

УДК (549+550.4):553.463(575.14)

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ НА КОМПЛЕКСНОЕ ОРУДЕНЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЯХТОН (ГОРЫ ЧАКЫЛ-КАЛЯН, УЗБЕКИСТАН)

Сайитов Сардор Савриддинович¹,
sardorsayitov@gmail.com

Цой Владимир Деньевич¹,
vtsoi@inbox.ru

¹ ГУ «Институт минеральных ресурсов»,
Узбекистан, 100164, г. Ташкент, ул. Олимлар, 64.

Актуальность. Результаты минералого-геохимических исследований повышают эффективность геологоразведочных работ, так как достоверные знания о распределении полезных компонентов и формах их нахождения в различных типах руд, характере распределения, их взаимосвязи, последовательности гипогенного минералообразования являются необходимыми для прогноза рудного потенциала объектов и определения направлений геологоразведочных работ. Кроме того, данные минералогических исследований используются при разработке рациональной схемы обогащения руд и обеспечивают комплексную переработку и использование минерально-сырьевых ресурсов.

Цель: изучить вещественный состав и минералого-геохимические особенности руд и рудовмещающих пород месторождения Яхтон.

Объект: месторождение Яхтон, расположенное в горах Чакыл-Калян Узбекистана, известное как скарно-шеелитовый объект с попутным золотом. Результаты последних геологоразведочных работ показали значительные перспективы объекта на золотое оруденение, то есть в зонах метасоматического изменения гранитоидов установлены промышленные содержания золота с комплексом попутных компонентов.

Методы. Минералогические и геохимические особенности оруденения были изучены комплексными методами исследований. Химический состав руд изучен полным силикатным, спектральным полуколичественным, ИСП-масспектрометрическим, атомно-абсорбционным, химическим методами исследований. Минеральный состав руд установлен в результате комплексных исследований, в том числе: оптической микроскопии в проходящем и отраженном свете, минералогического анализа тяжелых фракций, рентгеноспектрального локального анализа.

Результаты. Руда и рудовмещающие породы месторождения Яхтон алюмосиликатного (гранитоиды) и карбонатного (скарны, известняки) состава. Руды месторождения Яхтон комплексные. Содержание золота в руде до 4,45 г/т, оксида вольфрама до 0,33 %. Установлен следующий геохимический ряд элементов в последовательности увеличения кларков концентраций от 40 до 16500: $Sb < W < Re < Au < Cu < As < Ag < Se < Mo < Te < Bi$. Минеральная форма золота самородная и электрум. Пирит-арсенопиритовая с золотом парагенетическая минеральная ассоциация является основной продуктивной на золотое оруденение. Проявление минералов золото-серебряной стадии и телескопирование нескольких парагенетических минеральных ассоциаций способствовало образованию комплексных руд.

Ключевые слова:

руда, химический, минеральный состав, гранитоиды, самородное золото, пирит, элементы-примеси, месторождение Яхтон, горы Чакыл-Калян, Узбекистан.

Введение

Узбекистан входит в первую десятку стран мира по производству золота и разведанным запасам золота. Запасы золота оцениваются в 1800 т [1]. Имеется около сотни золоторудных месторождений – от мелких до гиганта мирового уровня – Мурунтау.

Золоторудные месторождения Узбекистана приурочены к единому Кызылкумо-Кураминскому металлогеническому поясу, включающему Южно-Тянь-Шанский орогенический пояс и Бельтау-Кураминскую вулcano-плутоническую дугу, образованные в результате субдукции коры Туркестанского палеоокеана под Казахстано-Киргизский континент, коллизии его с Каракумо-Таримским континентом и последующими геологическими процессами [2–4]. Они размещаются в черных сланцах (Мурунтау, Мютенбай), карбонатных, терригенных и вулканогенных породах (Кокпатас, Балпантау), в интрузивных образованиях (Зармитан) [5]. На золоторудных месторождениях Центральных Кызылкумов золото

отмечается в метасоматически измененных вмещающих породах и кварцево-жильных образованиях [6].

Что касается возраста золотого оруденения, то изотопные исследования арсенопирита, минерала спутника золота на месторождении Мурунтау, по данным Re-Os-He изотопии, дают 285,5±1,7 млн лет [7]. Граниты в глубокой скважине СГ-10 имеют возраст 287,2±3,9 млн лет, сиенодиоритовые порфириды – 285,4±5,1 и 284,4±1,9 млн лет, адамеллиты – 286,2±1,8 млн лет [8]. Результаты U-Pb геохронологии основных интрузивных массивов Узбекистана показали, что гранитоидный магматизм имеет преимущественно постколлизийный возраст, проявляющийся в аккреционных единицах в 270–290 млн лет, тогда как субдукционный магматизм преобладает как характерный для вулcano-плутонической дуги на отметке 300–320 млн лет. Определение возраста сульфидной минерализации методом Os-Re изотопии составляет 283–289 и 298–314 млн лет [9]. Установлено, что золотое оруденение накладывается на осадочно-вулканогенные и магматические породы различного

состава, от докембрия до верхнего-карбона – нижней перми, а рудообразование длилось порядка 60–70 млн лет [10]. Датировки магматических образований и арсенопирита на Мурунтау близки, что указывает, по видимому, на их генетическую связь, что подтверждает выводы об определенной синхронности золотого оруденения и гранитоидного магматизма [11].

Золоторудные месторождения Узбекистана имеют гидротермальный генезис. Руды гипогенных золоторудных месторождений образовались в раннесульфидную и золото-серебряную стадии и связаны с пирит-арсенопиритовой с золотом, золото-гесситовой и золото-серебряной парагенетическими минеральными ассоциациями (ПМА) [12]. В соответствии с зональностью, глубиной формирования оруденения на золоторудных месторождениях установлен единый последовательный ряд геохимических парагенезисов: /Au-W/Au-As/Au-Te/Au-Ag/Au-Sb/Au-Hg/ [13, 14].

Месторождение Яхтон всем известно как скарново-щелитовый объект с попутным золотом, развивающийся на контакте гранодиорит-порфиров, гранодиоритов Яхтонского комплекса (С3) с известняками, роговиками ходжакурганской (D2) и мадмонской (D1) свит [15]. В скарново-щелитовых месторождениях концентрируется не только W, но и Au [16]. Месторождения отнесены к скарново-редкометалльному типу [17].

Результаты последних геологоразведочных работ показали значительные перспективы объекта на золотое оруденение. Промышленные содержания золота с комплексом попутных компонентов установлены в зонах метасоматического изменения гранитоидов.

Оруденение на месторождении делится на два структурных яруса и имеет биметалльный характер (золото, вольфрам). Верхний ярус представлен скарнами гранат-пироксенового состава и характеризуется вольфрамовым оруденением. Во втором ярусе в тектонически-ослабленной зоне северо-восточного простирания в гранитоидах отмечаются субпараллельные минерализованные зоны с промышленными концентрациями Au и W [18].

Типоморфный анализ минералов показывает, что процесс рудообразования на месторождении был длительным, многостадийным и эволюционным. То есть месторождение Яхтон является полиформационным, формировавшимся в известково-магнезиально-карбонатной среде. Источниками вольфрама (рудогенерирующей структурой) служили гранитоиды мезо- и гипабиссальной фации глубинности C_3-P_1 [19]. Наличие в рудном процессе таких элементов, как Sr, Ni, Mg, Fe, S, свидетельствует о подкоровом (мантийном) источнике рудного вещества, производными которого также являются дайки субщелочных габброидов и лампрофиров [20].

В ходе геохимических исследований апогранитоидного вольфрамового оруденения месторождения Яхтон установлено, что оно контролируется поздней по отношению к продуктивному на скарны яхтонскому интрузивному комплексу тектонической зоной северо-восточного простирания. Структура выражена линейными зонами брекчирования, катаклаза, субпараллельными зонами мелкой трещиноватости [21].

Метасоматиты по гранитам на нижних горизонтах месторождения Яхтон имеют лентовидную форму средней мощностью 4–5 м. Основным промышленным компонентом является вольфрам, со средним содержанием элемента 0,3–0,5 % в рядовых рудах и 1,5–2,0 % в богатых. Также промышленный интерес могут иметь: золото 3–4 г/т (в отдельных пробах), молибден до 500–800 г/т, серебро до 115 г/т. Основной минерал руд – шеелит [21]. Золотопродуктивная минеральная ассоциация пирит-арсенопиритовая с золотом ПМА.

Для вольфрамового оруденения нижнего яруса месторождения Яхтон обобщенный геохимический ряд относительной интенсивности имеет вид: $Bi-Te-W-Au-Sb-As-Ag-Se-Mo-Sn-Cu-Be-U-Cd-Cr-B-Ba-Co-Mn$. Первые 9 элементов рассматриваются как типоморфный геохимический комплекс вольфрамового оруденения объекта и образуют наиболее интенсивные ореолы в околорудном пространстве нижнего яруса месторождения Яхтон [22].

Полигенность и полихронность объекта по мнению И. Тураева и др. [22] определяется совмещением в рудном поле гранитоидов, лампрофиров и щелочных базальтоидов геохимически и минерально-акцессорно специализированных на вольфрам и являющихся источниками привноса этого металла в рудное пространство в течение длительного времени, начиная с верхнего карбона и заканчивая верхним триасом.

С учетом комплексности состава сульфидно-редкометалльных руд можно попутно извлекать Cu, Bi, Au, Ag, Se, Te из вольфрамовых месторождений, в том числе из Яхтона [19]. Но формы нахождения этих попутных компонентов недостаточно изучены.

Целевым заданием исследований являлось изучение минералого-геохимических особенностей руд и рудовмещающих пород нижнего яруса месторождения Яхтон, установление основных продуктивных ПМА, формы нахождения ценных компонентов.

Результаты минералого-геохимических исследований повышают эффективность геологоразведочных работ, так как достоверные знания о распределении полезных компонентов и формах их нахождения в различных типах руд, характере распределения, их взаимосвязи, последовательности гипогенного минералообразования являются необходимыми для прогноза рудного потенциала объектов и определения направлений геологоразведочных работ. Кроме того, минералого-геохимические данные используются при разработке рациональной схемы обогащения руд и обеспечивают комплексную переработку и использование минерально-сырьевых ресурсов [23].

Методы исследования

Изучение минералого-геохимических особенностей руд и рудовмещающих пород месторождения Яхтон последовательно проводилось комплексом геологических, минералогических, петрографических, химико-аналитических методов. В процессе исследований были изучены рудные и минерализованные зоны, вскрытые скважинами и штольнями.

Химический состав руд и рудовмещающих пород изучен полным силикатным анализом. Содержания основных и попутных компонентов определены спектральным полуколичественным, ИСП-масспектрометрическим, атомно-абсорбционным, химическим методами исследований. Химико-аналитические исследования выполнены в лаборатории АИ ВСМС ГУ «ИМР». ИСП-масспектрометрический анализ выполнен в ЦЛ Госкомгеологии РУз.

Минеральный состав руд, их структурно-текстурные особенности, характер метасоматических изменений установлены при описании прозрачных шлифов, полированных аншлифов (на микроскопе Nikon Eclipse LV100 Pol), минералогического анализа тяжелых фракций проб-протолок. Форма нахождения основных и попутных компонентов установлена под микроскопом и рентгеноспектральным локальным анализом на микрозонде («Superprobe» JXA-8800R, JEOL). Рентгеноспектральный локальный анализ проводился в институте Геологии и геофизики Госкомгеологии РУз.

Результаты исследования

Характеристика основных типов рудовмещающих пород

В результате полевых наблюдений и изучения прозрачных шлифов выявлены следующие типы рудовмещающих пород: гранодиорит, гранодиорит-порфир, диоритовый порфирит, известняк, метасоматиты (скарны, измененные гранитоиды), кварц-карбонатные жильные образования. Все породы имеют разную степень метасоматического изменения (рис. 1).

Скарны образуются на контакте карбонатных пород с гранитоидами и включают два этапа минералообразования: магнезиально-скарновый и известково-скарновый с ранней щелочной, кислотной и поздней щелочной стадиями. Основная масса шеелита образуется вместе с продуктами кислотного выщелачивания (амфибол, везувиан, кварц по экзоскарнам; альбит, кварц, эпидот по эндоскарнам). Вторая стадия характеризуется развитием жил и прожилков кварца и геденбергита, иногда с пирротином и арсенопиритом. В позднюю щелочную стадию формируется полиминеральный комплекс новообразований: в эндоскарнах – альбит, кварц, хлорит, серицит, пирит; в экзоскарнах – кварц, хлорит, кальцит. Из сульфидов обычные пирротин, арсенопирит, пирит, халькопирит, реже отмечаются галенит, сфалерит, висмутин, золото [15].

Минеральный состав известковых скарнов представлен пироксеном (диопсид, геденбергит), гранатом (гроссуляр, андрадит), кварцем, андезином, ортоклазом, кальцитом и др. Структура полнокристаллическая. Текстура массивная. Акцессорные минералы представлены сфеном, рутилом. Количество граната в некоторых пробах достигает 40 %.

Процесс формирования околорудного пространства состоялся в двух этапах. На первом вмещающие оруденение гранодиориты были подвержены кислотному выщелачиванию, которое сменилось щелочным метасоматозом. Вторичные изменения гранодиоритов представлены окварцеванием, серицитизацией, каолинизацией, карбонатизацией, сульфидизацией. Метасоматиты в гранодиритах относятся к березитовой формации.

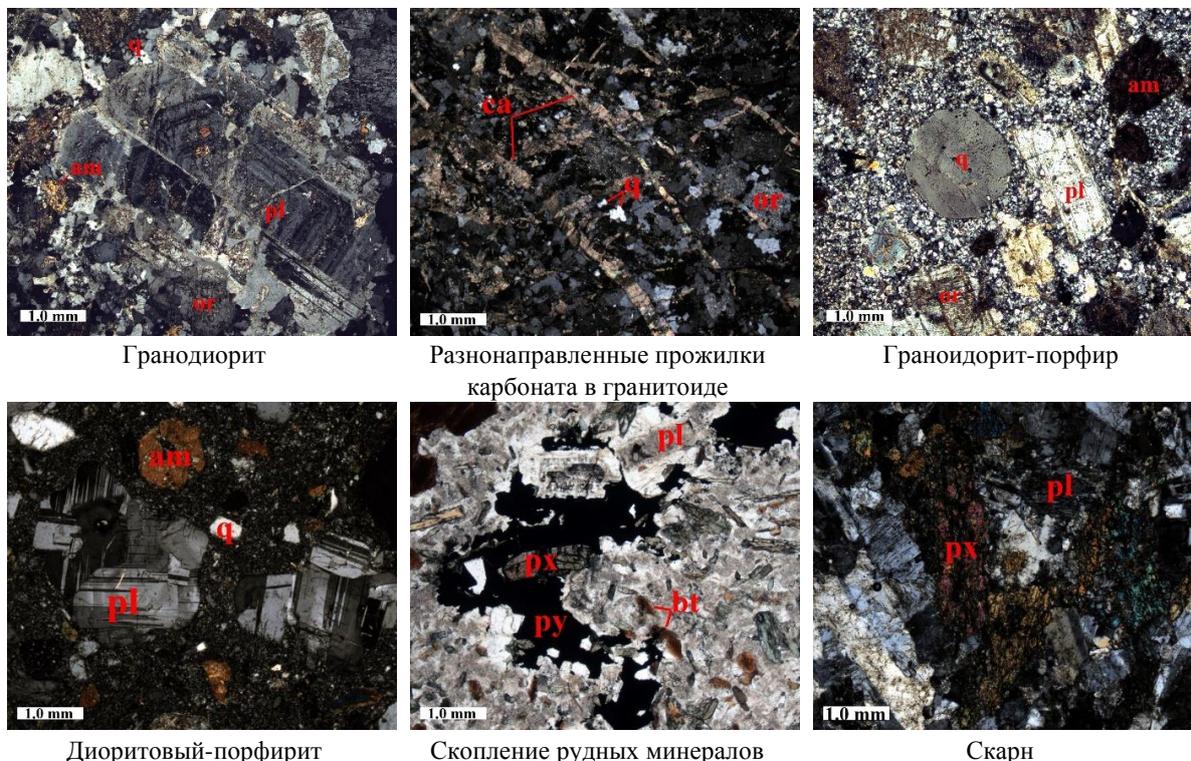


Рис. 1. Микрофотография рудовмещающих пород в проходящем свете (q – кварц, pl – плагиоклаз, or – ортоклаз, px – пироксен, am – амфибол, bt – биотит, ca – кальцит, py – пирит).

Fig. 1. Microphoto of ore-bearing rocks in transmitted light (q – quartz, pl – plagioclase, or – orthoclase, px – pyroxene, am – amphibole, bt – biotite, ca – calcite, py – pyrite)

Отмечается замещение роговой обманки хлоритом с лейкоксеном, иногда отмечается её эпидотизация, сопровождаемая микрозернистыми скоплениями лейкоксена и цоизита. В процессе кислотного выщелачивания плагиоклаз интенсивно пелитизирован и серицитизирован. В результате щелочного метасоматоза большинство зёрен плагиоклаза превращены в мелкозернистый альбит, среди которого распространены микрореликты интенсивно серицитизированного первичного плагиоклаза, реже у некоторых зёрен плагиоклаза наблюдается кайма альбита. Отдельные участки метасоматитов сложены мелкозернистым кальцитом почти в чистом виде [21]. Также кальцит установлен в виде прожилков. Акцессорные минералы представлены сфеном, цирконом, апатитом. Рудные минералы отмечаются в виде скоплений, вкрап-

лений, прожилков. Часто развиваются в межзерновых промежутках, трещинах нерудных минералов.

Геохимические особенности оруденения

Изучены пробы алюмосиликатного состава. На классификационной диаграмме магматических пород А.А. Маракушева по содержанию SiO_2 и $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ изученные рудовмещающие магматические породы попадают в поле гранитов, гранодиоритов и кварцевых диоритов (рис. 2).

Содержание кремнезема (SiO_2) в магматических породах – от 60,42 до 72,78 %. Глинозем (Al_2O_3) составляет от 9,5 до 16,80 %, CaO – от 2,39 до 9,62 %. Содержание Fe_2O_3 – до 2,57 %, FeO – до 6,19 %, сумма щелочей ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) – 3,57–5,54 %. Содержание Собщ. – до 2,36 %, Sc-д. – до 2,31 %.

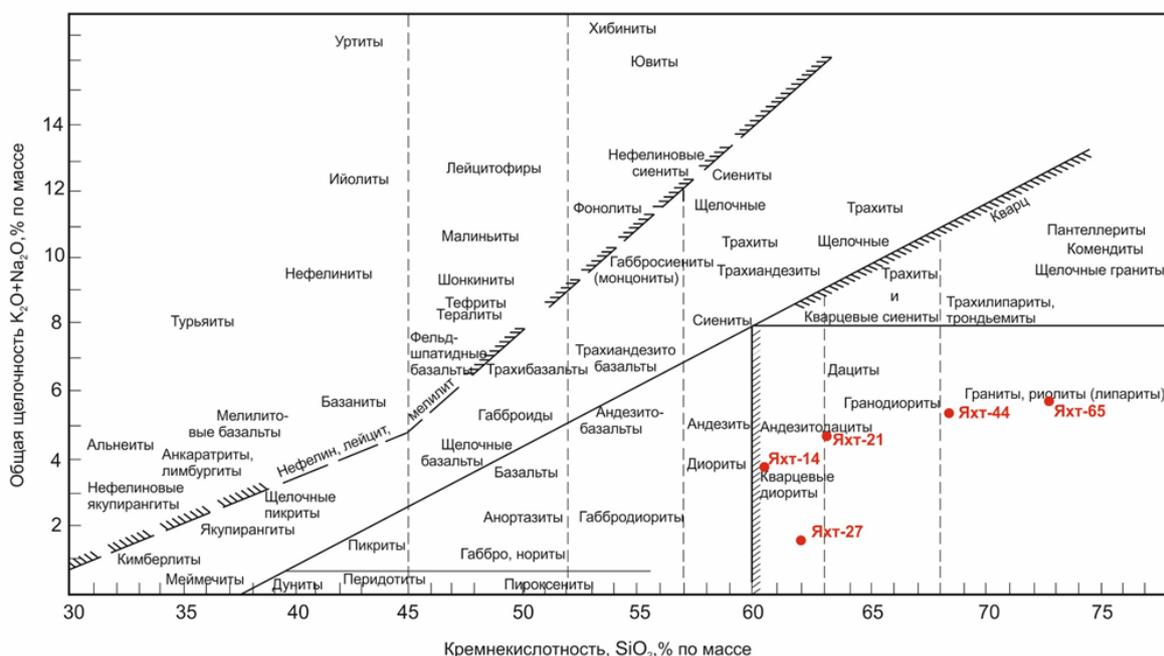


Рис. 2. Расположение рудовмещающих пород месторождения Яхтон на диаграмме систематики магматических пород в отношении содержания SiO_2 и $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ по А.А. Маракушеву

Fig. 2. Location of ore-bearing rocks of the Yakhton deposit on the diagram of systematics of igneous rocks in relation to the content of SiO_2 and $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ according to А.А. Marakushev

Содержания рудогенных элементов установлены комплексом аналитических исследований. Сначала все пробы были проанализированы спектральным полуквантитативным анализом для первоначального определения содержаний рудогенных элементов в изучаемых пробах. Пробы с повышенными содержаниями ценных компонентов были проанализированы ИСП-масспектрометрическим, атомно-абсорбционным на золото, химическим анализом на вольфрам, молибден.

Золото и вольфрам являются основными ценными компонентами руд. Повышенные концентрации Mn , Cu , W отмечаются в геденбергитовых и пироксен-гранатовых экзоскарнах; Au , Ag – в диопсидовых, геденбергитовых и пироксен-плагиоклазовых скарнах, Sn – в геденбергит-гранатовых и пироксен-плагиоклазовых скарнах. В оруденелых и сульфидизированных скарнах отмечаются стабильно повы-

шенные концентрации Au , Ag , Mo , Zn , Sn , As и относительно пониженные – Ti , Cr , Ni , Co , V [15]. Для метасоматически измененных гранитоидов характерны повышенные содержания золота. Из попутных компонентов в составе руд представляют интерес серебро, теллур, селен, висмут, молибден, медь. В единичных пробах отмечаются повышенные содержания свинца, редкоземельных элементов.

По данным ИСП-масспектрометрического анализа содержание вольфрама достигает 550 г/т, в среднем по 26 пробам составляет 96,6 г/т. Кларк концентрации (КК) вольфрама составил 47,3 (табл. 1). По данным химического анализа содержания WO_3 составляют 0,27–0,33 %, молибдена – 0,07–0,22 %.

Содержание золота в проанализированных пробах составило до 3,65 г/т по данным ИСП-масспектрометрического анализа. КК золота по дан-

ным ИСП-масспектрометрического анализа 26 проб составил 149,9 (табл. 1). Содержания золота по данным атомно-абсорбционного анализа составляют 0,08–4,45 г/т, в среднем по 41 пробам – 1,25 г/т.

Из попутных компонентов установлено серебро с содержанием от 0,45 до 330 г/т, в среднем 29,4 г/т, по данным ИСП-масспектрометрического анализа. По

данным атомно-абсорбционного анализа содержание серебра достигает 517,55 г/т в единичных пробах.

Содержания висмута колеблются в широких пределах – от 1,8 до 2400 г/т, в среднем составляет 148,3 г/т по 26 пробам. КК висмута 16477,8 г/т.

Содержание молибдена колеблется в широких пределах – от 7,6 до 9800 г/т, в среднем составляет 620,6 г/т.

Таблица 1. Результаты ИСП-МС анализа руд и рудовмещающих пород, г/т

Table 1. Results of ICP-mass spectrometric analysis of ores and ore-bearing rocks, g/t

Значение/Value	Li	Be	B*	Sc	Ti*	V	Cr	Mn	Fe*	Co	Ni	Cu
Мин./Min.	1,1	0,3	2,2	0,6	48	22	22	140	5900	1,7	5,4	26
Макс./Max.	31	6,5	31	9,7	4500	110	100	8600	220000	840	45	110000
Сред./Aver.	9,4	2,3	18	3	1171,3	52,5	50,3	1867,3	71503,8	56,9	15,6	9202
Кл. эл./CE	32	3,8	12	10	4500	90	83	1000	46500	18	58	47
КК/CC	0,3	0,6	1,5	0,3	0,3	0,6	0,6	1,9	1,5	3,2	0,3	195,8
Значение/Value	Zn	Ga	As	Se	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Se	Rb	Sr
Мин./Min.	15	1,3	17	1,1	1,5	23	0,7	1,2	0,09	1,1	1,5	23
Макс./Max.	430	32	8500	220	370	520	21	93	18	220	370	520
Сред./Aver.	97,2	14,4	508	21,6	104,8	241	10	39	5,1	21,6	105	240,7
Кл. эл./CE	83	19	1,7	0,05	150	340	29	170	20	0,05	150	340
КК/CC	1,2	0,8	299	431,8	0,7	0,7	0,3	0,2	0,3	432	0,7	0,7
Значение/Value	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	Cs	Ba
Мин./Min.	0,7	1,2	0,09	5,8	0,19	0,03	0,03	2,4	1,1	0,12	0,2	7,7
Макс./Max.	21	93	18	9800	330	7,7	2,4	180	440	130	17	3700
Сред./Aver.	10	39	5,1	620,6	29,4	1	0,4	20,5	21,7	7,2	4	1226
Кл. эл./CE	29	170	20	1,1	0,07	0,13	0,25	2,5	0,5	0,001	3,7	650
КК/CC	0,3	0,2	0,3	564,1	419,3	7,4	1,6	8,2	43,3	7175	1,1	1,9
Значение/Value	ΣPЗЭ	Hf	Ta	W*	Re	Pt*	Au*	Tl	Pb	Bi	Th	U
Мин./Min.	3,61	0,04	0,01	0,85	0,01	0	0,07	0,02	1,7	1,8	0,16	0,49
Макс./Max.	1813,5	3,1	1,1	550	0,47	0	3,65	1,9	3900	2400	14	7
Сред./Aver.	133,3	1,2	0,4	96,6	0,1	<0,05	0,6	0,6	267,6	148,3	6,3	3,7
Кл. эл./CE	178	1	2,5	1,3	0,0007	0,01	0,004	1	16	0,009	13	2,5
КК/CC	0,7	1,2	0,2	74,3	79,6	0	149,9	0,6	16,7	16478	0,5	1,5

* количество проб – 26/number of samples – 26; CE – clarke content of elements; CC – clarke concentration.

Для руд месторождения Яхтон очень характерны повышенные содержания селена и теллура. Содержание теллура достигает 130 г/т в отдельных пробах, в среднем по 26 пробам составляет 7,2 г/т. КК селена составляет 431,8 г/т. Содержание элемента достигает 220 г/т, в среднем по 26 пробам составляет 21,6 г/т.

Медь имеет локальное распространение, т. е. в отдельных сечениях содержание меди составляет 2700–110000 г/т. В остальных пробах содержание меди колеблется от 26 до 560 г/т.

По интенсивности накопления рудогенных элементов (по кларкам концентрации – относительно среднего содержания элемента в земной коре) выделены следующие группы элементов: 1) элементы с низким кларком концентраций (0–0,7 – Pt, Ta, Zr, Nb, Ti, Ni, Li, Sc, Y, Th, Tl, V, Be, Cr, Rb, Sr, ΣPЗЭ); 2) близкларковые (0,8–1,4 – Ga, Cs, Zn, Hf, U, B); 3) с высоким кларком концентраций (>1,5 – In, Mn, Ba, Co, Cd, Sn, Pb, Sb, W, Re, Au, Cu, As, Ag, Se, Mo, Te, Bi).

В свою очередь элементы с повышенными содержаниями на месторождении Яхтон подразделены на три группы: 1) умеренно концентрирующиеся – в 1,6–5 раз (в последовательности увеличения кларков концентрации): In<Mn<Ba<Co; 2) сильно концентрирующиеся – в 5–40 раз: Cd<Sn<Pb; 3) аномально концентрирующиеся – в 40–16500 раз: Sb<W<Re<Au<Cu<As<Ag<Se<Mo<Te<Bi.

Корреляционным анализом рудогенных элементов установлены сильные корреляционные связи между золотом и серебром, мышьяком, вольфрамом, сурьмой, марганцем, свинцом, висмутом и др., которые обусловлены генетическими особенностями и стадийностью минералообразования.

Положительные корреляционные связи, установленные между парами элементов: Ag-Pb, Ag-Sb, Mn-W, Ge-W, Cu-Mo, Zn-Mo и др., обусловлены геохимическими особенностями элементов, а также явлением телескопирования различных ПМА. Сильная связь серебра с сурьмой (0,80) свидетельствует о наличии собственно-серебряной ПМА, с сульфосолями серебра.

Результаты корреляционного анализа показали очень сильные геохимические связи между содержаниями Rb, Cs, Sr, Zr, Nb и породообразующими компонентами, особенно с щелочами Na, K, Al. Также отмечается группа черных металлов (V, Ti, Cr), элементы которой имеют сильные геохимические связи.

Сильные положительные связи вольфрама с магнием, кальцием и марганцем обусловлены процессом скарнообразования и наложением шеелита. Попутные компоненты руд, такие как Se, Te, Bi, Ag, имеют высокие положительные коэффициенты корреляции между собой и с As, Sb. Это обусловлено близостью по времени образования, присутствием совместных

минералов этих элементов и телескопированием минералов различных стадий.

Характер распределения элементов на глубине показывает изменения кларков концентраций золота соответственно с изменением кларков концентрации мышьяка, вольфрама, висмута, серебра (рис. 3).

КК золота характеризуется значением 34,9 (в интервалах 0–100, 400–600 м); повышенными значениями (от 1681,7 до 4100) – в интервалах 100–400 и 600–700 м (рис. 3). Видимо, мы имеем дело со вторым ярусом оруденения на глубоких горизонтах.

Таким образом, первый ярус оруденения – в интервале 100–400 и второй – в интервале 600–700 м и, возможно, ещё глубже.

В интервале 200–400 м отмечаются повышенные КК серебра и сурьмы, это, видимо, связано с проявлением сульфосолей серебра. С глубиной КК сурьмы уменьшается (рис. 3).

В интервале 100–400 м наблюдается сходство графиков для полиметаллов, серебра и золота. Такой

характер изменчивости графиков указывает на рудную зону в интервале 100–400 м, в которой проявлены минералы раннесульфидной, полиметаллической и золото-серебряной стадий. На остальных графиках нет определенной зависимости.

Таким образом, изменчивость КК основных типоморфных элементов указывает на рудные зоны, проявление стадийности гипогенного минералообразования и телескопирования, а также перспективы глубоких горизонтов изученного объекта.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что руда и рудовмещающие породы нижнего яруса месторождения Яхтон комплексного состава, т. е. кроме основных компонентов вольфрама и золота установлены аномально повышенные содержания серебра, висмута, теллура, селена, молибдена, меди. Установленные повышенные содержания ряда попутных компонентов повышают ценность руды. Распределение КК по вертикали отражает стадийность гипогенного минералообразования.

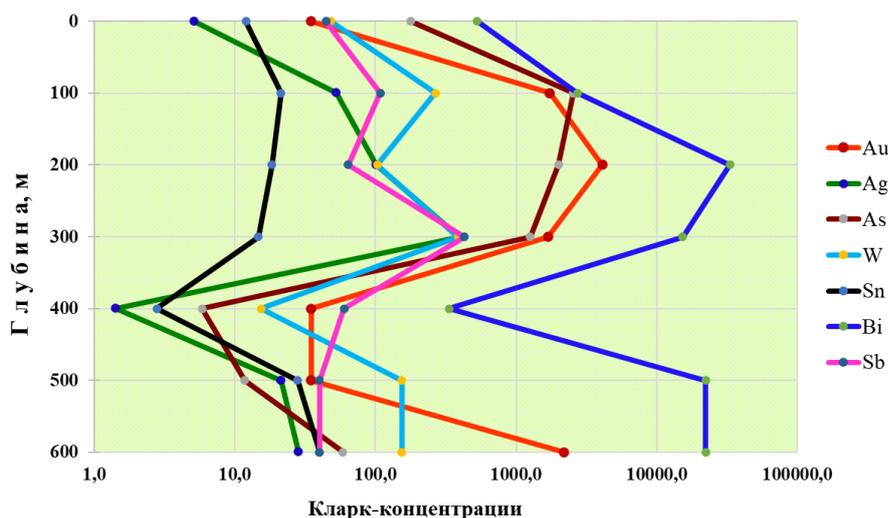


Рис. 3. Графики зависимости кларков-концентраций химических элементов

Fig. 3. Graphs of dependence of clark concentrations of chemical elements

Минеральный состав руд и формы нахождения ценных компонентов

В процессе минералогических исследований было определено более 60 минералов и соединений в составе руд и рудовмещающих пород месторождения Яхтон. Минералы подразделены на группы – широко распространенные, минералы средней распространенности и мало распространенные (табл. 2).

В группу главных рудных минералов входят: пирит, арсенопирит, пирротин. Шеелит, самородное золото, электрум, серебро самородное также были отнесены к главным минералам, так как они являются минералами основных ценных компонентов руд.

Пираргирит, фрейбергит, гессит, Ag-халькопирит, висмут самородный, шеелит, тетрадимит, теллурид висмута, PbBiAgSbS, BiSeTe, PbAgTe, PbSnSbFe соединения, галенит, висмут-селен, содержащий галенит, хедлаит, киноварь, висмутин, невскит, самородное золото и др. заверены результатами рентгено-

спектрального локального анализа на микрозонде Superprobe JXA-8800R.

Кварц, кальцит, калиевые полевые шпаты, плагиоклаз, пироксен, амфибол являются основными нерудными минералами. В подчиненном количестве отмечаются биотит, хлорит, серицит, гранат в составе руд и рудовмещающих пород. Из аксессуарных минералов установлены сфен, циркон, апатит, ильменит, рутил.

Содержание кварца в составе изученных проб достигает 40,14 %, плагиоклаза – от 16,0 до 46,52 %. КППШ составляет от 3,59 до 23,3 %. Содержание темноцветных минералов составляет 10,3–26,8 %. Сульфидные минералы представлены пиритом, пирротин, арсенопиритом. Содержание сульфидных минералов в составе проб составляет 0,84–4,32 %.

Рудная минерализация представлена вкраплениями, гнездовыми скоплениями, реже текстура рудных минералов прожилково-вкрапленная, прожилковая. Структура неравномерно зернистая, тонко-, средне-, аллотриоморфно зернистая (рис. 4).

По минеральному составу изученные пробы руд нижних ярусов месторождения Яхтон относятся к первичным рудам, т. е. рудные минералы представлены сульфидами и сульфосолями.

Основные и попутные компоненты образуют собственные минералы. Также по данным различных анализов мономинеральных фракций они входят в состав других минералов в виде примеси.

Таблица 2. Минеральный состав руд месторождения Яхтон
Table 2. Mineral composition of the ores of the Yakhton deposit

Распространение/Spread	Породообразующие/Rock-forming	Рудные минералы/Ore minerals
Широко-распространенные (главные) Widespread	Кварц, кальцит, калиевые полевые шпаты, плагиоклаз, пироксен, амфибол, глинистые минералы Quartz, calcite, potassium feldspars, plagioclase, pyroxene, amphibole, clay minerals	Пирит, арсенопирит, пирротин, шеелит, золото самородное, электрум, серебро самородное Pyrite, arsenopyrite, pyrrhotite, scheelite, native gold, electrum, native silver
Распространенные локально Locally spread	Биотит, хлорит, серицит, гранат Biotite, chlorite, sericite, garnet	Халькопирит, галенит, сфалерит, магнетит, гидроксиды железа, гематит, марказит, борнит, гессит, фрейбергит, полибазит, пираргирит, акантит, стефанит, антимонит, висмут самородный, висмутин, молибденит, медь самородная, блеклая руда, тетрадимит, жозеит, невскит, марказит, науманнит, виттихенит, борнит, клаусталит, креннерит, хедлаит, киноварь, PbAgTe, BiTeSbSe, PbBiAgS, BiSeTe, PbBiAgSbS, BiSe соединения Chalcopyrite, galena, sphalerite, magnetite, iron hydroxides, hematite, marcasite, bornite, hessite, freibergite, polybasite, pyrargyrite, acanthite, stephanite, antimonite, native bismuth, bismuthine, molybdenite, native copper, fahllore, tetradymite, joseite, nevskite, marcasite, naumannite, wittichenite, bornite, claustalite, krennerite, hedlaite, cinnabar, PbAgTe, BiTeSbSe, PbBiAgS, BiSeTe, PbBiAgSbS, BiSe compounds
Аксессуарные (редкие) Accessory (rare)	Сфен, циркон, апатит, монацит барит, целестин Sphene, zircon, apatite, monazite, barite, celestine	Ильменит, рутил, медная зелень Ilmenite, rutile, copper green

Самородное золото встречается в виде включений размером до 0,05 мм в нерудной массе, а также вкрапленно-точечной форме с самородным серебром по трещинам пород. Также золото самородное часто отмечается в виде вкрапления в пирите, арсенопирите, пироксене. Иногда самородное золото развивается по

межзерновым пространствам пирита и арсенопирита. Самородное золото часто ассоциирует с пиритом, арсенопиритом, самородным серебром, блеклой рудой, соединением Pb-Bi-Ag-S состава, самородным висмутом. Форма зерен точечная, округлая, ксеноморфная, треугольная (рис. 4, 5).

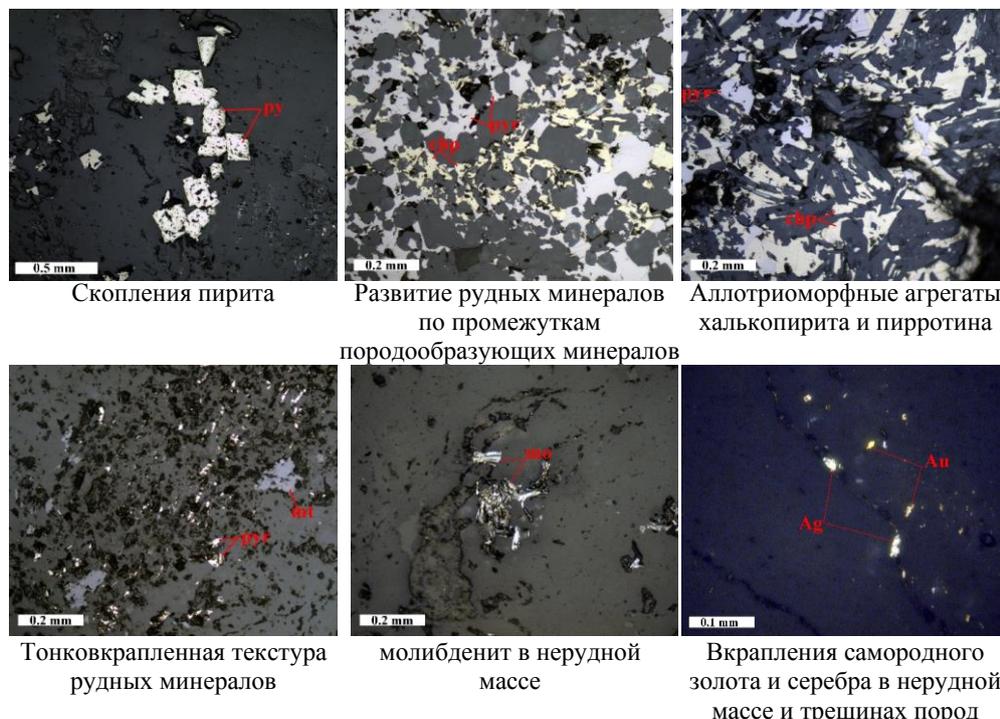
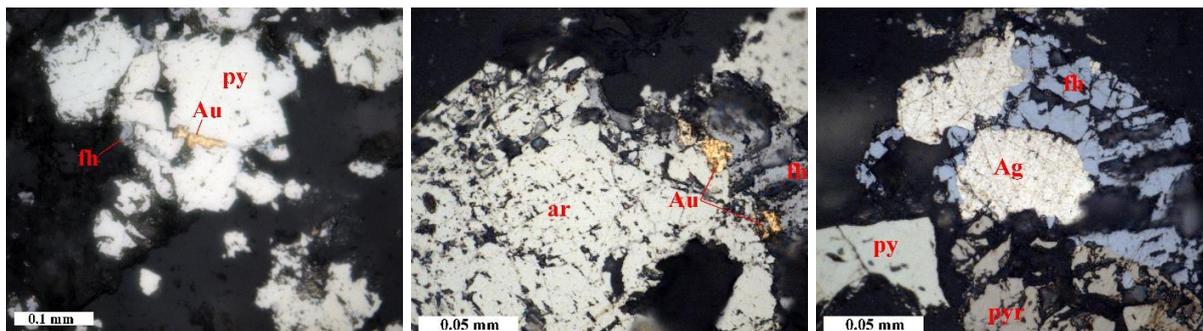


Рис. 4. Структурно-текстурные особенности рудных минералов. Фотография в отраженном свете: py – пирит, chp – халькопирит, pyr – пирротин, mt – магнетит, mo – молибденит, Au – золото самородное, Ag – серебро самородное
Fig. 4. Structural and textural features of ore minerals. Photography in reflected light: py – pyrite, chp – chalcopyrite, pyr – pyrrhotite, mt – magnetite, mo – molybdenite, Au – native gold, Ag – native silver



Золото самородное в пирите.

Золото самородное в сростках с арсенопиритом и блеклой рудой

Сростки самородного серебра, блеклой руды, пирита и пирротина

Рис. 5. Минералы благородных металлов. Фотография в отраженном свете: py – пирит, ar – арсенопирит, fh – блеклая руда, pyr – пирротин, Au – самородное золото, Ag – самородное серебро

Fig. 5. Minerals of precious metals. Photography in reflected light: py – pyrite, ar – arsenopyrite, fh – fahlre, pyr – pyrrhotite, Au – native gold, Ag – native silver

Состав золота установлен рентгеноспектральным локальным анализом. По классификации Н.В. Петровской [24] золото относится к относительно низкопробному и умеренно высокопробному. Состав самородного золота следующий: Au – 69,81–80,75 %, Ag – 17,07–27,25 %. Из элементов-примесей в составе самородного золота установлено железо – 0,4–2,95 %. Также по пробности некоторые зерна самородного золота соответствуют электруму: Au – 50,25–52,86 %, Ag – 46,39–49,01 %.

Из минералов серебра установлены: самородное серебро, электрум, сульфоантимониды серебра – фрейбергит, пираргирит, стефанит, полибазит, теллуриды серебра – гессит, селенид серебра – науманнит, сульфид свинца – акантит. Также установлены различные соединения серебра со свинцом, теллуrom, висмутом, сурьмой. Серебро входит в состав самородного золота, галенита, сульфидов висмута и свинца.

Самородное серебро встречается часто в виде единичных вкраплений в нерудной массе и в виде прожилков по трещинам, а также в сростках с сульфосолями, сульфидами, селенидами серебра, блеклой рудой, пирротинном, галенитом, пиритом, арсенопиритом

и др. рудными минералами. Размеры зерен до 0,2 мм. Форма зерен точечная, ксеноморфная. Ассоциирует чаще всего с самородным золотом, полибазитом, пираргиритом, пиритом, арсенопиритом (рис. 4, 5).

Минеральная форма нахождения вольфрама – шеелит. В основном отмечается в зонах скарнирования. Химический состав шеелита по данным рентгеноспектрального локального анализа под микрозондом следующий (%): W – 61,6–62,1; Ca – 14,28–14,33; O – 22,2–22,4; Mo – 0,27–0,29; Sr 0,41–0,80; Fe – 0,23–0,32.

Из минералов висмута установлены: висмут самородный, тетрадимит, висмутин, жозеит, виттихенит, различные соединения висмута с теллуrom, свинцом, серебром, селеном и др. Минералы висмута часто отмечаются в ассоциации друг с другом, а также с галенитом, минералами серебра, теллуrom, пиритом (рис. 5, 6). Часть висмутовых минералов диагностирована оптическим методом исследования, который был заверен рентгеноспектральным локальным анализом на микрозонде. Установленные повышенные содержания железа, серы, сурьмы за счет вмещающих или срастающихся минералов (табл. 3).

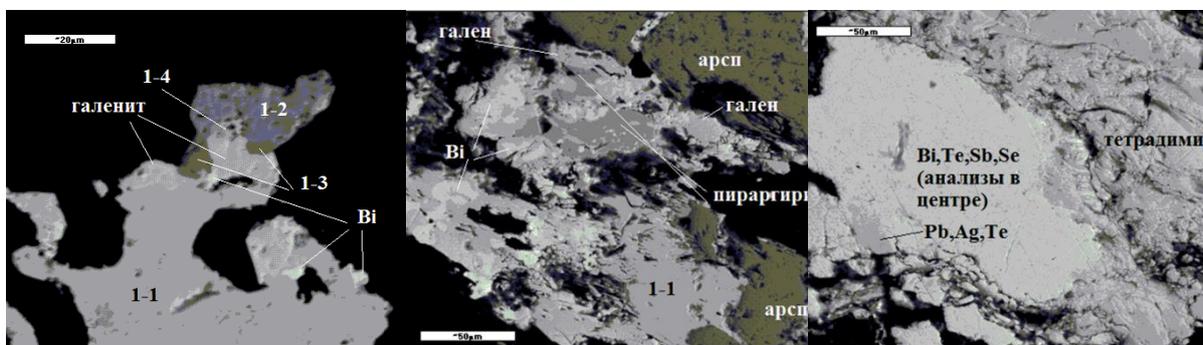


Рис. 6. Ассоциация минералов висмута. Фотография в обратно-отраженных электронах под микрозондом (1-1 – PbBiAgSbS соединение; 1-2 – пираргирит, 1-3 – фрейбергит, 1-4 – гессит)

Fig. 6. Association of bismuth minerals. Photography in backscattered electrons under a microprobe (1-1 – PbBiAgSbS compound; 1-2 – pyrrargyrite, 1-3 – freibergite, 1-4 – hessite)

Таблица 3. Химический состав некоторых редких минералов по результатам рентгеноспектрального локального анализа на микронзонде Jeol 8800R, %

Table 3. Chemical composition of some rare minerals according to the results of local X-ray spectral analysis on a Jeol 8800R microprobe, %

Минерал/Mineral	Формула/Formula	Ag	Te	Bi	Se	Sb	S	Fe	Cu	Σ
Гессит/Hessite	$Ag_{2,00}Te_{1,05}S_{0,02}$	61,04	37,94	н/о	н/о	н/о	0,22	н/о	н/о	99,2
	$Ag_{2,00}Te_{0,95}S_{0,01}$	63,99	36,02	н/о	н/о	н/о	0,14	н/о	н/о	100,2
	$Ag_{2,00}Te_{0,97}S_{0,05}Se_{0,00}$	63,42	36,57	н/о	0,05*	н/о	0,08*	н/о	н/о	99,99
	$Ag_{2,00}Te_{1,05}S_{0,02}$	64,98	33,9	1,01	н/о	н/о	0,51	н/о	н/о	100,4
Самородный висмут Native bismuth	Bi	н/о	н/о	95,79	н/о	3,78	н/о	0,43	н/о	100
	Bi	н/о	н/о	99,13	н/о	н/о	0,2	0,67	н/о	100
	Bi	н/о	н/о	99,2	н/о	н/о	н/о	0,8	н/о	100
	Bi	н/о	н/о	98,52	н/о	0,41	0,25	0,81	н/о	99,99
	Bi	н/о	н/о	95,1	н/о	4,2	0,24	0,62	н/о	100,2
	Bi	н/о	н/о	96,69	н/о	3,13	н/о	0,00*	н/о	99,82
Хедлайт/Hedleyite	$Bi_{7,00}Te_{2,75}Se_{0,29}Sb_{0,40}S_{0,51}$	н/о	18,65	77,59	1,24	2,64	0,87	н/о	н/о	101
	$Bi_{7,00}Te_{2,62}Se_{0,22}Sb_{0,40}S_{0,75}$	н/о	17,75	77,78	0,96	2,6	1,28	н/о	н/о	100,4
	$Bi_{7,00}Te_{2,14}Se_{0,18}Sb_{0,46}S_{0,13}$	н/о	15,06	80,58	0,79	3,1	0,23	н/о	н/о	99,76
	$Bi_{1,00}Se_{0,50}Te_{0,03}S_{0,27}$	н/о	1,55	78,56	14,81	н/о	3,32	3,62	н/о	101,9
Селенид висмута Bismuth selenide	$Bi_{1,00}Se_{0,51}Te_{0,03}S_{0,27}$	н/о	1,46	76,01	14,5	н/о	3,65	4,36	н/о	99,98
	$Bi_{2,00}Te_{1,87}S_{1,06}$	н/о	34,27	59,95	н/о	н/о	4,89	н/о	н/о	99,11
Тетрадимит Tetradymite	$Bi_{2,00}Te_{1,77}S_{1,02}$	н/о	33,4	61,98	н/о	н/о	4,89	н/о	н/о	100,3
	$Bi_{2,00}Te_{1,53}S_{1,02}$	н/о	30,46	65,12	н/о	н/о	5,12	н/о	н/о	100,7
	$Ag_{3,00}Sb_{1,13}S_{2,95}$	58,35	н/о	н/о	н/о	25,0	17,11	н/о	н/о	100,42
Пираргирит Pyrargyrite	$Ag_{3,00}Sb_{1,12}S_{3,04}$	58,53	н/о	н/о	н/о	24,7	17,68	н/о	0,29	100,93
Фрейбергит Freibergite	$Ag_6Cu_{4,08}Fe_{1,77}Sb_{4,9}S_{13,45}$	31,84	н/о	н/о	н/о	29,5	21,25	4,89	12,8	н/о
	$Ag_6Cu_{4,17}Fe_{1,87}Sb_{4,88}S_{13,38}$	31,48	н/о	н/о	н/о	29,0	20,91	5,09	12,9	н/о

*н/о – не обнаружено/not detected.

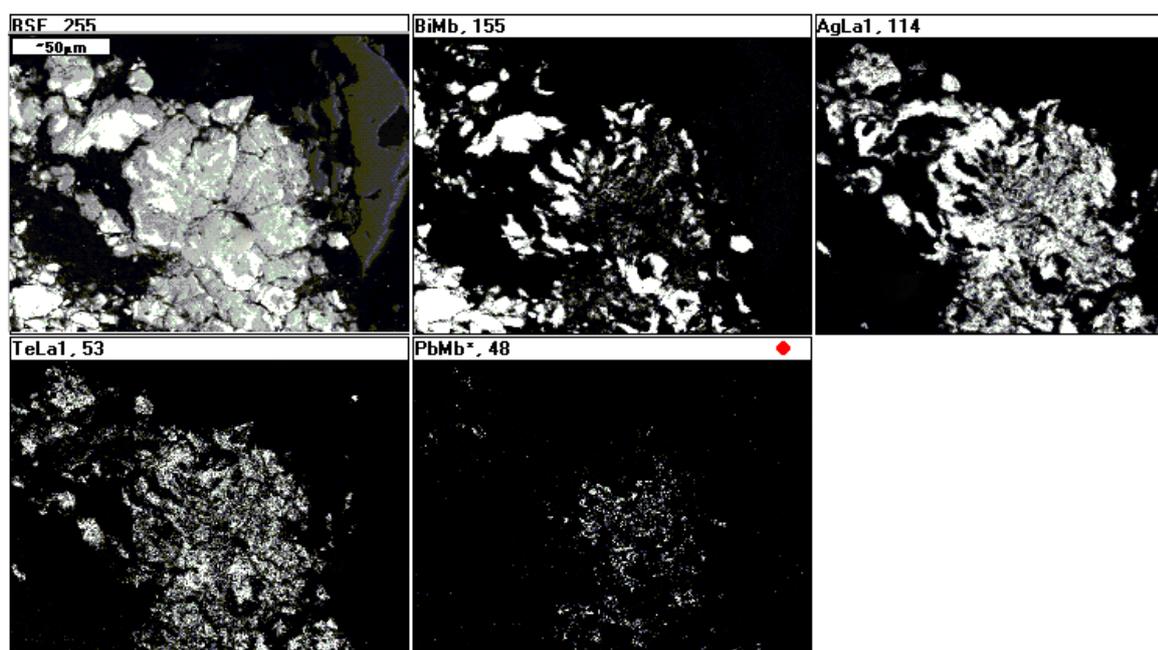


Рис. 7. Растровые картинки распределения элементов. Срастание самородного висмута и гессита с примесью свинца. Фотография в характерных рентгеновских излучениях

Fig. 7. Raster picture of the distribution of elements. Intergrowth of native bismuth and hessite with an admixture of lead. Photography is in characteristic X-rays

Пирит является самым широко распространенным рудным минералом. Отмечается в виде вкраплений, прожилков, скоплений. Встречаются агрегативные сростки пирита с пирротинном, арсенопиритом, халькопиритом, галенитом и др. По трещинам пирита развиваются более поздние минералы, такие как галенит, халькопирит. Установлены вкрапления самородного золота в пирите (рис. 4, 5, 8).

Арсенопирит также относится к распространённым минералам. Установлен в сростках с пиритом, самородным золотом, блеклой рудой, галенитом, самородным висмутом, висмутином (рис. 5, 6, 8).

Пирротин является одним из широко распространенных рудных минералов. Содержание минерала в описанных аншлифах составляет от частых зерен до 5–7 %. Отмечается в виде вкраплений, скоплений, аг-

регативных сростаний с халькопиритом, пиритом, висмутином, самородным висмутом, блеклой рудой и др. Часто заполняет межзерновые пространства не-

рудных минералов вместе с халькопиритом и образует аллотриоморфные агрегаты (рис. 4, 5).

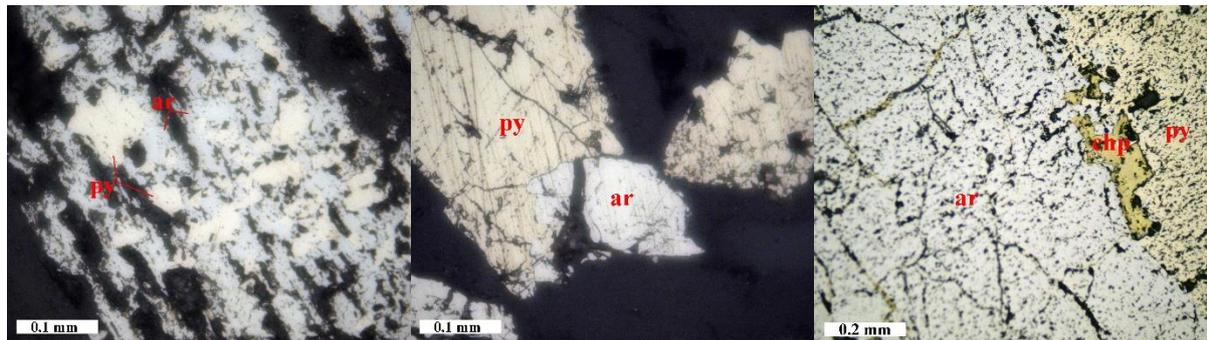


Рис. 8 Сростки пирита (py) с арсенопиритом (ar) и халькопиритом (chp)

Fig. 8. Intergrowths of pyrite (py) with arsenopyrite (ar) and chalcopyrite (chp)

Схема гипогенного минералообразования

Если обобщить результаты всех полученных минералогических данных, то можно заключить, что процесс гипогенного минералообразования на месторождении Яхтон был длительным. Процесс рудообразования начался с образования скарнов в пневматолиито-гидротермальный этап и продолжался в собственно гидротермальный этап.

Последовательность рудообразования была установлена на основе изучения характера сростаний, взаимоотношения минералов, их ассоциаций. По данным В.А. Жарикова [25] температура образования волластонитовой фации скарнов составляет 600–700 °С, пироксен-гранатовая – 600–500 (450) °С, пироксен-эпидотовая – 450 (500)–400 °С. Температурные границы между фациями в большей или меньшей степени зависят от глубинности, приведенные выше цифры отвечают давлению 1,0 кб, или глубине 4–6 км [25]. Следующие гидротермальные процессы происходят при температуре ниже 400–500 °С.

Вольфрамовая минерализация связана со скарнами, изменёнными известняками. Золотая минерализация приурочена к зонам изменений в гранитоидах. Частота встречаемости повышенных содержаний золота и сопутствующих элементов золота в гранитоидных породах значительно выше, чем в известняках.

По выявленным минералам на месторождении Яхтон в гидротермальном этапе установлены следующие стадии минералообразования: силикатно-карбонатная, ранняя окисная, вольфрамовая, ранне-сульфидная, полиметаллическая, золото-серебряная, поздняя окисная, сульфатная, сурьмяная, карбонатно-фторидная и карбонатно-силикатная с соответствующими ПМА (табл. 4).

В силикатно-карбонатную стадию формировалась карбонат-кварц-хлоритовая ПМА, имеющая слабое развитие на месторождении. С ранней окисной стадией связана распространенная магнетит-гематитовая, а со стадией вольфрамовая альбит-шеелитовая ПМА. Альбит-шеелитовая ПМА отмечается в зонах скарни-

рования и окварцевания карбонатных пород, в контактовых позициях с интрузивными породами.

В раннесульфидную стадию образовались кварц-молибденитовая, халькопирит-пирротиновая, пирит-арсенопиритовая и халькопирит-висмутовая ПМА.

Кварц-молибденитовая ПМА встречается на участках окварцевания в виде вкраплений, скоплений молибденита.

Халькопирит-пирротиновая ПМА встречается спорадически, местами имеет широкое проявление.

Пирит-арсенопиритовая с золотом ПМА является самой широко распространенной на месторождении и основной продуктивной на золотое оруденение.

Халькопирит-висмутовая ПМА на месторождении представлена висмутином, самородным висмутом, тетрадимитом, другими минералами висмута и довольно широко распространена.

В полиметаллическую стадию формируются сфалерит-халькопирит-галенитовая и галенит-блеклорудная ПМА. Минералы этих ПМА слабо проявлены и встречаются в виде единичных включений в изученных аншлифах.

Золото-серебряная стадия рудообразования начинается с образования тетрадимит-теллуровисмутитовой ПМА. Типичными минералами этой ПМА являются тетрадимит, жозеит в изученных аншлифах.

Типичными минералами золото-гесситовой ПМА золото-серебряной стадии рудообразования являются селениды и теллуриды золота и серебра. Из минералов этой ПМА в изученных аншлифах установлены гессит, креннерит. Минералы собственно серебряной ПМА представлены самородным серебром, сульфидантимонидами серебра, акантитом, блеклой рудой и достаточно широко проявлены в изученных аншлифах.

Более поздние ПМА не очень широко проявлены на объекте. В единичных зернах из поздних минеральных ассоциаций установлены антимонит, барит, целестин. Завершает процесс минералообразования пострудная кальцит-кварцевая ПМА.

Таблица 4. Сводная схема гипогенного минералообразования рудных месторождений Узбекистана [12]

Table 4. Summary scheme of hypogene mineral formation of ore deposits in Uzbekistan [12]

Этапы Stages	Стадии Phases	ПМА PMA	Типоморфные минералы Typomorphic minerals	Распространенность Commonness	
Гидротермальный Hydrothermal	Карбонатно-силикатная Carbonate-silicate	Карбонат-кварцевая Carbonate-quartz	Кварц, кальцит Quartz, calcite	+	
	Карбонатно-фторидная Carbonate-fluoride	Кварц-кальцит-барит-флюоритовая Quartz-calcite-barite-fluorite	Кальцит, кварц, барит , флюорит, целестин Calcite, quartz, barite , fluorite, celestite	+	
	Сурьмяная/Antimony	Кварц-антимонитовая Quartz-antimonite	Кварц, антимонит , сурьма, кальцит, киноварь Quartz, antimonite , antimony, calcite, cinnabar	+	
	Сульфатная/Sulfate	Кварц-барит-галенитовая Quartz-barite-galena	Галенит, барит , целестин , халькопирит, кварц, кальцит Galena, barite, celestite , chalcopyrite, quartz, calcite	+	
	Поздняя окисная Late oxide	Кварц-гематитовая Quartz-hematite	Кварц, гематит, кальцит, хлорит Quartz, hematite, calcite, chlorite	+	
	Золото-серебряная Gold-silver	Собственно серебряная Own silver		Серебро самородное, пираргирит , кераргирит, полибазит, аргентит , манган-кальцит, халькопирит, блеклая руда Native silver, pyrargyrite, kerargyrite, polybasite, argentite, manganese-calcite, chalcopyrite, fahlore	+++
		Золото-серебряная Gold-silver		Золото, борнит , халькозин, кюстелит халькопирит, кварц, кальцит, электрум Gold, bornite, chalcocite, kustelite, chalcopyrite, quartz, calcite, electrum	++
		Золото-гесситовая Gold-hessite		Золото, гессит , калаверит, алтаит, сиванит, петцит, креннерит Gold, hessite, calaverite, altaite, sylvanite, petzite, krennerite	++
		Тетрадимит-теллуровисмутитовая Tetradymite-tellurobismuthite		Тетрадимит, теллуровисмутит , халькопирит, жозент , бурнонит, джемсонит Tetradymite, tellurobismuthite, chalcopyrite, joseite, bournonite, jamsonite	++
	Полиметаллическая Polymetallic	Галенит-блеклорудная Galena-fahlore		Галенит, блеклая руда, сфалерит , кварц, кальцит Galena, fahlore, sphalerite, quartz, calcite	+
		Сфалерит-халькопирит-галенитовая Sphalerite-chalcopyrite-galena		Сфалерит, халькопирит, галенит , кальцит, хлорит Sphalerite, chalcopyrite, galena, calcite, chlorite	+
	Ранне-сульфидная Early sulfide	Халькопирит-висмутовая Chalcopyrite-bismuth		Халькопирит, висмутин , клапротит, виттихенит , борнит, самородный висмут , гладит, эмплектит, бенжаминит Chalcopyrite, bismuthine, claproite, wittichenite, bornite, native bismuth, ironite, emplectite, benjaminite	++
		Пирит-арсенопиритовая с золотом Pyrite-arsenopyrite with gold		Кварц, пирит, арсенопирит, золото , кобальтин, энаргит, леллингит, сафлорит, кубанит Quartz, pyrite, arsenopyrite, gold , cobaltite, enargite, lellingite, safflorite, cubanite	+++
		Халькопирит-пирротитовая Chalcopyrite-pyrrotite		Пирротин, халькопирит , марказит Pyrrotite, chalcopyrite, marcasite	+++
		Кварц-молибденитовая Quartz-molybdenite		Кварц, молибденит , пирит, шеелит, халькопирит Quartz, molybdenite, pyrite, scheelite, chalcopyrite	+++
	Вольфрамов Tungstate	Альбит-шеелитовая Albite-scheelite		Кварц, альбит, шеелит , вольфрамит, серицит, кальцит Quartz, albite, scheelite, wolframite, sericite, calcite	+++
Ранняя окисная Early oxide	Магнетит-гематитовая Magnetite-hematite		Гематит, магнетит, пирит , эпидот, серпентин Hematite, magnetite, pyrite, epidote, serpentine	++	
Силикатно-карбонатная Silicate-carbonate	Карбонат-кварц-хлоритовая Carbonate-quartz-chlorite		Кварц, хлорит , гематит, пирит Quartz, chlorite, hematite, pyrite	+	
Пневмато-гидротермальный Pneumatic-hydrothermal	Водных силикатов Hydrous silicates	Кварц-серицитовая Quartz-sericite	Кварц, мусковит, серицит, касситерит, олово самородное Quartz, muscovite, sericite, cassiterite, native tin	+	
		Кварц-турмалиновая Quartz-tourmaline	Кварц, турмалин Quartz, tourmaline	+	
		Эпидот-амфиболовая Epidote-amphibole	Эпидот, актинолит, тремолит, ортоклаз Epidote, actinolite, tremolite, orthoclase	++	
	Безводных силикатов Anhydrous silicates	Волластонит-родонитовая Wollastonite-rhodonite	Бустамит, родонит, волластонит Bustamite, rhodonite, wollastonite	+	
Гранат-пироксеновая Garnet-pyroxene		Пироксен, гранат, магнетит Pyroxene, garnet, magnetite	+++		

Примечание: жирным выделены установленные типичные минералы каждой ПМА на месторождении Яхтон; «+» – слабое проявление; «++» – среднее проявление; «+++» – широкое проявление на месторождении Яхтон.
Note: typical minerals of each PMA at the Yakhton deposit are in bold; «+» – weak occurrence; «++» – medium occurrence; «+++» – wide occurrence at the Yakhton deposit.

Заклучение

Руда и рудовмещающие породы месторождения Яхтон алюмосиликатного (гранитоиды) и карбонатного (скарны, известняки) состава. Руды месторождения Яхтон комплексные. Золото и вольфрам являются основными ценными компонентами руд. Для метасоматически измененных гранитоидов характерны повышенные содержания золота. В скарнированных породах отмечаются высокие содержания вольфрама. Из попутных компонентов в составе руд представляют интерес серебро, теллур, селен, висмут, молибден, медь

Содержание золота в рудах – до 4,45 г/т, оксида вольфрама – до 0,33 %. Элементы с повышенными содержаниями подразделены на три группы: 1) умеренно концентрирующиеся – в 1,6–5 раз (в последовательности увеличения кларков концентрации): In<Mn<Ba<Co; 2) сильно концентрирующиеся – в 5–40 раз: Cd<Sn<Pb; 3) аномально концентрирующиеся – в 40–16500 раз: Sb<W<Re<Au<Cu<As<Ag<Se<Mo<Te<Bi.

Установленные сильные корреляционные связи золота с мышьяком указывают на их генетическую связь в виде пирит-арсенопиритовой с золотом ПМА. Также отмечаются положительные связи между содержаниями золота и вольфрама, серебра, сурьмы, висмута, которые обусловлены генетическими особенностями и стадийностью минералообразования, т. е. явлением телескопирования различных ПМА. Сильная связь серебра с сурьмой доказывается наличием собственно серебряной ПМА с сульфосолями серебра.

Установленные сильные положительные связи вольфрама с магнием, кальцием и марганцем обусловлены процессом скарнообразования и наложением шеелита. В результате минералого-геохимических исследований установлены два горизонта рудообразования. Первый ярус оруденения – в интервале 100–400 м и второй – в интервале 600–700 м и, возможно, глубже. Повышенные содержания сурьмы, серебра, свинца, мышьяка, цинка, висмута, золота в интервале 100–400 м указывают, что в этом интервале проявлены минералы раннесульфидной, полиметаллической и золото-серебряной стадий.

На глубоких горизонтах широко проявлены пирит-арсенопиритовая с золотом ПМА, которая также

отмечается повышением содержания мышьяка. Также с глубиной увеличиваются содержания вольфрама, олова, связанные с ранними стадиями минералообразования (ранней окисной и вольфраматов).

Если сравнить выявленные минералы и минералы в обобщенной схеме гипогенного минералообразования рудных месторождений Узбекистана, то можно заключить, что процессе минералообразования на месторождении был длительным. Многообразие минерального состава связано с распространенным явлением телескопирования. Комплексность руд месторождения подтвердилась результатами аналитических исследований, которые приведены в таблицах.

Процесс рудообразования начался с образования скарнов в пневмато-гидротермальный этап и собственно оруденения в гидротермальный этап.

Вольфрамовая минерализация формировалась по раннее образованным скарнам и скарноидам, а также по измененными известнякам. Золотая минерализация приурочена к зонам метасоматических изменений в гранитоидах. Частота встречаемости повышенных содержаниями золота и сопутствующих элементов золота в гранитоидах значительно выше, чем в известняках.

Пирит-арсенопиритовая с золотом ПМА является самой широко распространенной в изученных пробах и основной продуктивной на золотое оруденение. Золото-серебряная стадия гипогенного минералообразования представлена минералами тетрадимит-теллуrowисмутитовой, золото-гесситовой, золото-серебряной, собственно серебряной ПМА.

Более поздние ПМА не очень широко проявлены на месторождении. Завершает процесс минералообразования пострудная кальцит-кварцевая ПМА.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что распределение элементов по вертикали отражает стадийность гипогенного минералообразования. Телескопирование нескольких ПМА обусловило образование комплексных руд и крупного по масштабу месторождения Яхтон. Кроме золота, вольфрама, серебра, в руде месторождения Яхтон имеют практический интерес следующие элементы: медь, висмут, селен, теллур, молибден и др. Установленные повышенные содержания ряда попутных компонентов повышают ценность руды и в целом объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Minerals Commodity Summaries, U.S. Geological Survey. – Reston, Virginia, 2022. – P. 202. URL: <https://doi.org/10.3133/mcs2022> (дата обращения 15.01.2023).
2. Геодинамика северной окраины Туркестанского палеоокеанического бассейна и некоторые особенности формирования золоторудных месторождений Узбекистана / Т.Н. Далимов, Р.И. Конеев, И.Н. Ганиев, Х.Д. Ишбаев // Тезисы докладов международного совещания. – М., 2002. – С. 142–144.
3. Gold and base metal metallogeny of the Central Asian orogenic supercollage: Society of Economic Geology / A.S. Yakubchuk, V.V. Shatov, D. Kirwin, A. Edwards, O. Tomurtogoo, G. Bardach, V.A. Buryak // Inc. Economic Geology. – 2005. – 100th Anniversary Volume. – P. 1035–1068.
4. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia / R.J. Goldfarb, R.D. Taylor, G.S. Collins, N.A. Goryachev, O.F. Orlandini // Gondwana Res. – 2014. – V. 25. – P. 48–102.
5. Goldfarb R.J., Конеев Р.И., Холматов Р.А., Кривошеева А.Н. Нахождения и микро-наноансамбли золота – индикаторы условий образования, размещения и типизации орогенных месторождений Узбекистана (Южный Тянь-Шань) // Записки Российского минералогического обществ. – 2019. – № 4. – С. 30–45. URL: <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1484.02> (дата обращения 15.01.2023).
6. Цой В.Д., Королева И.В., Алимов Ш.П. Природные типы руд золоторудных месторождений Узбекистана. – Ташкент, Изд-во ГПИ «НИИМП», 2015. – 156 с.
7. Age and source constraints for the giant Muruntau gold deposits, Uzbekistan, from coupled Re-Os-He isotopes in arsenopyrite / R. Morelli, R. Creaser, R. Seltmann, F. Stuart, D. Selby, T. Graupner // Geological Society of America. Geology. – 2007. – V. 35. – № 9. – P. 795–798.
8. Костицын Ю.А. Rb-Sr система пород и минералов месторождения Мурунтау: автореф. дис. ... канд. наук. – М., 1991. – 23 с.

9. Koneev R.I., Seltmann R. South Tien Shan orogenic belt: structure, magmatism and gold mineralization (Uzbekistan) // Geophysical Research Abstracts. – 2014. – V. 16. – EGU2014-7384-1.
10. Конеев Р.И., Халматов Р.А., Мун Ю.С. Золоторудные месторождения Узбекистана: минералого-геохимический стиль, закономерности размещения и формирования // Геология и минеральные ресурсы. – 2009. – № 4. – С. 11–24.
11. Хамрабаев И.Х. Петролого-геохимические критерии рудоносности магматических комплексов (на примере Узбекистана). – Ташкент: Фан, 1969. – 471 с.
12. Цой В.Д., Королева И.В., Сайитов С.С., Булин С.Е. Стадийность гипогенного минералообразования рудных месторождений Узбекистана и её значение при оценке перспективности разведываемых объектов // Геология и минеральные ресурсы. – 2021. – № 1. – С. 15–18.
13. Gold ore deposits of Uzbekistan: geochemistry, nanomineralogy of tellurium and selenium / R.I. Koneev, Ye. Ignatkov, A.N. Turesebekov, U. Aripov, R. Khalmatov, O. Kodirov, M. Usmanov // Geochemistry, mineralogy and petrology. – 2005. – IGCP-486. – P. 102–107. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228374229> (дата обращения 15.01.2023).
14. New data on the absolute age of magmatism and gold mineralization in Uzbekistan / R. Seltmann, R.I. Koneev, F.K. Divaev, R.A. Khalmatov // Geology and Mineral Resources. – 2014. – № 2. – P. 10–15.
15. Рудные месторождения Узбекистана / отв. ред. Н.А. Ахмедов. – Ташкент, Изд-во «ИМР», 2001. – 661 с.
16. Ушаков В.Н., Кренделев Ф.П., Воронич В.А. Оценка золоторудных и шеелитовых месторождений. – Новосибирск, Изд-во «Наука», 1976. – 110 с.
17. Rozikov O.T. Genetic types of rare mineral gold of Western Uzbekistan (Southern Tien-Shan) // The American Journal of Applied Sciences. – 2020. – P. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.37547/tajas/Volume02Issue12-10>.
18. Ярбобоев Т.Н., Султанов Ш.А., Очилов И.С. Основные дайковые серии северной части Чакылкалянского мегаблока и их потенциальная рудоносность (на примере Яхтонского дайкового роя, Южный Узбекистан) // Бюллетень науки и практики. – 2020. – Т. 6. – № 11. – С. 104–116. URL: <https://doi.org/10.33619/2414-2948/60/10> (дата обращения 15.01.2023).
19. Исмаилов М. Среда и скарновое минералообразование (на примере скарново-шеелитовых и волластонитовых месторождений Западного Узбекистана: авт. дис. д-ра наук. – Ташкент, 1995. – 55 с.
20. Jurayev M.N., Jumagulov A.B., Muhammadiyev B.U. Localization conditions and basic geochemical characteristics of apogranitoid tungsten mining in the lower tier of the Yachton deposit // Science and innovation international scientific journal. – 2023. – V. 2. – Iss. 1 January. – P. 192–201.
21. Жураев М.Н., Тураев Т.Н., Мухаммадиев Б.У. Геохимические особенности апогранитоидного вольфрамового оруденения (на примере нижнего яруса месторождения Яхтон) // Отечественная геология. – 2018. – № 6/2018. – С. 43–50. DOI: 10.24411/0869-7175-2018-100026.
22. Тураев Т.Н., Акбаров Х.А., Жураев М.Н. О роли магматических образований Яхтонского рудного поля в формировании вольфрамового оруденения (Чакылкаляньские горы) // Горный вестник Узбекистана. – 2019. – № 3. – С. 35–41.
23. Вещественный состав руд участка Северо-Западный Кызылалмасайского рудного поля / С.С. Сайитов, В.Д. Цой, О.А. Халиков, Р.Д. Печерский, С.Е. Булин, Ш.М. Расулов // Геология и минеральные ресурсы. – 2022. – № 3. – С. 27–32.
24. Петровская Н.В. Самородное золото. – М.: Изд-во «Наука», 1973. – 347 с.
25. Жариков В.А., Омеляненко Б.И. Некоторые проблемы изучения изменений вмещающих пород в связи с металлогеническими исследованиями // Изучение закономерностей размещения минерализации при металлогенических исследованиях. – М.: Изд-во «Недра», 1965. – С. 119–194.

Поступила: 31.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 13.03.2023 г.

Информация об авторах

Сайитов С.С., PhD, начальник отдела Минералогических исследований ГУ «Институт минеральных ресурсов».

Цой В.Д., доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник ГУ «Институт минеральных ресурсов».

UDC (549+550.4):553.463(575.14)

MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES AND PROSPECTS FOR COMPLEX MINERALIZATION OF THE YAKHTON DEPOSIT (MOUNTAINS CHAKYL-KALYAN, UZBEKISTAN)

Sardor S. Sayitov¹,
sardorsayitov@gmail.com

Vladimir D. Tsoi¹,
vtsoi@inbox.ru

¹ Institute of Mineral Resources,
64, Olimlar street, Tashkent, 100164, Uzbekistan.

The relevance. The results of mineralogical and geochemical studies increase the efficiency of exploration work, since reliable knowledge about the distribution of useful components and their finding forms in various types of ores, character of distribution, their intergrowth, sequence of hypogene mineral formation are necessary for predicting the ore potential of objects and determining the directions of geological exploration. In addition, the data of mineralogical and geochemical studies are used in the development of a rational scheme for the enrichment of ores and ensure the complex processing and use of mineral resources.

The main aim of the research is to study the material composition and mineralogical and geochemical features of ores and ore-bearing rocks.

Object of the research is Yakhton deposit, located in the Chakyl-Kalyan mountains of Uzbekistan, which is known as a skarn tungsten object with associated gold. The results of recent exploration work have shown high prospects of the object for gold mineralization. Industrial grades of gold with a complex of associated components were established in the zones of metasomatic alteration of granitoids.

Methods. Chemical composition of ores was studied by silicate, spectral semi-quantitative, ICP-mass spectrometric, atomic absorption, chemical research methods. Mineral composition of ores was established by complex analyzes: optical microscopy in transmitted and reflected light, mineralogical analysis of heavy fractions, X-ray spectral local analysis under a microprobe.

Results. Ore and ore-bearing rocks of Yakhton deposit are aluminosilicate (granitoid) and carbonate (skarns, limestones) composition. The ores of the Yakhton deposit are complex. The content of gold in the composition of ores is up to 4,45 g/t, tungsten oxide is up to 0,33 %. In the sequence of increasing concentration clarks in the composition of ores, the following series of elements with clarke concentrations of 40–16500 times was established: Sb<W<Re<Au<Cu<As<Ag<Se<Mo<Te<Bi. The mineral form of gold is native gold, electrum. The pyrite-arsenopyrite paragenetic mineral association is the main productive one for gold mineralization. The manifestation of the gold-silver stage and the telescoping of several paragenetic mineral association are due to the formation of complex ores.

Key words:

ore, chemical, mineral composition, granitoids, native gold, pyrite, impurity elements, Yakhton deposit, Chakyl-Kalyan mountains, Uzbekistan.

REFERENCES

1. *Minerals Commodity Summaries, U.S. Geological Survey*. Reston, Virginia, 2022. 202 p. Available at: <https://doi.org/10.3133/mcs2022> (accessed 15 January 2023).
2. Dalimov T.N., Koneev R.I., Ganiev I.N., Ishbaev Kh.D. Geodinamika severnoy okrainy Turkestanskogo paleoceanicheskogo basseyna i nekotorye osobennosti formirovaniya zolotorudnykh mestorozhdeniy Uzbekistana [Geodynamics of the northern margin of the Turkestan paleoceanic basin and some features of the formation of gold deposits in Uzbekistan]. *Tezisy dokladov mezhdunarodnogo soveshchaniya* [Abstracts of the international conference]. Moscow, 2002. pp. 142–144.
3. Yakubchuk A.S., Shatov V.V., Kirwin D., Edwards A., O. Tomurtogoo, Bardach G., Buryak V.A. Gold and base metal metallogeny of the central asian orogenic supercollage: society of economic geology. *Inc. Economic Geology*, 2005, 100th Anniversary vol., pp. 1035–1068.
4. Goldfarb R.J., Taylor R.D., Collins G.S., Goryachev N.A., Orlandini O.F. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia. *Gondwana Res.*, 2014, vol. 25, pp. 48–102.
5. Koneev R.I., Kholmatov R.A., Krivosheeva A.N. Findings and micro-nanoensembles of gold – indicators of the conditions for the formation, placement and typification of orogenic deposits in Uzbekistan (Southern Tien Shan). *Notes of the Russian Mineralogical Society*, 2019, no. 4, pp. 30–45. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1484.02> (accessed 15 January 2023).
6. Tsoi V.D., Koroleva I.V., Alimov Sh.P. *Prirodnye tipy rud zolotorudnykh mestorozhdeniy Uzbekistana* [Natural types of ores of gold deposits in Uzbekistan]. Tashkent, NIIMR Publ., 2015. 156 p.
7. Morelli R., Creaser R., Seltmann R., Stuart F., Selby D., Graupner T. Age and source constraints for the giant Muruntau gold deposits, Uzbekistan, from coupled Re-Os-He isotopes in arsenopyrite. *Geological Society of America, Geology*, 2007, vol. 35, no. 9, pp. 795–798.
8. Kostitsyn Yu.A. *Rb-Sr sistema porod i mineralov mestorozhdeniya Muruntau*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Rb-Sr system of rocks and minerals of the Muruntau deposit. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 1991. 23 p.
9. Koneev R.I., Seltmann R. South Tien Shan orogenic belt: structure, magmatism and gold mineralization (Uzbekistan). *Geophysical Research Abstracts*, 2014, vol. 16. EGU2014-7384-1.
10. Koneev R.I., Khalmatov R.A., Moon Yu.S. Gold deposits of Uzbekistan: mineralogical and geochemical style, regularities of location and formation. *Geology and mineral resources*, 2009, no. 4, pp. 11–24. In Rus.
11. Khamrabaev I.Kh. *Petrologo-geokhimicheskie kriterii rudonosnosti magmaticheskikh kompleksov (na primere Uzbekistana)* [Petrological and geochemical criteria for the ore content of igneous complexes (on the example of Uzbekistan)]. Tashkent, Fan Publ., 1969. 471 p.
12. Tsoi V.D., Koroleva I.V., Saitov S.S., Bulin S.E. Stages of hypogene mineral formation of ore deposits in Uzbekistan and its significance in assessing the prospects of explored objects. *Geology and Mineral Resources*, 2021, no. 1, pp. 15–18. In Rus.
13. Koneev R.I., Iqnatikov Ye., Turesbekov A.H., Aripov U., Khalmatov R., Kodirov O., Usmanov M. Gold ore deposits of Uzbekistan: geochemistry, nanomineralogy of tellurium and selenium. *Geochemistry, mineralogy and petrology*, 2005, IGCP-486, pp. 102–107. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/228374229> (accessed 15 January 2023).

14. Seltmann R., Koneev R.I., Divaev F.K., Khalmatov R.A. New data on the absolute age of magmatism and gold mineralization in Uzbekistan. *Geology and Mineral Resources*, 2014, no. 2, pp. 10–15.
15. *Rudnye mestorozhdeniya Uzbekistana* [Ore deposits of Uzbekistan]. Ed. by N.A. Akhmedov. Tashkent, IMR Publ., 2001. 661 p.
16. Ushakov V.N., Krendelev F.P., Voronich V.A. *Otsenka zolotorudnykh i sheelitovykh mestorozhdeniy* [Evaluation of gold and scheelite deposits]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1976. 110 p.
17. Rozikov O.T. Genetic types of rare mineral gold of Western Uzbekistan (Southern Tien-Shan). *The American Journal of Applied Sciences*, 2020, pp. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.37547/tajas/Volume02Issue12-10>.
18. Yarbobeov T.N., Sultanov Sh.A., Ochilov I.S. Main dike series of the northern part of the Chakylkalyan megablock and their potential ore content (on the example of the Yakhton dike swarm, Southern Uzbekistan). *Bulletin of Science and Practice*, 2020, vol. 6, no. 11, pp. 104–116. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.33619/2414-2948/60/10> (accessed 15 January 2023).
19. Ismailov M. *Sreda i skarnovoe mineraloobrazovanie (na primere skarnovo-sheelitovykh i wollastonitovykh mestorozhdeniy Zapadnogo Uzbekistana)*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk. [Environment and skarn mineral formation (on the example of skarn-scheelite and wollastonite deposits of Western Uzbekistan). Dr. Diss. Abstract]. Tashkent, 1995. 55 p.
20. Jurayev M.N., Jumagulov A.B., Muhammadiyev B.U. Localization conditions and basic geochemical characteristics of apogranitoid tungsten mining in the lower tier of the Yakhton deposit. *Science and innovation international scientific journal*, 2023, vol. 2, Iss. 1 January, pp. 192–201. In Rus.
21. Juraev M.N., Turaev T.N., Muhammadiev B.U. Geochemical features of apogranitoid tungsten mineralization (on the example of the lower stage of the Yakhton deposit). *Otechestvennaya geologiya*, 2018, no. 6/2018, pp. 43–50. In Rus. DOI: 10.24411/0869-7175-2018-100026.
22. Turaev T.N., Akbarov Kh.A., Zhuraev M.N. On the role of igneous formations of the Yakhton ore field in the formation of tungsten mineralization (Chakylkalyan mountains). *Mining Bulletin of Uzbekistan*, 2019, no. 3, pp. 35–41. In Rus.
23. Sayitov S.S., Tsoi V.D., Khalikov O.A., Pechersky R.D., Bulin S.E., Rasulov Sh.M. Material composition of ores in the Severo-Zapadny area of the Kyzylalmasai ore field. *Geology and Mineral Resources*, 2022, no. 3, pp. 27–32. In Rus.
24. Petrovskaya N.V. *Samorodnoe zoloto* [Native gold]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 347 p.
25. Zharikov V.A., Omelyanenko B.I. Nekotorye problemy izucheniya izmeneniy vmeshchayushikh porod v svyazi s metallogenicheskimi issledovaniyami [Some problems of studying alterations in host rocks in connection with metallogenetic studies]. *Izucheniye zakonomernostey razmeshcheniya mineralizatsii pri metallogenicheskikh issledovaniyakh* [The study of patterns of distribution of mineralization in metallogenetic studies]. Moscow, Nedra Publ., 1965. pp. 119–194.

Received: 31 January 2023.

Reviewed: 13 March 2023.

Information about the authors

Sardor S. Sayitov, PhD, head of the Department, Institute of Mineral Resources.

Vladimir D. Tsoi, Dr. Sc., professor, chief researcher, Institute of Mineral Resources.