имеет преимущественно утяжеленный изотопный состав (значения $\delta^{34}\text{S}$ галенита изменяются от +2.9‰ до +10‰ и в основном находятся в интервале 7.3–10‰), свидетельствующий о ее первично осадочном происхождении при подчиненном значении магматогенных источников. Можно предполагать, что формирование рудопроявления Синильга связано с активизацией эндогенных процессов в позднепалеозойское время при важнейшей роли регионального метаморфизма зеленосланцевой фации.

Благодарности. Работа выполнена по теме НИР госзадания (ГР № АААА-А17-117121270036-7) ИГ Коми НЦ УрО РАН при частичной финансовой поддержке проекта УрО РАН № 18-5-5-57.

Литература

1. *Тарбаев М.Б.* Жильный тип золоторудной минерализации Приполярного Урала: Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. – Сыктывкар, 1991. – 16 с.

2. *Тарбаев М.Б., Кузнецов С.К.* Золоторудное проявление Синильга на Приполярном Урале // Сыктывкарский минерал. сб. – Сыктывкар, 1996. – № 25. – С. 94–103. (Тр. Ин-та геол. Коми НЦ УрО РАН, Вып. 90.)
3. *Тарбаев М.Б., Кузнецов С.К.* Палеозойские золоторудные кварцевые жилы на Приполярном Урале // Докл. РАН. – 1996. – Т. 350, № 5. – С. 658–660.
4. *Сокерина Н.В., Шанина С.Н., Зыкин Н.Н., Исаенко С.И., Пискунова Н.Н.* Условия формирования золоторудной минерализации на проявлении Синильга, Приполярный Урал (по данным изучения флюидных включений) // Зап. Рос. минерал. о-ва. – 2013. – Ч. 142, Вып. 6. – С. 88–104.
5. *Фишман М.В., Юшкин Н.П.* Проблемы металлогении Европейского Северо-Востока. – Сыктывкар: Коми филиал АН СССР, 1980. — 29 с. (Серия препринтов «Научные доклады», Вып. 57.)
6. *Тимонина Р.Г.* Петрология метаморфических пород Приполярного Урала. – Л.: Наука, 1980. – 102 с.
7. *Пыстин А.М.* Полиметаморфические комплексы западного склона Урала. – СПб.: Наука, 1994. – 208 с.
8. *Бортников Н.С., Брызгалов И.А., Кривицкая Н.Н., Прокофьев Ю.В., Викентьева О.В.* Майское многоэтапное прожилково-вкрапленное золото-сульфидное месторождение (Чукотка, Россия): минералогия, флюидные включения, стабильные изотопы и условия образования // Геология рудных месторождений. – 2004. – Т. 46, № 6. – С. 475–509.
9. *Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Рябуха М.А., Тимкина А.Л.* Золоторудное месторождение Герфед: характеристика флюидов и РТ-условия образования кварцевых жил (Енисейский кряж, Россия) // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 11. – С. 1851–1867.
10. *Гриненко В. А.* Приготовление двуокиси серы для изотопного анализа // Журн. неорганической химии. – 1962. – № 7. – С. 2578–2582.
11. *Майорова Т. П.* Изотопия серы и свинца сульфидов золоторудных месторождений севера Урала // Геология и минеральные ресурсы европейского северо-востока России: Материалы XV геол. съезда Республики Коми. – Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2009. – Т. II. – С. 274–276.
12. *Chang Zh., Large R., Maslennikov V.* Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: Evidence for an early timing and a seawater sulfur source // *Geology*. – 2008. – V. 36, No 12. – P. 971–974.
13. *Дубинина Е.О., Иконникова Т.А., Чугаев А.В.* Изотопные вариации серы на месторождении Сухой Лог // XIX симпозиум по геохимии стабильных изотопов им. акад. А.П. Виноградова: Тез. докл. – М.: Акварель, 2010. – С. 102–106.
14. *Мичурин С.В., Крупенин М.Т., Шарипова А.А.* Изотопный состав серы сульфидов в рифейских отложениях западного склона Южного Урала // XIX симпозиум по геохимии стабильных изотопов им. акад. А.П. Виноградова: Тез. докл. – М.: Акварель, 2010. – С. 251–254.
15. *Goldfarb R.J., Baker T., Dubé D., Groves D.I., Craig J.R., Hart C.J., Patrice Gosselin P.* Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes // *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. – Society of Economic Geologists, Inc., 2005. – P. 407–450.
16. *Горячев Н.А.* Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. – 143 с.
17. *Омото Х., Рай Р.О.* Изотопы серы и углерода // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. – М.: Мир, 1982. – С. 403–450.

18. *Карякин А.Е., Смирнова В.А.* Структуры хрусталеносных полей. – М.: Недра, 1967. – 240 с.
19. *Буканов В.В.* Горный хрусталь Приполярного Урала. - Л.: Наука, 1974. – 212 с.
20. *Козлов А.В.* Хрусталеобразование в гидротермальных палеосистемах: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. – СПб., 1998. – 42 с.
21. *Кузнецов С.К.* Жильный кварц Приполярного Урала. – СПб.: Наука, 1998. – 203 с.
22. *Огородников В.Н., Сазонов В.Н.* Соотношение золоторудных и хрусталеносных месторождений обрамления гнейсовых блоков Урала. – Свердловск: УрО АН СССР, 1991. – 72 с.
23. *Водолазская В.П., Берлянд Н.Г., Котов К.Н., Шергина Ю.П., Маречев А.М., Акимов Л.В.* Кожимская область тектоно-магматической активизации и ее золотоносность // Руды и металлы. – 1996. – № 4. – С. 16–27.

Поступила в редакцию
22.01.18

Кузнецов Сергей Карпович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией минералогии

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН
ул. Первомайская, д. 54, г. Сыктывкар, 167982, Россия
E-mail: kuznetsov@geo.komisc.ru

Тарбаев Михаил Борисович, кандидат геолого-минералогических наук, начальник

Отдел геологии и лицензирования департамента по недропользованию по северо-западному федеральному округу по Республике Коми (КОМИНЕДРА)
ул. Интернациональная, д. 157, г. Сыктывкар, 167982, Россия

Сокерина Наталья Владимировна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории минералогии

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН
ул. Первомайская, д. 54, г. Сыктывкар, 167982, Россия
E-mail: sokerina@geo.komisc.ru

Майорова Татьяна Петровна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории минералогии; заместитель заведующего кафедры геологии

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН
ул. Первомайская, д. 54, г. Сыктывкар, 167982, Россия
Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина
ул. Петрозаводская, д. 120, г. Сыктывкар, 167005, Россия
E-mail: mayorova@geo.komisc.ru

Филиппов Василий Николаевич, старший научный сотрудник лаборатории экспериментальной минералогии

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН
ул. Первомайская, д. 54, г. Сыктывкар, 167982, Россия

Шанина Светлана Николаевна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории экспериментальной минералогии

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН
ул. Первомайская, д. 54, г. Сыктывкар, 167982, Россия
E-mail: shanina@geo.komisc.ru

**Gold-Sulphide Mineralization and Formation Conditions
of Sinilga Deposit (Subpolar Urals)***S.K. Kuznetsov^{a*}, M.B. Tarbaev^b, N.V. Sokerina^{a**}, T.P. Mayorova^{a,c***},
V.N. Filippov^a, S.N. Shanina^{a****}*^a*Institute of Geology of the Komi Science Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Syktyvkar, 167982 Russia*^b*Geology and Licensing Office, Subsoil Management Department for the Northwestern Federal District
in the Komi Republic (KOMINEDRA), Syktyvkar, 167982 Russia*^c*Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar, 167005 Russia*E-mail: **kuznetsov@geo.komisc.ru*, ***sokerina@geo.komisc.ru*,****mayorova@geo.komisc.ru*, *****shanina@geo.komisc.ru*

Received January 22, 2018

Abstract

Hydrothermal gold deposits are known in the Subpolar Urals, which are mainly associated with sulfide-quartz veins and zones of vein-disseminated sulfide mineralization. Their investigation is very important for the development of the existing ideas about the regional patterns of ore formation. We have studied the material composition and formation conditions of gold-sulfide ores from the Sinilga deposit. As a result of the study, we have established that the gold-sulfide mineralization of this deposit is superimposed on relatively young quartz veins filling the steeply dipping fractures oriented across the foliation of the rocks. Sulfides in the ores are mainly represented by coarse-grained galena, forming nests, veins and inclusions in vein quartz. Pyrite, pyrrhotite, arsenopyrite, and chalcopyrite are present in insignificant amounts. Hypergenic minerals are widely developed: goethite, hydrogoethite, anglesite, jarosite, cerussite, and scorodite. Gold is closely associated with sulfides, mainly with galena, which is often observed in areas of development of hypergenic minerals, in fractures of vein quartz, grows on small crystals of rock crystal. The composition of gold includes an admixture of silver (up to 10 wt. %). Crystallization of quartz of gold-bearing veins occurred in hydrothermal chloride-sodium-potassium solutions with a significant proportion of carbon dioxide in the temperature range from approximately 390 °C to 270 °C. Gold-sulfide mineralization corresponds to the latest stages of mineral formation. Sulfur of galena has a predominantly heavier isotopic composition (galena $\delta^{34}\text{S}$ vary from +2.9‰ to +10‰ and are mainly in the range of 7.3–10‰), indicating its primary sedimentary origin with a subordinate value of magmatic sources. We have suggested that hydrothermal processes played the most important role in the formation of the Sinilga deposit. They were conditioned by the Late Paleozoic metamorphism of the greenschist facies.

Keywords: gold, ore composition, sulfur isotopy, genesis, Sinilga ore occurrence, Subpolar Urals

Acknowledgments. The study was performed within the research and development project of the state task (SR no. AAAA-A17-117121270036-7) for the Institute of Geology of the Komi Science Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences and supported in part by the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (project no. 18-5-5-57).

Figure Captions

Fig. 1. Geological structure of the Sinilga gold deposit: 1 – quaternary deposits; 2. – upper and middle strata of the Middle Riphean Puyvinskaya series: dark gray. gray-green sericite-quartz. sericite-albite-quartz schists; 3 – granitoids of Narodinsk massif; 4 – faulting; 5 – gold-mining areas; 6, 7 – gold-sulphide-quartz veins and disintegrated sulphide-quartz veins; 8 – mining (ditches and trenches); 9 – outline of gold placer.

Fig. 2. Sulphides in the gold ore veins of the Sinilga deposit: *a* – galena partially substituted with angle-site in quartz; *b* – galena in pyrite; *c* – pyrite with a frame of iron hydroxides (grey); *d* – pyrrhotite in quartz; *e* – chalcopyrite and galena in pyrite; *f* – arsenopyrite partially substituted with scorodite in pyrite.

Fig. 3. Gold of the Sinilga deposit: *a–e* – gold in pyrite and products of supergene substitution of sulphides with secondary minerals; *d* – gold particle with an uneven distribution of impurities (areas with a high content of Ag are marked with dotted line); *e* – fragment of gold particle with complex shapes; *f–h* – gold in vein quartz.

References

1. Tarbaev M.B. The vein type of gold mineralization in the Polar Urals. *Extended Abstract of Cand. Geol.-Mineral. Sci. Diss.* Syktyvkar, 1991. 16 p. (In Russian)
2. Tarbaev M.B., Kuznetsov S.K. Sinilga gold occurrence in the Polar Urals. *Syktyvkar. Mineral. Sb.*, 1996, no. 25, pp. 94–103. (In Russian)
3. Tarbaev M.B., Kuznetsov S.K. Paleozoic gold veins in the Polar Urals. *Dokl. Ross. Akad. Nauk*, 1996, vol. 350, no. 5, pp. 658–660. (In Russian)
4. Sokerina N.V., Shanina S.N., Zykin N.N., Isaenko S.I., Piskunova N.N. Conditions for formation of gold mineralization at the Sinilga gold occurrence, Polar Urals (According to the study of fluid inclusions). *Zap. Ross. Mineral. O-va.*, 2013, vol. 142, no. 6, pp. 88–104. (In Russian)
5. Fishman M.V., Yushkin N.P. Problems of metallogeny of European North-East. *Seriya preprintov "Nauchnye doklady"* [Ser. Preprints "Research Reports"]. Vol. 57. Syktyvkar, Komi Fil. Akad. Nauk SSSR, 1980. 29 p. (In Russian)
6. Timonina R.G. *Petrologiya metamorficheskikh porod Pripolyarnogo Urala* [Petrology of Metamorphic Rocks in the Polar Urals]. Leningrad, Nauka, 1980. 102 p. (In Russian)
7. Pystin A.M. *Polimetamorficheskie komplekсы zapadnogo sklona Urala* [Polymetamorphic Complexes of the Western Slope of the Urals]. St. Petersburg, 1994. 208 p. (In Russian)
8. Bortnikov N.S., Bryzgalov I.A., Krivitskaya N.N., Prokof'ev Yu.V., Vikent'eva O.V. Multistage vein-disseminated gold-sulfide deposit Maiskoe (Chukotka, Russia): Mineralogy, fluid inclusions, stable isotopes, and formation conditions. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, 2004, vol. 46, no. 6, pp. 475–509. (In Russian)
9. Gibsher N.A., Tomilenko A.A., Sazonov A.M., Ryabukha M.A., Timkina A.L. The Gerfed gold deposit: Fluids and *PT*-conditions for quartz vein formation (Yenisei Ridge, Russia). *Russ. Geol. Geophys.*, 2011. vol. 52, pp. 1461–1473.
10. Grinenko V.A. Preparation of sulfur dioxide for isotope analysis. *Zh. Neorg. Khim.*, 1962, no. 7, pp. 2578–2582. (In Russian)
11. Mayorova T.P. Isotopy of sulfur and lead of sulphides from gold deposits in the Northern Urals. *Geologiya i mineral'nye resursy evropeiskogo severo-vostoka Rossii: Materialy XV geol. s"ezda Respubliki Komi* [Geology and Mineral Resources of the European North-East of Russia: Proc. XV Geol. Congr. of Komi Republic]. Vol. II. Syktyvkar, IG Komi NTs Ural. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2009, pp. 274–276. (In Russian)
12. Chang Zh., Large R., Maslennikov V. Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: Evidence for an early timing and a seawater sulfur source. *Geology*, 2008, vol. 36, no. 12, pp. 971–974. doi: 10.1130/G25001A.1.
13. Dubinina E.O., Ikonnikova T.A., Chugaev A.V. Isotopic variations of sulfur from the Sukhoi Log deposit. *XIX simpozium po geokhimii stabil'nykh izotopov im. akad. A.P. Vinogradova* [Proc. XIX Symp. on Geochemistry of Stable Isotopes Named for Acad. A.P. Vinogradov]. Moscow, Akvarel', 2010, pp. 102–106. (In Russian)
14. Michurin S.V., Krupenin M.T., Sharipova A.A. Sulfur isotopic composition of sulphides from the Riphean deposits in the western slope of the Southern Urals. *XIX simpozium po geokhimii stabil'nykh izotopov im. akad. A.P. Vinogradova* [Proc. XIX Symp. on Geochemistry of Stable Isotopes Named for Acad. A.P. Vinogradov]. Moscow, Akvarel', 2010, pp. 251–254. (In Russian)
15. Goldfarb R.J., Baker T., Dubé D., Groves D.I., Craig J.R., Hart C.J., Patrice Gosselin P. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. In: *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Soc. Ekon. Geol., Inc., 2005, pp. 407–450.

16. Goryachev N.A. *Proiskhozhdenie zoloto-kvartsevykh zhil'nykh poyasov severnoi Patsifiki* [The Origin of Gold-Quartz Vein Zones of the North Pacific]. Magadan, SVKNII Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2003. 143 p. (In Russian)
17. Omoto H., Ray R.O. Isotopes of sulfur and carbon. In: *Geokhimiya gidrotermal'nykh rudnykh mestorozhdenii* [Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits]. Moscow, Mir, 1982, pp. 403–450. (In Russian)
18. Karyakin A.E., Smirnova V.A. *Struktury khrustalenykh polei* [Structures of Crystal-Bearing Fields]. Moscow, Nedra, 1967. 240 p. (In Russian)
19. Bukanov V.V. *Gornyi khrystal' Pripolyarnogo Urala* [Rock Crystals of the Polar Urals]. Leningrad, Nauka, 1974. 212 p. (In Russian)
20. Kozlov A.V. Crystal formation in hydrothermal systems. *Extended Abstract of Doc. Geol.-Mineral. Sci. Diss.* St. Petersburg, 1998. 42 p. (In Russian)
21. Kuznetsov S.K. *Zhil'nyi kvarts Pripolyarnogo Urala* [Vein Quartz of the Polar Urals]. St. Petersburg, Nauka, 1998. 203 p. (In Russian)
22. Ogorodnikov V.N., Sazonov V.N. *Sootnoshenie zolotorudnykh i khrustalenykh mestorozhdenii obramleniya gneisovykh blokov Urala* [The Ratio of Gold and Rock Crystal Deposits Framing Gneiss Blocks of the Urals]. Sverdlovsk, Ural. Otd. Akad. Nauk SSSR, 1991. 72 p. (In Russian)
23. Vodolazskaya V.P., Berlyand N.G., Kotov K.N., Shergina Yu.P., Mareichev A.M., Akimov L.V. Kozhimskaya area of tectonic and magmatic activity and its gold bearing potential. *Rudy Met.*, 1996, no. 4, pp. 16–27. (In Russian)

Для цитирования: Кузнецов С.К., Тарбаев М.Б., Сокерина Н.В., Майорова Т.П., Филиппов В.Н., Шанина С.Н. Золото-сульфидная минерализация и условия формирования рудопроявления Синильга, Приполярный Урал // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 2. – С. 308–323.

For citation: Kuznetsov S.K., Tarbaev M.B., Sokerina N.V., Mayorova T.P., Filippov V.N., Shanina S.N. Gold-sulphide mineralization and formation conditions of Sinilga deposit (Subpolar Urals). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2018, vol. 160, no. 2, pp. 308–323. (In Russian)