

УДК 553.411

© М.М.Константинов, 2006

МОДЕЛИ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НОВЫХ И НЕТРАДИЦИОННЫХ ТИПОВ

М.М.Константинов (ЦНИГРИ Роснедра МПР России)

Обращение к опыту зарубежных стран, в первую очередь США, Канады, Австралии, Китая, где выявлены, оценены и вовлечены в промышленное освоение значительные по масштабам месторождения новых и нетрадиционных типов, представляется перспективным для решения задачи воспроизводства минерально-сырьевой базы золота России с учетом значительного разнообразия исходных геологических обстановок: от древних зеленокаменных поясов в архейско-протерозойских блоках до третичных вулканоплутонических поясов Тихоокеанской окраины.

Среди месторождений подвижных поясов наиболее актуальны поиски золото-кварцевых месторождений типа Бендиго (Южная Австралия). Месторождения этого типа, в основном отработанные в начале прошлого века, благодаря своим масштабам (добыто около 650 т Au), высоким содержаниям металла и простой технологии обогащения руд, представляют весьма привлекательный прототип для поисков. На юге Австралии месторождения локализованы в песчано-глинистых толщах (турбидитах) девонского возраста и в региональном плане контролируются системой синклиналий и разломами близмеридионального простирания. В последние десятилетия на глубоких горизонтах рудного поля Бендиго вскрыты слепые стратиформные залежи многоярусного строения [6], что значительно увеличивает перспективы этого региона.

Изучение однотипных, хотя и небольших по масштабам, месторождений Дуэт-Бриндакитской группы в Южном Верхоянье позволило установить их приуроченность к турбидитовым песчано-глинистым образованиям, продуктивному верхнекаменноугольному–нижнепермскому стратоуровню и обосновать их гидротермально-осадочно-метаморфический генезис. Общие признаки месторождений этой группы: приуроченность к турбидитовой формации; контроль синклиноными прогибами и продольными разломами; конформное многоярусное строение рудных залежей; существенно кварцевый состав легкообогащаемых рудных тел со свободным золотом.

Работами И.С.Гольдберга, Г.Я.Абрамсона и В.Л.Лося [1] на рудном поле Бендиго доказано наличие широких ореолов выноса золота из вмещающих пород (рис. 1), что может служить обоснованием метаморфогенной природы руд расположенных там месторождений. Огромные территории Северо-Востока России, включая Якутию, Магаданскую область и Чукотку, а также протерозойский комплекс Ленской провинции перспективны, в первую очередь, на выявление крупных стратиформных золото-кварцевых месторождений.

Другую значительную группу составляют крупнообъемные или крупнотоннажные месторождения прожилково-вкрапленных руд. Большое значение имеют месторождения группы Карлин (штат Невада, США).

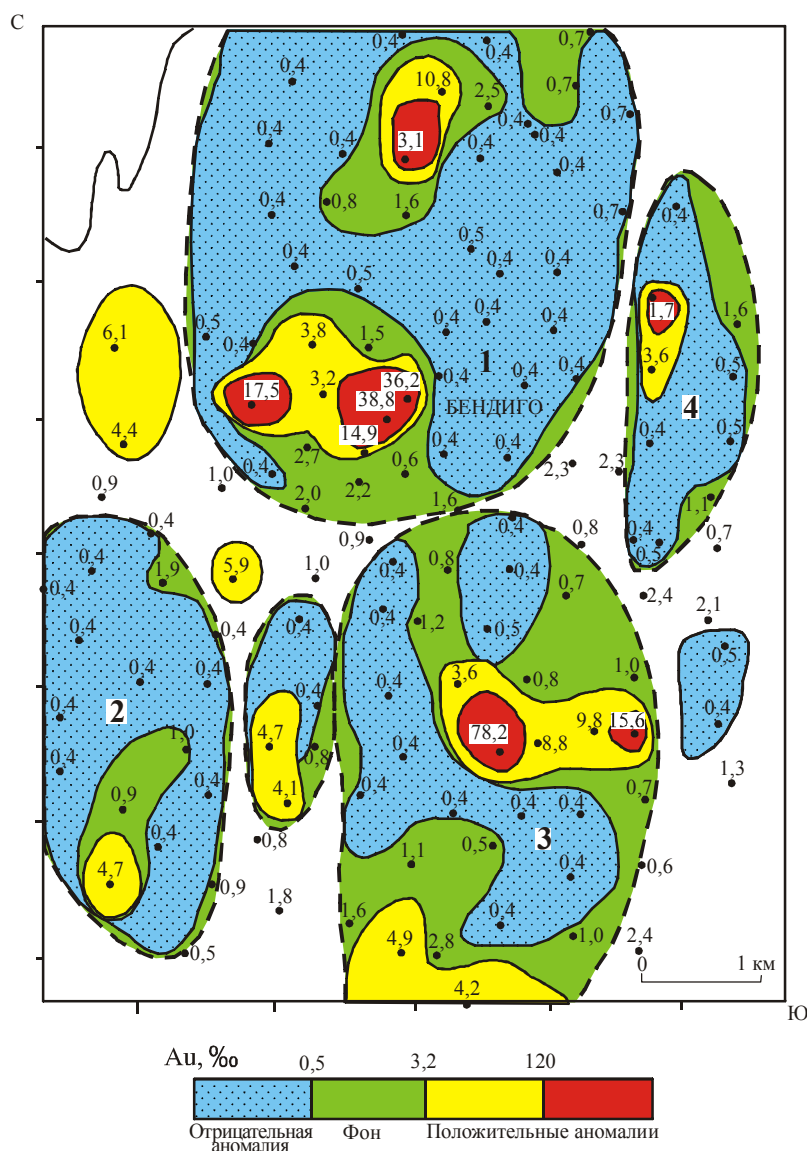


Рис. 1. Распределение концентраций золота в породах в районе месторождения Бендигго, по И.С.Гольдбергу и др., 2004:

геохимические системы минеральных отложений: 1 — Бендигго, 2 — Малдон, 3 — Калсмайн-Миртл-Крик, 4 — Фостервилль

Основными прогнозно-поисковыми критериями и признаками оруденения карлинского типа можно считать: положение в зоне сопряжения эв- и миогеосинклинальных структур (пассивная континентальная окраина), осложненных валлообразным поднятием (возможно, форма проявления глубинного разлома); приуроченность к известкостово-глинистым фациям флишеидных и турбидитовых комплексов; приуроченность к приподнятым блокам, по которым рудовмещающая толща выводится на поверхность; наличие горизонтов декарбонизации и окварцевания, иногда безрудных в «че-

хольных» частях, развивающихся по мергелистым и доломитовым горизонтам; выделения в трещинках реальгара, аурипигмента и углеродистого вещества.

О генезисе месторождений карлинской группы в публикациях американских геологов высказаны разнообразные гипотезы, и, скорее всего, эти месторождения полигенны. Однако после личного ознакомления и изучения литературных материалов для большой группы крупнообъемных месторождений с прожилково-вкрапленными рудами и низкими содержаниями металла автору наиболее вероят-

ной представляется осадочная или гидротермально-осадочная модель рудообразования [2].

Намечено три этапа формирования руд: накопление первично-осадочных или гидротермально-осадочных руд вдоль зоны глубинного разлома, разделяющего мегаструктуры с эв- и миогеосинклинальным режимом развития; возможно, одновременное формирование в рудоподводящих разломах богатых крутопадающих залежей, таких как месторождение Мейкл; внедрение в ларамийское время вдоль этой зоны интрузивных штоков и частичная перегруппировка рудного вещества с образованием небольших золото-скарновых месторождений; образование в третичное время протяженных зон трещиноватости северо-западного простирания, диагональных простирания (тренды Карлин и Кортез), и формирование мощных зон аргиллизитов с наложенной ртутно-сурьмяной минерализацией, сопровождающейся переотложением золота вдоль зон метасоматоза и их частичным обогащением.

Дополнительные материалы по месторождениям карлинского типа в Центральном Перу (район Варикоча) [3] показывают, что на них могут отсутствовать типичные для штата Невада мощные зоны аргиллизитов с киноварно-реальгарной ассоциацией и, вероятно, регенерированным золотом. Минерализация кварца, родохрозита, пирита, кальцита, серицита и барита сосредоточена в трубообразных телах среди верхнемеловых углеродистых известняков вблизи третичных монзонитовых штоков. Содержания Au около 3 г/т (отношение Ag/Au около 2,5), Te 4 г/т, Mo 12 г/т, Cu 0,1–0,2%. Ресурсы месторождения оцениваются в 200 т Au. Наличие углеродистых фаций известняков и экзоконтактовые ореолы монзонитовых интрузий становятся в данном случае основными поисковыми критериями.

В качестве основного метода поисков эффективна геологическая съемка, однако для выявления неэродированных частей рудоносной формации необходимы поисковое бурение и специальные палеотектонические и литолого-фациальные реконструкции.

Заслуживает внимания месторождение Гаогун на юге Китая (провинция Гуангдун), представленное серией зон милонитов в протерозойской толще слюдяных сланцев и гнейсов (рис. 2, 3). Зоны милонитов имеют мощность около 40 м, протяженность 450 м и крутое падение. В них развита прожилково-вкрапленная сульфидная минерализация, связанная с этапом наложенных и, как подчеркивают исследователи этого месторождения [4], хрупких деформаций. Прожилки имеют прерывистый характер, а размер вкраплений сульфидов, среди которых преобладает халькопирит, колеблется в пределах 0,05–0,005 мм. Содержание Au в оруденелых милонитах, являющихся в настоящее время объектом отработки, от 1 до 73 г/т. В то же время, около половины всего объема милонитов не минерализованы, что подтверждает наложенный характер золото-сульфидной минерализации. Процессы выветривания способны замаскировать выходы на поверхность оруденелых милонитов, которые могут быть пропущены даже в хорошо изученных золоторудных районах, в связи с чем это месторождение и представляет интерес как возможный объект для поисков.

Поиски подобных месторождений также могут оказаться эффективными в разнообразных обстановках развития интенсивных разрывных дислокаций, связанных с тектоническим сжатием, свойственным позднеорогенным или позднеколлизионным этапам развития территорий.

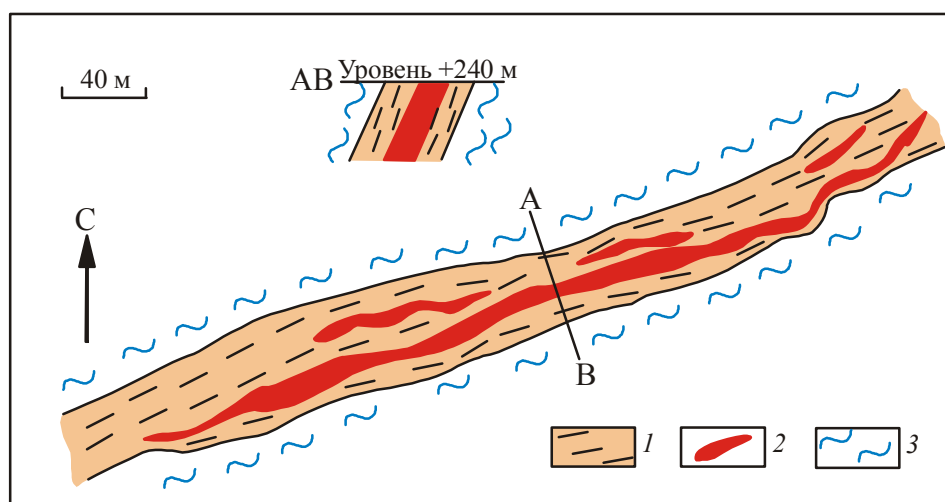


Рис. 2. План и разрез через рудное тело месторождения Гаогун, по [4]:

1 — милонит; 2 — рудные тела; 3 — слюдяные сланцы и гнейсы

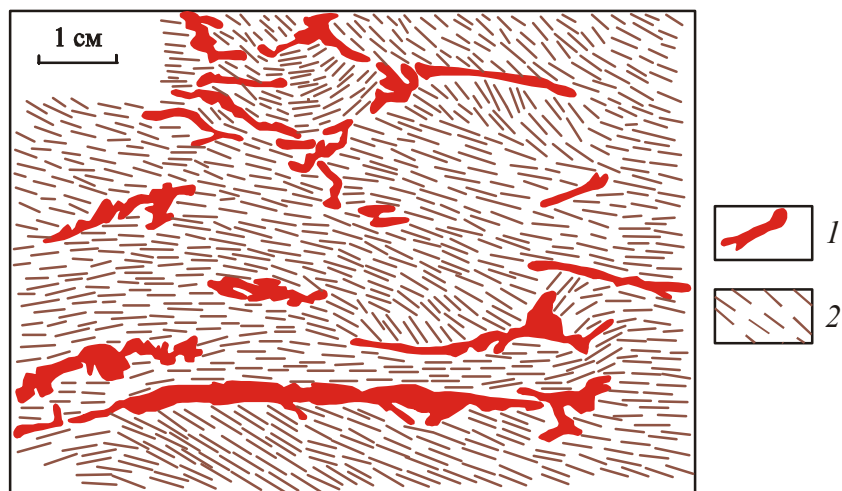


Рис. 3. Распределение золотоносных сульфидных прожилков в зоне милонитов, по [4]:

1 — сульфидные прожилки; 2 — сланцеватость милонитов

Вулканоплутонические пояса, включая древние зеленокаменные трогги, сложенные существенно базитовыми, андезит-риолитовыми или риолит-гранит-порфировыми комплексами, имеют значительные перспективы для выявления новых типов месторождений. Так, золоторудное месторождение Хемло в Канаде — одно из крупнейших в мире. Запасы его превышают 600 т Au при средних содержаниях около 8 г/т (рис. 4). Геологическая позиция определяется приуроченностью к метавулканическому поясу Херон-Бей (возраст 2,6–2,8 млрд. лет), составляющему южную часть зеленокаменного пояса Абитибби. Минерализация приурочена к южному погружению синклинали Хемло. Стратиграфические вулканогенно-осадочные комплексы амфиболитовой фации включают формации: Кеч-Лейк — основные и средние вулканиты; Рул-Лейк — перемежающиеся метаосадочные породы, обогащенные серицитовыми, пелитовыми и магнетитовыми компонентами; Муз-Лейк — рудоносная, заключающая фельзитовые вулканокласты, порфириды и метаосадки; Цедар-Лейк — кластические метаосадки, непосредственно перекрывающие рудные тела. Рудные тела протягиваются более чем на 2200 м при мощности от 3 до 40 м (средняя мощность 20 м); по падению оруденение прослеживается более чем на 2500 м.

Среднее отношение Au/Ag в рудах 4:1. Пирит составляет примерно 6% объема рудных тел в виде субгидральных и эвгидральных зерен до 3 мм в диаметре, образующих слои полумассивного агрегата мощностью до 1 м. Барит присутствует в виде массивных слоев или единичных крупных зерен в си-

ликатной массе, молибденит — в виде рассеянных зерен размером от 0,024 до 0,5 мм. Золото преимущественно ассоциирует с молибденитом и вкрапленным пиритом в виде очень мелких свободных выделений по границам зерен кварца и в трещинках в грубозернистом пирите. Углеродистый материал пропитывает мусковит или выделяется по границам его зерен.

Наиболее вероятен (по А.Д.Щеглову) гидротермально-осадочный генезис оруденения в связи с проявлениями кислого вулканизма, о чем свидетельствуют стратиформный характер рудных залежей, переслаивание рудных тел с туфами, слоистые текстуры руд, изотопный состав серы рудных баритов, аналогичный составу серы из заведомо осадочных баритов района. В то же время, тесная ассоциация молибдена с золотом напоминает месторождения порфирового типа. Модель образования месторождения базируется на представлениях о формировании стратиформных осадочно-гидротермальных руд в мелководном морском бассейне архейского возраста, возможно, обогащенном сероводородом в связи с проявлением кислого субмаринного вулканизма, а также о последующем многократном метаморфизме, приводящем к перекристаллизации мелкозернистых руд, их брекчированию и частичной регенерации в пределах первично обогащенных прослоев пород определенного состава. Возможно более позднее наложение реалгар-аурипигментовой минерализации.

Формирование месторождения охватывало длительный (более 200 млн. лет) временной интервал, в течение которого сопряженно развивались

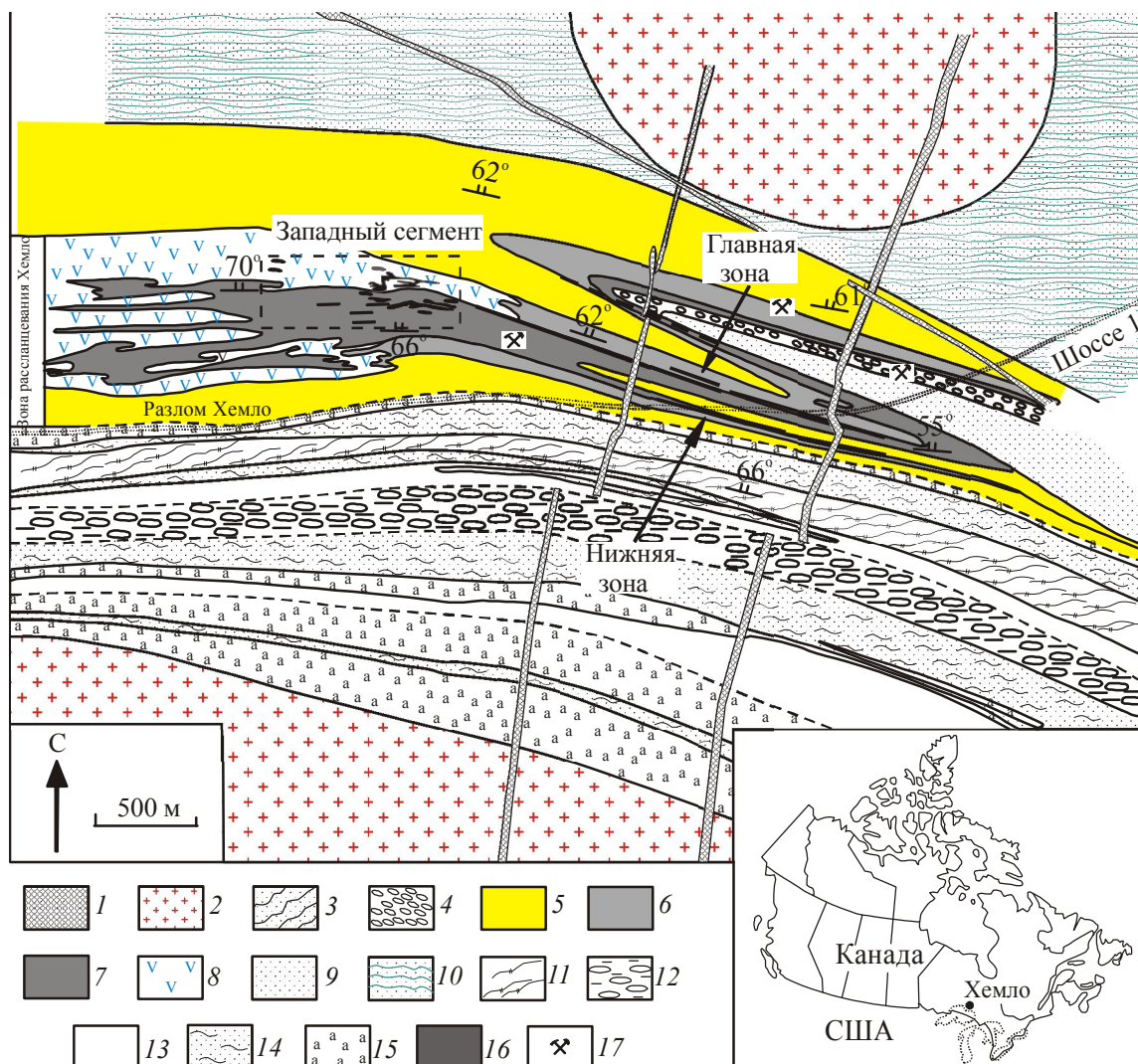


Рис. 4. Геологическая карта района месторождения Хемло, по [8]:

интрузивные породы: 1 — диабазовые дайки, 2 — фельзитовые интрузии; супракрустальные породы к северу и внутри зоны расщепления Хемло: 3 — куммингтонитовые сланцы, 4 — гравелиты, 5 — верхние граувакки, магнетитовые пласты, 6 — порфиры Муз-Лейк, 7 — кальциево-силикатные вакки, 8 — вулканокластические породы с пропластками фельзитов, 9 — вулканокластические породы и мафитовые вакки, 10 — мафитовые метавакки, метааргиллиты; супракрустальные породы к югу от зоны расщепления Хемло: 11 — метапелиты и метаграувакки, 12 — метакогломераты, 13 — фельзитовые сланцы, 14 — мафитовые вакки, 15 — амфиболитовые гнейсы; 16 — проекция минерализации с глубины; 17 — рудники

процессы магматизма, метаморфизма, тектонических дислокаций и рудообразования. Необычное сочетание золотой, молибденовой и ртутной минерализации косвенно свидетельствует о возможной многоэтапности рудообразования, что характерно для крупных рудных концентраций.

Вряд ли будет правильным «замыкать» формирование этого уникального месторождения только на докембрийской металлогении. Наличие субмаринных и даже субаэральных обстановок с разви-

тием риолитового вулканизма открывает широкие возможности прогноза и поисков подобных месторождений в России.

Расположенное в третичных вулканитах юго-запада США (штат Невада) месторождение Раунд Маунтин отличается гигантскими размерами. При среднем содержании Au 1,2 г/т оно заключает 300 т Au и обрабатывается открытым способом с обогащением руд методом кучного выщелачивания. Ежегодно перерабатывается около 12 млн. т руды. Вмещают ру-

ды олигоценые туфы мощностью около 300 м, слагающие кальдерный комплекс. Покровы пепловых туфов с несогласием налегают на палеозойские кварциты, углеродистые аргиллиты, сланцы и известняки, меловые шошонитовые граниты, среднекислые интрузии эоцена – олигоцена и среднеолигоценые туфы. Рудовмещающий комплекс, слагающий кальдеру, имеет возраст 27,2–23,5 млн. лет, непосредственно рудовмещающие туфы — 26,7 млн. лет. Возраст оруденения, определенный калий-аргоновым методом, от 25,1±8,8 до 26,6±0,6 млн. лет.

Линзообразные рудные зоны, отрабатываемые карьером, погружаются к северо-западу. Они представлены густой сетью золотоносных кварцадуляр-пиритовых жил, прожилков и гнезд различной ориентировки. Отношение Ag/Au в рудах составляет от 1:1 до 10:1. Рудные зоны локализованы преимущественно в пористых туфах, где они образуют стратифицированную рудную залежь мощностью до 150 м, заключающую основные запасы месторождения. Основной рудный минерал — золотоносный пирит; золото фиксируется в тонких трещинках и в виде включений. В качестве редких минералов установлены теллуриды золота и серебра, сфалерит, галенит, халькопирит, пирротин, тетраэдрит, пираргирит, арсенопирит, марказит, реальгар. На глубине 200–300 м от поверхности развита зона окисления с новообразованиями гётита, гематита и ярозита.

Заслуживает внимания большая группа медно-порфириновых – золото-порфириновых систем, широко развитых в третичных вулканоплутонических поясах Андийских Кордильер. Так, золото-порфириновые месторождения района Рефуджио в Чили характеризуют крайнюю золотую часть ряда этой группы с отношением $\% \text{Cu}:\text{г/т Au}=0,03$. Они содержат от 0,5 до 2 г/т Au и <0,05 вес. % гипогенной меди [7].

Месторождения ассоциируют с субвулканическими телами андезит-дацитового состава, образующими пологие купольные структуры. Глубокие части рудоносного интервала месторождений характеризуются кварцевыми прожилками в ассоциации с хлорит-магнетит-альбитовыми или пирит-альбит-глинистыми изменениями, тогда как приповерхностные уровни — пирит-альбит-глинистыми и местами кварц-алунитовыми линзами. Как полагают John L. Muntean и Marco T. Einaudi [7], основное различие между порфириновыми золотыми месторождениями района Рефуджио и порфириновыми медными состоит в небольшой (<1 км) глубине формирования золото-порфириновых комплексов по сравнению с глубиной 1,5–4 км, характерной для типичных медно-порфириновых месторождений.

В Перу ведется эффективная отработка плащеобразных залежей вторичных кварцитов, заключа-

ющих золото в концентрациях 2–3 г/т. Залежи представлены рыхлым, пористым кварцем, небольшим количеством вкраплений эпургита и алунита (Янакочи, Пьерина). Отработка осуществляется одновременно несколькими карьерами, при этом подготавливаются новые площади. Необычно низкая себестоимость добытого металла (около 3 дол. за 1 г Au) обусловлена тем, что рыхлый золотосодержащий кварц не требует предварительного дробления и непосредственно поступает на кучное выщелачивание при весьма высоком для этого метода извлечения золота (более 80%).

Вулканоплутонический пояс Центральной Аляски, контролируемый длительно формировавшимся антиклинорным поднятием, включает месторождения в интрузивных штоках и сближенных дайковых системах. Месторождения принадлежат к золото-кварцевой и золото-мышьяковисто-сульфидной формациям.

На месторождении Форт-Нокс штокверк тонких (доли миллиметра) золотоносных прожилков диаметром около 500 м развит в гранитах и гранодиоритах. Разноориентированные прожилки сформированы в ходе нескольких продуктивных стадий минералообразования. Основные рудные минералы — самородное золото, висмутин, арсенопирит, молибденит, шеелит и теллуриды, жильные — кварц, серицит. Внутри штокверка отчетливо выделяются маломощные (10–20 см) золото-кварцевые жилы со средним содержанием Au 15 г/т. Эти жилы более 70 лет были известны как коренной источник самородков золота с висмутином в россыпях. Однако при оценке запасы жил составляли лишь первые тонны золота и поэтому в течение многих лет не отрабатывались. В конце 80-х годов на волне интереса к крупнообъемным месторождениям была проведена литохимическая съемка, выявлена комплексная литохимическая аномалия, а затем пробурены сотни скважин. В результате оконтурен золотоносный штокверк по бортовому содержанию Au 0,5 г/т. Среднее содержание Au в рудах 0,9 г/т, запасы 260 т.

В рассматриваемой модели рудообразующей системы обращают на себя внимание признаки связи месторождения с вмещающими гранитоидами. Возраст месторождения 92 млн. лет. При этом возраст золотой минерализации лишь незначительно отличается от возраста вмещающих гранитоидов. Изотопы углерода, кислорода и водорода указывают на магматическое происхождение рудоносных флюидов, а изотопные соотношения свинца и серы сульфидов близки к таковым для калишпатом из материнских интрузий.

К сверхкрупным золоторудным месторождениям относится Донлин Крик [5]. Ресурсы золота на месторождении оцениваются в 800 т при среднем

содержании ~2 г/т. Возраст месторождения 70 млн. лет. Оно приурочено к поздне меловому флишевому бассейну северо-восточного простирания, сформировавшемуся между аккреционными океаническими террейнами в задуговой области активной континентальной окраины, сложенному граувакками и глинистыми сланцами. Рудовмещающим является комплекс гипабиссальных гранит-порфировых даек размером 8×3 км, составляющий часть магматической дуги с возрастом 77–58 млн. лет. Месторождение подразделяется на пять участков, большинство из которых представлены зонами кварц-карбонатных прожилков, выполняющих трещины север-северо-восточного простирания.

Среди сульфидов преобладают арсенопирит, пирит и обычно более поздний антимонит. Золото, заключенное в арсенопирите, представлено микронными выделениями в тонком (<20 мкм) игольчатом арсенопирите, где его концентрации составляют в среднем 40 г/т, тогда как более крупнозернистый арсенопирит (>50 мкм) содержит около 15 г/т Au. Пирит беден золотом (0,1–1,0 г/т).

Околорудные изменения — серицитизация, карбонатизация, сульфидизация. По данным изучения флюидных включений в кварце преобладали водные рудообразующие флюиды. Золотоносные флюиды гомогенизировались при температуре 275–300°C на глубине 1–2 км.

Прожилковая и вкрапленная золото-сульфидная (с кварцем и карбонатом) минерализация в целом сосредоточена вблизи свиты гранит-порфировых даек и локализуется в системе трещиноватости северо-восточного простирания. Частично зоны минерализации локализованы и в близрасположенных вмещающих породах (рис. 5).

Месторождение относится к золото-мышьяковисто-сульфидной формации с упорными, трудно-обогатимыми рудами. Его ближайший российский аналог — месторождение Майское на Чукотке. В то же время, значительные масштабы месторождения и наличие уже разработанных эффективных технологий обогащения руд определяют актуальность поисков однотипных объектов.

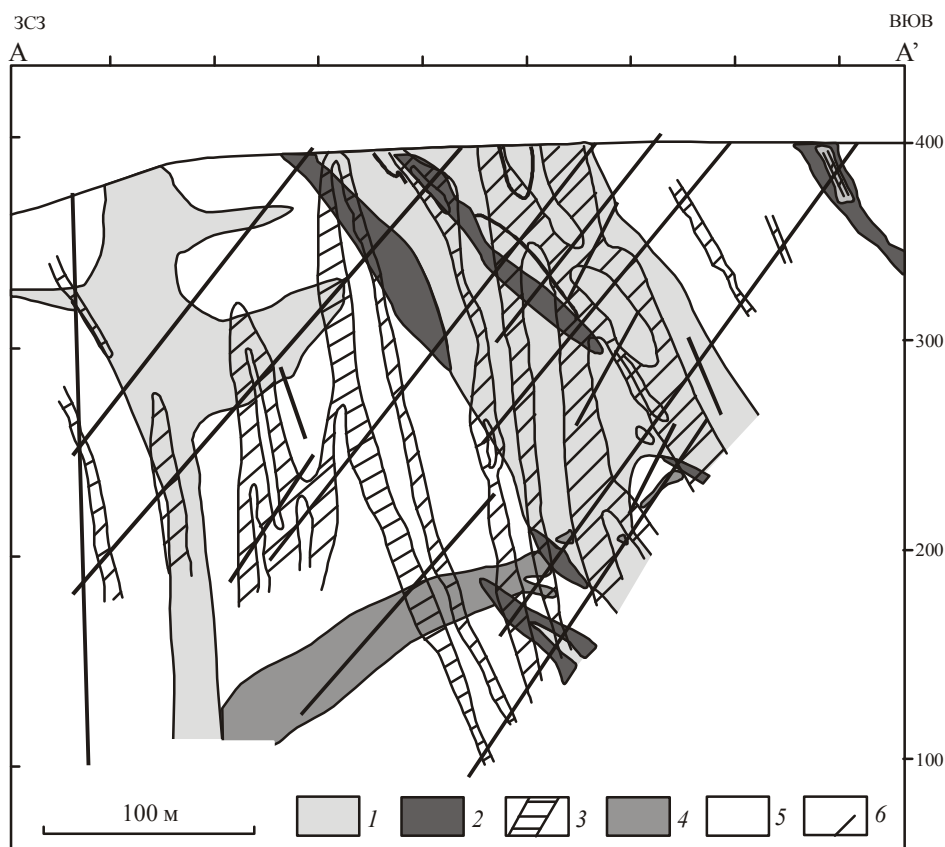


Рис. 5. Геологический разрез по линии А – А' месторождения Донлин Крик, по [5]:

1 — недифференцированные афаниты и кристаллические риодациты; 2 — тонкозернистые порфировые риодациты; 3 — генерализованные контуры зон с содержанием Au > 2 г/т; 4 — дайки мафитов; 5 — недифференцированные граувакки, аргиллиты, сланцы; 6 — буровые скважины

При рассмотрении месторождений, формирующихся в различных геотектонических обстановках, следует обратить внимание на возможность выявления золотоносных метаморфизованных кор выветривания, которые под влиянием высоких температур и давления могут быть приняты за стратифицированные залежи метасоматитов. Идентифицировать месторождения этого типа геологи пока не умеют.

По уровню рентабельности крупнообъемных месторождений Россия уже приближается к ведущим золотодобывающим странам. Так, на месторождениях Куранах и Таборное в Алданском районе рентабельна отработка руд с содержанием Au соответственно 1,5 и 1,7 г/т. Модели крупнообъемных месторождений могут эффективно использоваться в старых золоторудных районах с развитой инфраструктурой — на Урале, в Восточном Забайкалье и Хабаровском крае, где ранее объектам такого типа с крупными ресурсами, но низкими содержаниями Au не уделялось должного внимания. Особенно актуальна эта задача сегодня, когда мировая цена на золото стремительно растет и уже достигла 700 дол. за тройскую унцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольбдерг И.С., Абрамсон Г.Я., Лось В.Л. Геохимические системы крупных золоторудных месторождений Бендиго-Балларатской провинции (Австралия): поисковые и генетические аспекты // Геология и охрана недр. 2004. № 4. С. 22–31.
2. Константинов М.М. Новые и нетрадиционные типы золоторудных месторождений // Руды и металлы. 1995. № 2. С. 18–26.
3. Alvares Angel A., and Donald C. Noble Sedimentary Rock-Hosted Disseminated Precious Metal Mineralization at Purisima Concepcion, Yaricocha District, Central Peru // Econ. Geol. 1988. Vol. 83. P. 1368–1378.
4. Gniling Zhong, Boulter C.A., and Jincheng Liang. Brittle for Disseminated Gold Mineralization in Mylonite: Gaogun Gold Deposit, Hetal Goldfield, Guangdong Province South China // Econ. Geol. 2001. Vol. 96. № 1. P. 49–61.
5. Goldfarb R.J., Roberto Augusto. The Late Cretaceous Donlin Creek gold deposit, Southeastern Alaska: controls on opizanal ore formation // Econ. Geol. 2004. Vol. 99. № 4. P. 643–673.
6. Jia Y., X.Li, and R.Kirrich. A Fluid Inclusion Study of Gold-Bearing Quartz Vein Systems in Central and North Deborah Deposits of the Bendigo Gold Field, Central Victoria, Australia // Econ. Geol. 2000. Vol. 95. P. 467–494.
7. Muntean J.L., and Einaudi M.T. Porphyry Gold Deposits of the Refugio District, Maricunga Belt, Northern Chile // Econ. Geol. 2000. Vol. 95. P. 1445–1472.
8. Tomkins A.G., Pattison D.R., and Eva Zaleski. The Hemlo Gold Deposit, Ontario: An Example of Melting and Mobilization of a Precious Metal-Sulfosalt Assemblage during Amphibolite Facies Metamorphism and Deformation // Econ. Geol. 2004. Vol. 99. № 6. P. 1063–1085.