

УДК 553.2:549.283 (571.56)

МИНЕРАЛОГИЯ РУД СОХАТИНОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СЕВЕРО-ВОСТОК АЗИИ, РОССИЯ)

Тимкин Тимофей Васильевич¹,
timkin@tpu.ru

Ворошилов Валерий Гаврилович¹,
v_g_v@tpu.ru

Юркова Мария Викторовна¹,
mvyu5@tpu.ru

Mansour Ziaii²,
m.ziaii47@gmail.com

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Шахрудский технологический университет,
Иран, 3619995161, Болвар Данешка, Шахруд.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью расширения минерально-сырьевой базы действующих золотодобывающих предприятий Восточной Якутии и Магаданской области.

Цель: изучение минералогии руд Сохатиного золоторудного месторождения и установление последовательности минералообразования.

Методы: топоминералогическое картирование руд и метасоматитов; изучение прозрачных, прозрачно-полированных и полированных шлифов (Carl Zeiss Axio Imager.A2m.); сканирующая электронная микроскопия с локальным энергодисперсионным анализом (TESCAN VEGA 3 SBU с ЭДС OXFORD X-Max 50); рентгенодифракционный анализ (Rigaku Ultima IV), масс-спектрометрический с индуктивно связанной плазмой анализ, геофизические (каппаметрия).

Результаты. Установлено, что гипогенная золоторудная минерализация на месторождении Сохатиное представлена жильно-прожилковыми телами кварц-карбонат-сульфидного состава, приуроченными к зонам мезотермальных метасоматитов пропилит-березитового ряда. Минерализация развивается на сопряжении пологопадающих надвиговых зон и крутопадающих поперечных разрывов. Вмещающая среда представлена метаморфитами фации зеленых сланцев: амфибол-биотит-полевошпатовыми и мусковит-кварцевыми сланцами, подвергшимися процессам пропилитизации. В результате проведенных исследований изучен минералогический состав руд и метасоматитов, определена последовательность рудоотложения; проведено морфологическое описание самородного золота; выявлены новые минералы (аркубисит, селеноаркубисит, висмутин, сервеллит, матильдит, шапбахит, науманнит, клаусталит, гессит), не описанные на Сохатином месторождении ранее. Отложение рудных минералов шло в три ступени, которым соответствуют следующие минеральные ассоциации: 1) кварц-карбонат-барит-пиритовая; 2) золото-полиметаллическая; 3) золото-висмут-теллуридная. Концентрация золота возрастает от ранних парагенезисов к поздним. В гипергенных условиях вдоль рудных зон сформировались линейные коры выветривания глинистого состава с максимальными концентрациями золота. Золото в окисленных рудах более высокопробное, в значительной степени очищенное от примесей серебра и других элементов.

Ключевые слова:

Золото, месторождение Сохатиное, минералогия руд, метасоматиты, линейные коры выветривания.

Введение

За последние десятилетия орогенные, или так называемые «мезотермальные», месторождения золота в метаморфических поясах привлекли значительный интерес из-за их широкого геологического распространения и существенного вклада в структуру запасов и прогнозных ресурсов золота [1–6]. Все эти месторождения относятся к золото-кварцевой и золото-редкометалльной формациям согласно региональным классификациям [7]. На территории России одной из перспективных для поисков и разработки коренных месторождений золота является Верхояно-Колымская провинция, где сосредоточены многочисленные месторождения золота [8]. Это объясняется тем, что геодинамическая обстановка орогенеза является наиболее продуктивной в плане формирования уни-

кальных рудных объектов (Бендиго, Калгурли, Колар, Сухой Лог, Мурунтау, Аляска-Джуно, Джеймстаун, Наталка и др.) [1, 4, 9]. Верхояно-Колымский ороген пережил сложную историю субдукции, аккреции и столкновений, неоднократные импульсы магматизма и метаморфизма и формирование крупных месторождений золота (Базовское, Бадран, Дразное, Мало-Тарынское, Хангаласское, Наталка, Павлик, Родионовское) [10]. В целом на объектах Приколымского террейна, как и на других мезотермальных месторождениях золота северо-востока Азии, оруденение золота является гидротермальным, с обязательным структурным рудоконтролирующим фактором пересечения зон надвигов и секущих структур, и широко проявленными поздними золото-висмут-теллуридными минеральными ассоциациями [11].

Типичным представителем таких объектов является Сохатиное золоторудное месторождение. Оно располагается на границе республики Саха (Якутия) и Магаданской области (рис. 1), в пределах Верхне-Индибирского горнопромышленного района, что является благоприятным фактором для освоения месторождения. Геолого-поисковыми работами в период 1990–1995 гг. на территории Сохатиного рудного поля были выявлены промышленные месторождения (Сохатиное, Восточное), связанные с околорудными метасоматитами пропилит-березитового ряда, а также ряд мелких проявлений и точек минерализации золота. Большинство золоторудных месторождений Восточной Якутии и Магаданской области, приуроченных к зонам сопряжения надвигов и секущих рудоконтролирующих структур, являются потенциальными объектами промышленного освоения [11–14]. Однако на многих из них, включая месторождение Сохатиное, условия локализации и вещественный состав руд изучены недостаточно, что сдерживает их освоение и определяет актуальность выполненных исследований.

Целью данной работы является изучение минералогии гидротермально-метасоматических образований Сохатиного месторождения и установление последовательности отложения золотоносных минеральных ассоциаций для уточнения вопросов генезиса и оптимизации технологии переработки руд.

Геологическое строение

В регионально-геологическом плане Сохатиное рудное поле приурочено к Шаманихо-Столбовскому рудно-россыпному золотоносному району, который в

минерагеническом отношении входит в состав синаккреционного Яно-Колымского мегапоояса [15, 16]. В геотектоническом отношении район исследования принадлежит Приколымскому поднятию (террейну) пассивной континентальной окраины, сложенному терригенно-карбонатными и вулканогенными толщами, накопленными в интервале от раннего протерозоя до позднего мела [16].

Месторождение Сохатиное расположено в центральной части одноименного рудного поля (рис. 1). В строении месторождения принимают участие метаморфические сланцы сохатинской толщи раннепротерозойского возраста (PR_1sh) мусковит-кварцевые и амфибол-биотит-полевошпатового состава, подвергшиеся на территории рудного поля интенсивному воздействию гидротермальных процессов пропилит-березитового ряда. Магматические образования представлены силлами метатрахиродацит-трахириолит-порфиров зурнинского комплекса ($\tau\lambda\xi PR_{1zr}$) и дайками микродolerитов грязнинского комплекса (vJ_3gr) [16, 17]. Структурная обстановка месторождения обусловлена интенсивным развитием разрывных нарушений в сочетании с крупными пликативными структурами. Складчатые структуры толщ кристаллических сланцев имеют сложные формы, для них характерны крупные размеры и в основном пологие углы залегания. Разрывная тектоника мезозойского возраста повсеместно развита на территории месторождения. Наиболее ранние дизъюнктивы северо-восточного и северо-западного простираний относятся, соответственно, к сдвиговому и сбросовому кинематическим типам.

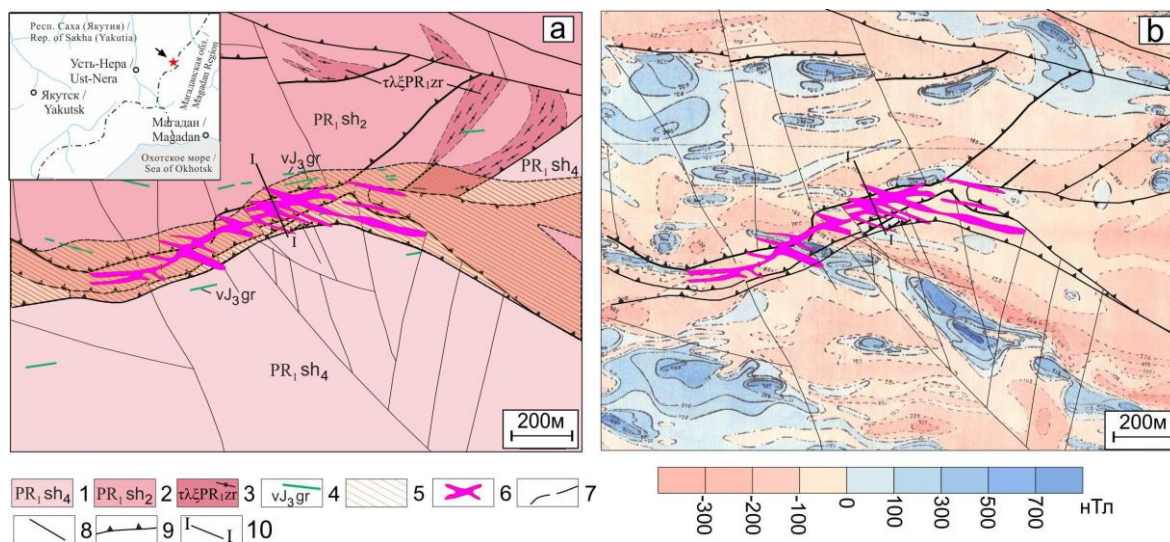


Рис. 1. Схема геологического строения Сохатиного месторождения (а) и карта магнитного поля (б): 1 – кварц-мусковитовые сланцы (PR_1sh_4); 2 – эпидот-амфибол-полевошпатовые и эпидот-хлорит-полевошпатово-кварцевые сланцы (PR_1sh_2); 3 – силлы метатрахиродацит-трахириолит-порфиров ($\tau\lambda\xi PR_{1zr}$); 4 – дайки долеритов (vJ_3gr); 5 – области распространения метасоматитов пропилит-березитового типа; 6 – первичный ореол золота ($>0,1$ г/т); 7 – геологические границы; 8 – разрывные нарушения; 9 – пологопадающие надвиги; 10 – линия разреза на рис. 3

Fig. 1. Geological scheme (a) and magnetic field map (b) of the Sokhatiny deposit: 1 – quartz-muscovite schist (PR_1sh_4); 2 – epidote-amphibole-feldspar and epidote-chlorite-feldspar-quartz schists (PR_1sh_2); 3 – rhyodacite and rhyolite sills ($\tau\lambda\xi PR_{1zr}$); 4 – dikes of dolerites (vJ_3gr); 5 – propylitic and sericitic (phyllic) alteration; 6 – primary gold halo ($>0,1$ ppm); 7 – geological boundaries; 8 – faults; 9 – gently dipping thrust faults; 10 – section line in Fig. 3

Более молодые субширотные разрывы пересекают их, формируя сбросы и надвиги [11, 18]. Зоны надвигов состоят из серии пологих разломов с общим падением плоскостей смещения на север. К ним приурочены гидротермально-метасоматические образования, вмещающие золоторудную минерализацию в участках сопряжения надвигов с сериями крутопадающих разрывов северо-западного и субширотного простираний (рис. 1, 3).

На месторождении широко развиты гипергенные процессы, которые проявились в образовании линейных кор выветривания вдоль зон тектонических нарушений [19, 20].

Лицензией на геологическое изучение и разведку золота в Сохатином рудном поле владеет ООО «Дюамель» (учредитель – «Золотой Актив», г. Москва). В 2018 г. компанией были завершены геологоразведочные работы на участке Сохатиный, и в 2019 г. начата опытно-промышленная эксплуатация месторождения.

В ходе геологоразведочных работ на Сохатином месторождении были выявлены три рудных тела. Пространственно они соотносятся с областями развития метасоматитов. Рудные тела приурочены к сопряжению крутопадающих трещин с благоприятными в структурном отношении пологими надвиговыми структурами.

Для руд месторождения характерна следующая геохимическая специализация: Au–Ag–Pb–Bi–Cu–As–Zn–Te–Cd.

Фактический материал и методы исследования

Минералогия руд и метасоматитов изучалась по образцам из разведочных канав и керн поисково-оценочных скважин. Петрографические описания пород и руд проводилась методом оптической микроскопии на тонких срезах образцов горных пород, выполненных в лаборатории отделения геологии НИ ТПУ (г. Томск) с использованием микроскопа Carl Zeiss Axio Imager.A2m. Химический состав минералов определялся методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа Tescan Vega 3 SBU (Чехия, TESCAN), оснащенного рентгеновским энергодисперсионным детектором Oxford X-Max 50 (EDX) с Si/Li кристаллическим детектором. Ускоряющее напряжение для СЭМ съемки и анализа составляло 20 кВ с интенсивностью тока зонда в пределах 4...11,5 нА. Локальный рентгено-спектральный анализ выполнялся с предварительной калибровкой интенсивности зонда (11,4...11,5 нА) по кобальтовому стандарту при рабочем (фокусном) расстоянии 15 мм. СЭМ фотографии накапливались для двух основных детекторов: вторичных электронов (SE – secondary electrons) и обратно-рассеянных электронов (BSE – backscattered electrons) в лаборатории отделения геологии (НИ ТПУ, г. Томск, аналитик Т.Ю. Якич). Объемный минералогический состав образцов определялся в Томском научно-исследовательском и проектном институте нефти и газа с помощью рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV, оснащенного источником излуче-

ния Cu-K α при токе 30 мА и напряжении рентгеновской трубки 40 кВ. Предварительно подготовленные препараты сканировались в интервале углов 2 θ 3...65° с шагом 0,02° и скоростью сканирования 1°/мин. Содержание микроэлементов в подготовленных пробах получены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (химико-аналитический центр «Плазма», г. Томск, аналитики – Т.А. Филипас, А.Н. Маковенко). Магнитная восприимчивость (MS) измерялась с помощью капнометра КТ-10 фирмы TetraPlus, позволяющего проводить замеры с чувствительностью 1·10⁻⁶ единиц СИ с хранением данных и последующей загрузкой на ПК. Для точных измерений определения проводились на плоских спилах керн скважин.

Результаты и обсуждения

Гидротермально-метасоматический этап

В пределах месторождения рудовмещающие породы представлены хлорит-кварцевыми, хлорит-эпидот-кварцевыми и мусковит-серицит-кварцевыми сланцами, являющимися продуктами воздействия гидротермальных растворов на исходные кристаллические сланцы амфибол-биотит-полевошпат-мусковит-кварцевого состава. Относительно слабо измененные породы с сохранившимися первичными темноцветами и полевыми шпатами встречаются только на значительном удалении от рудных зон. Более устойчивый в условиях кислотного выщелачивания мусковит частично сохраняется вплоть до внутренних зон березитов, где он в итоге тоже может полностью заместиться серицитом.

Наиболее ранними гидротермальными процессами являются изменения пропилитового типа, выражающиеся в эпидотизации и хлоритизации вмещающих пород. К метасоматитам данного типа тяготеет магнетитовая минерализация и рассеянная сульфидная вкрапленность, по-видимому, завершавшая этот процесс. В целом пропилиты фиксируют достаточно обширную область гидротермальной проработки пород, внутри которой локализируются околорудные березиты и золотое оруденение [14, 21, 22]. Околорудные метасоматиты представлены кварц-серицитовыми березитами, которые приурочены к тектоническим нарушениям и содержат в себе большое число кварцевожильных образований. Мощность березитовых зон может достигать первых десятков метров.

Состав березитов и количественные соотношения новообразованных минералов в существенной степени определяются не только интенсивностью процесса, но и характером вмещающих пород. В той или иной мере новообразованные хлорит, карбонат и серицит могут присутствовать в разных зонах метасоматической колонки березитов, тем не менее в ее строении можно уверенно выделить три зоны – внутреннюю, промежуточную и внешнюю. Во внешних зонах березитов происходит избирательная переработка породы с замещением основных породообразующих минералов хлоритом, который в промежуточной зоне интенсивно замещается анкеритом (рис. 2, а, б).

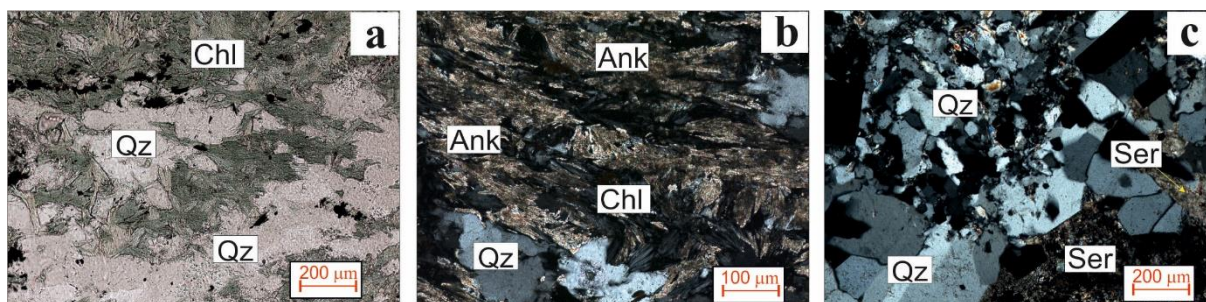


Рис. 2. Зоны колонки березитов (фото в проходящем свете): а – внешняя хлоритовая, б – промежуточная карбонатная, с – внутренняя кварц-серицитовая; Ank – анкерит, Chl – хлорит, Ser – серицит, Qz – кварц

Fig. 2. Zones of the beresite column (photo in reflected light): a – outer chlorite, b – intermediate carbonate, c – inner quartz-sericite; Ank is ankerite, Chl is chlorite, Ser is sericite, Qz is quartz

По мере приближения к внутренней зоне колонки, насыщенной кварцевыми прожилками, в метасоматитах исчезают хлорит и карбонат, при этом увеличивается количество серицита и кварца. Во внутренних зонах структура и текстура первичных пород сменяется типичной лепидогранобластовой структурой метасоматитов, породы приобретают массивное строение, светло-серую окраску и нередко сложены только кварц-серицитовым агрегатом (рис. 2, с).

Первичные руды представляют собой системы сопряженных пологопадающих и крутопадающих жильно-прожилковых тел карбонат-кварцевого состава с неравномерно распределенной сульфидной минерализацией в пределах зон березитизации.

Вкрапленность раннего, практически не золотосного, пирита широко развита далеко за пределами березитовых тел и связана, по нашему мнению, с завершением пропилитизации. Это явление чрезвычай-

но важно в качестве поисковой предпосылки для оконтуривания возможных золоторудных зон по данным магниторазведки.

Для оценки воздействия метасоматических процессов на магнитные свойства пород нами измерена магнитная восприимчивость образцов керна поисково-оценочных скважин [23, 24].

Результаты измерений показали, что магнитность пород в целом отражает их основность: породы, содержащие биотит, хлорит и эпидот, более магнитны, чем кварцево-гидрослюдистые породы. По скважинам отмечается сопряженность между аномальными концентрациями Р, V, Fe, Mn, Zn, Co, Ni и участками повышенной магнитной восприимчивости. Однако количественная взаимосвязь данных параметров не является прямо-пропорциональной. Участки наиболее интенсивной пропилитизации сопровождаются сульфидной вкрапленностью и обладают низкой магнитной восприимчивостью.

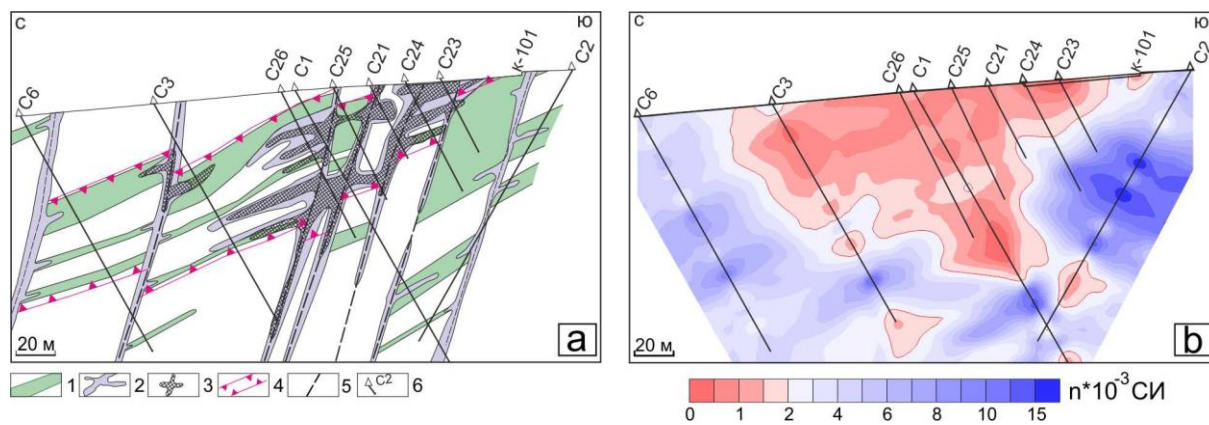


Рис. 3. Принципиальная схема распределения метасоматитов и руд (а) и магнитная восприимчивость пород (б) в разрезе по линии скважин 6–3–1–2 Сохатиного месторождения: 1 – пропилитизация; 2 – околорудные березиты с золото-сульфидно-кварцевой минерализацией; 3 – области аномального накопления золота, включая рудные тела; 4 – граница основных надвиговых перемещений; 5 – крутопадающие рудоконтролирующие нарушения

Fig. 3. Schematic diagram of the distribution of metasomatites and ores (a) and magnetic susceptibility in the section along the line of holes 6–3–1–2 of the Sokhatiny deposit: 1 – propylitic; 2 – sericitic (phyllic) alteration with gold-sulfide-quartz mineralization; 3 – areas of development of gold-bismuth-telluride mineralization; 4 – boundary of major thrust movements; 5 – steeply falling ore-controlling faulting

Максимально магнитными являются породы на фронте пропилитизации, в которых процесс замещения амфиболов и биотита эпидотом и хлоритом, сопровождающийся вкрапленностью новообразованного магнетита,

еще не завершился. С возрастанием интенсивности процесса магнетит замещается пиритом. Магнитная восприимчивость пород при этом резко снижается, а концентрация золота в метасоматитах постепенно возрастает.

Таким образом, в масштабах месторождений периферия зон пропилитизации характеризуется повышенной магнитностью, а в центральных частях, где развиты золотоносные березиты, породы практически немагнитны (рис. 3, *b*). На карте магнитного поля минерализованные зоны и рудоконтролирующие разломы также отчетливо фиксируются интенсивными знакопеременными аномалиями на фоне достаточно спокойного поля неизменных пород (рис. 1, *b*). Данный факт может служить критерием для поисков золоторудных месторождений и оценки их масштабов.

Отсутствие внутриминерализационных даек, приуроченность разновременных рудных минералов к одним и тем же структурам, единство околорудного метасоматоза березитового типа при наличии одной волны эволюции кислотности-щелочности растворов – все это не позволяет разделять березит-сульфидную минерализацию на стадии в понимании этого термина Д.С. Коржинским и его последователями [25]. Выделенные рудные ассоциации мы параллелизуем со ступенями минерального равновесия в пределах единой березит-сульфидной стадии рудоотложения.

Этап Stages	Гидротермально-метасоматический Hydrothermal-metasomatic							Гипергенный Supergene alteration
	Пропилитовая Propylitic		Березит-сульфидная Sericitic (phyllie)-sulphide					
Стадии Substages								
Ассоциации Mineral association								
Минералы Minerals	I	II	III	IV	V	VI	Пострудная Post-ore	
Кварц / Quartz		████████	████████	████████			████████	
Эпидот / Epidote	████████							
Серицит / Sericite			████████	████████				
Хлорит / Chlorite	████████		████████		████████			
Карбонаты / Carbonates		████████	████████	████████	████████	████████	████████	████████
Магнетит / Magnetite	████████							
Гематит / Hematite			—					
Барит / Barite				████████				
Пирит / Pyrite		████████	████████	████████				
Арсенопирит / Arsenopyrite					████████			
Сфалерит / Sphalerite					████████			
Пирротин / Pyrrhotite					████████			
Халькопирит / Chalcopyrite					████████	████████		
Галенит / Galena					████████	████████		
Золото / Native gold					████████	████████		████████
Виттихенит / Wittchenite						████████		
Айкинит / Aikinite						████████		
Михараит / Miharaite						████████		
Аркубисит / Arcubisite						████████		
Se-аркубисит / Se-arcubisite						████████		
Гессит / Hesseite						████████		
Висмутин / Bismuthinite						████████		
Матильдит / Matildite						████████		
Шапбахит / Schabachite						████████		
Науманнит / Naumannite						████████		
Сервеллит / Cerveleite						████████		
Борнит / Bornite							████████	████████
Ковеллин / Covellite								████████
Халькозин / Chalcocite								████████
Малахит / Malachite								████████
Азурит / Azurite								████████
Ярозит / Jarosite								████████
Лимонит / Limonite								████████
Монтмориллонит / Montmorillonite								████████
Гидрослюда / Hydromica								████████
Каолинит / Kaolinite								████████
Тектонические подвижки / Tectonic		▲	▲	▲	▲	▲	▲	

Рис. 4. Схема последовательности минералообразования Сохатиного месторождения. Минеральные ассоциации: I – эпидот-хлоритовая; II – кварц-кальцитовая; III – кварц-карбонат-серицитовая (березитовая); IV – кварц-карбонат-барит-пиритовая; V – золото-полиметаллическая (1-я продуктивная); VI – золото-висмут-теллуридная (2-я продуктивная). Толщина линии указывает на относительную распространенность минералов

Fig. 4. Sequence of mineral formation in Sokhatiny deposit. Mineral associations: I – epidote-chlorite; II – quartz-calcite; III – quartz-carbonate-sericitic (phyllie); IV – quartz-carbonate-barite-pyrite; V – gold-polymetallic; VI – gold-bismuth-telluride. The line thickness marks the relative abundance of minerals

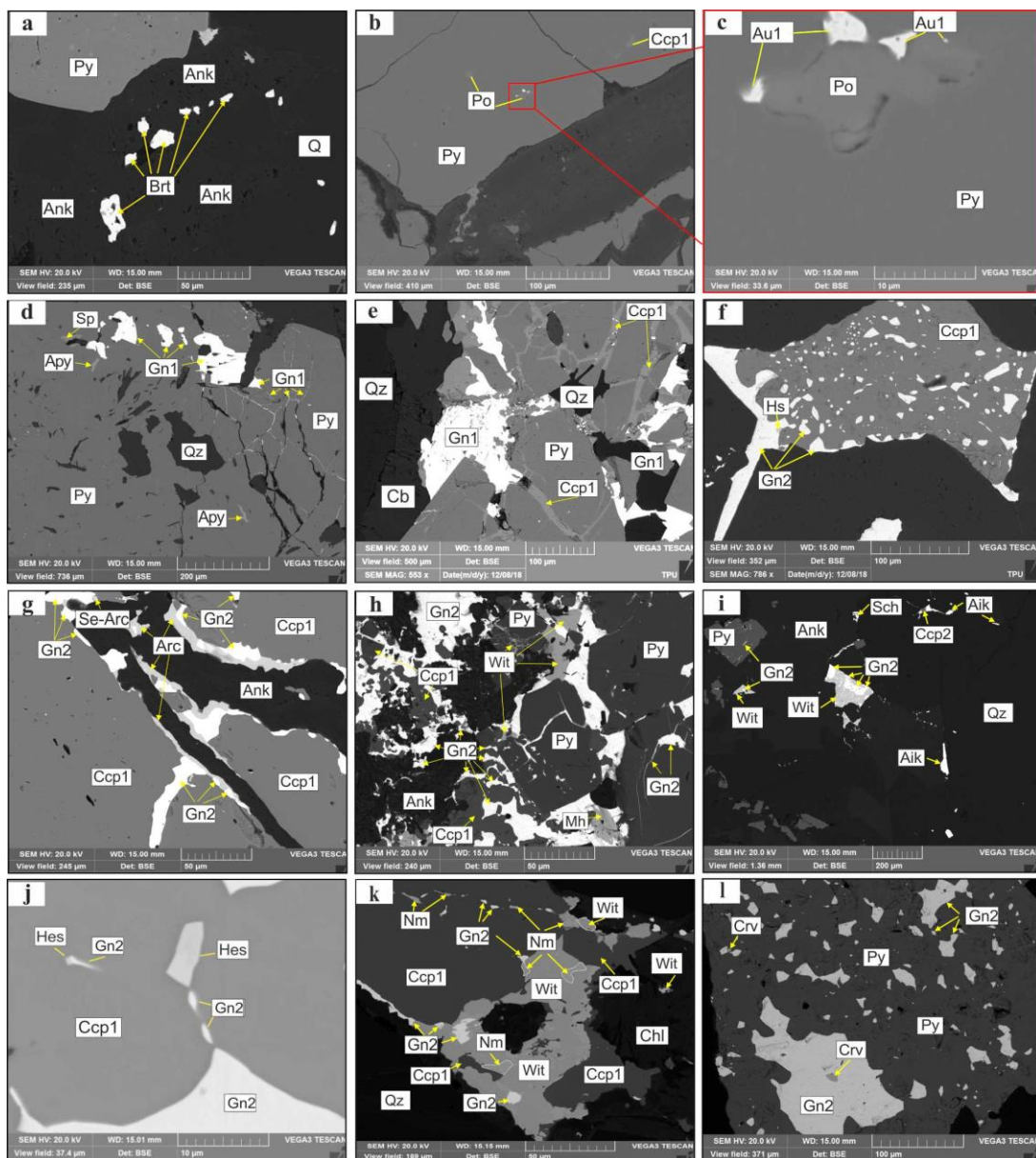


Рис. 5. Минеральные ассоциации Сохатинского месторождения (изображения в обратно рассеянных электронах): а) микровключения барита (Brt) в анкерит (Ank)-кварцевом (Qz) прожилке, вместе с пиритом (Py); б, с) включение пирротина (Po) в пирите (Py), обрастающее золотом (Au1); д) включения и прожилки галенита-1 (Gn1) вместе с арсенопиритом (Apy), сфалеритом (Sp) и кварцем (Qz) в пирите (Py); е) кварц (Qz)-анкерит (Ank)-галенит (Gn1)-халькопиритовый (Ccp-1) агрегат, цементирующий раздробленные зерна пирита (Py); ф) галенит-2 (Gn2) с гесситом (Hs) замещают зерно халькопирита-1 (Ccp-1); г) галенит-2 (Gn2) и аркубисит (Arc) в зальбандах анкеритовых (Ank) прожилков, секущих халькопирит-1 (Ccp-1); h) галенит-2 (Gn-2) в ассоциации с виттихенитом (Wit) и михараитом (Mh), цементирующие пирит (Py) и халькопирит-1 (Ccp-1); и) вкрапления шпахбахита (Sch), виттихенита (Wit) и айкинита (Aik) в ассоциации с поздним халькопиритом-2 (Ccp2) и галенитом-2 (Gn2) в анкерит (Ank)-кварцевом (Qz) прожилке; j) галенит (Gn2)-гесситовые (Hs) прожилки в халькопирите-1 (Ccp-1); k) пересечение и замещение халькопирита-1 (Ccp-1) агрегатом зерен галенита-2 (Gn2), виттихенита (Wit) и науманнита (Nm); l) выделения сервеллеита (Crv) среди вкрапленников галенита-2 (Gn2), замещающего пирит (Py)

Fig. 5. Mineral assemblages of the Sokhatiny deposit (backscattered electron images): а) microinclusions of barite (Brt) in ankerite (Ank)-quartz (Qz) veinlet, together with pyrite (Py); б, с) inclusion of pyrrhotite (Po) in pyrite (Py) overgrown with gold (Au1); д) inclusions and veinlets of galena-1 (Gn1) together with arsenopyrite (Apy), sphalerite (Sp) and quartz (Qz) in pyrite (Py); е) quartz (Qz)-ankerite (Ank)-galena (Gn1)-chalcopyrite (Ccp-1) aggregate cementing crushed pyrite (Py) grains; ф) galena-2 (Gn2) with hessite (Hs) replace the grain of chalcopyrite-1 (Ccp-1); г) galena-2 (Gn2) and arcubisite (Arc) in selvages of ankerite (Ank) veinlets intersecting chalcopyrite-1 (Ccp-1); h) galena-2 (Gn-2) in association with wittichenite (Wit) and miharaite (Mh), cementing pyrite (Py) and chalcopyrite-1 (Ccp-1); и) inclusions of scharbachite (Sch), wittichenite (Wit), and aikinite (Aik) in association with late chalcopyrite-2 (Ccp2) and galena-2 (Gn2) in an ankerite (Ank)-quartz (Qz) veinlet; j) galena (Gn2)-hessite (Hs) veinlets in chalcopyrite-1 (Ccp-1); k) intersection and replacement of chalcopyrite-1 (Ccp-1) by an aggregate of grains of galena-2 (Gn2), wittichenite (Wit) and naumannite (Nm); l) segregation of servelleite (Crv) among phenocrysts of galena-2 (Gn2) replacing pyrite (Py)

В пределах Сохатиного месторождения нами выделяются следующие минеральные ассоциации: I эпидот-хлоритовая и II кварц-кальцитовая, характеризующие прожилковую стадию; III кварц-карбонат-серцитовая, IV кварц-карбонат-барит-пиритовая, V золото-полиметаллическая (1-я продуктивная), VI золото-висмут-теллуридная (2-я продуктивная), которые вместе с пострудными кварц-карбонатными прожилками объединяются нами в березит-сульфидную стадию (рис. 4) [26]. В коре выветривания развиты гипергенные минералы, в том числе вторичное золото.

Рассмотрим парагенезисы продуктивной березит-сульфидной стадии минерализации.

Кварц-карбонат-барит-пиритовая минеральная ассоциация (степень равновесия) вскрыта на месторождении практически всеми поверхностными горными выработками и скважинами и пользуется наибольшим распространением. Основными нерудными минералами являются кварц и карбонаты, реже барит. Кварц имеет, как правило, серый цвет. Структура его равномернозернистая с ровной или зубчатой границей зерен. Текстура обычно массивная, микродрузовидная. Карбонат, наряду с кварцем, составляет основной объем жильных образований и представлен анкеритом. В кварц-карбонатных прожилках, а также в интерстициях пирита, нередко включения реликтовых минералов вмещающих пород и метасоматитов: рутила, циркона, монацита, апатита, хлорита. Барит встречается либо в виде сыпучих включений среди кварца и анкерита (рис. 5, а), либо составляет самостоятельные прожилки мощностью в первые сантиметры.

Единственный сульфидный минерал данной ассоциации – пирит. Он отмечается в кварцево-карбонатных жилах и прожилках в виде гипидиоморфных агрегатов, часто раздробленных и цементированных более поздними минералами. Внутреннее строение кристаллов пирита в изломе слабо раковистое, часто зернистое, иногда встречаются фрамбоидальные образования пирита. В зависимости от преобладающего развития граней в комбинациях кристаллов выделено 5 морфологических типов кристаллов (МТК) пирита: преобладающий кубический (70–100 %), реже – пентагондодекаэдрический (0–23 %) и куб-пентагондодекаэдрический (0–23 %) и в единичных случаях – куб-октаэдрический и пентагон-октаэдрический. Кубические кристаллы чаще всего хорошо образованы, с равномерно развитыми и блестящими гранями (100), покрытыми очень тонкой, нередко многоцентровой штриховкой роста. Содержания золота минимальны в пирите кубического габитуса и возрастают пропорционально увеличению доли пентагондодекаэдрических и куб-пентагондодекаэдрических типов кристаллов, что характерно для всех гидротермальных месторождений золота [27].

Продуктивность кварц-карбонат-барит-пиритовой минеральной ассоциации крайне низкая, только при наложении минералов золото-полиметаллической ассоциации золотоносность пирита резко возрастает, что прямо связано с механическими включениями позднего золота (рис. 5, б, с; 6, а–с).

Золото-полиметаллическая ассоциация является самой продуктивной на золото, ореолы ее распространения определяют контуры рудных тел. Этот парагенезис максимально развит в центральной части месторождения и постепенно выклинивается к флангам. Представлен в виде прожилково-жильных образований, иногда в виде околожильной вкрапленности сульфидов в метасоматитах. Непосредственно в жилах и прожилках сульфиды встречаются в виде редкой рассеянной вкрапленности или гнездообразных агрегатов. Под микроскопом видно, что минералы золото-полиметаллической ассоциации цементируют раздробленные зерна пирита, проникают в них по трещинам и заполняют межзерновые пространства ранней пиритовой ассоциации (рис. 5, е).

Формирование золото-полиметаллической ассоциации начинается с пирротина. Единичные выделения этого минерала встречены в интерстициях зерен пирита (рис. 5, б). Взаимоотношений с другими минералами не установлено, но ассоциация с нарастающим на его гранях золотом позволяет отнести пирротин, с учетом его химического состава, к началу золото-полиметаллической ступени отложения (рис. 5, с).

Не менее редким минералом руд является арсенопирит. Встречен в виде единичных выделений в пирите, совместно со сфалеритом и галенитом-1, что, собственно, и позволяет отнести его к началу той же ступени минерализации (рис. 5, д). Характерно, что в геохимическом поле аномалии мышьяка очень тесно коррелируются с Au, Ag, Bi, Pb, Cu.

Одним из главных минералов золото-полиметаллической ассоциации является халькопирит-1. Он встречается в виде вкрапленности и линзочек в кварце и карбонате, а чаще всего совместно с галенитом-1 цементирует катаклазированные зерна пирита (рис. 5, е).

Галенит-1 по степени распространения практически не уступает халькопириту-1. Встречается в виде вкрапленности в пирите и кварцево-карбонатных прожилках, микропросечек, секущих минералы ранних ассоциаций (рис. 5, д, е). В пространственном распределении галенита и халькопирита можно отметить латеральную зональность: галенит преобладает в западной части месторождения, халькопирит – в восточной.

Сфалерит встречается в рудах крайне редко, образуя тонкую рассеянную вкрапленность в пирите, вместе с галенитом-1 (рис. 5, д).

Минералы *золото-висмут-теллуридной ассоциации* выявлены только с помощью электронно-зондового микроанализа. Пространственно они тяготеют к участкам сопряжения пологих и крутопадающих структур, то есть к наиболее золотоносным частям рудных тел. Главный представитель этого парагенезиса – галенит-2, постоянно ассоциирующий с комплексом минералов теллуридно-сульфид-сульфосольного ряда: виттихенитом, айкинитом, висмутином, аркубиситом, селеноаркубиситом, сервеллеитом, матильдитом, михарайтом, шапбахитом, науманнитом, гесситом, клаусталитом (рис. 5, таблица).

Большая часть этих минералов, в том числе очень редкий минерал сервеллеит, впервые открытый и зарегистрированный в 1986 г. [28], выявлена на место-

рождении впервые. Отдельные минералы обогащены, относительно теоретических формул, медью и свин-

цом, что можно связывать с наличием микропримесей замещаемых минералов: халькопирита-1 и галенита-1.

Таблица. Химический состав минералов золото-висмут-теллуридной ассоциации (мас. %)

Table. Chemical composition of Bi-Te-minerals association (wt. %)

Минерал Mineral	Виттихенит Wittikhenite	Айкинит Aikinit	Аркубит Arcubisite	Селенаркубит Se-Arcubisite	Висмутин Bismuthinite	Михараит Miharaite
S	19,73	17,42	14,1	12,69	17,71	20,25
Fe	–	1,23	–	0,62	2,73	6,29
Cu	38,1	20,54	10,07	11,32	0,87	25,83
Se	–	–	–	3,66	1,47	–
Ag	–	–	57,1	55,59	–	–
Te	–	–	1,82	0,99	–	–
Pb	–	25,19	–	–	–	24,84
Bi	40,67	35,62	17,03	15,15	72,94	20,07
Сумма/Total, %	99,48	100	100	100	96,89	97,28
Формула теоретическая Theoretical formula	Cu ₃ BiS ₃	CuPbBiS ₃	Ag ₆ CuBiS ₄	Ag ₆ CuBi(S,Se) ₄	Bi ₂ S ₃	PbCu ₄ FeBiS ₆
Формула фактическая Actual formula	Cu _{2,9} Bi _{0,95} S ₃	Cu _{1,06} Pb _{1,34} Bi _{0,93} S ₃	Ag _{6,3} Cu _{1,74} Bi _{0,7} S _{4,5}	Ag _{5,2} Cu _{1,8} Bi _{0,7} (S,Se _{0,54}) ₄	Bi _{1,9} S ₃	Pb _{1,2} Cu _{3,86} Fe _{1,07} Bi _{0,9} S ₆
Минерал Mineral	Сервеллеит Cervelleite	Матильдит Matildite	Науманнит Nau- mannite	Шапбахит Schapbachite	Клаусталит Clausthalite	Гессит Hessite
S	5,91	12,67	1,47	12,76	–	0,4
Fe	–	3,7	0,49	–	2,07	–
Cu	6,33	3,38	1,9	6,33	2,66	–
Se	0,71	4,24	22,1	4,92	24,99	–
Ag	67,72	21,26	72,85	17,3	–	62,44
Te	22,87	–	1,19	–	–	35,22
Pb	–	–	–	24,6	67,96	1,71
Bi	–	36,41	–	34,09	–	–
Сумма/Total, %	103,54	100	100	–	97,68	100
Формула теоретическая Theoretical formula	Ag ₄ TeS	AgBiS ₂	Ag ₂ Se	PbAg ₂ Bi ₂ S ₅	PbSe	Ag ₂ Te
Формула фактическая Actual formula	(Ag _{3,4} Cu _{0,54})Te _{0,97} S	AgBiS ₂	Ag _{2,4} Se	Pb _{1,5} Ag ₂ Bi ₂ Cu _{0,25} S ₅	Pb _{1,04} Se	Ag _{2,09} Te

Минералы этого комплекса обычно нарастают на кристаллы более ранних сульфидов и проникают в них по трещинам, но контакты часто размытые, что указывает на замещение ранних минералов, в первую очередь, халькопирита-1 (рис. 5, f, h, k). Галенит-2 и аркубит часто приурочены к зальбандам анкеритовых прожилков, секущих халькопирит-1, демонстрируя зональность отложения (рис. 5, g). Халькопирит-2 в этом парагенезисе является одним из самых редких минералов и встречен лишь в виде очень мелких единичных включений.

Секущих взаимоотношений между минералами внутри данной ступени не установлено, что расценивается нами как их близодновременное отложение. Можно лишь предположить более длительный период отложения галенита-2 в сравнении с остальными минералами ассоциации.

Характерной особенностью Сохатиного месторождения является наличие в составе золото-висмут-теллуридной минерализации только сульфовисмутитов и полное отсутствие сульфосолей на основе сульфоарсениновой и сульфогангитовой составляющих (блеклых руд, энаргита, прустита, пираргирита и др.). Столь же показательно постоянное накопление здесь примесей селена вплоть до образования собственных минералов (науманнит, клаусталит, селенаркубит). Гидрогеохимические аномалии селена установлены даже в водотоках, дренирующих Сохатиное месторождение.

Вместе с галенитом-2 и другими минералами поздней ассоциации часто встречается золото, что указывает на ее золотоносность.

Самородное золото является главным минералом, определяющим промышленную ценность руд Сохатиного месторождения. В гидротермальном процессе золото отлагалось в двух продуктивных минеральных ассоциациях. По нашим наблюдениям и данным предыдущих исследований [19] морфологически зерна золота можно разделить на три группы: 1) комковидно-изометричные; 2) удлинённые и 3) сложной формы. Первые представлены комковатыми и объемными золотишками; вторые – уплощенно-удлинёнными, пластинчатыми; последние – проволочковидными и крючковатыми. В количественном отношении комковидно-изометричная форма золотинок является преобладающей.

Основное количество самородного золота связано с сульфидами. По времени отложения выделяется две генерации гипогенного золота. Золото-1 чаще всего наблюдается совместно с халькопиритом-1 и галенитом-2 в прожилках, цементирующих раздробленные зерна пирита (рис. 6, d). Золото-1 в пирите присутствует и отдельно, в виде механической примеси (рис. 6, a), но в большинстве случаев связь этих выделений с галенит-халькопиритовой минерализацией все-таки устанавливается (рис. 6, b, c). Пирит, видимо, служил химически благоприятной средой для осаждения золота.

Золото-2 вместе с галенитом-2, виттихенитом и другими минералами поздней ассоциации обрастает зерна халькопирита-1 и проникает по трещинам в него и более ранние минералы (рис. 6, e, f).

Цвет золота соломенно-желтый, иногда с бронзовым оттенком, реже – бледно-желтый. Встречаются зерна как с сильным блеском, так и матовые.

Основной примесью в золоте является серебро, доля которого меняется от 7 до 38 %. Как золото-1, так и золото-2 имеют достаточно широкий диапазон изменения пробы. В тех случаях, когда генерация золота под микроскопом устанавливается однозначно, золото-1 имеет диапазон колебаний пробы от 662 до 920 ‰ (среднее 788 ‰), золото-2 – от 636 до 832 ‰ (среднее 734 ‰).

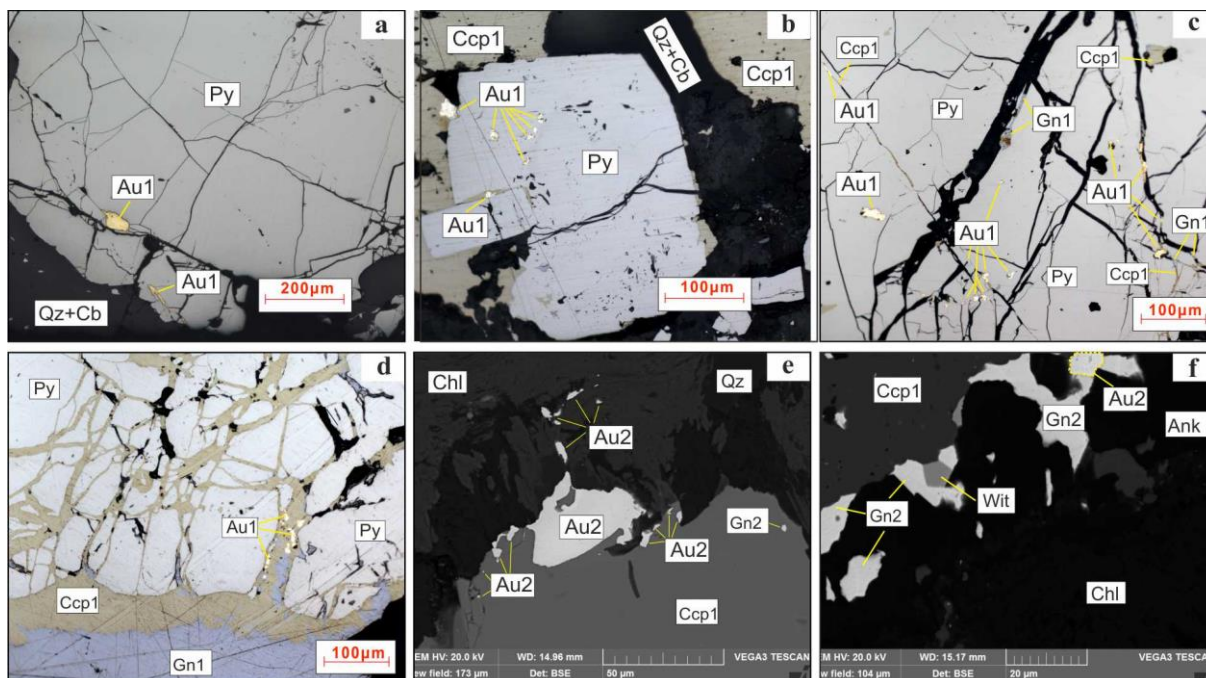


Рис. 6. Формы выделения золота и взаимоотношения с другими минералами: Au1 – золото-1, Au2 – золото-2, Py – пирит, Gn1 – галенит-1, Gn2 – галенит-2, Ccp1 – халькопирит-1, Wit – виттихенит, Qz – кварц, Chl – хлорит, Ank – анкерит; a–d – фото, e–f – изображение в обратно рассеянных электронах

Fig. 6. Forms of gold precipitation and relationships with other minerals: Au1 – gold-1, Au2 – gold-2, Py – pyrite, Gn1 – galena-1, Gn2 – galena-2, Ccp1 – chalcopyrite-1, Wit – wittichenite, Qz – quartz, Chl – chlorite, Ank – ankerite; a–d – photo, e–f – image in backscattered electrons

Тенденция снижения пробы прослеживается, но статистически значимого различия между золотом-1 и золотом-2 не устанавливается. Средняя проба по всем замерам гипогенного золота составляет 744 ‰, что говорит в пользу того, что в рудах преобладает золото-2.

Гипергенный этап

Образование минералов в гипергенный этап связано с преобразованием продуктов гидротермально-метасоматического этапа в результате просачивания вдоль ослабленных зон по трещинам поверхностных вод, обогащенных кислородом [20, 29]. Наиболее неустойчивыми являются карбонаты – анкерит, сидерит и кальцит, за ними следуют основные сульфиды: халькопирит, пирит, галенит. Относительно устойчивы к выветриванию кварц и барит.

Пирит обычно замещается аморфными агрегатами гидроокислов железа – гетитом и гидрогетитом, в конечном итоге – рыхлым лимонитом. Замещение халькопирита гипергенными минералами обычно сопровождается образованием зональных агрегатов со структурой краевых каемок. Сначала по халькопириту образуется борнит, затем – ковеллин и халькозин, в приповерхностных условиях – карбонаты меди (ма-

лахит и азурит). Халькопирит наименее устойчивый из всех сульфидов, тем не менее полное его замещение наблюдается далеко не всегда, в большинстве образцов сохраняется до 50 % халькопирита (рис. 7, a). Более устойчивый галенит в зоне окисления замещается церусситом, сфалерит – смитсонитом.

Проба золота из зоны окисления – от 788 до 920 ‰ (в среднем 858 ‰), примеси представлены только серебром. Статистическая значимость отличия по составу гипергенного золота от гипогенного устанавливается с доверительной вероятностью 99,99 %. Окисленное золото, таким образом, облагорожено за счет процессов химического растворения и переотложения первичного золота, с выносом серебра. Существенных различий в морфологических особенностях и размерности гипогенного и гипергенного золота на сегодняшний день не установлено.

Характерными новообразованными минералами гипергенного этапа являются каолинит и монтмориллонит. Каолинит встречается в виде бесцветных тонкошешуйчатых и пластинчатых агрегатов, образует прожилковидные или гнездообразные тонкозернистые (<0,01 мм) скопления. Мощность прожилков составляет 1–2 мм. Корродирует кварц, карбонаты и

минералы ранних метасоматитов (рис. 7, *b*). В свою очередь каолинит сечется прожилками позднего гипергенного карбоната, являющегося типичным минералом золотоносных кор выветривания [30–35]. Содержание каолинита достигает 30 % и более в близповерхностных условиях, с глубиной резко снижается до 1–5 %, в интервале 30–40 м и глубже прак-

тически исчезает. Это не подтверждает точку зрения геологов, проводивших поисковые работы, о существовании на месторождении аргиллизитов [19]. Вероятнее всего, линейные коры выветривания являются остатками мощных, ныне эродированных, площадных кор выветривания, формировавшихся в регионе с палеоцена по миоцен [20].

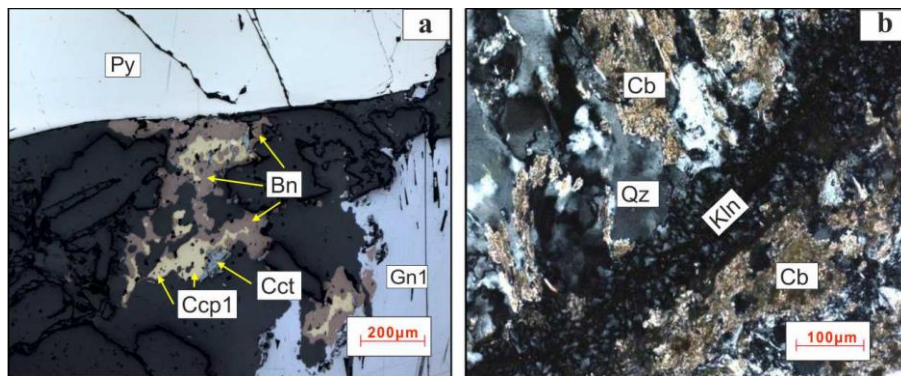


Рис. 7. Новообразованные минералы в зоне окисления Сохатиного месторождения: *a*) замещение халькопирита (Ccp1) борнитом (Bn) и халькозином (Cct) со структурой краевых каёмок; *b*) образование каолинита (Kln) по трещинкам и в межзерновом пространстве с замещением карбоната (Cb); Gn1 – галенит-1; Py – пирит; Qz – кварц

Fig. 7. Newly formed minerals in the oxidation zone of the Sokhatiny deposit: *a*) replacement of chalcopyrite (Ccp1) by bornite (Bn) and chalcocite (Cct) with the border structure; *b*) formation of kaolinite (Kln) along cracks and in the intergranular space with replacement of carbonate (Cb); Gn1 – galena-1; Py – pyrite; Qz – quartz

Монтмориллонит образуется по эпидот-хлоритовым метасоматитам (пропилитам) и рудам в зонах выветривания. По рентгенофазовому анализу количество монтмориллонита в зоне окисления может достигать 28 %, с глубиной он исчезает.

В целом окисление руд начинается с появления каолинита (1–2 %) и частичного замещения мусковита гидрослюдой (иллитом). Затем начинается окисление сульфидов, количество глинистых минералов возрастает до 20–30 % и более. В участках максимального окисления первичные минералы, за исключением кварца, почти полностью замещены каолинитом, монтмориллонитом, ярозитом, гипсом, иллитом. При этом валовый химический состав окисляющихся руд существенно не меняется.

Заключение

Проведенными исследованиями установлено, что гипогенная золоторудная минерализация на месторождении Сохатиное представлена жильно-прожилковыми телами кварц-карбонат-сульфидного состава, приуроченными к зонам метасоматитов пропилит-березитового ряда. Минерализация развивается на сопряжении пологопадающих надвиговых зон и

крутопадающих поперечных разрывов. Вмещающая среда представлена пропилитизированными кристаллическими сланцами нижнего протерозоя.

В формировании гидротермальных образований выделено две стадии: пропилитовая и березит-сульфидная с сопряженным золотым оруденением.

Изучен минеральный состав руд, и определена последовательность рудоотложения; проведено описание состава самородного золота; выявлены новые минералы (аркубисит, селеноаркубисит, висмутин, сервеллит, матильдит, шапбахит, науманнит, клаусталит, гессит), не описанные ранее на Сохатином месторождении. Отложение рудных минералов шло в три ступени, которым соответствуют следующие минеральные ассоциации: 1) кварц-карбонат-барит-пиритовая; 2) золото-полиметаллическая; 3) золото-висмут-теллуридная. Концентрация золота возрастает от ранних парагенезисов к поздним.

В гипергенных условиях вдоль рудных зон сформировались линейные коры выветривания с максимальными концентрациями золота. Золото в окисленных рудах более высокопробное, в значительной степени очищенное от примеси серебра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types / D. Groves, R. Goldfarb, M. Gebre-Mariam, S. Hagemann, F. Robert // *Ore Geology Reviews*. – 1998. – V. 13. – № 1–5. – P. 7–27.
2. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration

- significance / D. Groves, R. Goldfarb, F. Robert, C.J.R. Hart // *Economic Geology*. – 2003. – V. 98. – № 1. – P. 1–29.
3. Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits / D. Groves, M. Santosh, R.J. Goldfarb, L. Zhang // *Geoscience Frontiers*. – 2018. – V. 9. – № 4. – P. 1163–1177.
4. Goldfarb R.J., Groves D.I. Orogenic gold: common or evolving fluid and metal sources through time // *Lithos*. – 2015. – V. 233. – P. 2–26.

5. Chen Y.J. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential // *Geology in China*. – 2006. – V. 33. – № 6. – P. 1181–1196.
6. Goryachev N.A., Pirajno F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia // *Ore Geology Reviews*. – 2014. – V. 59. – P. 123–151.
7. Горячев Н.А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. – Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 1998. – 210 с.
8. Савчук Ю.С., Волков А.В. Крупные и суперкрупные орогенные золотые месторождения: геодинамика, структура, генетические следствия // *Литосфера*. – 2019. – Т. 19. – № 6. – С. 813–833.
9. Goldfarb R.J., Phillips G., Nokleberg W. Tectonic setting of synorogenic gold deposits of the Pacific Rim // *Ore Geology Reviews*. 1998. – V. 13. – № 1–5. – P. 185–218.
10. Fridovsky V.Y. Structural control of orogenic gold deposits of the Verkhojansk-Kolyma folded region, northeast Russia // *Ore Geology Reviews*. – 2018. – V. 103. – P. 38–55.
11. Глухов А.Н. Тектонические факторы рудогенеза докембрийских террейнов на примере Приколымского поднятия и Омолонского массива (Северо-Восток Азии) // *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*. – 2019. – Т. 64. – № 2. – С. 219–248.
12. Шпикерман В.И. Домеловая минералогия Северо-Востока Азии. – Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 1998. – 333 с.
13. Глухов А.Н. Геологическое строение и состав руд золоторудного месторождения Надежда // *Отечественная геология*. – 2013. – № 4. – С. 7–17.
14. Глухов А.Н., Савва Н.Е., Колова Е.Е. Вещественный состав и генезис золотых руд месторождения Надежда, Магаданская область // *Руды и металлы*. – 2016. – № 4. – С. 60–71.
15. Горячев Н.А. Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. – Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 2003. – 143 с.
16. Глухов А.Н. Медное и полиметаллическое оруденение Приколымского террейна и его генетическая типизация // *Литосфера*. – 2019. – Т. 19. – № 5. – С. 717–730.
17. Глухов А.Н. Геохимическая специализация верхнепротерозойских комплексов Приколымского террейна // *Тихоокеанская геология*. – 2014. – Т. 33. – № 3. – С. 29–38.
18. Тектонофизические критерии геодинамической эволюции Приколымского террейна (Северо-Восток России) / А.Н. Глухов, А.С. Гладков, Д.А. Кошкарев, О.В. Лунина // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2012. – Т. 3. – № 4. – С. 361–375.
19. Протопопов Г.Х. Первые находки рудного золота в Шаманихо-Столбовском золотороссыпном районе Северо-Востока России // *Отечественная геология*. – 1994. – № 9. – С. 31–32.
20. Глухов А.Н., Калинин Ю.А., Буляков Г.Х. Коры выветривания Глухаринского рудно-россыпного узла (Приколымское поднятие, Северо-Восток Азии) и их золотоносность // *Литология и полезные ископаемые*. – 2020. – № 5. – С. 461–484.
21. Метасоматизм и метасоматические породы / С.С. Абрамов, О.В. Андреева, В.А. Жариков, Г.П. Зарайский, А.А. Маракушев, Б.И. Омеляненко, Н.Н. Перцев, К.В. Подлесский, И.Т. Расс, В.Л. Русинов. – М.: Научный мир, 1998. – 492 с.
22. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования / В.В. Жданов, А.Е. Костин, Е.А. Кухаренко, Э.А. Ланда, Л.И. Лукьянова, В.Л. Масайтис, З.Д. Москаленко, Ю.Д. Пушкарев, Л.Н. Шарпенко. – СПб: Изд-во ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2009. – 160 с.
23. Mineralogical, chemical and micromorphological studies of the argillic alteration zone of the epithermal gold deposit Ovacik, Western Turkey: tools for applied and genetic economic geology / H.G. Dill, R. Dohrmann, S. Kaufhold, G. Çiçek // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2015. – V. 148. – P. 105–127.
24. Гаврилов Р.Ю., Синкина Е.А., Мищих С.Н. Метод капшметрии как прогнозно-поисковый критерий золотого оруденения // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 106–116.
25. Korzhinskii D.S. The theory of metasomatic zoning // *Mineralium Deposita*. – 1968. – V. 3. – № 3. – P. 222–231.
26. Юркова М.В. Минералогия руд Сохатиного месторождения (Республика Саха) // *Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче. Сборник тезисов докладов I Молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ*. – М., 19–21 февраля 2020. – М.: ЦНИГРИ, 2020. – С. 225–227.
27. Пириты золоторудных месторождений (свойства, зональность, практическое применение) / А.Ф. Коробейников, В.А. Нарсеев, А.Я. Пшеничкин, П.С. Ревякин. – М.: ЦНИГРИ, 1993. – 213 с.
28. Criddle A.J., Chicholm J.E., Cervelleite S.C.J. Ag₄TeS, a new mineral from the Bambolla mine, Mexico, and a description of a photochemical reaction involving cervelleite, acanthite, and hessite // *European Journal of Mineralogy*. – 1989. – V. 1. – P. 371–380.
29. Supergene remobilization of Au in Au-bearing regolith related to orogenic deposits: a case study from Kazakhstan / Y.A. Kalinin, G.A. Palyanova, E.A. Naumov, K.R. Kovalev, F. Pirajno // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – V. 109. – P. 358–369.
30. Минерально-геохимическая зональность золотоносных кор выветривания Томь-Яйского междуречья / О.М. Янченко, В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин, М. Зиаи // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 83–94.
31. Морфология и состав золота кор выветривания Томь-Яйского междуречья / О.М. Янченко, В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин, И.В. Мартыненко, М. Зиаи // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 3. – С. 84–92.
32. Характер распределения фосфатов в золотоносных корах выветривания Томского района / О.М. Янченко, Т.В. Тимкин, В.Г. Ворошилов, Т.Ю. Якич, М. Зиаи // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 74–91.
33. Петрохимическая характеристика кор выветривания Ольховско-Чибижского района / И.В. Мартыненко, В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин, М. Зиаи // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 12. – С. 136–144.
34. Геохимические критерии выявления коллекторов и прогноза их нефтегазоносности в терригенных отложениях Пуртазовской нефтегазоносной области / Е.Р. Исаева, В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин, М. Зиаи // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 132–141.
35. Pshenichkin A., Timkin T., Oskina Y. Noble metals in rocks and ores of Maysko-Lebed ore field (Mountain Shoriya) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 24. – P. 1–6.

Поступила 25.03.2022 г.

Информация об авторах

Тимкин Т.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ворошилов В.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Юркова М.В., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Mansour Ziaii, PhD, доцент Шахрудского технологического университета.

UDC 553.2:549.283 (571.56)

ORE MINERALOGY OF SOKHATINY GOLD DEPOSIT (NORTHEAST ASIA, RUSSIA)**Timofey V. Timkin¹,**
timkin@tpu.ru**Valery G. Voroshilov¹,**
v_g_v@tpu.ru**Maria V. Yurkova¹,**
olmininayanchenko@mail.ru**Mansour Ziaii²,**
m.ziaii47@gmail.com¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.² Shahrood University of Technology,
Bolvar Daneshka, Shahrood, 3619995161, Iran.

The relevance of the study is caused by the need to expand the mineral resource base of operating gold mining enterprises in Eastern Yakutia and the Magadan region.

The main aim: to study the material composition of the ores of the Sokhatiny gold ore deposit and to establish the sequence of mineral formation.

The methods: topomineralogical mapping of ores and metasomatites; study of transparent, transparent-polished and polished thin sections; scanning electron microscopy (TESCAN VEGA 3 SBU OXFORD X-Max 50); X-ray diffraction analysis (Rigaku Ultima IV), ICP-MS, geophysical (kappametry).

Results. It was established that the gold ore mineralization at the Sokhatiny deposit has a hydrothermal-metasomatic and hypergenic genesis. In the first case, vein-veinlet bodies of a quartz-carbonate-sulfide composition were formed, confined to the zones of circum-ore beresitization rocks. In the second, there was a transformation of the products of the hydrothermal-metasomatic stage under the influence of exogenous factors. The metasomatic processes in the field are manifested in the form of areal propylization and beresitization of the host metamorphic shale rock. As a result of mineralogical and mineralogical research methods, the material composition of ores was studied in detail and the sequence of ore deposition was determined; a morphological description of native gold was carried out; new minerals were identified that were not previously described at the Sokhatiny deposit. The deposition of ore minerals went in three stages, which correspond to the following mineral associations: 1) quartz-calcite-barite-pyrite; 2) gold-polymetallic; 3) gold-bismuth-telluride. Based on the names, it follows that increased concentrations of gold are confined to later steps. In oxidized ores, native gold is also noted, which in its morphological parameters does not differ from primary one. The oxidation zone is characterized by low levels of addition of silver and other elements in gold, due to chemical dissolution in surface conditions.

Key words:

Gold, Sokhatiny deposit, ore mineralogy, metasomatites, linear weathering crusts.

REFERENCES

- Groves D., Goldfarb R., Gebre-Mariam M., Hagemann S., Robert F. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 1998, vol. 13, no. 1–5, pp. 7–27.
- Groves D., Goldfarb R., Robert F., Hart C.J.R. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Economic Geology*, 2003, vol. 98, no. 1, pp. 1–29.
- Groves D., Santosh M., Goldfarb R.J., Zhang L. Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits. *Geoscience Frontiers*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 1163–1177.
- Goldfarb R.J., Groves D.I. Orogenic gold: common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 2015, vol. 233, pp. 2–26.
- Chen Y.J. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential. *Geology in China*, 2006, vol. 33, no. 6, pp. 1181–1196.
- Goryachev N.A., Pirajno F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 59, pp. 123–151.
- Goryachev N.A. *Geologiya mezozoykskikh zoloto-kvartsevykh zhilnykh poyasov Severo-Vostoka Azii* [Geology of mesozoic gold-quartz vein belts of North-East of the Asia]. Magadan, NEISRI FEB RUS Publ., 1998. 210 p.
- Savchuk Y.S., Volkov A.V. Large and super-large orogenic golden deposits: Geodynamics, structure, genetic consequences. *Lithosphere (RUSSIA)*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 813–833. In Rus.
- Goldfarb R.J., Phillips G., Nokleberg, W. Tectonic setting of synorogenic gold deposits of the Pacific Rim. *Ore Geology Reviews*, 1998, vol. 13, no. 1–5, pp. 185–218.
- Fridovsky V.Y. Structural control of orogenic gold deposits of the Verkhoyansk-Kolyma folded region, northeast Russia. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 103, pp. 38–55.
- Glukhov A.N. Tectonic framework for metallogeny of precambrian structures on the example of Kolyma and Omolon terranes (Northeast Asia). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 219–248. In Rus.
- Shpikerman V.I. *Domelovaya minerageniya Severo-Vostoka Azii* [Pre-cretaceous metallogeny of Northeastern Asia]. Magadan, NEISRI FEB RUS Publ., 1998. 333 p.
- Glukhov A.N. Geological structure and ore composition of the Nadezhda gold deposit (Magadan region). *Otechestvennaya geologiya*, 2013, no. 4, pp. 7–17. In Rus.
- Glukhov A.N., Savva N.E., Kolova E.E. Ore mineralogy and genesis of Nadezhda gold deposit, Magadan region. *Ores and metals*, 2016, no. 4, pp. 60–71. In Rus.

15. Goryachev N.A. *Proiskhozhdenie zoloto-kvartsevykh zhilnykh poyasov Severnoy Patsifiky* [Origin of gold-quartz vein belts in the North Pacific]. Magadan, NEISRI FEB RUS Publ., 2003. 143 p.
16. Glukhov A.N. Base metal mineralization of the Kolyma terrain in Northeast Russia: Overview and genetic classification. *Lithosphere (RUSSIA)*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 717–730. In Rus.
17. Glukhov A.N. Geochemical specialization of the Upper Proterozoic complexes of the Kolyma Terrane in Northeast Russia. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2014, vol. 8, no. 3, pp. 177–186. In Rus.
18. Glukhov A.N., Gladkov A.S., Koshkarev D.A., Lunina O.V. Tectonophysical evidences of geodynamic evolution of the Prikolyma terrain (North-Eastern regions of Russia). *Geodynamics & Tectonophysics*, 2012, vol. 3, no. 4, pp. 361–375. In Rus.
19. Protopopov G.Kh. Pervye nakhodki rudnogo zolota v Shamanikho-Stolbovskom zolotorossynom rayone Severo-Vostoka Rossii [The first finds of ore gold in the Shamanikho-Stolbovsky gold placer region of the North-East of Russia]. *Otechestvennaya geologiya*, 1994, no. 9, pp. 31–32.
20. Glukhov A. N. Weathering crusts in the Glukharinyi ore-placer cluster (Kolyma Terrane, Northeastern Russia) and their gold potential. *Lithology and Mineral Resources*, 2020, vol. 55, no. 5, pp. 392–414. In Rus.
21. Abramov S.S., Andreeva O.V., Zharikov V.A., Zaraiskii G.P., Marakushev A.A., Omelyanenko B.I., Pertsev N.N., Podlesskii K.V., Rass I.T., Rusinov V.L. *Metasomatizm i metasomaticheskie porody* [Metasomatism and metasomatic rocks]. Moscow, Nauchny Mir Publ., 1998. 492 p.
22. Zhdanov V.V., Kostin A.E., Kukharev E.A., Landa E.A., Lukyanova L.I., Masaitis V.L., Moskalenko Z.D., Pushkarev Yu.D., Sharpenok L.N. *Petrograficheskiy kodeks Rossii. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya* [Petrographic code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations]. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2009. 160 p.
23. Dill H.G., Dohrmann R., Kaufhold S., Çiçek G. Mineralogical, chemical and micromorphological studies of the argillic alteration zone of the epithermal gold deposit Ovacik, Western Turkey: Tools for applied and genetic economic geology. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, vol. 148, pp. 105–127.
24. Gavrillov R.Yu., Sinkina E.A., Mitsykh S.N. Method of kap-pametry as prospecting criteria of gold mineralization. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 83–94. In Rus.
25. Korzhinskii D.S. The theory of metasomatic zoning. *Mineralium Deposita*, 1968, vol. 3, no. 3, pp. 222–231.
26. Yurkova M.V. Mineralogiya rud Sokhatinogo mestorozhdeniya (Respublika Sakha) [Mineralogy of ores of the Sokhatinskoe deposit (Republic of Sakha)]. *I Molodezhnaya nauchno-obrazovatel'naya konferentsiya CNIGRI* [I Youth Scientific and Educational Conference of TsNIGRI]. Moscow, TsNIGRI Publ., 2020. pp. 225–227.
27. Korobeinikov A.F., Narseev V.A., Pshenichkin A.Ya., Revyakin P.S. *Pirity zolotorudnykh mestorozhdeniy (svoystva, zonalnost, prakticheskoe primeneniye)* [Pyrites of gold deposits (properties, zoning, practical application)]. Moscow, TsNIGRI Publ., 1993. 213 p.
28. Criddle A.J., Chicholm J.E., Cerveleite S.C.J. Ag₄TeS, a new mineral from the Bambolla mine, Mexico, and a description of a photochemical reaction involving cervelleite, acanthite, and hessite. *European Journal of Mineralogy*, 1989, vol. 1, pp. 371–380.
29. Kalinin Y.A., Palyanova G.A., Naumov E.A., Kovalev K.R., Pirajno F. Supergene remobilization of Au in Au-bearing regolith related to orogenic deposits: A case study from Kazakhstan. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 109, pp. 358–369.
30. Yanchenko O.M., Voroshilov V.G., Timkin T.V., Ziaii M. Mineral-geochemical zonality of golden bearing weathering crust of the Tom-Yaya interfluvium. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 83–94. In Rus.
31. Yanchenko O.M., Voroshilov V.G., Timkin T.V., Martynenko I.V., Ziaii M. Morphology and composition of gold in weathering crust of the Tom-Yaya interfluvium. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 332, no. 9, pp. 74–91. In Rus.
32. Yanchenko O.M., Timkin T.V., Voroshilov V.G., Yakich T.Yu., Ziaii M. Nature of phosphate distribution within the golden weathering crusts of the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 330, no. 3, pp. 84–92. In Rus.
33. Martynenko I.V., Voroshilov V.G., Timkin T.V., Ziaii M. Petrochemical characterization of weathering crusts of Olkhovsk-Chibizhek district. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 136–144. In Rus.
34. Isaeva E.R., Voroshilov V.G., Timkin T.V., Mansour Ziaii. Geochemical criteria to identify reservoirs and to forecast their oil and gas content in terrigenous deposits in Pur-Tazovskoy oil-bearing field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 132–141. In Rus.
35. Pshenichkin A., Timkin T., Oskina Y. Noble metals in rocks and ores of Maysko-Lebed ore field (Mountain Shoriya). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24, pp. 1–6.

Received: 25 March 2022.

Information about the authors

Timofey V. Timkin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valery G. Voroshilov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Maria V. Yurkova, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Mansour Ziaii, PhD., associate professor, Shahrood University of Technology.