



МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ,
ОЦЕНКИ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.411:550.8 (575.21)

Месторождение золота Кумтор (Срединный Тянь-Шань, Кыргызстан) и применение трёхмерного моделирования в программе Leapfrog Geo (Seequent) при проведении геологоразведочных работ

Шевкунов А. Г., Корницкий А. И., Башкиров А. П., Айдаркулов Т. Н.

Кумтор Голд Компани, г. Бишкек, Кыргызская Республика

Аннотация. Месторождение Кумтор является одним из крупных золоторудных объектов Тянь-Шаня. Рудные зоны локализованы в породах черносланцевой формации, в амагматичной пологозалегающей структуре. Отличительными особенностями месторождения в ряду золоторудных объектов, локализованных в черносланцевых толщах, являются преобладание руд пирит-(полевошпат)-карбонатного состава и практически полное отсутствие в рудах мышьяка. Кумтор – типичный представитель месторождений орогенного типа.

Использование трёхмерного моделирования геологической структуры месторождения в программе Leapfrog Geo позволяет оперативно корректировать модель при получении новых данных бурения и эксплуатационной разведки, оптимизировать проведение геологоразведочных работ и прогнозировать новые участки для проведения поискового бурения.

Ключевые слова: золото, чёрные сланцы, Кумтор, Срединный Тянь-Шань, 3D-моделирование, Leapfrog Geo.

Для цитирования: Шевкунов А. Г., Корницкий А. И., Башкиров А. П., Айдаркулов Т. Н. Месторождение золота Кумтор (Срединный Тянь-Шань, Кыргызстан) и применение трёхмерного моделирования в программе Leapfrog Geo (Seequent) при проведении геологоразведочных работ. Руды и металлы. 2023. № 2. С. 18–43. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10007.

The Kumtor gold deposit in the Middle Tien Shan, Kyrgyzstan, and the application of 3-D modeling in Seequent's Leapfrog Geo software for the geological exploration

Shevkunov A. G., Kornitsky A. I., Bashkirov A. P., Aidarkulov T. N.

Kumtor Gold Company, Bishkek, Kyrgyz Republic

Annotation. The Kumtor deposit is one of the largest gold deposits in the Tien Shan. The ore zones are localized in rocks of the black shale formation, in an amagmatic gently dipping structure. Distinctive features of the ore deposit in a line of gold objects localized in black shales are the predominance of ores of pyrite-(feldspar)-carbonate composition and the almost complete absence of arsenic in the ores. Kumtor is a typical representative of orogenic type deposits.

The use of 3D modeling of the geological structure of the ore deposit with the Leapfrog Geo software allows one to quickly correct the model when new drilling and operational exploration data are received, to optimize the exploration work, and to forecast new sites for the exploratory drilling.

Keywords: gold, black shale, Kumtor, Middle Tien Shan, 3D modeling, Leapfrog Geo.

For citation: Shevkunov A. G., Kornitsky A. I., Bashkirov A. P., Aidarkulov T. N. The Kumtor gold deposit in the Middle Tien Shan, Kyrgyzstan, and the application of 3-D modeling in Seequent's Leapfrog Geo software for the geological exploration. Ores and metals, 2023, № 2, pp. 18–43. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10007.



Региональная геологическая позиция месторождения. Месторождение Кумтор является одним из крупных золоторудных объектов Тянь-Шаня и находится на территории Кыргызской республики (рис. 1). В региональном плане оно расположено в западной части Сарыджазской тектонической подзоны Акшийрякской геантиклинальной зоны [6] Срединного Тянь-Шаня. Последний с геодинамической точки зрения является сутурой Кыргызско-Казахского континента [38]. В результате многочисленных тектонических событий земная кора территории Срединного Тянь-Шаня испытала интенсивные деформации и сокращения, особенно вдоль выступа к северу Таримской платформы, между 77 и 90° восточной долготы. На схеме тектонического строения (см. рис. 1) хорошо видно, что ширина Срединного Тянь-Шаня на этом участке сократилась относительно всей остальной его западной части более чем в 3,5 раза. Здесь же наблюдается выступ Кыргызско-Казахского континента к югу.

При неоднократных сближениях жёстких массивов должно было происходить сжатие земной коры между ними с образованием пакета надвиговых чешуй и зон сдвигов. Именно поэтому в настоящее время Срединный Тянь-Шань имеет сложную тектоническую структуру, представленную набором многочисленных надвиговых пластин, перекрывающих одна другую и смятых в складки. Основные деформации, которые вызвали образование пакетов надвиговых чешуй, происходили при направлении вектора тангенциального напряжения с юго-юго-востока [38]. Позднекаменноугольно-пермская коллизия дополнительно вызвала формирование системы региональных зон сдвигов [2]. На Восточном Тянь-Шане это система правосторонних сдвигов северо-западной и левосторонних сдвигов субмеридиональной ориентировки. Вышеупомянутые сдвиговые деформации развернули на отдельных интервалах субширотную структуру Тянь-Шаня против часовой стрелки (к северо-востоку). В одном из таких развёрнутых блоков и расположено месторождение Кумтор.

Геология месторождения Кумтор. Месторождение расположено в пределах Срединно-

го Тянь-Шаня, на северо-западном склоне хребта Акшийряк, в 5–7 км южнее линии Николаева (рис. 2). Локализовано месторождение в амагматичной, пологозалегающей (25–55°) тектонической структуре среди толщи филлитов – Кумторской зоне смятия [3, 5, 9, 12]. В процессе проведения геологоразведочных работ (1981–1990 гг.) месторождение изучалось специалистами многих ведущих научно-исследовательских и отраслевых институтов СССР (ЦНИГРИ, ИМГРЭ, ИЛСАН, ФПИ и др.).

Основной структурой Кумторского месторождения является чешуйчато-надвиговой пакет различных структурно-формационных единиц, формировавшийся с допалеозоя до настоящего времени. Такие взгляды на строение территории хребта Акшийряк впервые были высказаны после проведения геолого-съёмочных и геологоразведочных работ [3, 12]. В сводной тектоно-стратиграфической колонке [37] самые древние породы, представленные гнейсами и мраморами архея (?) – нижнего протерозоя, находятся в самом верху разреза. Они по надвигу граничат с метаморфизованными отложениями и интрузивными породами верхнего рифея. Верхнерифейские отложения перекрывают по надвигу венд-нижнепалеозойские осадочно-метаморфические отложения. Последние являются рудовмещающими на месторождении и надвинуты, в свою очередь, на нижнекаменноугольные породы.

Вмещающие золотое оруденение породы месторождения Кумтор представляют собой толщу серых филлитов хлорит-(полевошпат)-кварц-серицитового состава с пачками углестых пород, карбонатно-филлитовых ритмитов и конгломерато-сланцев (диамиктитов). Они принадлежат к джетымтауской серии Срединного Тянь-Шаня, весь объём которой официально отнесён к венду на основании региональных стратиграфических корреляций [17]. Породы джетымтауской серии венда перекрываются черносланцевым горизонтом кембрия-ордовика, который регионально прослеживается вдоль всего Срединного Тянь-Шаня.

Содержание углерода органического происхождения в большинстве (83 %) вышеописанных типов пород определено [3] на уровне

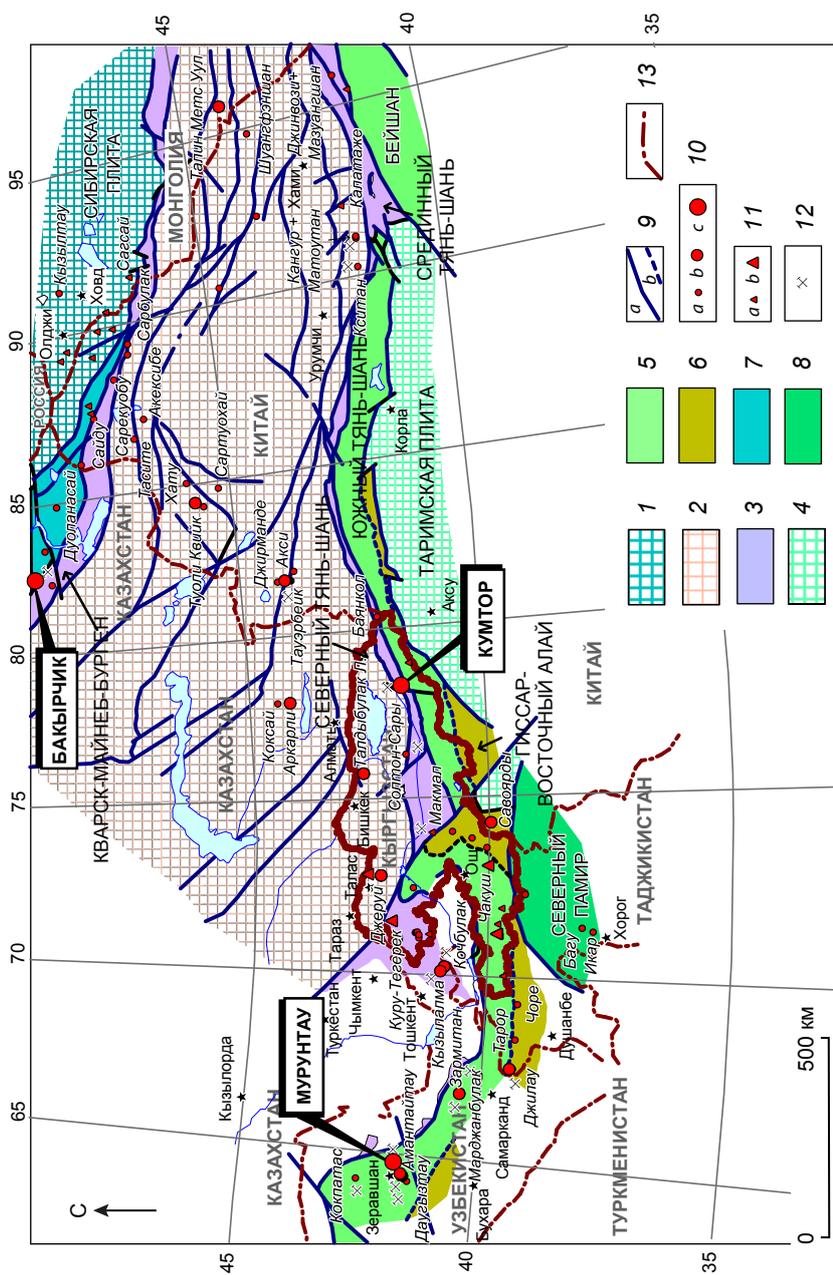


Рис. 1. Схема тектонического строения Центральной Азии с местоположением главных месторождений золота (модифицированная на основе тектонической карты [36]):

1 – Сибирская плита; 2 – Кыргыз-Казахский континент; 3 – сутурные зоны; 4 – Таримская плита; коллизионные пояса PZ₃; 5 – Алай-Кокшаал, Бейшан, 6 – Гиссар-Восточный Алтай, 7 – Южный Алтай; 8 – коллизионный пояс MZ-CZ (Северный Памир); 9 – разломы (α – выявленные, b – предполагаемые); месторождения золота: 10 – мезотермальные (α – средние, b – крупные, c – уникальные), 11 – другие типы (α – средние, b – крупные); 12 – действующие рудники; 13 – государственные границы

Fig. 1. Schematic tectonic map of Central Asia showing location of the main gold deposits (modified after the tectonic map [36]):

1 – Siberian plate; 2 – Kyrgyz-Kazakh continent; 3 – suture zones; 4 – Tarim plate; collision belts PZ₃; 5 – Alai-Kokshaal, Beishan, 6 – Gissar-Eastern Altai, 7 – Southern Altai; 8 – MZ-KZ collision belt (Northern Pamir); 9 – faults (α – identified, b – assumed); gold deposits: 10 – mesothermal (α – medium, b – large, c – unique), 11 – other types (α – medium, b – large); 12 – active mines; 13 – state borders

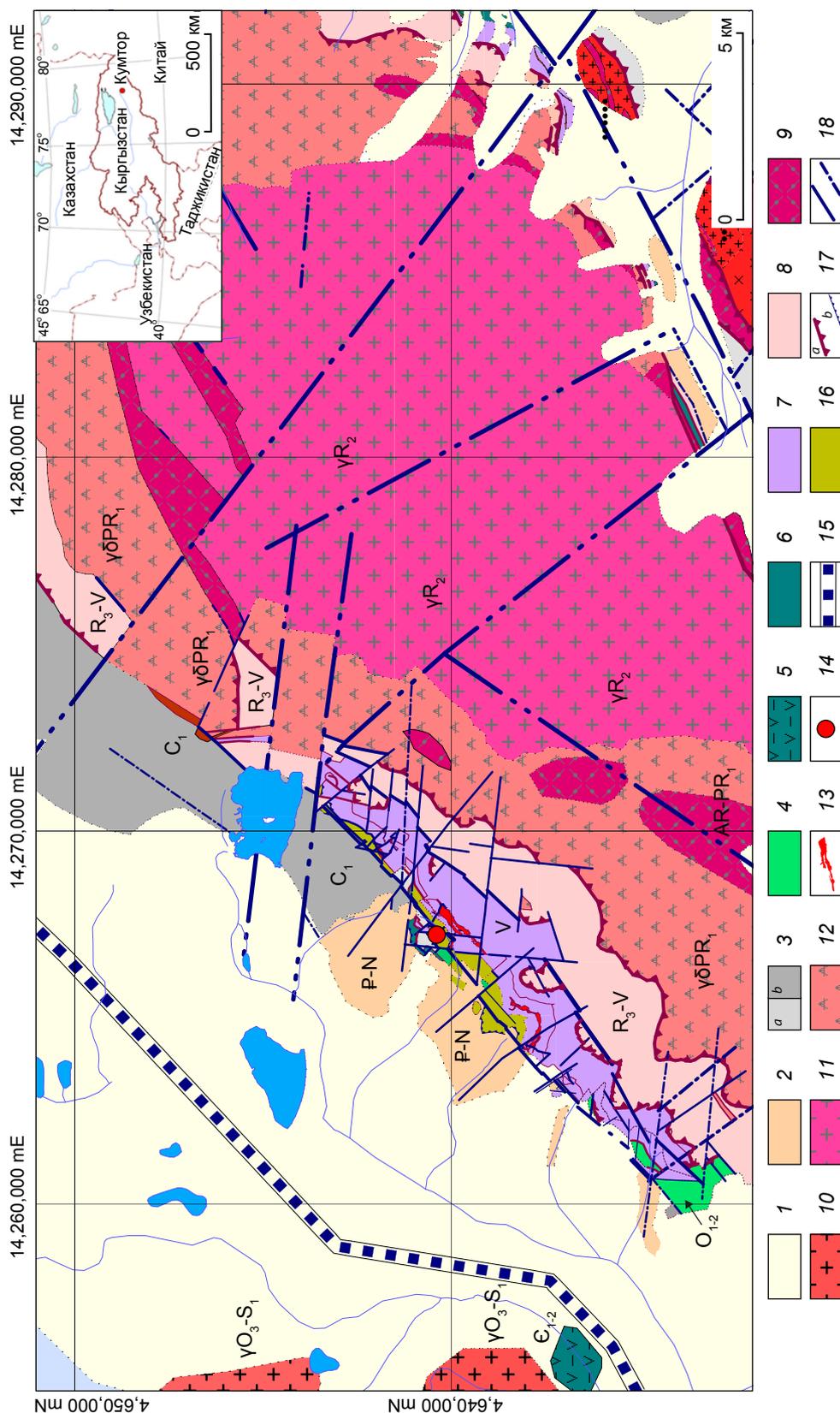


Рис. 2. Схематическая геологическая карта хребта Акширяк и его окрестностей без покрова ледниковых образований:

1 – моренные и аллювиальные отложения, Q; 2 – красноцветные глины, P-N; 3 – известняки (a) и песчаники (b), C₁; 4 – алевролиты, O₁₋₂; 5 – вулканиты, Є (Северный Тянь-Шань); 6 – чёрные кремни, Є-O; 7 – филлиты, диамиктиты дзхетымтауской серии, V; 8 – аркозы, метариолиты, R₃-V; 9 – гнейсы, мраморы, AR-PR₁ (?); 10 – граниты, O₃-S₁ (Северный Тянь-Шань); 11 – граниты, гранодиориты, R₂; 12 – кварцевые диориты, PR₁ (?); 13 – рудоносная зона; 14 – центральная часть месторождения Кумтор; 15 – линия Николаева по границе Северного и Среднего Тянь-Шаня; 16 – зона альпийского тектонического меланжа; 17 – надвиги палеозойские (a) и альпийские (b); 18 – крутопадающие разломы разновозрастные

Fig. 2. Schematic geological map of the Akshiryak ridge and its environs without the cover of glacial formations:

1 – moraine and alluvial deposits Q; 2 – red clays, P-N; 3 – limestones (a) and sandstones (b), C₁; 4 – siltstones, Є (Northern Tien Shan); 5 – black cherts, Є-O; 7 – phyllites, diamictites of the Dzhetymtau series, V; 8 – arkoses, metarhyolites, R₃-V; 9 – gneisses, marbles, AR-PR₁ (?); 10 – granites, O₃-S₁ (Northern Tien Shan); 11 – granites, granodiorites, R₂; 12 – quartz diorites, PR₁ (?); 13 – ore-bearing zone; 14 – central part of the Kumtor deposit; 15 – the Nikolaev Line along the border of the Northern and Middle Tien Shan; 16 – zone of Alpine tectonic mélangé; 17 – thrust faults: (a) Paleozoic and (b) Alpine; 18 – steeply dipping faults of different ages

0,1–1 % (рассеянное углистое вещество). Такие содержания обычно наблюдаются в разнообразных филлитах, диамиктитах, ритмитах и известняках. Около 6 % пород имеют повышенные содержания углерода в пределах 1,5–3 %. И, наконец, третья группа пород имеет высокие содержания $C_{орг.}$ (> 6 %). Эти разности пород представлены углистыми филлитами венда, обычно пиритиносными, углесто-кремнистыми и углесто-глинистыми сланцами кембрия–ордовика с Mo-U-V минерализацией. Углистое вещество во всех рудовмещающих породах представлено в основном антраксолитом. Наибольшие концентрации углистого вещества (до 10–25 %) зафиксированы в зонах разломов по углистым типам пород с интенсивной графитизацией.

В структуре месторождения выделены три латеральных типа разреза венда, сложенных: 1) пестроцветными гематитсодержащими хлоритовыми филлитами; 2) серыми полосчатыми филлитами и пиритиносными углистыми филлитами; 3) псаммитовыми филлитами.

При этом латеральные типы разреза джетымтауской серии и перекрывающих её стратифицированных образований смяты в складки и совмещены в вертикальную тектоно-стратиграфическую последовательность по разновозрастным надвигам, составляя практически весь объём Кумторской зоны смятия. Первый тип разреза слагает подошву, второй – рудоносную зону, третий – висячий бок Кумторской зоны смятия. Во всех типах разреза как своеобразный маркер джетымтауской серии присутствуют диамиктиты (конгломерато-сланцы, тиллоиды) двух уровней – «нижние», в основании разреза, часто залегающие на породах верхнего рифея, и «верхние», завершающие разрез венда (байконурская свита).

Основной надвиг – Кумторский – лежит в подошве Кумторской зоны смятия и представляет собой мощную (более 600 м) пологопадающую зону будинажа и рыхлых тектонических брекчий альпийского возраста. Матрикс брекчий – разнообразные черносланцевые и другого состава рыхлые тектониты и глины трения, содержащие глыбы, тектонические блоки и даже отдельные мощные тектонические че-

шуи разновозрастных пород – от гранитоидов и метавулканитов протерозоя до известняков каменноугольного возраста, а также фрагменты минерализованных зон и метасоматитов с золотом. В основании Кумторского надвига залегают красноцветные мусорные глины и конгломерато-брекчии верхнего палеогена – неогена либо сильно выветрелые («рыжие») песчаники нижнего карбона.

Ближе к основной рудоносной структуре в пределах Кумторского надвига наблюдаются фрагменты тел динамокластитов – реликтовых предрудных тектонических образований, маркирующих палеозойские надвиги. Это линзы и пакеты сильнографитизированных филлитов-филлонитов, насыщенных метаморфогенными карбонат-кварцевыми прожилками и жилами, субсогласными с рассланцеванием пород. Характерны будинаж и флюидальные текстуры. Характер смятия и будинажа прожилков подчёркивает преобладание текучих пластических деформаций на этапе формирования данного типа тектонитов. Обычно на динамокластиты наложены порции слабозолотоносных («отработанных») гидротермальных растворов, вызвавших дополнительную силицификацию и пиритизацию пород – они являются минерализованными зонами. Мощность их достигает первые десятки метров.

Собственно рудные зоны месторождения Кумтор представляют собой чередование интервалов интенсивного прожилкования (штокверков) в разнообразных филлитах с интервалами метасоматически преобразованных филлитов. Штокверки слагают периферийные части рудных тел. Они представлены сгущением прожилков, до образования брекчиевидных текстур, как субсогласных с рассланцеванием, так и секущих по системе трещинного кливажа. Субсогласные прожилки преимущественно карбонат-кварцевого состава, секущие – пирит-кварц-полевошпат-карбонатные и пирит-карбонатные. Последние два вида прожилков обычно являются рудоносными и наложены на карбонат-кварцевые. Метасоматиты слагают ядра рудных тел. Выделяются неполнопроявленные и полнопроявленные разности в зависимости от степени



проработки вмещающих филлитов. Рудные тела преимущественно линзо-, пластообразные, мощностью от первых десятков до 100–150 м, вертикальный размах оруденения по падению до 600–1000 м и более. Текстуры руд – вкрапленные, прожилково-вкрапленные, сетчато-прожилковые, полосчатые, пятнистые, брекчиевые и брекчиевидные (рис. 3).

Совокупности штокверков и тел метасоматитов были объединены после разведки Центрального участка месторождения по промышленным кондициям в несколько рудных тел [12]: Штокверковое, Южное, Северное и Северо-Восточное. Наиболее богатое – Штокверковое – наблюдается в месте структурного слияния обособленных Южного и Северного рудных тел. К настоящему времени в пределах Центрального участка дополнительно разведаны и отрабатываются рудные тела Северный раздвиг (NB) и Южный раздвиг (SB). Первое является продолжением к северо-востоку ранее потерянного Штокверкового рудного тела. Второе выявлено по простиранию рудоносной зоны, в юго-западной части Центрального участка, и сопоставимо по масштабам со Штокверковым. Кроме того, разведаны и частично отработаны промышленные рудоносные зоны на флангах – участки Юго-Западный и Сарытор. Определённые перспективы связываются также с участком Северо-Восточный [37].

На месторождении не существует литологического контроля золотого оруденения – зоны минерализации с золотом и рудные тела задокументированы во всех вышеописанных типах пород. Но состав и степень новообразований, и прежде всего тип метасоматитов, конечно же, напрямую зависят от первичного литологического и петрохимического составов пород. Ниже будут описаны результаты статистической обработки и других действий с петрохимическими данными, полученными в результате анализа выборки композитных проб с участков Центральный, Юго-Западный и Сарытор месторождения Кумтор.

Характеристика композитов проб на основе рассмотрения и сопоставления различных петрохимических модулей (Юдович Я. Э., 1981 г.) в выборке из неизменённых пород сви-

детельствует о том, что большая часть рудо-вмещающих пород месторождения Кумтор первоначально представляла собой относительно однородные глинозёмистые пелитовые слабоизвестковистые осадки, образовавшиеся из гидролизатных продуктов завершающих стадий выветривания [20]. В результате метагенеза и зеленосланцевого метаморфизма в настоящее время они представляют собой кварц-хлорит-серицитовые, кварц-серицитовые, серицит-хлоритовые, карбонат-кварц-серицитовые и углистые альбит-кварц-серицитовые филлиты в различных соотношениях как по разрезу, так и по простиранию пород.

На базе валового силикатного анализа (ALS Chemex) 764 композитных проб хвостов керна геологоразведочных скважин из различных минерализованных зон и вмещающих пород месторождения Кумтор был проведён статистический анализ распределения основных пороодо-, рудообразующих компонентов в разных выборках, расчёт баланса привноса/выноса петрогенных компонентов [20], а также проведена оценка некоторых петрохимических пропорций, предложенных Ф. П. Биерлайном с соавторами [24] для определения степени гидротермальных изменений вмещающих пород на золоторудных месторождениях, локализованных в метатурбидитах: индексы насыщения $3K/Al$ и $CO_2 / (Mg + Fe + Ca)$, индекс геохимических изменений $(K_2O + CO_2) / (K_2O + CO_2 + Na_2O + Al_2O_3)$. Такие пропорции являются часто более информативными, чем абсолютные концентрации оксидов, так как содержания в пробах K_2O , Na_2O и других оксидов зависят от типа пород.

По вещественному составу среди рудоносных метасоматитов месторождения Кумтор ранее были выделены [3, 5, 9, 12] следующие основные их разновидности: альбитовые, калишпатовые и карбонатные. Причём по стадийности минералообразования альбитовые метасоматиты были отнесены к наиболее ранним, а карбонатные метасоматиты вообще не вписывались в схему кислотно-щелочного метасоматоза. Нами после проведения детальных петрографических, петрохимических и минералогических исследований предлагается

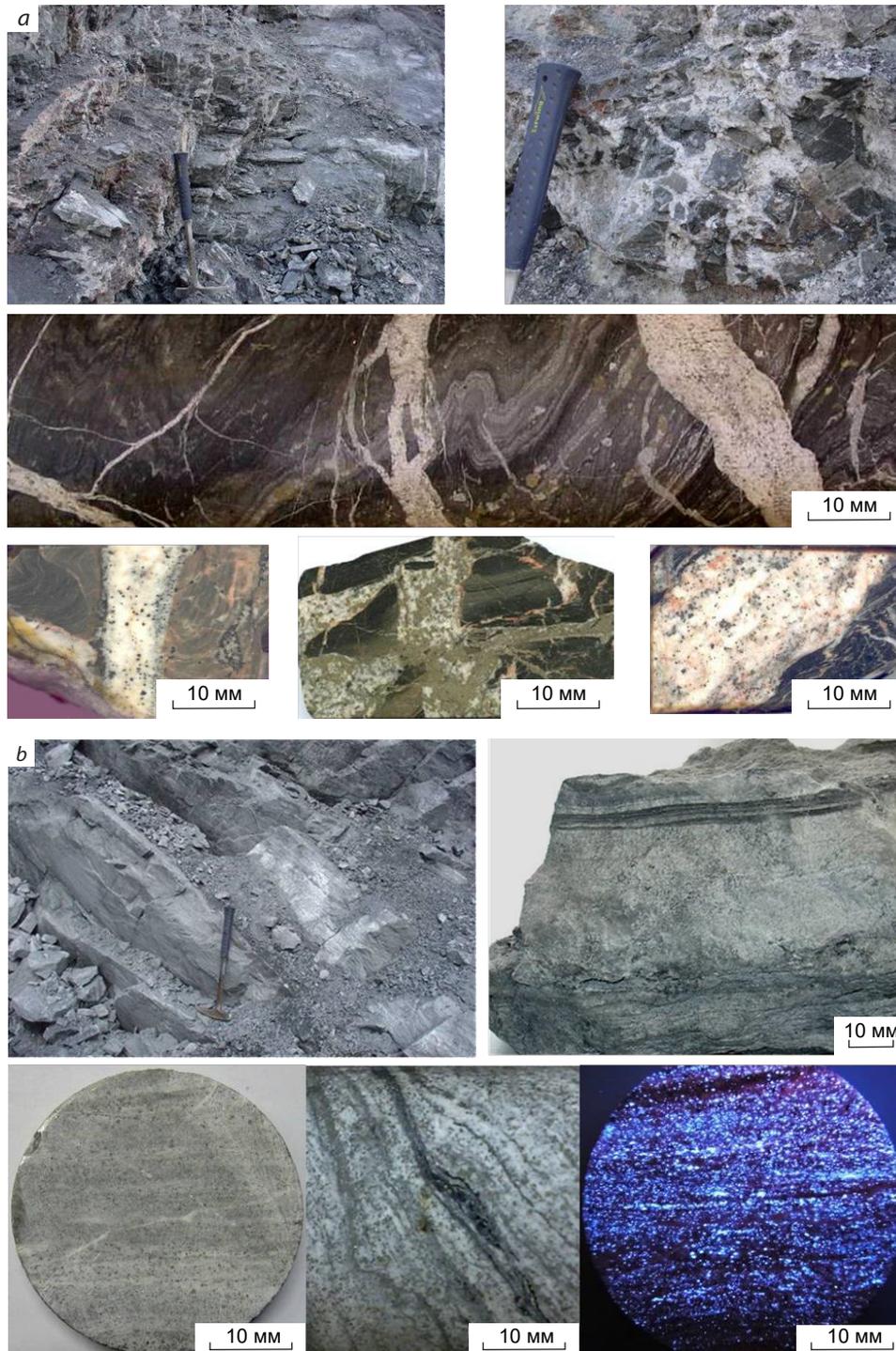


Рис. 3. Разновидности рудоносных метасоматитов месторождения Кумтор:

a – рудоносные штокверки пирит-карбонатных прожилков и брекчиевидные тела (вверху – в обнажениях; ниже – фрагмент фото ядра и шлифы); *b* – полосчатые рудоносные пирит-карбонатные метасоматиты (на фото справа внизу – то же, в УФ-лучах (светло-голубой – шеелит, розовый – манганокальцит)); *c* – шлифы карбонат-кальцит-кварцевых метасоматитов с обломками серицитолитов по филлитам, вкрапленностью пирита и гнездами гематита; *d* – массивная рудоносная брекчия пирит-шеелит-карбонат-альбитового состава (на нижнем фото – то же, в УФ-лучах (светло-голубой – шеелит))



Fig. 3. Varieties of ore-bearing metasomatites of the Kumtor deposit:

a – ore-bearing stockworks of pyrite-carbonate veinlets and brecciated bodies (on the top, in outcrops; on the bottom, a fragment of a borehole core photo and polished sections); *b* – banded ore-bearing pyrite-carbonate metasomatites (in the photo on the right bottom: the same, in UV rays (light blue is scheelite, pink is manganese calcite)); *c* – polished sections of carbonate–potassium feldspar–quartz metasomatites with fragments of sericitolites after phyllites, pyrite dissemination, and hematite nests; *d* – massive ore-bearing breccia of pyrite-scheelite-carbonate-albite composition (in the bottom photo: the same, in UV rays (light blue is scheelite))

несколько иная схема преобразования вмещающих пород, последовательности минерало- и рудообразования на месторождении [19, 20]. Ниже по совокупности данных сформулированы основные выводы о петрохимической модели формирования месторождения:

- во всех минерализованных зонах однозначно наблюдается привнос таких петрохимических компонентов, как CaO, MnO, SrO, CO₂, CO, S_{tot.} (в составе COS или SO₂); они образуют основной состав исходного, существенно углекислотного, флюида, имеют глубинный источник, высокую первоначальную температуру (порядка 500–600 °С) и являются впоследствии основными петрохимическими компонентами руд; исходный флюид также содержал некоторое количество K₂O;

- в процессе внедрения в рудообразующую структуру произошли локальные прогревы и взаимодействие исходного флюида с компонентами исходных пород (филлитов); следствием этого на начальном этапе являются дегидратация и разложение породообразующих серицита и хлоритов, образование серицитолитов и кварц-калишпатовых метасоматитов; одновременно рудообразующий флюид обогащается водой и такими компонентами, как K₂O (из состава хлоритов), Na₂O, SiO₂, MgO, BaO, а также освободившимися Fe²⁺ и Fe³⁺; серицитолиты являются надёжным свидетельством прошедшего процесса преобразования исходных пород;

- образовавшиеся первичные серицитолиты и кварц-калишпатовые метасоматиты не являются золотоносными; практически во всех кварц-калишпатовых метасоматитах наблюдается в той или иной мере привнос карбонатных компонентов (CaO, MnO, C_{tot.}), поэтому правильнее говорить о карбонат-кварц-калишпатовых рудных метасоматитах;

- в дальнейшем при эволюции рудообразующего процесса (понижении температуры) из таких компонентов преобразовавшегося флюида, как Na₂O, K₂O, SiO₂ и Al₂O₃, в локальных зонах происходит образование метасоматитов преимущественно альбитового состава; они часто развиваются по ранним кварц-калишпатовым, при этом происходит замещение пер-

вичного калишпата альбитом с переходом освободившегося K₂O снова в рудообразующий флюид; процесс альбитизации калиевого шпата довольно широко развит на месторождении;

- образовавшиеся альбитовые метасоматиты также не являются золотоносными; практически во всех альбитовых метасоматитах, за редким исключением, зафиксирован привнос карбонатных компонентов (CaO, MnO, C_{tot.}); правильнее говорить о карбонат-альбитовых рудных метасоматитах;

- каждая стадия образования полевошпатовых метасоматитов завершается подстадией карбонатообразования; среди кварц-калишпатовых метасоматитов развиты гнёзда и штокверки существенно доломитового состава, а в альбитовых метасоматитах преимущественно развиты анкерит и кальцит;

- существенно карбонатные метасоматиты развиваются как по калишпатовым метасоматитам, так и по альбитовым, более поздним; анкерит и кальцит корродируют и замещают все ранее новообразованные минеральные ассоциации; для них типичны флюидално-полосчатые милонитовые текстуры;

- из таких «заимствованных» из исходных пород компонентов рудообразующего флюида, как MgO, BaO, H₂O, Fe²⁺ и Fe³⁺, и первично содержащихся в нём CaO, CO₂, CO, SO₂ (COS?), MnO, SrO происходит стадийно-пульсационное, при изменении физико-химических параметров среды [28], новообразование большинства рудообразующих и рудных минералов – манганокальцита, анкерита, доломита, сидерита, пирита, гематита, барита, баритоцелестина;

- из рудных тел, представленных полнопроявленными метасоматитами, в конечном итоге происходит вынос большей части таких компонентов, как SiO₂, Al₂O₃, TiO₂ и OH;

- остаточные флюиды с кремнезёмом обычно выносятся из зон основного предрудного метасоматоза и образуют существенно кварцевые метасоматиты в подошве рудокализирующей структуры; они характеризуются повышенными содержаниями C_{org.}, Cr₂O₃, небольшой долей полевых шпатов, железистых карбонатов; мощные тела таких полнопроявленных



метасоматитов содержат небольшое количество золота;

- если исключить структурный фактор, сильно влияющий на рудообразование, исходный петрохимический состав рудовмещающих пород также имеет значение, с чем связаны вариации набора метасоматитов на разных участках; в этих случаях происходит нарушение вышеописанной схемы рудообразующего процесса или разные отклонения от неё.

По результатам количественного рентгенофазового анализа (QXRD) 35 проб одной из скважин, пересекающей всю рудоносную структуру Южного раздува, и петрографических исследований были установлены некоторые закономерности изменения минерального состава в направлении от висячего бока к подошве рудоносной зоны [22]. Неизменённые породы висячего бока представлены псаммитовыми филлитами альбит-доломит-хлорит-кварц-серицитового состава в разных вариациях этих основных минеральных компонентов. Содержания калиевого полевого шпата в неизменённых филлитах не превышают 1 %. Оказалось, что по количественному содержанию альбита неизменённые филлиты практически не отличаются от пород рудоносной зоны. Первичный «породный» альбит пропускается при петрографических исследованиях из-за мелких размеров зёрен в сростках с кварцем.

Ближе к рудной зоне среди филлитов висячего бока появляются интервалы пиритизации филлитов с убогими содержаниями золота, потом интервалы карбонатизации (анкерит + сидерит) с пиритом и содержаниями золота более 1 г/т, и, далее, альбит-пиритовые обособления в виде маломощных линз метасоматитов и скоплений прожилков. Начало основной рудной зоны по изученному пересечению характеризуется резким увеличением содержания калиевого полевого шпата (микроклина), появлением (на фоне альбита, железистого доломита/анкерита и пирита) заметных количеств кальцита и барита. Внутри рудной зоны и ближе к подошве встречаются интервалы пирит-карбонат-альбитовых метасоматитов с преобладанием в их составе альбита. На таких участках калиевого шпата прак-

тически нет. Ближе к подошве в рудоносных породах уменьшается содержание кальцита, возрастает содержание сидерита, в подошве отмечается резкое увеличение содержания кварца. Заканчивается этот разрез карбонатизированной кварц-полевошпатовой породой (метавулканыты R_3) с порфиробластами альбита и калишпата. Полевые шпаты здесь, в отличие от рудоносной зоны, сильно серицитизированы, а альбит калишпатизирован.

Подобная картина изменения минерального состава пород и руд по разрезу подтверждает описанные выводы относительно петрохимической модели месторождения. Как видно из всего вышесказанного, месторождение Кумтор не вписывается в рамки существующих традиционных схем рудообразования и метасоматоза, что позволило ранее выделить кумторский тип золотого оруденения [12].

Минералого-геохимические особенности месторождения. Массовые определения рудных и нерудных минералов проведены визуально-оптическими методами с помощью микроскопа Nikon eclipse (LV 100 POL), оснащённого цифровой камерой DS-Fi1, в шлифах, полированных шлифах и аншлифах. Кроме того, использованы результаты количественного рентгенофазового минералогического анализа (QXRD) 35 образцов, SEM BSE рентгеновские карты-имиджи распределения ряда порообразующих элементов и микроэлементов в отдельных образцах из метасоматитов и руд месторождения Кумтор, выполненные в лаборатории McKnigh Mineralogy (университет Балларат, Австралия), а также результаты микронзондовых анализов ($n = 165$) микровключений в рудах, произведённых на растровом электронном микроскопе JSM-5300 JEOL в лаборатории рудных месторождений ИГЕМ (г. Москва) и на растровом электронном микроскопе JXA-8800 R/RL JEOL в Институте геологии АН Узбекистана (г. Ташкент). Разные типы пирита, пирротин и некоторые рудные минералы (сфалерит, калаверит, халькопирит, тетраэдрит) были проанализированы в семи образцах из вмещающих пород и в двух – из руд месторождения Кумтор методом LA-ICP-MS на 30 элементов (Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu,

Zn, As, Se, Zr, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Ba, La, W, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th, U, Fe, S) в Центре по изучению генезиса рудных месторождений (CODES) Тасманийского Университета (г. Хобарт, Тасмания, Австралия). Всего выполнено 192 анализа зёрен пирита и семь – пирротина.

По совокупности предыдущих работ [1, 3, 5, 12, 18, 28] и настоящих исследований было установлено около 100 минералов в рудах и вмещающих породах месторождения Кумтор. Основные рудные минералы – пирит, гематит, шеелит, второстепенные – халькопирит, сфалерит, самородное золото, теллуриды, блёклые руды (тетраэдрит, теннантит), галенит, висмутин, тетрадимит, самородное Ag и др. Нерудные минералы руд – карбонаты (анкерит, доломит, кальцит, сидерит), КППШ (микроклин), альбит, кварц, серицит, целестинобарит, антракосолит-графит. Главный добываемый компонент руд – золото, средние содержания которого в рядовых рудах 2–10 г/т, а в богатых достигают десятков г/т. Серебро – попутно извлекаемый элемент. Потенциальный интерес представляют W, Te и S.

Пирит – самый распространённый на месторождении рудный минерал. Его содержание в рудах колеблется, по разным оценкам, от 7–10 до 10–20 %. Наблюдается большое разнообразие его генераций и кристалломорфологических разновидностей (кубы, октаэдры, пентагон-додекаэдры, губчатые выделения), позволяющих восстановить в совокупности с приуроченными к нему микропарагенезисами других рудных минералов картину рудообразующего процесса. На долю пирита, по данным минерального баланса и исследований технологических проб, приходится до 80 % золота, 56 % серебра и 70 % теллура [1, 12, 18]. Кроме «рудного» пирита, на месторождении широко проявлена колчеданная пиритовая минерализация, не имеющая самостоятельного промышленного значения [3, 12].

На месторождении Кумтор выделяются три главных генетических типа пирита [3, 21]: осадочно-диагенетический (Py1), метаморфический (Py2) и гидротермальный (Py3). В каждом типе пирита выделяется несколько морфогенетических разновидностей. Осадочно-диаге-

нетический пирит подразделяется на фрамбоидальный, обломковидный крипто-, микро- и мелкозернистый, слоистый и конкреционный мелкозернистый. Нередко встречаются тесные сростания этих разновидностей, поэтому выделены также переходные разновидности – обломковидный мелкозернистый пирит с фрамбоидами, и фрамбоидальный, частично перекристаллизованный при метаморфизме. Все эти разновидности пирита сформировались до стадии метаморфической пирротинизации, которая наблюдается исключительно в породах висячего бока, вне рудоносной зоны. С пиротином ассоциируют порфиридные эвгедральные кристаллы метаморфического пирита. Среди «рудного» пирита, с которым связано золото, выделены сильно корродированные зёрна, эвгедральные кристаллы, дырчатые эвгедральные кристаллы, субгедральные зёрна. Каждая из вышеупомянутых разновидностей пирита и пирротин характеризуются своими геохимическими особенностями, которые описаны детально в работе [21].

С начала геологоразведочных работ по настоящее время усилиями многих исследователей в рудах месторождения Кумтор достоверно определены разными методами (с подтверждением состава микрозондовыми исследованиями) следующие минералы, содержащие золото [1, 11]: самородное золото (с пробностью 920–986 и 704–876 ‰); интерметаллиды Au-Ag – электрум (600–700 ‰), кюстелит (400–600 ‰), «белёное золото» (< 400 ‰); теллуриды – калаверит (AuTe₂), сальванит (AuAgTe₄), петцит (Ag₃AuTe₂), креннерит ((Au,Ag)₂Te₄), мутманнит ((Ag,Au)Te), монтбрейит ((Au₂Te₃)Au₂(Te,Sb)₃), безсмертновит (Au₄Cu(Te,Pb)). На долю теллуридов Au-Ag в рудах месторождения Кумтор приходится около 50 % всего золота [1], а остальные 50 % связаны с самородным золотом и интерметаллидами Au-Ag. До 90 % всех золотосодержащих минералов и минеральных ассоциаций так или иначе связаны с «рудным» пиритом [12, 18]. Средние содержания золота в «рудных» пиритах колеблются от 0,05 до 280 г/т.

Среди самородного золота преобладает высокопробное (920–986 ‰). Основная его

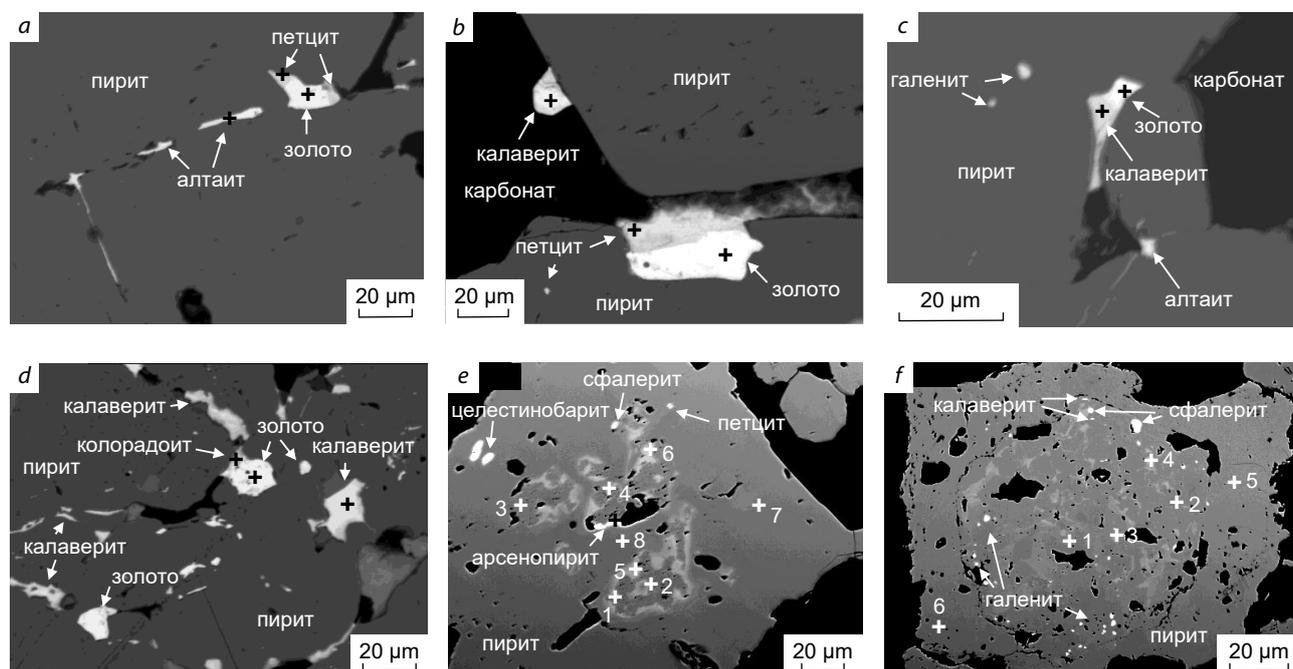


Рис. 4. Изображение в отражённых электронах отдельных микрофрагментов из пирит-полевошпат-карбонатных руд с золото-теллурид-сульфидной ассоциацией по результатам минераграфических и микрозондовых (+) исследований. Месторождение Кумтор, Центральный участок, рудное тело Южный раздвиг:

a – пирит-калишпат-карбонатный метасоматит, обр. 112728, скважина D1127 (504,1 м); *b* – пирит-альбит-калишпат-карбонатный метасоматит, обр. 91920, скважина D919 (273,6 м); *c* – кварц-карбонатный метасоматит, обр. 1032-270, скважина D1032 (270 м); *d* – пирит-альбит-калишпат-карбонатный метасоматит, обр. 919-242, скважина D919 (242,2 м); Штокверковое рудное тело: скважина D670 (120,4 м) – *e* (обр. 67027/1; 1, 4, 5, 6 – мышьяковистый пирит (As = 3,1–4,7 вес. %), 2 – слабмышьяковистый пирит (As = 0,16 вес. %), 3, 7, 8 – пирит «без мышьяка»); *f* – обр. 67027/2; 3, 4 – мышьяковистый пирит (As = 1,6–2,9 вес. %), 1, 2, 5 – слабмышьяковистый пирит (As = 0,07–0,54 вес. %), 6 – пирит «без мышьяка»)

Fig. 4. Back-scattered electron image of individual microfragments of the pyrite-feldspar-carbonate ores with the gold-telluride-sulfide assemblage, according to the minerographic and microprobe (+) investigations. Kumtor deposit, Central site, Southern Swell ore body:

a – pyrite–potassium feldspar–carbonate metasomatite, Sample 112728, Borehole D1127 (504.1 m); *b* – pyrite–albite–potassium feldspar–carbonate metasomatite, Sample 91920, Borehole D919 (273.6 m); *c* – quartz–carbonate metasomatite, Sample 1032-270, Borehole D1032 (270 m); *d* – pyrite–albite–potassium feldspar–carbonate metasomatite, Sample 919-242, Borehole D919 (242.2 m); Stockwork ore body, Borehole D670 (120.4 m): *e* – Sample 67027/1: 1, 4, 5, 6 – arsenic pyrite (As = 3.1–4.7 wt %), 2 – low-arsenic pyrite (As = 0.16 wt %), 3, 7, 8 – "arsenic-free" pyrite); *f* – Sample 67027/2: 3, 4 – arsenic pyrite (As = 1.6–2.9 wt %), 1, 2, 5 – low-arsenic pyrite (As = 0.07–0.54 wt %), 6 – "arsenic-free" pyrite

примесь – Ag (2,1–8,3 вес. %); другие элементы-примеси (Te, Sb, Se, Cu) дают в сумме не более 1 вес. %. Золото наблюдается в виде микронных (1–50 мкм) округлых и кристаллических выделений внутри зёрен «рудного» пирита, на гранях кристаллов пирита и в виде пластинчатых выделений по микротрещи-

нам в нём (рис. 4). Кроме того, высокопробное золото отмечается в карбонатном матрикс рудных брекчий – в виде скоплений микронных кристаллов и интерстиций среди зёрен Mn-Fe-карбонатов (Mn-Fe-доломита, анкерита, сидерита, Mn-Fe-кальцита). В ассоциации с ним чаще всего встречаются калаверит и

теллуриды Au-Ag (петцит, креннерит), теллурид Pb (алтаит), халькопирит, блёклые руды (Zn-тетраэдрит), реже галенит, сфалерит, теллуриды Ni (мелонит) и Hg (колорадоит), тетрадимит, висмутин, гематит, шеелит. Все вышечисленные рудные минералы также образуют, чаще всего, микронные выделения.

Низкопробное золото (704–876 ‰) встречается реже, в виде микронных зёрен (10–50 мкм) на гранях кристаллов пирита, в микротрещинах по нему и кавернах. Обычно оно отмечается в ассоциации с целестинобаритом, теллуридами Ni (мелонитом) и Sb (теллурантимоном). Это золото ртутистое (0,12–5,28 вес. % Hg); другими элементами-примесями являются Ag (4,6–11,7 вес. %), Cu (до 8,6 вес. %), Sb (до 1,1 вес. %), Te (до 4,2 вес. %), Pb (до 2 вес. %), Zn (до 1,2 вес. %). Ещё реже встречаются микронные выделения интерметаллидов Au-Ag (< 700 ‰).

Часто при высоких содержаниях золота в пирит-карбонатных метасоматитах не наблюдается видимого самородного золота и теллуридов золота. Возможно, это золото находится в виде субмикронных и наночастиц в составе более низкотемпературных разновидностей «рудного» пирита. Некоторые изображения SEM BSE и фрагменты рентгеновских карт (McKnight Mineralogy, 2008) показывают наличие микронных включений теллуридов Au и Ag, а также тонкораспылённых микро-, наночастиц Au, Ag и Mn в зёрнах «рудного» пирита месторождения Кумтор. Подобное тонкораспылённое в мышьяковистых пиритах золото было обнаружено и изучено в образцах руд месторождения Карлин [35]. Представлено оно там наночастицами Au⁰ и наночастицами Au⁺¹.

Вольфрам наряду с теллуридом и серебром является типоморфным элементом золотых руд месторождения Кумтор [3, 12, 15, 29]. Он образует широкий и устойчивый ореол, выходящий за контуры золоторудных тел. Содержания WO₃ в пробах из руд колеблются от 0,005 до 1 %, составляя чаще всего в рядовых рудах (данные технологических испытаний) 0,027–0,11 % [12]. В Штокверковой и Южной рудных зонах содержания WO₃ достигали местами 0,2–0,5 %, что позволило при разведке место-

рождения выделить отдельные тела бедных вольфрамовых руд [18].

Основной минерал вольфрама в рудах – тонкозернистый шеелит; редко встречается вольфрамит и, по результатам рационального химического анализа, предполагается присутствие сульфида вольфрама – тунгстенита. Шеелит встречается в составе прожилков, а также в виде густой вкрапленности в телах метасоматитов [15]. Он образует скопления отдельных светло-серых изометрических выделений от мельчайших (0,01–0,05 мм) до 1–2 мм, реже идиоморфные кристаллы медово-коричневого цвета размером до 0,5–0,7 см. Состав шеелит-содержащих прожилков различен: от пирит-кварц-полевошпат-карбонатных до шеелит-карбонатных и моношеелитовых. Реже шеелит концентрируется в полевошпат-карбонатных жилах, образующих секущие линзующиеся тела мощностью от 0,2 до 1–2 м. Здесь он тяготеет к одному из контактов жил, образуя скопления вкрапленности в виде струйчатых полосчатых выделений, параллельных контакту жил.

Шеелиты месторождения Кумтор характеризуются высокими содержаниями стронция (Sr > 1 %). По набору основных элементов-примесей, входящих изоморфно в матрицу шеелита (Mo, Mn, Sc, Y, Yb), шеелиты месторождения Кумтор разделяются на три группы, отождествляемые с разными генерациями: шеелит-I отличается повышенными содержаниями Mo и зеленовато-жёлтой люминесценцией (единичные зёрна); шеелит-II (самая многочисленная группа) характеризуется голубой люминесценцией, полным набором вышеуказанных элементов-примесей и большими вариациями их содержаний; шеелит-III имеет голубую люминесценцию и повышенные содержания Y и Yb (+ РЗЭ иттриевой группы?). По спектрам фото- и рентгенолюминесценции на месторождении Кумтор выделяются, как минимум, две разновидности шеелитов: с явно выраженными пиками Dy³⁺, Tb³⁺, Er³⁺, Eu³⁺, Pr³⁺ и Sm³⁺; с отдельными маловыразительными всплесками Dy³⁺ и Pr³⁺.

Наибольшие концентрации шеелита связаны с телами пирит-карбонатных метасоматитов. Это полосчатые белые, существенно



карбонатные тела с вкрапленностью шеелита по полосчатости (см. рис. 3, *b*) в Южной рудной зоне, и массивные серые карбонат-альбитовые разности с равномерной тонкой вкрапленностью пирита и шеелита (см. рис. 3, *d*) – в Северной рудной зоне. Мощность их составляет от 0,5–5 до 10 м и более. Тела либо ограничены с обеих сторон тектоническими зонами смятия, либо постепенно переходят во вмещающие их углистые карбонатные филлиты и часто смяты вместе с ними в складки.

Ореолы вольфрама развиты гораздо шире ореолов золота [1, 18]; они наблюдаются в осевой зоне, кровле и подошве рудоносной структуры. В рудных телах относительно простого состава (участки Юго-Западный, Сарытор) вольфрам имеет существенную положительную корреляцию с Au, Te, Hg. В рудоносных блоках Центрального участка, с чередованием или наложением разных типов метасоматитов, корреляция W с Au и другими элементами ослабевает, становится незначимой. С глубиной ширина ореолов W увеличивается. Наибольшими средними содержаниями W характеризуются пирит-карбонатные и пирит-альбит-карбонатные тела (соответственно 260 и 118 г/т); в пирит-карбонат-калишпатовых и пирит-карбонат-альбитовых разностях они равны 72 и 23 г/т [12].

Золото-вольфрам-сульфидные «залежи» сопровождаются также контрастными эндогенными ореолами Hg, Sb, Sr, Ag, Ba, Cu, Pb, Zn и других элементов. Морфология ореолов всех сопутствующих элементов в целом согласуется с формой и условиями залегания рудоносных «залежей». Контурные ореолы Au и Te повторяют друг друга. По предварительным данным, на верхних и средних горизонтах преобладают ореолы Hg, Sr и Ba. По падению рудоносной зоны, с глубиной, их интенсивность снижается, а вот концентрации Ag и Sb нарастают. Слабые ореолы Pb характерны только для осевой части рудной зоны, где проявлены пирит-карбонатные метасоматиты. As, Cu и Zn характеризуются чаще всего ореолами выноса из рудной зоны, образуя слабоконтрастные аномальные ореолы в висячем и лежащем боках рудоносной зоны. Геохимиче-

ская зональность контрастная, дифференцированная, но чаще всего сильно искажённая процессами альпийской тектоники (надвигами, сдвигами).

В рудных зонах золото имеет существенную положительную корреляцию с Te, Ag, Cu, Hg, Sb, As, Sr и Zn, и слабую – с Bi, Pb, W. Корневой геохимической ассоциацией руд является группа элементов Au + Te + Hg + Ag + W, при содержаниях золота 1–10 (до 320) г/т, теллура 1–20 (до 250) г/т, ртути 0,1–6 г/т, серебра 1–5 (до 40) г/т, вольфрама 0,005–0,1 %. Все эти элементы образуют собственные минеральные формы и микропримеси в других минералах. Мышьяк на месторождении не образует значимых концентраций (< 50 г/т) и присутствует в рудах лишь в составе блёклых руд (теннантит, тетраэдрит), а также в виде примеси в некоторых разновидностях пирита. Очень редко наблюдаются микровключения арсенопирита в ассоциации с мышьяковистым пиритом (см. рис. 4).

Во всех типах руд золото доминирует над серебром – отношение Au/Ag колеблется от 2 : 1 до 7 : 1 и более. Теллур в рудах, наоборот, доминирует над золотом. Средние значения отношения Te/Au уменьшаются в направлении от минерализованных зон к богатым рудам (8,6 → 4,2 → 3,3 → 2,2). Полимодальное распределение значений отношения Te/Au связано с присутствием в рудах кроме теллуридов Au-Ag теллуридов других металлов (Pb, Bi, Ni, Sb, Hg) и вариацией их количества. Отношение Te/Se колеблется на месторождении в пределах от 1 : 10 до 90 : 1. Во вмещающих породах это отношение стабильно < 1. В рудах значения отношения стабильно > 1 (в среднем 10 : 1 – 20 : 1). Селениды (клаусталит, берцелианит) в рудах наблюдаются очень редко и определены пока лишь оптическими методами [12].

По геохимическим признакам на месторождении намечается выделение на настоящее время двух основных природных типов руд (условно): висмутового и сурьмяно-свинцово-стронциевого. Для первого отношение Sb/Bi менее 1 : 1 (до 1 : 10) при содержаниях висмута до 26 г/т, для второго от 10 : 1 до 30 : 1. В богатых рудах часто отмечается со-

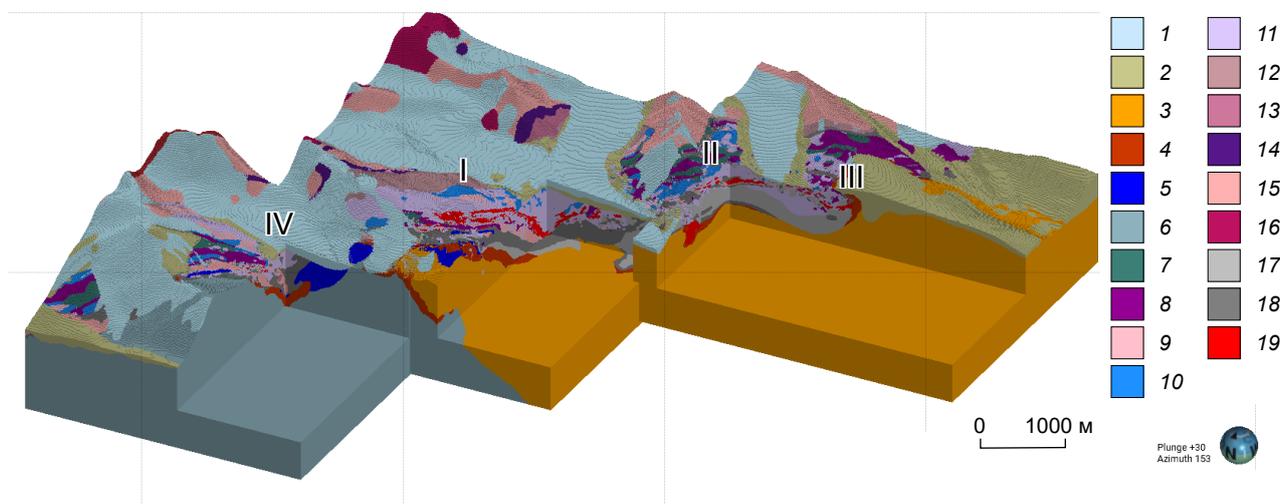


Рис. 5. Геологическая 3D-модель Кумторского рудного поля с участками Центральный (I), Юго-Западный (II), Сарытор (III) и Северо-Восточный (IV):

1 – ледники; 2 – моренные отложения; 3 – палеоген-неогеновые мусорные глины и конглобрекции; 4 – породы зоны окисления; 5 – известняки карбона; 6 – песчаники карбона; 7 – лидиты, углистые сланцы кембрия–ордовика; 8 – диамиктиты верхние; 9 – углистые филлиты венда; 10 – карбонатные филлиты-ритмиты венда; 11 – полосчатые филлиты венда; 12 – терригенные ритмиты; 13 – пестроцветные филлиты венда; 14 – диамиктиты нижние; 15 – комплекс пород верхнего рифея – риолиты, аркозы; 16 – гранитоиды сарыджазского комплекса; 17 – тектониты; 18 – тектонические брекчии; 19 – рудоносные зоны

Fig. 5. Geological 3D model of the Kumtor ore field with the Central (I), Southwestern (II), Sarytor (III), and North-eastern (IV) sites:

1 – glaciers; 2 – moraine deposits; 3 – Paleogene-Neogene “rubbish-dump” clays and conglobreccias; 4 – rocks of the oxidation zone; 5 – Carboniferous limestones; 6 – Carboniferous sandstones; 7 – lydites, Cambrian–Ordovician carbonaceous shales; 8 – upper diamictites; 9 – Vendian carbonaceous phyllites; 10 – Vendian carbonate phyllite rhythmities; 11 – Vendian banded phyllites; 12 – terrigenous rhythmities; 13 – varicolored Vendian phyllites; 14 – lower diamictites; 15 – Upper Riphean rock complex: rhyolites, arkoses; 16 – granitoids of the Sarydzhas complex; 17 – tectonites; 18 – tectonic breccias; 19 – ore-bearing zones

вмещение обоих типов, но при значительном преобладании сурьмяно-свинцово-стронциевого; на Центральном участке последний абсолютно преобладает. Висмутовый тип наблюдается на некоторых фланговых участках месторождения (Юго-Запад – Сарытор), где развиты преимущественно пирит-карбонат-кварц-альбитовые метасоматиты.

Моделирование месторождения в среде Leapfrog Geo. В процессе проведения геологоразведочного бурения и эксплуатационных работ на руднике Кумтор в последние годы были получены дополнительные интересные данные, которые позволили уточнить ряд вопросов, касающихся геологии и тектонической структуры месторождения. По совокупности всех

имеющихся материалов была сформирована рабочая геологическая модель месторождения (рис. 5) в среде программного обеспечения для имплицитного моделирования Leapfrog Geo (Seequent).

Использование возможностей трёхмерного моделирования программы Leapfrog Geo при проведении работ на месторождении Кумтор позволяет обрабатывать весь спектр баз данных, полученных за многие годы при изучении месторождения и пополняемых в настоящее время в процессе геологоразведочных и эксплуатационных работ. Сопоставление различных индуцированных в одной среде трёхмерных моделей, таких как геологическая, геолого-структурная, моделей метасоматической,



минералогической и геохимической зональностей, моделей геотехнической и извлечения золота позволяют оперативно корректировать проведение геологоразведочных и эксплуатационных работ, делать корректные выводы по вопросам генезиса и истории формирования структуры месторождения, прогнозировать участки для проведения поисковых работ. Отдельные модули программы позволяют оперативно оценить потенциальные ресурсы вновь выявленных зон минерализации и участков, оптимизировать проектирование и проведение разведочного бурения в перспективных зонах.

Кроме геологической модели, на основе имеющихся баз данных также сгенерированы структурная модель месторождения, модель метасоматитов, геохимических ореолов элементов-спутников золотого оруденения и модель извлечения золота в контурах рудных тел. Эти модели постоянно совершенствуются и корректируются по мере поступления новых данных геологоразведочного бурения и результатов анализов в полуавтоматическом режиме.

Геолого-структурное моделирование в среде Leapfrog Geo, на основе базы данных структурных замеров элементов залегания пород с поверхности, по уступам карьеров и в скважинах с ориентированным керном подтверждает приуроченность рудоносной структуры месторождения к зоне смятия пород. Основная рудоносная зона расположена в системе надвигов, приуроченных к лежащему крылу сложной антиформной структуры, на переходе её в висячее крыло сильно сжатой синформы (рис. 6). Основными разрывными структурами, выделенными при моделировании месторождения, являются Нижний Кумторский, Чёрный и Верхний Кумторский надвиги, разлом Лысый и Сарыторский надвиг. По этим структурам месторождение разделено на четыре основные зоны, сложенные специфическими структурно-вещественными комплексами [37].

В основании структуры выделяется Базис, сложенный породами палеогена–неогена (на участке Северо-Восточный это песчаники нижнего карбона); на нём, по альпийскому надвигу, залегает Зона 0, сложенная породами зоны окисления; далее выделяется Зона 1, сложен-

ная альпийскими тектоническими брекчиями, преимущественно по углистым породам кембрия–ордовика и венда; выше по разрезу расположена Зона 2, сложенная минерализованными филлитами и диамиктитами венда – основная рудоносная зона смятия месторождения; Зона 3 – висячий бок рудоносной структуры, сложенный монотонной толщей смятых полосчатых филлитов венда; Зона 4, сложенная толщей специфических пород – терригенных ритмитов, отличающихся от пород джетымтауской серии литологией и повышенной степенью метаморфизма филлитов вплоть до кристаллических сланцев, насыщенных неравномерной вкрапленностью метаморфогенного магнитного пирротина.

Выше Зоны 4 по разрезу расположена тектоническая чешуя, сложенная породами верхнего протерозоя–венда – толщей метааркозов и метариолитов рифея с фрагментами базальных конгломерато-сланцев венда («нижних» диамиктитов), залегающих на эродированной поверхности пород рифея. Породы этой тектонической чешуи метаморфизованы в условиях биотитовой зоны зеленосланцевой фации. Контакт с породами Зоны 4 проходит по Сарыторскому надвигу. Эта очень пологая (5–25°) структура прослежена регионально по простиранию на десятки км [3]. Тектонический шов палеозойского надвига выполнен милонитами, имеет мощность 0,5–1,5 м и не несёт признаков золотой минерализации. В пределах Центрального участка месторождения положение Сарыторского надвига осложнено крупным взбросом, и он не прослеживается на поверхности (см. рис. 6).

Кумторская зона смятия в настоящее время представляет собой сложный агломерат со-надвиговых динамокластитов (филолитов, катаклазитов, милонитов и брекчий) палеозойского возраста, образовавшихся в результате предрудного и синрудного динамотермального метаморфизма, среди которых расположены минерализованные породы. Характерны гидротермально-метасоматические и брекчиевые текстуры руд, связь оруденения со штокверками разнообразных прожилков и телами метасоматитов, структурный контроль тел

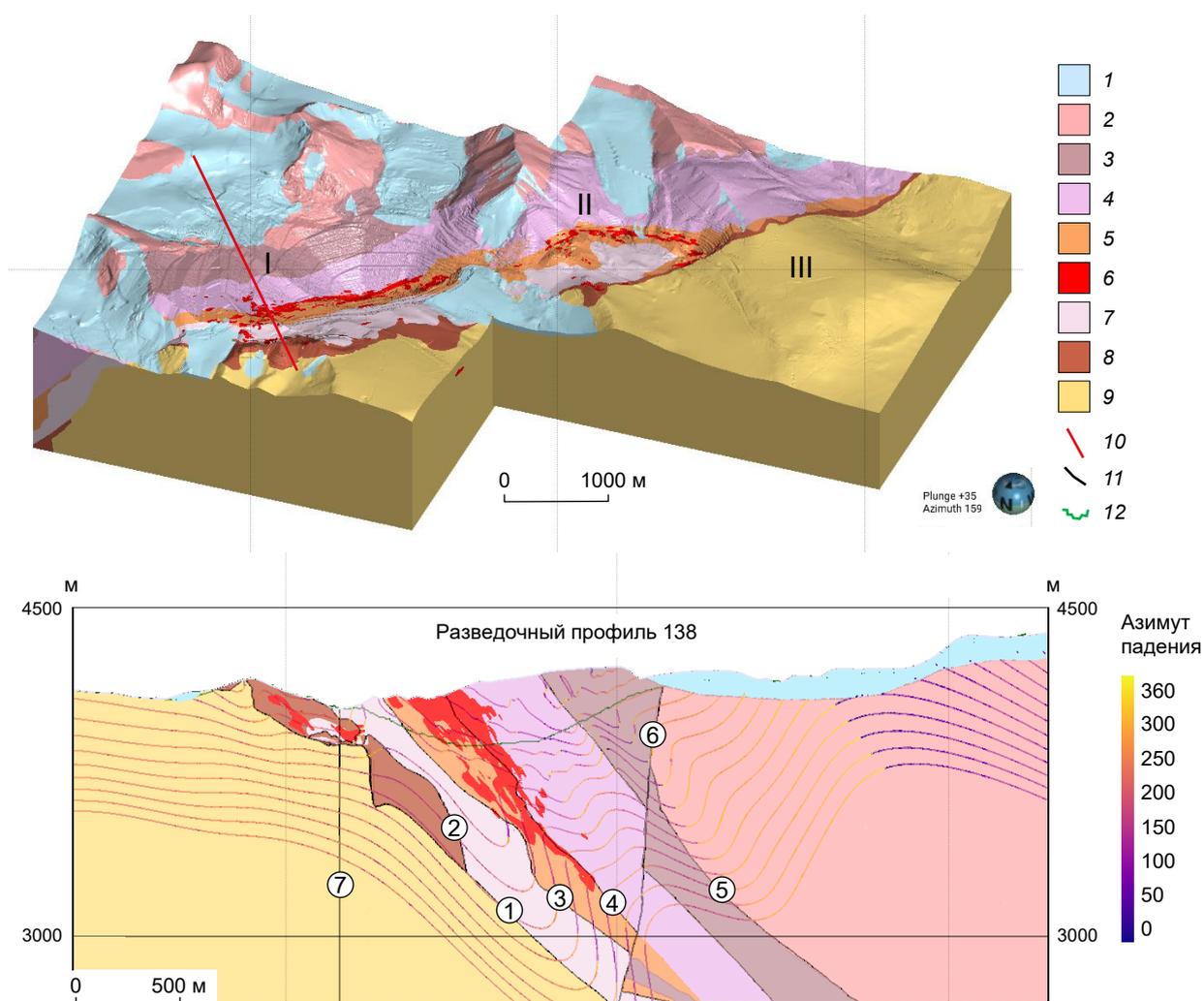


Рис. 6. Геолого-структурная модель основных участков месторождения Кумтор (I – Центральный, II – Юго-Западный, III – Сарытор) с выделением главных структурно-вещественных комплексов (Зоны 0–4) и геолого-структурный разрез с расположением структурных изоповерхностей и основных тектонических швов по разведочному профилю 138:

1 – ледники; 2 – верхнерифейский комплекс пород верхней надвиговой чешуи; 3 – Зона 4; 4 – Зона 3; 5 – Зона 2; 6 – рудоносная зона ($Au > 0,5 \text{ г/т}$); 7 – Зона 1; 8 – Зона 0; 9 – палеоген-неогеновые породы основания (Базис); 10 – линия разреза по профилю 138; на разрезе: 11 – основные надвиги (1 – Нижний Кумторский, 2 – Чёрный, 3 – Верхний Кумторский, 4 – Лысый, 5 – Сарыторский) и разломы (6 – Южный взброс, 7 – Кумторский взбросо-сдвиг); 12 – контур карьера

Fig. 6. Structural geological model of the main sites of the Kumtor deposit (Central, Southwestern, and Sarytor), showing the principal structural and compositional complexes (Zones 0–4), and a structural geological cross-section along the exploration Profile 138, showing position of the structural isosurfaces and principal tectonic sutures:

1 – glaciers; 2 – Upper Riphean complex of rocks of the upper thrust slice; 3 – Zone 4; 4 – Zone 3; 5 – Zone 2; 6 – ore-bearing zone ($Au > 0.5 \text{ g/t}$); 7 – Zone 1; 8 – Zone 0; 9 – Paleogene-Neogene rocks of the basement (Basis); 10 – cross-section line along Profile 138; on the cross-section: 11 – main thrusts (1 – Lower Kumtor, 2 – Chernyi (Black), 3 – Upper Kumtor, 4 – Lysy (Bald), 5 – Sarytor) and faults (6 – Southern reverse fault, 7 – Kumtor reverse slip fault); 12 – quarry contour



метасоматитов и оруденения системами разрывных нарушений и надвигов, а также приуроченность золотого оруденения к черносланцевой толще с сульфидной минерализацией и к породам, обогащённым $C_{орг.}$, наличие реликтовых ритмично-полосчатых и бурундучных текстур, идентичность складок в некоторых рудных телах и вмещающих породах, простой минеральный состав руд, часто соответствие минерального состава метасоматитов, руд и вмещающих филлитов.

В процессе изучения структурных особенностей было установлено широкое развитие в пределах месторождения Кумтор процессов альпийской тектоники, которые значительно преобразили первичный облик месторождения, сформировавшегося в позднепалеозойское время. В подошве рудоносной структуры установлен мощный альпийский надвиг пород рудовмещающего разреза на палеоген-неогеновые отложения – Кумторский. В подошве этой структуры наблюдаются остатки мезозойской аллитовой коры выветривания, перемешанные с красноцветными глинами $P-N_1$ и размазанные при надвиге. Установленная по данным поисково-разведочного бурения минимальная амплитуда смещения пород Кумторской зоны смятия по альпийскому надвигу в северо-северо-западных румбах составляет около 1,5 км. Этот надвиг хорошо прослеживается на Центральном участке месторождения по результатам 3D-моделирования геотехнических данных – по полосе развития сильно разрушенных пород со значениями показателя качества пород (RQD) < 5–10 % (рис. 7).

Во фронтальной части этого надвига наблюдается мощная зона тектонического «меланжа», прослеженная по простираию всей структуры месторождения на протяжении более 12 км. Матриком этой зоны являются тектонические глины, рыхлые мелкообломочные полосчатые тектонические брекчии и тектониты. В виде обломков и глыб на ограниченном пространстве встречается весь возрастной спектр пород от R_2 до C_1 и $P-N_1$. В нижней части зоны тектонического меланжа наблюдаются в большом объёме окисленные разности пород – известняки карбона, алевролиты ор-

довика, филлиты и диамиктиты венда, в том числе и зоны минерализации с золотом (Зона 0).

Зоны минерализации окисленного типа, представляющие потенциально промышленный интерес [37], рассматриваются нами преимущественно как фрагменты мезозойской коры выветривания, деформированные и перемещённые альпийской тектоникой. В красноцветных мусорных глинах и конгломератобрекчиях $P-N_1$ на отдельных участках (Парковка), часто вблизи минерализованных зон окисления, установлены значительные по мощности (до 150 м) слабозолотоносные шлейфы рассеяния окисленных эродированных руд Кумтора (рис. 8).

Альпийские деформации наблюдаются по разрезу и выше Кумторского надвига, в структуре самой Кумторской зоны смятия и рудоносной зоны. Последовавшими альпийскими деформациями большая часть структуры месторождения превращена в «мегабрекчию». В пределах основной рудоносной зоны месторождения глыбы минерализованных пород, метасоматитов и руд разделены многочисленными тектоническими зонами, сложенными альпийскими тектонитами и рыхлыми «микробрекчиями» мощностью от 1 до 10 м. Часто альпийские рыхлые тектониты развиваются по тектоническим структурам, заложенным ранее, в палеозойское время (динамокласти-там и др.).

Согласно результатам проведённого структурного анализа нами выделяются как минимум шесть эпизодов тектонической активности (D1–D6), в течение которых происходило преобразование вмещающих пород месторождения и его структуры. Эти выводы развивают ранее проведённые исследования [23] и не противоречат в целом существующим моделям тектонической эволюции земной коры Тянь-Шаня [6, 10, 29, 38]. Выделяемые тектонические эпизоды происходили начиная с конца ордовика до четвертичного периода включительно (D1 – O_3-S ; D2 – $S-D$; D3 – C_3-P_1 ; D4 – P_2-T_1 ; D5 – T_3-K_2 ; D6 – N_2-Q_1, Q_2-Q_4). В результате сформировались рудовмещающая структура месторождения, минерализованные и рудные зоны, и впоследствии произошла деструк-

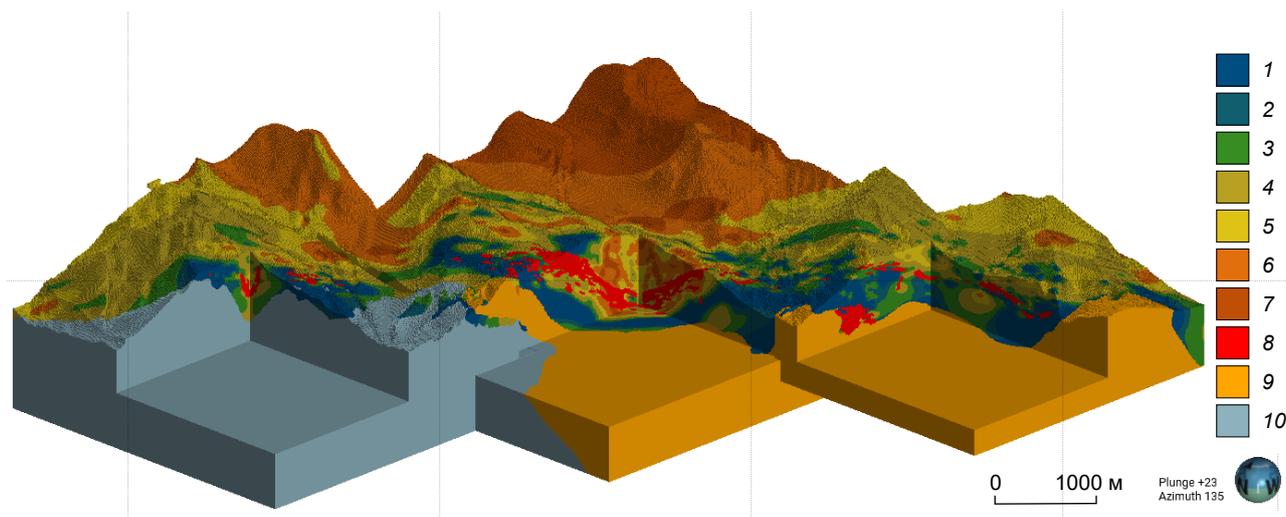


Рис. 7. 3D-модель показателя качества пород (RQD) в пределах рудоносной структуры месторождения Кумтор, без покровов моренных отложений и ледников, по данным геотехнических замеров при документации керна пробуренных скважин:

качество пород (%): 1 – породы разлома (< 5), 2 – очень плохое (5–10), 3 – плохое (10–20), 4 – ниже среднего (20–40), 5 – среднее (40–60), 6 – хорошее (60–80), 7 – очень хорошее (> 80); 8 – рудоносные зоны (Au > 0,5 г/т); 9 – палеоген-неогеновые глины и конглобрекции; 10 – песчаники нижнего карбона

Fig. 7. 3D model of the rock quality designation (RQD) within the ore-bearing structure of the Kumtor deposit, without the covers of moraine deposits and glaciers (according to geotechnical measurements during the bore-hole core documentation):

rock quality (%): 1 – fault rocks (< 5), 2 – very poor (5–10), 3 – poor (10–20), 4 – below average (20–40), 5 – average (40–60), 6 – good (60–80), and 7 – very good (> 80); 8 – ore-bearing zones (Au > 0.5 g/t); 9 – Paleogene-Neogene clays and conglobreccias; 10 – Lower Carboniferous sandstones

ция единой рудоносной системы до состояния, которое наблюдается в настоящее время.

Для каждого выделенного тектонического эпизода характерна своя структурная ассоциация. При этом сначала (D1–D2) преобладали пластические деформации больших глубин в условиях зеленосланцевой фации регионального метаморфизма; на этапах D3–D4 (формирование рудоносной структуры и рудообразование) – хрупко-пластические деформации с катаклизмом и милонитизацией в условиях стрессового динамометаморфизма; в последующем (D5–D6) – хрупкие деформации при выдвигании рудоносных зон к поверхности.

Обсуждение типа и генезиса месторождения Кумтор. Широкое развитие надвиговых структур, отсутствие «магматического очага», зеленосланцевая фация метаморфизма вмещающих пород и динамокластиты, де-силици-

фикация, карбонатизация и сульфидизация вмещающих пород, вкрапленные текстуры сульфидных руд, зональность оруденения – все эти признаки позволяют отнести месторождение Кумтор к орогенному типу [25, 26]. Месторождение Кумтор хорошо сопоставляется по основным позициям с такими известными месторождениями золота, как Мурунтау (Центральные Кызылкумы, Узбекистан), Сухой Лог, Олимпиадинское, Наталка (Россия). Разным для отдельно взятых месторождений является возраст вмещающих толщ, метаморфизма, магматизма и рудообразования [9, 13–16, 33]. На месторождениях Олимпиадинское и Сухой Лог обращает на себя внимание присутствие в составе руд и метасоматитов марганецсодержащих карбонатов, как на Кумторе, что может быть связующим звеном при разработке общей модели формирования этих месторождений.

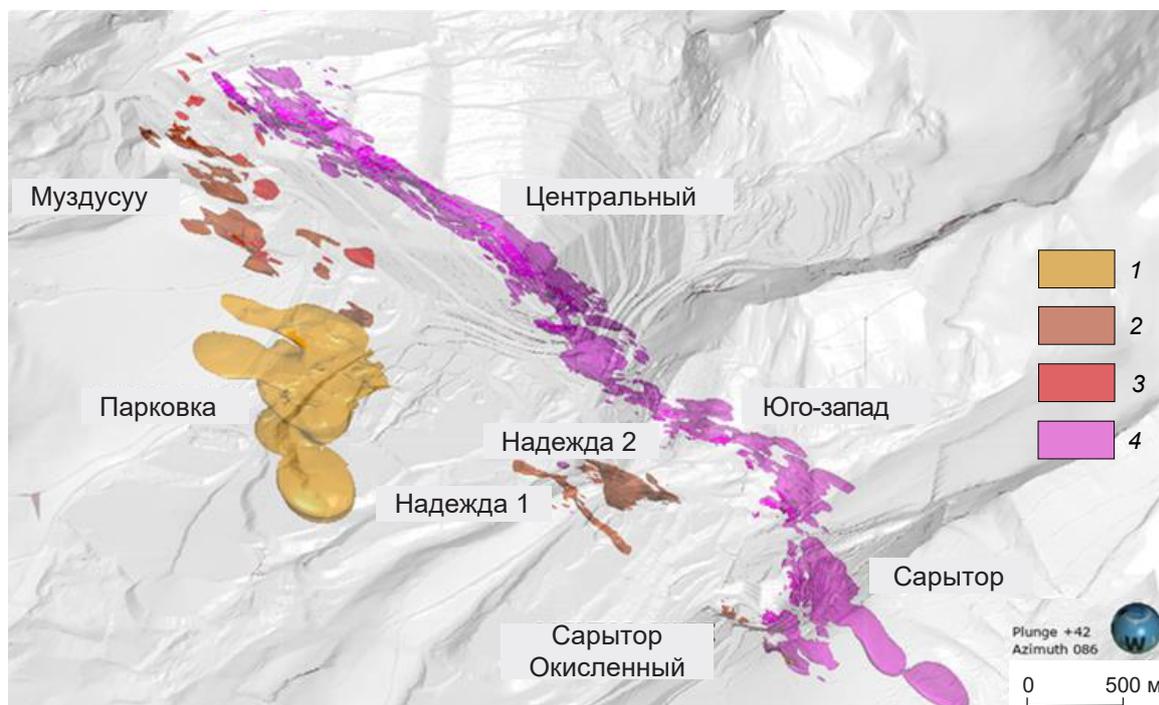


Рис. 8. 3D-местоположение доменов с разными типами минерализации золота в пределах участков Центральный (Центральный, Муздусуу, Парковка), Юго-Западный (Юго-Запад, Надежда 1, Надежда 2) и Сарытор (Сарытор, Сарытор Окисленный) на фоне карьеров, 3D-вид на восток:

1 – минерализация в отложениях $P-N_1$; 2 – окисленный тип минерализации в породах Зоны 0; 3 – сульфидный тип минерализации в породах Зоны 1; 4 – сульфидные руды (>1 г/т) основной рудоносной зоны месторождения

Fig. 8. 3D location of domains with different types of gold mineralization within the main sites Central (Central Quarry, Muzdusuu, Parking), Southwestern (South-West, Nadezhda 1, Nadezhda 2) and Sarytor (Sarytor, Sarytor Oxidized) on the background of quarries, 3D view toward the east:

1 – mineralization in $P-N_1$ deposits; 2 – oxidized type of mineralization in rocks of Zone 0; 3 – sulfide type of mineralization in rocks of Zone 1; 4 – sulfide ores ($Au >1$ g/t) of the main ore-bearing zone of the Kumtor deposit

Интересным фактом является также присутствие в составе пород рудовмещающих разрывов и структуры месторождений Наталка и Кумтор таких специфических образований, как диамиктиты.

Главные отличительные особенности месторождения Кумтор в ряду золоторудных объектов, локализованных в черносланцевых толщах, – преобладание руд пирит-(полевошпат)-карбонатного состава и отсутствие в рудах практически значимых количеств мышьяка, и особенно в форме арсенопирита. Наиболее близким к нему по геологическому стро-

ению и составу руд является месторождение Сухой Лог (Россия) [31, 33]. Среди тьянь-шаньских месторождений, на основании сравнения минералого-геохимических особенностей руд и состава метасоматитов, Кумтор близок к золоторудным месторождениям Узбекистана [7, 14]. Месторождение Кумтор, по нашему мнению, занимает промежуточное положение между известными месторождениями золота Мурунтау и Кочбулак.

Вероятно, это является отражением разных уровней единой вертикальной зональности формирования рудоносных зон в ряду выше-

упомянутых типов месторождений. Как известно, богатые золоторудные тела Мурунтау (калишпат-кварцевые метасоматиты с самородным золотом) приурочены к «линзе» высокотемпературных пород, претерпевших преобразования хлорит-биотитовой субфации зеленосланцевого метаморфизма, вплоть до начала амфиболитовой фации [14, 25]. Месторождение Кочбулак является представителем теллур-золотого оруденения эпитермального типа. Много сходства и в геолого-структурных позициях всех этих золоторудных объектов. На месторождении Кумтор в последнее время выявлены мощные (> 100 м) зоны пирротинизации филлитов – кристаллических сланцев висячем боку рудоносной структуры. Мощные зоны пирротинизации описаны и на Мурунтау [14], только ниже позиции рудоносных зон.

По мнению Н. К. Курбанова [9], месторождение Кумтор располагается на 1,5–2 км выше кровли скрытого массива позднепалеозойских гранитоидов. Гипотетическая связь оруденения Кумтора с магматизмом описывается также в работе [32]. Логичнее предполагать удалённую связь новообразований, наблюдаемых на месторождении Кумтор, с щелочным магматизмом, проявления которого известны [2] пока только в пределах Южного Тянь-Шаня (P_2 – T_1). К северо-востоку от месторождения, на правом борту ледника Петрова, в контурах геохимических ореолов золота и вольфрама известны дайки щелочных сиенитов (бостонитов) предположительно возраста P_1 . Но в связи с щелочным магматизмом описаны пока только месторождения золота медно-порфирового и карлинского типов [30].

Наиболее приближено к Кумтору по типу метасоматитов Рябиновское золото-медно-порфировое месторождение, приуроченное к щелочному массиву на Алданском щите [8]. Много месторождений золота в связи с щелочным магматизмом выявлены в зонах герцинской и мезозойской тектоно-магматической активизации Северо-Китайского кратона [34]. Но и здесь нет прямого соответствия, тем более что на рудоносных участках Кумтора отсутствуют какие-либо интрузивные проявления. Карбо-

натный метасоматоз и золото-теллурид-пиритовые руды, локализованные в чёрных сланцах, наблюдаются на месторождении Сухой Лог [16, 31, 33].

Относительно возраста формирования золотого оруденения по месторождению Кумтор данных мало. Первые единичные радиологические определения (K/Ar метод) по серициту из филлитов [4, 18] дали цифры 430–365 млн лет, что соответствует времени регионального метаморфизма вмещающих пород (S–D). Эти же авторы оценивают возраст формирования оруденения по серицитам (K/Ar) и пиритам (Pb/Pb) в интервале 280–170 млн лет (P_1 – J_2). Недавно появились новые данные по серициту (Ar/Ar), указывающие на возраст формирования серицитолитов Кумтора 284–288 млн лет [32]. Это примерно соответствует возрасту внедрения постколлизийных гранитоидов (C_3 – P_1) Срединного и Южного Тянь-Шаня.

Позиция месторождения Кумтор хорошо вписывается в определённую часть модели формирования орогенных месторождений в условиях сходящихся окраин плит, предложенной Д. Гровесом [27]. По этой модели рудообразующая структура месторождения приурочена к зоне коллизии в позиции «континент-континент» [37] и сформировалась в позднепалеозойскую (C_3 – P_1) орогенную стадию развития региона. Это время характеризуется возобновлением движений Ишим-Срединно-Тяньшанского микроконтинента в сторону Кыргызско-Казахского континента. Тогда же происходит активная субдукция коры Туркестанского палеоокеана под Ишим-Срединно-Тяньшанский микроконтинент и сжатие последнего с южной стороны. В условиях «зажатого клина» при двухстороннем давлении предполагается переплавление на глубине фрагментов литосферы и подъём в этом месте границы астеносферы. Это объясняет особенности вещественного состава руд месторождения, в частности наличие большого количества новообразованных карбонатов. Согласно модели рудообразующие компоненты берут своё начало в зоне «переработки» блоков литосферы, и существенное количество CaO и CO₂ образуется в результате диссоциации седиментогенных карбонатов.



Список литературы

1. *Аникин С. И.* Геология и минералого-геохимические особенности золото-теллур-редкометалльного оруденения в углеродистых толщах венда Кумторского рудного поля (Срединный Тянь-Шань) : автореф. дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук. – Бишкек : БПИ, 1992. – 20 с.
2. *Баженов М. Л., Буртман В. С.* Позднепалеозойские деформации Тянь-Шаня // *Геотектоника.* – № 3. – 1997. – С. 56–65.
3. *Богдецкий В. Н., Матвеев В. Г., Туманов Б. М.* Геологическая позиция золото-вольфрамового оруденения в углеродистых сланцах на примере одного месторождения Тянь-Шаня // *Стратиформные месторождения цветных и редких металлов в черносланцевых формациях.* – Фрунзе [Бишкек] : ФПИ, 1981. – С. 101–105.
4. *Боголепов В. Г., Найдёнов Б. М.* Генетические особенности формирования метаморфогенного золоторудного месторождения в Киргизии // *Тезисы докладов V совещания «Метаморфогенное рудообразование низких фаций метаморфизма складчатых областей фанерозоя», ч. I.* – Львов, 1986. – С. 84–85.
5. *Дзялошинский В. Г., Емельянов С. И., Романов В. И.* Роль гидротермального и дислокационного метаморфизма в формировании вольфрам-золото-сульфидных месторождений Срединного Тянь-Шаня и особенности их поисков // *Труды ЦНИГРИ, 1988.* – С. 53–57.
6. *Жуков Ю. В.* Нижнепалеозойские формации Срединного Тянь-Шаня // *Новые данные по стратиграфии Тянь-Шаня.* – Фрунзе [Бишкек] : Илим, 1965. – С. 32–56.
7. *Конев Р. И.* Парагенезисы теллуридов и селенидов в золоторудных месторождениях Узбекистана // *Материалы годичной сессии МО РМО «Роль минералогии в познании процессов рудообразования».* – М. : ИГЕМ, 2007. – С. 202–206.
8. *Кочетков А. Я.* Рудоносность щелочных массивов Алданского щита. Рябиновское медно-золото-порфиоровое месторождение // *Тихоокеанская геология.* – 2006. – Т. 25, № 1. – С. 62–73.
9. *Курбанов Н. К.* Геолого-генетические модели формирования золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах // *Рудоносность осадочных комплексов.* – Л. [СПб.], 1988. – С. 138–147.
10. *Максумова Р. А., Дженчураева А. В., Березанский А. В.* Структура и эволюция покровно-складчатого сооружения киргизского Тянь-Шаня // *Геология и геофизика.* – 2001. – Т. 42, № 10. – С. 1444–1452.
11. *Миколайчук Г. А., Усманов И. А., Шевкунов А. Г.* Золото месторождения Кумтор (Срединный Тянь-Шань) // *Материалы Всероссийской конференции «Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования, задачи прикладных исследований».* – М. : ИГЕМ РАН, 2010. – Т. 2. – С. 52–54.
12. *Никоноров В. В.* Новый тип золотого оруденения в Кыргызстане // *Геология рудных месторождений.* – 1993. – Т. 35, № 5. – С. 450–454.
13. *Новожилов Ю. И., Гаврилов А. М.* Золото-сульфидные месторождения в углеродисто-терригенных толщах. – М. : ЦНИГРИ, 1999. – 175 с.
14. *Проценко В. Ф.* Метаморфизм и рудогенез в черносланцевых толщах Средней Азии. – Ташкент : ГП ИМР, 2008. – 116 с.
15. *Рафаилович М. С., Шевкунов А. Г., Колоскова С. М., Ежков Ю. Б.* Вольфрамовая минерализация в крупных месторождениях золота в углеродисто-терригенных толщах Средней Азии // *Геология и минеральные ресурсы.* – 2013. – № 3. – С. 16–28.
16. *Рундквист И. К., Бобров В. А., Смирнова Т. Н. [и др.].* Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района // *Геология рудных месторождений.* – 1992. – Т. 34, № 6. – С. 3–15.
17. *Сагындыков К. С., Дзялошинский В. Г., Варгуни-на Н. И. [и др.].* Геотектоническая позиция, состав и рудоносность углеродистой терригенно-флишоидной формации венда Тянь-Шаня // *Стратифицированные рудоносные формации докембрия и раннего палеозоя Тянь-Шаня.* – Фрунзе [Бишкек] : Илим, 1989. – С. 14–27.
18. *Трифонов Б. А., Гончаренко А. В., Перельман И. М.* Новый тип вольфрам-золоторудного оруденения в вендских углеродистых отложениях // *Тезисы докладов Всесоюзного совещания «Комплексное использование вольфрамовых месторождений в СССР».* Раздел III. – Л. [СПб.], 1986. – С. 36–37.
19. *Шевкунов А. Г., Башкиров А. П.* Условия зарождения минералообразующей системы и динамика её развития на примере месторождения Кумтор // *Рудообразующие процессы: от генетических концепций к прогнозу и открытию новых рудных провинций и месторождений.* *Материалы Всероссийской конференции.* – М. : ИГЕМ РАН, 2013. – С. 173–174.

20. Шевкунов А. Г., Башкиров А. П. Расчёт баланса (привноса/выноса) основных петрогенных компонентов в процессе рудообразования на месторождении золота Кумтор (Срединный Тянь-Шань) // Месторождения стратегических металлов: закономерности размещения, источники вещества, условия и механизмы образования. Материалы докладов Всероссийской конференции. – М. : ИГЕМ РАН, 2015. – С. 153–154.
21. Шевкунов А. Г., Масленников В. В., Ларж Р. Р., Масленникова С. П., Данюшевский Л. В. Геохимические особенности разновидностей пирита золоторудного месторождения Кумтор, Кыргызстан // Минералогия. – 2018. – Т. 4, № 4. – С. 22–40.
22. Шевкунов А. Г., Гуда А. А., Скорынина А. А., Макнайт С. В. Исследование минерального состава руд месторождения Кумтор (Срединный Тянь-Шань) методами QXRD и XRF // Минералогия. – Т. 8, № 3. – 2022. – С. 79–101.
23. Abeleira A., Ansdell K. M., Thomas D., Heaman L., Melrose D. L. Geology and Structural Evolution of the Kumtor Region, Tien Shan, Kyrgyzstan // Gold in 2000: Littleton, Poster Session Extended Abstracts Volume / Society of Economic Geologist; eds. L. A. Bucci, J. L. Mair. – 2000.
24. Bierlein F. P., Arne D., McKnight S., Lu J., Reeves S., Besanko J., Marek J., Cooke D. R. Wall-rock Petrology and Geochemistry in Alteration halos Associated with Mesothermal Gold Mineralization, Central Victoria, Australia // Economic Geology. – 2000. – V. 95. – P. 283–311.
25. Gold geology and deposit types : pdf-презентация – краткий курс по месторождениям золота // PDAC International Convention / PDAC and SEG Short Course. – Toronto, Canada, 2011. – 206 p.
26. Groves D. I., Goldfarb R. J. [et al.]. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance // Economic Geology. – 2003. – V. 98. – P. 1–29.
27. Groves D. I., Bierlein F. P. Geodynamic settings of mineral deposit systems // Journal of the Geological Society. – 2007. – V. 164. – P. 19–30.
28. Ivanov S. M., Ansdell K. M., Melrose D. L. Ore texture and stable isotope constraints on ore deposition mechanisms at the Kumtor lode gold deposit // Gold in 2000: Littleton, Poster Session Extended Abstracts Volume / Society of Economic Geologists; eds. L. A. Bucci, J. L. Mair. – 2000. – P. 47–52.
29. Jenchuraeva R. J., Nikonorov V. V., Litvinov P. The Kumtor gold deposit // Paleozoic geodynamics and gold deposits in the Kyrgyz Tien Shan: IGCP-373 Field Conference Excursion Guidebook. – 2001. – P. 139–152.
30. Jensen E. P., Barton M. D. Gold deposits related to alkaline magmatism // SEG Reviews. – 2000. – V. 13, Ch. 8. – P. 279–314.
31. Large R. R., Maslennikov V. V. [et al.]. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia // Economic Geology. – 2007. – V. 102. – P. 1233–1267.
32. Mao J., Konopelko D., Seltmann R., Lehmann B. [et al.]. Postcollisional age of the Kumtor gold deposit and timing of Hercynian events in the Tien Shan, Kyrgyzstan // Economic Geology. – 2004. – V. 99. – P. 1771–1780.
33. Maslennikov V. V., Large R. R., Shevkunov A. G., Simonov V. A. Evolution of the Sukhoi Log and Kumtor gold ore giants // Abstract of CERCAMS14 & MDSC's34 Annual Meeting, 2011. Section XIII. – P. 4–5.
34. Nie Feng-Jun, Wu Cheng-Yu. Gold deposits related to alkaline igneous rocks in North China Craton, People's Republic of China // Global Tectonics and Metallogeny. – 1998. – V. 6. – P. 159–171.
35. Reich M., Kesler S. E. [et al.]. Solubility of gold in arsenian pyrite // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2005. – V. 69, № 11. – P. 2781–2796.
36. Shoude Ch., Guangrui W., Bureau X. [et al.]. Metallogenic Maps of Precious and Nonferrous Metallic Ore in Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions. – 1994.
37. Technical Report on the Kumtor Mine, Kyrgyz Republic. NI 43-101 Technical Report, Centerra Gold Inc. 2021. P. 7-1–8-5.
38. Windley B. F., Alexeiev D., Xiao W. [et al.]. Tectonic models for accretion of Central Asian Orogenic Belt // Journal of the Geological Society. – 2007. – V. 164. – P. 31–47.



References

- Anikin S. I. Geologiya i mineralogo-geokhimicheskie osobennosti zoloto-tellur-redkometal'nogo orudneniya v uglerodistykh tolshchakh venda Kumtorskogo rudnogo polya (Sredinnyi Tyan'-Shan') [Geology and mineralogical and geochemical features of gold-tellurium-rare-metal mineralization in carbonaceous strata of the Vendian Kumtor ore field (Middle Tien Shan): Extended abstract of candidate's thesis], Bishkek, BPI Publ., 1992, 20 p.
- Bazhenov M. L., Burtman V. S. PozdnePaleozoiskie deformatsii Tyan'-Shanya [Late Paleozoic deformations of the Tien Shan], *Geotektonika [Geotectonics]*, No 3, 1997, pp. 56–65. (In Russ.)
- Bogdetskii V. N., Matveenkov V. G., Tumanov B. M. Geologicheskaya pozitsiya zoloto-vol'framovogo orudneniya v uglerodistykh slantsakh na primere odnogo mestorozhdeniya Tyan'-Shanya [Geological position of gold-tungsten mineralization in carbonaceous shales on the example of one Tien Shan deposit], *Stratiformnye mestorozhdeniya tsvetnykh i redkikh metallov v chernoslantsevnykh formatsiyakh [Stratiform deposits of non-ferrous and rare metals in black shale formations]*, Frunze, FPI Publ., 1981, pp. 101–105.
- Bogolepov V. G., Naidenov B. M. Geneticheskie osobennosti formirovaniya metamorfogenno zolotorudnogo mestorozhdeniya v Kirgizii [Genetic features of the formation of a metamorphogenic gold deposit in Kyrgyzstan], *Tezisy dokladov V soveshchaniya "Metamorfogennoe rudoobrazovanie nizkikh fatsii metamorfizma skladchatykh oblastei fanerozoza", ch. I [Abstracts of the V meeting "Metamorphogenic ore formation of low facies of metamorphism of folded Phanerozoic regions", Part I]*, L'vov, 1986, pp. 84–85.
- Dzhaloshinskii V. G., Emel'yanov S. I., Romanov V. I. Rol' gidrotermal'nogo i dislokatsionnogo metamorfizma v formirovanii vol'fram-zoloto-sul'fidnykh mestorozhdenii Sredinnogo Tyan'-Shanya i osobennosti ikh poiskov [The role of hydrothermal and dislocation metamorphism in the formation of tungsten-gold-sulfide deposits of the Middle Tien Shan and features of their prospecting], *Trudy TsNIGRI [Proceedings of TsNIGRI]*, 1988, pp. 53–57.
- Zhukov Yu. V. Nizhnepaleozoiskie formatsii Sredinnogo Tyan'-Shanya [Lower Paleozoic formations of the Middle Tien Shan], *Novye dannye po stratigrafii Tyan'-Shanya [New data according to the stratigraphy of the Tien Shan]*, Frunze, Ilim Publ., 1965, pp. 32–56.
- Koneev R. I. Paragenezisy telluridov i selenidov v zolotorudnykh mestorozhdeniyakh Uzbekistana [Paragenesis of tellurides and selenides in gold deposits of Uzbekistan], *Materialy godichnoi sessii MO RMO "Rol' mineralogii v poznanii protsessov rudoobrazovaniya" [Materials of the annual session of the Ministry of Defense of the Republic of Uzbekistan "The role of mineralogy in the study of ore formation processes"]*, Moscow, IGEM Publ., 2007, pp. 202–206.
- Kochetkov A. Ya. Rudonosnost' shchelochnykh massivov Aldanskogo shchita. Ryabinovskoe medno-zoloto-porfirovoe mestorozhdenie [Ore potential of alkaline massifs of the Aldan shield. Ryabinovsky copper-gold-porphyry deposit], *Tikhookeanskaya geologiya [Russian Journal of Pacific Geology]*, 2006, V. 25, No 1, pp. 62–73. (In Russ.)
- Kurbanov N. K. Geologo-geneticheskie modeli formirovaniya zolotorudnykh mestorozhdenii v uglerodisto-terrigennykh kompleksakh [Geological and genetic models of the formation of gold deposits in carbon-terrigenous complexes], *Rudonosnost' osadochnykh kompleksov [Ore-bearing sedimentary complexes]*, Leningrad, 1988, pp. 138–147.
- Maksumova R. A., Dzhenchuraeva A. V., Berezanskii A. V. Struktura i evolyutsiya pokrovno-skladchatogo sooruzheniya kirgizskogo Tyan'-Shanya [Structure and evolution of the cover-folded structure of the Kyrgyz Tien Shan], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2001, V. 42, No 10, pp. 1444–1452. (In Russ.)
- Mikolaichuk G. A., Usmanov I. A., Shevkunov A. G. Zoloto mestorozhdeniya Kumtor (Sredinnyi Tyan'-Shan') [Gold deposits of Kumtor (Middle Tien Shan)], *Materialy Vserossiiskoi konferentsii "Samorodnoe zoloto: tipomorfizm mineral'nykh assotsiatsii, usloviya obrazovaniya, zadachi prikladnykh issledovaniy" [Materials of the All-Russian conference "Native gold: typomorphism of mineral associations, conditions of formation, tasks of applied research"]*, Moscow, IGEM RAN Publ., 2010, V. 2, pp. 52–54.
- Nikonov V. V. Novyi tip zolotogo orudneniya v Kirgizstane [A new type of gold mineralization in Kyrgyzstan], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*, 1993, V. 35, No 5, pp. 450–454. (In Russ.)
- Novozhilov Yu. I., Gavrilov A. M. Zoloto-sul'fidnye mestorozhdeniya v uglerodisto-terrigennykh tolshchakh [Gold-sulfide deposits in carbon-terrigenous strata], Moscow, TsNIGRI Publ., 1999, 175 p.

14. Protsenko V. F. Metamorfizm i rudogenez v chernoslantsevykh tolshchakh Srednei Azii [Metamorphism and ore genesis in the black shale strata of Central Asia], Tashkent, GP IMR Publ., 2008, 116 p.
15. Rafailovich M. S., Shevkunov A. G., Koloskova S. M., Ezhkov Yu. B. Vol'framovaya mineralizatsiya v krupnykh mestorozhdeniyakh zolota v uglerodistoterrigennykh tolshchakh Srednei Azii [Tungsten mineralization in large gold deposits in carbon-terrigenous strata of Central Asia], *Geologiya i mineral'nye resursy* [Geology and mineral resources], 2013, No 3, pp. 16–28. (In Russ.)
16. Rundkvist I. K., Bobrov V. A., Smirnova T. N. [et al.]. Etapy formirovaniya Bodaibinskogo zolotorudnogo raiona [Stages of formation of the Bodaibinsky gold ore district], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 1992, V. 34, No 6, pp. 3–15. (In Russ.)
17. Sagyndykov K. S., Dzyaloshinskii V. G., Varguni-na N. I. [et al.]. Geotektonicheskaya pozitsiya, sostav i rudonosnost' uglerodistoi terrigenno-flishoidnoi formatsii venda Tyan'-Shanya [Geotectonic position, composition and ore content of the carbonaceous terrigenous-flyschoid formation of the Vendian Tien-Shan], *Stratifikatsionnyye rudonosnye formatsii dokembriya i rannego paleozoya Tyan'-Shanya* [Stratified ore-bearing formations of the Precambrian and Early Paleozoic of the Tien Shan], Frunze, Ilim Publ., 1989, pp. 14–27.
18. Trifonov B. A., Goncharenko A. V., Perel'man I. M. Novyi tip vol'fram-zolotorudnogo orudneniya v vendskikh uglerodistykh otlozheniyakh [A new type of tungsten-gold mineralization in Vendian carbonaceous deposits], *Tezisy dokladov Vsesoyuznogo soveshchaniya "Kompleksnoe ispol'zovanie vol'framovykh mestorozhdenii v SSSR". Razdel III* [Abstracts of reports of the All-Union Meeting "Integrated use of tungsten deposits in the USSR". Section III], Leningrad, 1986, pp. 36–37.
19. Shevkunov A. G., Bashkirov A. P. Usloviya zarozhdeniya mineralobrazuyushchei sistemy i dinamika ee razvitiya na primere mestorozhdeniya Kumtor [Conditions of the origin of the mineral-forming system and the dynamics of its development on the example of the Kumtor deposit], *Rudoobrazuyushchie protsessy: ot geneticheskikh kontseptsii k prognozu i otkrytiyu novykh rudnykh provintsii i mestorozhdenii. Materialy Vserossiiskoi konferentsii* [Ore-forming processes: from genetic concepts to the prediction and discovery of new ore provinces and deposits. Materials of the All-Russian Conference], Moscow, IGEM RAN Publ., 2013, pp. 173–174.
20. Shevkunov A. G., Bashkirov A. P. Raschet balansa (privnosa/vynosa) osnovnykh petrogennykh komponentov v protsesse rudoobrazovaniya na mestorozhdenii zolota Kumtor (Sredinnyi Tyan'-Shan') [Calculation of the balance (introduction/removal) of the main petrogenic components in the process of ore formation at the Kumtor gold deposit (Middle Tien Shan)], *Mestorozhdeniya strategicheskikh metallov: zakonomernosti razmeshcheniya, istochniki veshchestva, usloviya i mekhanizmy obrazovaniya. Materialy dokladov Vserossiiskoi konferentsii* [Deposits of strategic metals: patterns of placement, sources of matter, conditions and mechanisms of formation. Materials of the reports of the All-Russian Conference], Moscow, IGEM RAN Publ., 2015, pp. 153–154.
21. Shevkunov A. G., Maslennikov V. V., Larzh R. R., Maslennikova S. P., Danyushevskii L. V. Geokhimicheskie osobennosti raznovidnostei piritazolotorudnogo mestorozhdeniya Kumtor, Kyrgyzstan [Geochemical features of pyrite types of the Kumtor gold deposit, Kyrgyzstan], *Mineralogiya* [Mineralogy], 2018, V. 4, No 4, pp. 22–40. (In Russ.)
22. Shevkunov A. G., Guda A. A., Skorynina A. A., Maknait S. V. Issledovanie mineral'nogo sostava rud mestorozhdeniya Kumtor (Sredinnyi Tyan'-Shan') metodami QXRD i XRF [Studies of mineral composition of ores of the Kumtor deposit (Central Tien Shan) by QXRD and XRF methods], *Mineralogiya* [Mineralogy], V. 8, No 3, 2022, pp. 79–101. (In Russ.)
23. Abeleira A., Ansdell K. M., Thomas D., Heaman L., Melrose D. L. Geology and Structural Evolution of the Kumtor Region, Tien Shan, Kyrgyzstan, Gold in 2000: Littleton, Poster Session Extended Abstracts Volume, *Society of Economic Geologist*, eds. L. A. Bucci, J. L. Mair, 2000.
24. Bierlein F. P., Arne D., McKnight S., Lu J., Reeves S., Besanko J., Marek J., Cooke D. R. Wall-rock Petrology and Geochemistry in Alteration halos Associated with Mesothermal Gold Mineralization, Central Victoria, Australia, *Economic Geology*, 2000, V. 95, pp. 283–311.
25. *Gold geology and deposit types: pdf presentation – a short course on the birth of gold*, PDAC International Convention, Toronto, Canada, 2011, 206 p.
26. Groves D. I., Goldfarb R. J. [et al.]. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance, *Economic Geology*, 2003, V. 98, pp. 1–29.



27. Groves D. I., Bierlein F. P. Geodynamic settings of mineral deposit systems, *Journal of the Geological Society*, 2007, V. 164, pp. 19–30.
28. Ivanov S. M., Ansdell K. M., Melrose D. L. Ore texture and stable isotope constraints on ore deposition mechanisms at the Kumtor lode gold deposit, Gold in 2000: Littleton, Poster Session Extended Abstracts Volume, *Society of Economic Geologist*, eds. L. A. Bucci, J. L. Mair, pp. 47–52.
29. Jenchuraeva R. J., Nikonorov V. V., Litvinov P. The Kumtor gold deposit, Paleozoic geodynamics and gold deposits in the Kyrgyz Tien Shan: IGCP-373 Field Conference Excursion Guidebook, 2001, pp. 139–152.
30. Jensen E. P., Barton M. D. Gold deposits related to alkaline magmatism, *SEG Reviews*, 2000, V. 13, No 8, pp. 279–314.
31. Large R. R., Maslennikov V. V. [et al.]. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia, *Economic Geology*, 2007, V. 102, pp. 1233–1267.
32. Mao J., Konopelko D., Seltmann R., Lehmann B. [et al.]. Postcollisional age of the Kumtor gold deposit and timing of Hercynian events in the Tien Shan, Kyrgyzstan, *Economic Geology*, 2004, V. 99, pp. 1771–1780.
33. Maslennikov V. V., Large R. R., Shevkunov A. G., Simonov V. A. Evolution of the Sukhoi Log and Kumtor gold ore giants, *Abstract of CERCAMS14 & MDSG's 34 Annual Meeting, 2011. Section XIII*, pp. 4–5.
34. Nie Feng-Jun, Wu Cheng-Yu. Gold deposits related to alkaline igneous rocks in North China Craton, People's Republic of China, *Global Tectonics and Metallogeny*, 1998, V. 6, pp. 159–171.
35. Reich M., Kesler S. E. [et al.]. Solubility of gold in arsenian pyrite, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, V. 69, No 11, pp. 2781–2796.
36. Shoude Ch., Guangrui W., Bureau X. [et al.]. Metallogenic Maps of Precious and Nonferrous Metallic Ore in Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions, 1994.
37. Technical Report on the Kumtor Mine, Kyrgyz Republic. NI 43-101 Technical Report, Centerra Gold Inc., 2021, pp. 7-1–8-5.
38. Windley B. F., Alexeiev D., Xiao W. [et al.]. Tectonic models for accretion of Central Asian Orogenic Belt, *Journal of the Geological Society*, 2007, V. 164, pp. 31–47.

Шевкунов Анатолий Геннадьевич (anatoly_shevkunov@mail.ru)

кандидат геол.-минерал. наук, геолог-консультант геологоразведочного отдела

Корницкий Антон Игоревич

кандидат геол.-минерал. наук, менеджер геологоразведочного отдела

Башкиров Анатолий Павлович

геолог-консультант геологоразведочного отдела

Айдаркулов Тынчтыкбек Нартаевич

заместитель менеджера геологоразведочного отдела

Кумтор Голд Компани, г. Бишкек, Кыргызская Республика