

ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВАЯ МОДЕЛЬ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА, СВЯЗАННЫХ С ИНТРУЗИВАМИ ГРАНИТОИДОВ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ

А. В. Волков, А. А. Сидоров

ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН
(Москва, Российская Федерация)

Представлена прогнозно-поисковая модель, обобщающая наиболее важные характеристики месторождений золота, связанных с интрузивами гранитоидов (IRGS¹), применительно к Арктической зоне России. На северо-востоке России подобные месторождения называют золото-редкометалльными (ЗРМ) в связи с заметной примесью в рудах *Bi*, *Te*, *W*, *Co* и *Sn*. Данная модель основана главным образом на результатах исследований ЗРМ северо-востока России, а также на данных зарубежных исследователей, изучавших месторождения металлогенического пояса Тинтин, расположенного на территории Северной Канады (Юкон) и Аляски. В геологической части модели подчеркиваются классификационные признаки ЗРМ по отношению к другим типам гидротермальных магматических систем. На первый план выдвинуты наиболее важные индикаторные факторы формирования ЗРМ. Показано, что в экономическом плане в не освоенных регионах Арктической зоны России наиболее интересны богатые жильные ЗРМ типа Пого (Аляска, США), Школьное (Магаданская область) и Кекурное (Чукотский автономный округ). На территории европейской части Арктической зоны, в более освоенных старопромышленных районах Кольского полуострова, Карелии, Архангельской области и полярного Урала промышленно значимы также штокверковые крупнотоннажные ЗРМ (типа Форт-Нокс, Аляска, США).

Ключевые слова: Арктическая зона, гранитоидный магматизм, интрузив, золото, поисковая модель, месторождение, прогноз, критерии.

Статья поступила в редакцию 18 июня 2018 г.

Введение

На территории России и стран СНГ известно большое количество детально изученных несколькими поколениями советских ученых крупных месторождений золота (более 100 т) в интрузивах гранитоидов и дайках: Березовское, Кочкарское и Джегтыгоринское на Урале, Дарасунское в Забайкалье, Васильковское, Бестюбе, Акбокай и другие в Казахстане, Чермитан в Узбекистане. Большая их часть успешно разрабатывается в настоящее время.

В начале 1940-х годов в оловоносных районах северо-востока СССР были выявлены золоторудные проявления в интрузивах гранитоидов, отличающиеся по геологическому положению и минералогии от типичных месторождений золотокварцевой формации. П. И. Скорняков еще в 1949 г. отнес эти проявления и месторождения к турмалиново-кварцевой

формации и разделил на четыре минеральных типа: Au-Co, Au-Te, Au-W и Au-касситеритовый. Н. А. Шило и др. [1], анализируя особенности золоторудных месторождений Магаданской области и Индигирского района Якутии, указывали на необходимость выделения самостоятельной золото-редкометалльной рудной формации. А. П. Осипов и А. А. Сидоров [2] суммировали имеющийся материал по рудопроявлениям золото-редкометалльной формации и провели сравнительный анализ этого материала и данных по аналогичной рудной минерализации других золоторудных провинций СССР. Н. В. Петровская [3], Л. А. Фирсов [4], а позднее Н. А. Горячев [5; 6] полагают, что подобные месторождения принадлежат к золото-кварцевой или золото-сульфидно-кварцевой формациям.

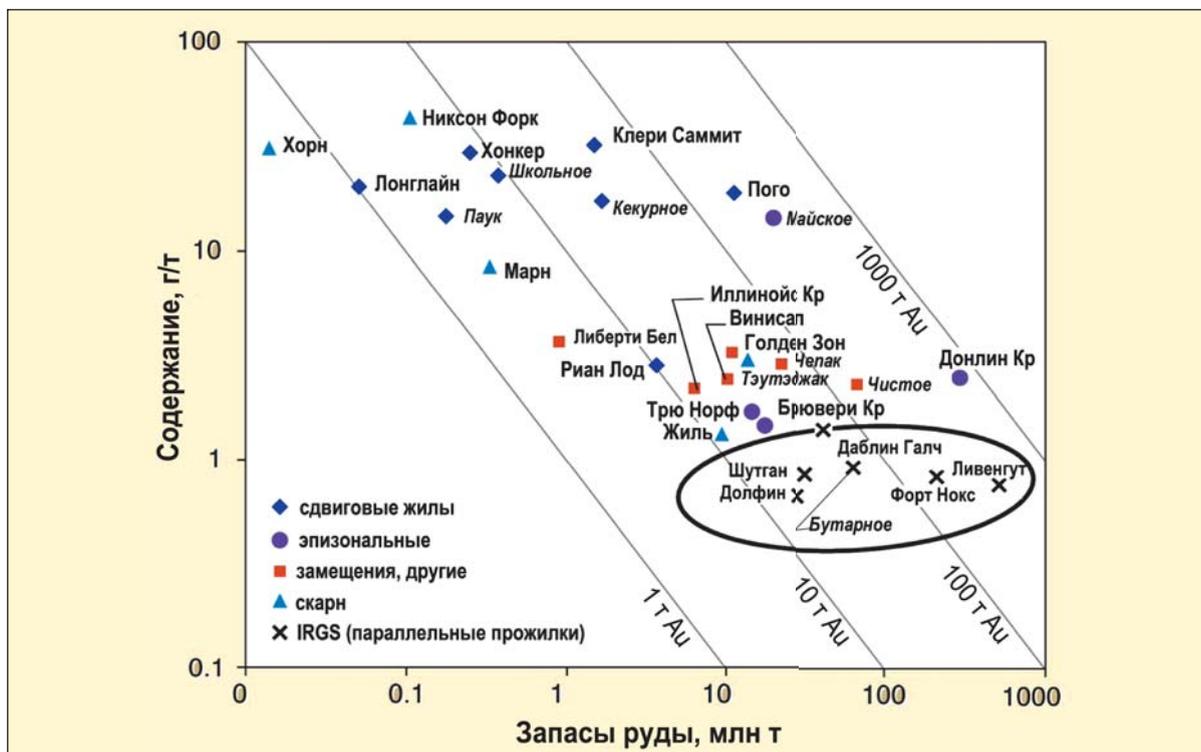


Рис. 1. Месторождения золота, связанные с интрузивами гранитоидов на диаграмме запасы-содержание. Окружены крупнотоннажные штокверковые месторождения типа Форт-Нокс. Составлено на основе опубликованных [14 и др.] и авторских данных

Сравнительно недавно зарубежные ученые [7] на примере месторождений золота в металлогеническом поясе Тинтин, расположенном на территории центральной Аляски и севере Канады (Юкон), предложили выделить новый глобально распространенный класс месторождений золота, связанных с интрузивами (IRGS). С тех пор интерес в мире к месторождениям IRGS (ЗРМ) не ослабевает, подогреваемый успешной разработкой на Аляске и в Австралии месторождений Форт-Нокс (более 200 т), Пого (более 200 т) и ряда других [8]. В поясе Тинтин недавно недалеко от месторождения Форт-Нокс открыто и разведано новое крупное месторождение этого класса Ливенгук с ресурсами, превышающими 600 т золота при среднем содержании 0,8 г/т [9].

Большинство месторождений ЗРМ сформировалось в течение фанерозоя, но известно несколько объектов протерозойского и даже архейского возраста [7]. Результаты исследований месторождений золота, связанных с интрузивами гранитоидов, детально обсуждались во многих работах [7; 8; 10—14].

За рубежом наиболее изучены месторождения золотоносного пояса Тинтин в восточной части штата Аляска и центрального Юкона [7; 14 и др.]. Этот пояс примерно 1000 км длиной вмещает большое количество месторождений золота, связанных с интрузивами разных возрастов от юрского до эоценового. В настоящее время IRGS пояса Тинтин — эталоны, с которыми могут быть сопоставлены поисковые объекты в других регионах.

Таким образом, главные примеры ЗРМ — зарубежные объекты (рис. 1). Надо отметить, что месторождения северо-востока России за исключением месторождений Школьное, Бутарное и Кекурное [15—17] значительно слабее изучены, чем их зарубежные аналоги.

Большинство открываемых в мире ЗРМ — крупнотоннажные объекты, отличающиеся большими запасами, но бедными рудами, содержание золота в которых обычно не превышает 1,5—2,5 г/т. Эталон для таких объектов — месторождение Форт-Нокс (Аляска, США), на котором отрабатываются руды с содержанием менее 1,0 г/т. Однако, как уже отмечалось [18], подобные месторождения на большей части Арктической зоны России в настоящее время не представляют интереса для горной промышленности в отличие от крупных и богатых ЗРМ типа Пого (Аляска, США). На рис. 1 отчетливо видно богатство месторождения Пого по сравнению с другими ЗРМ.

Типизация месторождений ЗРМ

В месторождениях золота, связанных с гранитоидами, гранитоидные комплексы определяют структурную позицию руд, являются источником вещества в них и определяют энергетику флюидной рудно-магматической системы. Эти месторождения возникают в обстановках коллизии и активных окраин континентов. Золотое оруденение, в том числе в промышленных концентрациях, известно непосредственно в массивах и штоках гранитоидов,

в многочисленных дайках, в надинтрузивной зоне плутонов. Возраст золотоносных интрузивов различен — позднеюрский, раннемеловой, позднемеловой. Все объекты генетически связаны с телами гранитоидов. Оруденение данного типа формируется в разнообразных по составу и строению геологических структурах и не зависит от них. В частности, руды данного типа известны как в терригенных слабо метаморфизованных толщах позднего палеозоя — позднего мезозоя, так и среди интенсивно метаморфизованных (вплоть до амфиболитовой фации) палеозойских отложениях Кулара, Чукотки и северо-запада Северной Америки.

Отличительные признаки ЗРМ:

- среднеглиноземистые, субщелочные интрузии от гранодиоритового до фельзитового состава, которые находятся на границе между ильменитовой и магнетитовой сериями;
- CO_2 , CH_4 содержащие гидротермальные флюиды;
- постоянная ассоциация золота с повышенными содержаниями следующих индикаторных геохимических элементов: Bi, W, Sn, As, Mo, Co, Te и/или Sb и низкими содержаниями Cu, Zn, Pb, часто Ag;
- содержание сульфидов менее 5%, с восстановленным составом, обычно представленным арсенипитритом, пирротинитом и пиритом при отсутствии магнетита и гематита;
- обычно слабоизмененные окорудные породы за исключением месторождений, сформировавшихся на малой глубине;
- тектоническая обстановка — конвергентная граница плит, в которой континентальный магматизм обычно представлен одновременными интрузиями щелочного, среднеглиноземистого известково-щелочного и высокоглиноземистого составов, собранными в магматические пояса;
- приурочены к магматическим поясам с ранее хорошо известными вольфрамовыми и/или оловянными месторождениями.

По форме связи с гранитоидами могут быть выделены две основные группы золоторудных месторождений и рудопроявлений: (1) объекты, генетически связанные с телами гранитоидов, такие как месторождения Яно-Колымского пояса; (2) объекты, структурно (парагенетически) связанные с гранитоидами, а также месторождения, приуроченные к дайкам (дайковый тип). Кроме того, к ЗРМ (IRGS) зарубежные ученые относят так называемые эпизональные месторождения с упорным золотом, такие как гигантское месторождение Донлин Крик с запасами около 1000 т золота, Аляска [14]. В нашей стране подобные месторождения (Олимриадинское, Майское, Неждановское, Кючус и др.) выделяют в самостоятельную золото-сульфидно-вкрапленную рудную формацию [19].

Среди российских и зарубежных типичных ЗРМ отметим Бутарное, Тугучак, Дубач (Малыш), Эргелях, Лево-Дыбинское, (северо-восток России), Кировское, Джегдаг (Дальний Восток), Форт-Нокс, Даблин

Галч (Аляска). Рудные тела этих месторождений представлены жилами мощностью 0,1—0,6 м и протяженностью 2—100 м, штокверковыми ареалами площадью до 1—2 км² и более с 10—20% кварцевого материала на погонный метр, зонами дробления мощностью до 10—20 м и протяженностью до 500—800 м с различным количеством кварцевого материала. Обычны сочетания зон дробления и стволых жил, или зон дробления и штокверков. Мощность околосильных метасоматитов (березитов) достигает 1 м, а в штокверках и зонах дробления охватывает всю занимаемую ими площадь. Для большинства месторождений характерно низкое содержание золота при большом объеме рудной массы и запасов металла; вертикальный размах оруденения превышает 300 м.

Перечисленные отличительные признаки ЗРМ были установлены в результате сравнительного изучения месторождений пояса Тинтин [7] и северо-востока России [13].

Тектоническая позиция месторождений

Наиболее часто месторождения этого типа встречаются в осадочных комплексах террейнов пассивных континентальных окраин, прорванных магматическими поясами. Обычно их формирование связано с позднеорогенной или постколлизией тектоническими обстановками. Взаимодействие магматических расплавов происходило неоднократно с осадочными и метасадочными вмещающими породами. Большую роль в их формировании могло играть выполаживание зоны субдукции — именно этот процесс предполагается на северо-востоке Азии в позднемеловое время [20]. Общее в региональной структурной позиции ЗРМ — контроль очагово-купольными структурами, в ядрах которых локализованы гранитные плутоны разных размеров от весьма крупных (сотни и тысячи квадратных километров) до относительно небольших (первые квадратные километры). В пределах орогенных поясов такие структуры располагаются вдоль основных разломов глубокого заложения, в пределах вулcano-плутонических поясов, они входят в состав крупных вулcano-тектонических структур.

Геофизические особенности ЗРМ

В аномальном магнитном поле и поле кажущегося удельного сопротивления шток Бутарный выражен локальными отрицательными аномалиями внутри кольцевых положительных аномалий (магнитный бублик, рис. 2), аналогичные аномалии характерны для золотоносных штоков в поясе Тинтин [14]. В поле силы тяжести шток Бутарный отмечается отрицательной гравитационной аномалией, ось которой смещена относительно выхода интрузива на поверхность к северо-западу на 0,7 км, свидетельствуя об общем погружении интрузива на северо-запад. Разуплотнение может быть связано с очаговой

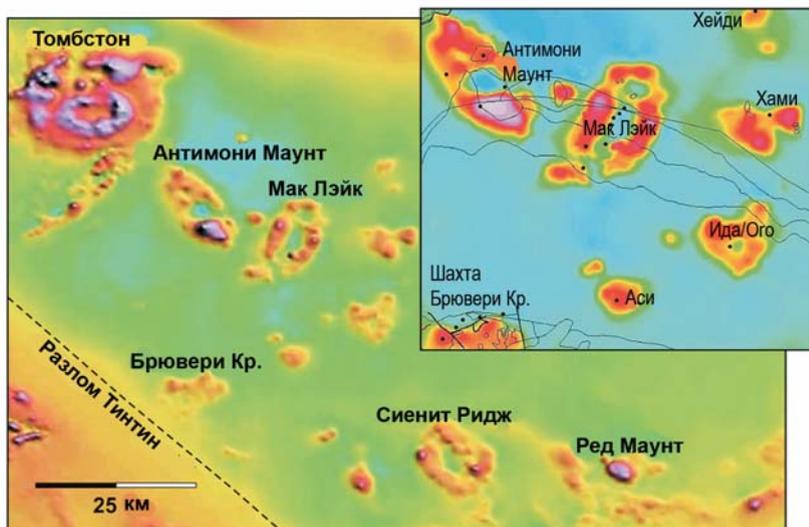


Рис. 2. Карта остаточной напряженности магнитного поля по аэромагнитным данным показывает, что многие плутоны, содержащие IRGS, могут быть идентифицированы по кольцевым положительным магнитным зонам роговиков, которые, вероятно, фиксируют контактово-метаморфические пирротиновые ореолы [14]

магматической структурой, прослеживаемой по геофизическим данным на глубине до 14 км. Площадь последней, оцененная по данным гравиметрии, на глубине 1 км составляет 19,1 км² [16].

Аномалии в форме бублика с отчетливыми минимумами — дырами в центре отвечают плутонами ильменитовой серии. На врезке рис. 2 показана подробная магнитная карта района озера Майк, черными точками отмечены рудопроявления, а линиями — геологические контакты. Примечательно, что рудопроявления Хайди, Хами, Ида/Оро и Аси отражены большими магнитными аномалиями, но не выходят на поверхность. Они, а также рудопроявление Рэд Маунт, вероятно, представляют собой кровельные зоны над вершущками, в основном захороненными плутонами [14].

Структурный контроль минерализации

Главный элемент структуры ЗРМ — штоки гранитоидов. Обычно они имеют вытянутую форму, как шток, вмещающий месторождение Форт-Нокс, что связано с их приуроченностью к крупным глубинным разломам. ЗРМ обладают общими геолого-структурными признаками, заключающимися прежде всего в локализации в апикальных частях гранитоидных плутонов или в их надынтрузивных зонах независимо от состава пород рамы, вмещающей гранитоиды. Соответственно в значительной степени тектоника месторождений определяется тектоникой гранитных интрузивов. Рудные тела и месторождения подразделяются на три структурно-морфологических типа: жильный (системы жил, сопровождаемых ореолами прожилков), штокверковый и приконтактных залежей [10; 11]. Протяженность жил невелика и обычно не превышает первых сотен метров при мощности до 1 м, параметры штокверков существенно больше, они достигают 1—2 км по длине и 200—400 м по ширине, приконтактные залежи достигают длины в сотни метров при мощности-ширине в первые десятки метров.

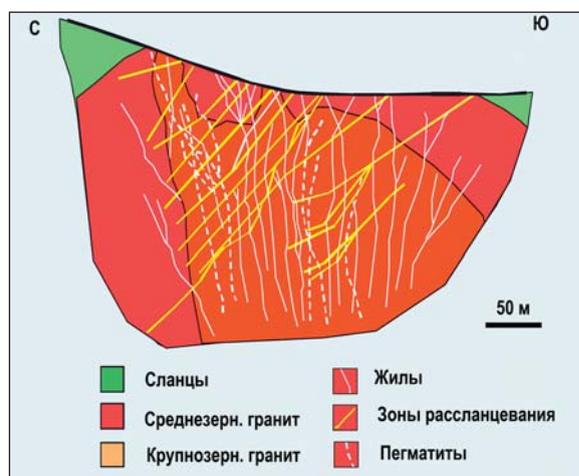


Рис. 3. Сводный геологический разрез месторождения Форт-Нокс [7; 14; 21; 22]

Доминирующий структурный контроль ЗРМ обусловлен режимом слабого растяжения, при котором в хрупком панцире интрузивного купола и вмещающих роговиках формируются зоны параллельных трещин [21]. Последние выполнены тонкими (0,1—5 см) золотоносными с малым количеством сульфидов кварцевыми прожилками, образующими обширные штокверковые рудные тела, такие как на месторождении Форт-Нокс (рис. 3).

Главный фактор, контролирующей минерализацию, — химическая активность вмещающих пород [14]. Известковистые породы в термальном ореоле — очевидное место формирования скарнов. Отсутствие восстановленных, главным образом шеелитовых скарнов указывает на плутоны, вмещающие крупные штокверковые месторождения. Подобная структурная обстановка выявлена на месторождении Тэутэджек [23]. Все перечисленные выше структурные обстановки, контролирующей формирование ЗРМ, сведены на рис. 4.

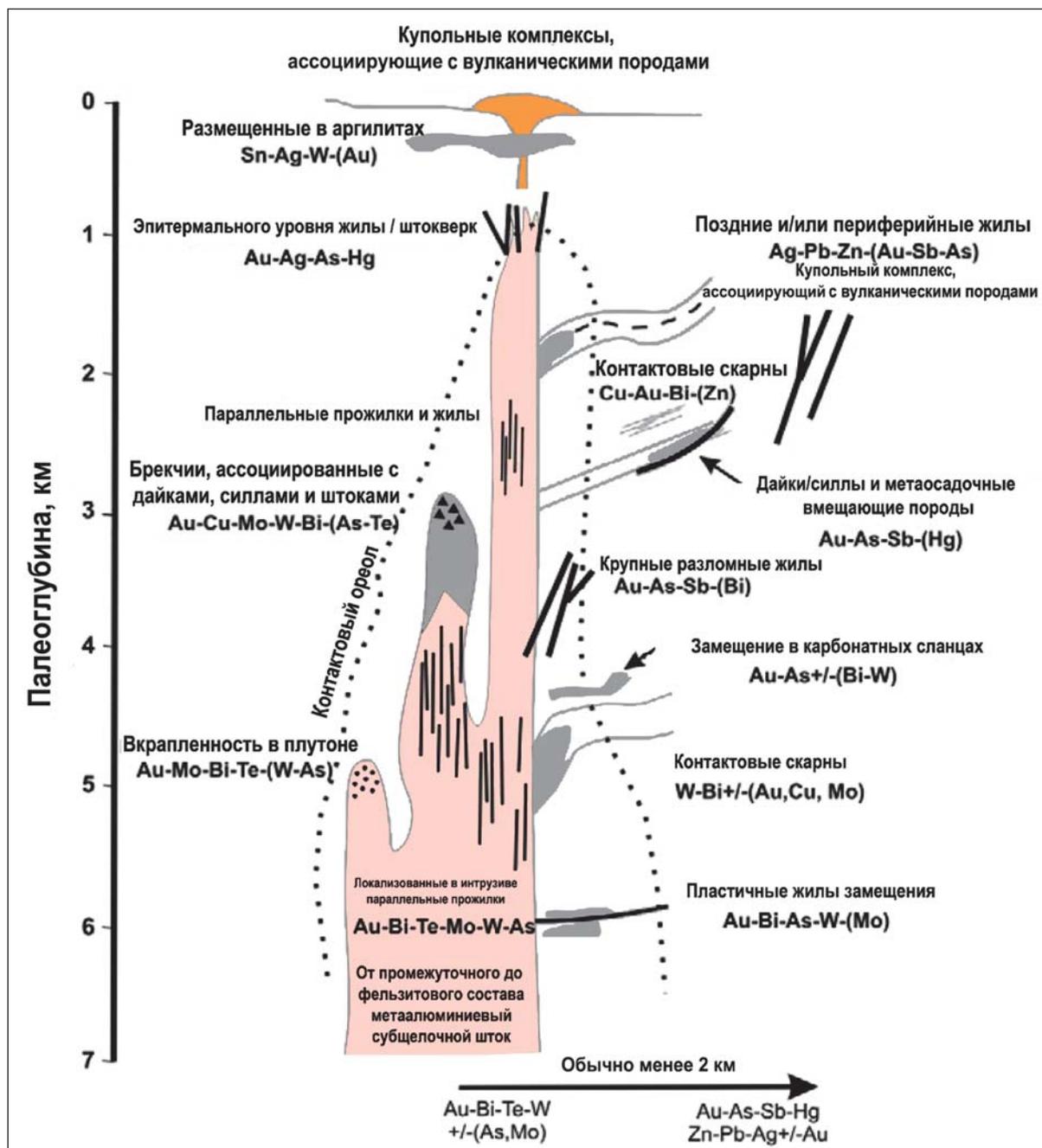


Рис. 4. Пространственная геолого-поисковая модель ЗРМ [22]

Сопутствующие метасоматиты

Метасоматические породы широко развиты в пределах ЗРМ. Оруденение данного типа сопровождается разнообразными метасоматитами: скарнами, грейзенами, березитами, кварц-лорит-серицитовыми, полевошпат-серицитовыми и пр. Скарны известкового типа достаточно редки, грейзены также проявлены весьма редко. Основные — березитоподобные метасоматиты (рис. 5), сопровождающие рудный процесс, они характеризуются преобладающим развитием серицита, а в некоторых

случаях и полевых шпатов. Мощность метасоматитов относительно невелика и редко превышает параметры рудных тел более чем на сотню метров.

Минералогические особенности руд

Руды ЗРМ — убогосульфидные, количество сульфидных минералов и новообразованных по ним сульфатов и оксидов составляет 2,5—3%, на некоторых участках рудных тел количество сульфидов достигает 7—10% (массивные арсенопиритовые гнезда). Главная ассоциация рудных

минералов — арсенопирит-золото-висмут (самородный). Отношение Ag к Au в рудных интервалах изменяется от 0,006 до 0,7 и в среднем составляет 0,11. По-видимому, на большинстве месторождений всё Ag входит в состав самородного Au . В качестве нерудных минералов преобладают кварц, альбит, калишпат, мусковит-серицит, турмалин, иногда гранат, пироксен, эпидот, кальцит, аксинит и гидромусковит (в коре выветривания появляется каолинит). Основной жильный минерал руд — кварц (более 70%). Из рудных минералов преобладают арсенопирит (обычно мышьяковистый), второстепенные минералы — самородное золото, пирит, леллингит, пирротин, самородный висмут, антимонит, буланжерит, сфалерит, галенит, халькопирит, редкие минералы — сульфосоли висмута и свинца, теллуриды висмута (галеновисмутит, наффилдит, жозеит, хедлейит), а также мальдонит, теллуриды серебра и золота. Интересный факт — наличие в рудах месторождений касситерита, что нетипично («чуждо») для золотоносных минеральных ассоциаций [3]. В частности, на месторождении Школьное касситерит отмечается в пробах на горизонтах 1190, 1100 м и широко развит в пробах горизонта 950 м. Широкое развитие в рудах фрейбергита (Школьное) может свидетельствовать о формировании этого месторождения вблизи поверхности [15].

В связи с тем, что рудные тела представляют собой жилы и зоны ветвящегося прожилкования, преобладает жильно-прожилковая текстура, реже встречаются гнездово-вкрапленная и крустификационная. Рудные минералы (сульфиды), образуя гнезда и вкрапления в кварце, создают гнездово-вкрапленный текстурный рисунок. С зоной окисления связаны коррозионные текстуры — кавернозная, ячеистая, каемчатая и цементационная.

В рудах обычно выделяются два минеральных парагенезиса, названных по преобладающим минералам: ранний — 1-я стадия — биотит-хлорит-гидрослюдистый → кварц-полевошпатовый → золото-пирит-арсенопиритовый (висмутсодержащий); поздний — 2-я стадия (жилы меняют простирание и пересекаются с ранними) — кварц-леллингит-арсенопирит-антимонит-джермсонитовый; гипергенный (связанный с окислением руд на поверхности) → золото-скородит-ярозитовый.

Арсенопирит — основной и наиболее часто встречающийся рудный минерал. По данным микрозондового анализа арсенопирит содержит от 31,5 до 33,4 ат. % As . Высоко мышьяковистый арсенопирит и леллингит до дайковой жилы № 6 месторождения



Рис. 5. Золотоносный штокверк в березитах месторождения Форт-Нокс [14]

Школьное содержат до 2% кобальта и, как показали данные микрозондового анализа, в этой жиле они ассоциируют с самородным висмутом и беспримесным золотом, теллуридами висмута и мальдонитом [5]. Содержание Fe , As , S в этом арсенопирите свидетельствует о его нестехиометрическом составе: высокие величины серно-мышьякового отношения (1,16—1,51) установлены в краевых частях кристаллов, а низкие характерны для центральных частей (0,92—0,98). Однако в среднем величина серно-мышьякового отношения составила 1,1, что близко к стехиометрическому составу арсенопирита [15]. По этому параметру арсенопирит месторождения Школьное отличается как от арсенопирита вкрапленных руд золото-сульфидных месторождений (Майского, Олимпиадинского и др.), так и от арсенопирита золото-кварцевых месторождений Яно-Колымского пояса [15].

Самородное золото — основной промышленно ценный минерал в руде. В результате детальных минералогических исследований, проведенных на ряде месторождений северо-востока России, был установлен тонкодисперсный характер подавляющей части золота, которое встречается в виде микровключений в сульфидах руд (рис. 6), в основном в пирите и арсенопирите [13]. По размерам (1—30 мкм) это золото (рис. 6а) существенно отличается от «нанозолота» («невидимого» золота) в сульфидах и может извлекаться цианированием.

В отличие от «нанозолота» тонкодисперсное золото в рудах ЗРМ ассоциирует с соразмерными выделениями теллуридов золота и висмута, самородным висмутом (см. рис. 6б) и характеризуется более низкой пробностью (850—970). Главными сульфидными минералами — носителями этого золота является средне- и мелкокристаллический арсенопирит, пирротин, реже пирит и леллингит. Типоморфной особенностью руд как с нано-, так и с

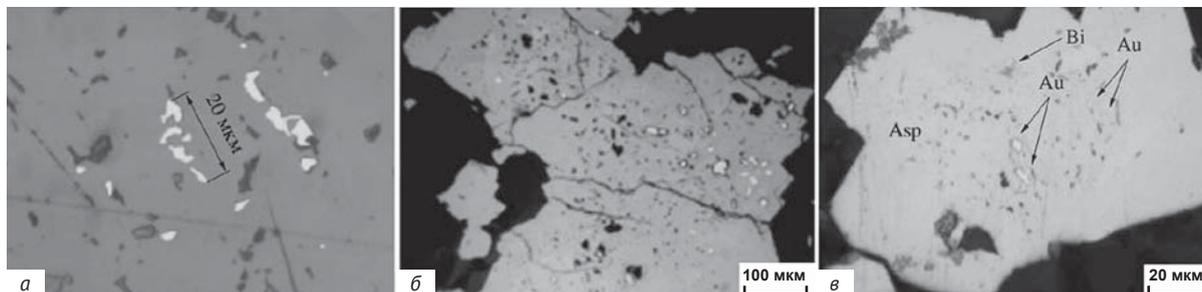


Рис. 6. Тонкодисперсное золото и теллуриды в арсенопирите ЗРМ северо-востока России: а – фрагмент крупного зерна арсенопирита с многочисленными включениями самородного золота (месторождение Басуганьинское, размеры зерна арсенопирита 1–2 мм, а включений золота – до 10–20 мкм, увеличение 300), б – фрагмент крупного зерна тонкопористого арсенопирита с многочисленными включениями золотоносных висмут-теллуридных сростаний (месторождение Тэутэджек, размер зерна арсенопирита 1–2 мм, висмута-теллуридных включений – до 25–30 мкм, увеличение 150), в – тонкодисперсное самородное золото и висмут в арсенопирите сульфидных жил месторождения Чепак (увеличение 400)

тонкодисперсным золотом является их вкрапленный характер, что свидетельствует о близких условиях рудообразования.

Таким образом, тонкодисперсное золото (1–30 мкм) в ассоциации с теллуридами золота, висмута и самородным висмутом в сульфидах может рассматриваться в качестве так называемой минералогической подписи, указывающий на принадлежность месторождения или рудопроявления к IRGS.

Термобарогеохимические особенности руд

Термобарогеохимия флюидов ЗРМ пояса Тинтин хорошо изучена [22; 24]. Большинство Au-W-Bi-Te жил произошли из первоначально высокотемпературных (380–300°C) обогащенных CO₂ (5–14%) низкосолёных (2–6 wt.% NaCl equiv.) существенно водных карбонатных флюидов с CH₄ и N₂. Впоследствии эти флюиды охлаждались до температур 280–250°C, но не ниже 160°C. Несмешанные низкосолёные (0,2 wt.% NaCl equiv.) и высокосолёные (6–15 wt.% NaCl equiv.) водные флюиды, практически без CO₂, формировали поздние As-, Sb-, и Ag-Pb-Zn жилы и прожилки. Барометрия по флюидным включениям показывает, что на большинстве месторождений (Даблин Галч, Шеелит Дом и др.) золото отлагалось на глубине от 3 до 10 км (в основном 5–7 км, рис. 7). Изучение флюидных включений ЗРМ разными исследователями на северо-Востоке России в целом показывает сходные термобарогеохимические особенности руд [5; 6; 12; 15; 16; 25; 26].

Особенности изотопного состава кислорода и серы

Детальное изучение изотопного состава кислорода и серы было проведено на месторождениях Клер Крик и Шеелит Дом [27; 28]. Изотопный состав δ¹⁸O кварца Au-W-Bi-Te прожилков, локализованных в штоках, ранжирован в диапазоне от 14‰ до 16‰, немного тяжелее, чем δ¹⁸O вмещающих гранитов — от 11‰ до 13‰, и сходен со значениями в осадочных породах от 13‰ до 16‰. Сурьмяные и Ag-Pb-Zn жилы, локализованные в терригенных

толщах, имеют δ¹⁸O от 17‰ до 20‰, что отражает сильное взаимодействие с вмещающими породами. Изотопный состав δ³⁴S сульфидов из Au-W-Bi-Te прожилков, локализованных в штоках, находится в достаточно узком диапазоне от 0‰ до –3‰, для скарновых месторождений характерен диапазон от 2‰ до –7‰, для расположенных в терригенных толщах арсенопиритовых жил — от –7‰ до –10‰, и от –9‰ до –11‰ для Ag-Pb-Zn жил.

Геохимические особенности

Руды ЗРМ обладают отчетливой минералогическо-геохимической спецификой, выражающейся в существенном преобладании или повышенном фоне в них таких элементов, как Au, As, Bi, W, Mo, Te, S, Co, Ni, Pb, Ag, В. Содержания мышьяка достигают 10%, в среднем составляя 0,5–1,5%. Содержания золота варьируют в широких пределах от долей до десятков и сотен грамм на тонну. Количества остальных отмеченных элементов составляют десятки-сотни грамм на тонну, реже десятые доли процента. Соответственно определяется и минералогия руд. Высокие содержания Au в крупном месторождении пояса Тинтин Даблин Галч сопровождаются повышенными концентрациями Bi, As, Sb, Cu, Zn, однако золото во всех классах содержаний исключительно коррелирует только с Bi и, возможно, с Te [29]. Факторный анализ на месторождении Клер Крик показал две главные геохимические ассоциации для богатых Au руд — доминирующую As-Au-Bi±Sb,Te и последующую — Ag-Bi-Pb±As,Au [27]. W имеет небольшую корреляцию почти с каждым из элементов этих ассоциаций кроме Au в богатых рудах. Аналогичным образом минерализация в месторождении Шеелит Дом характеризуется как Au-Te-Bi±W±As, так и Ag-Pb-Zn-Cd-Sb±Cu±Au геохимическими ассоциациями. Эпизональное месторождение Брювери Крик резко отличается от других месторождений провинции As-Sb-Hg геохимической подписью [14]. Отметим, что аналогичная геохимическая ассоциация установлена для ряда месторождений и проявлений северо-востока России (Майское, Кючус, Нежданское,

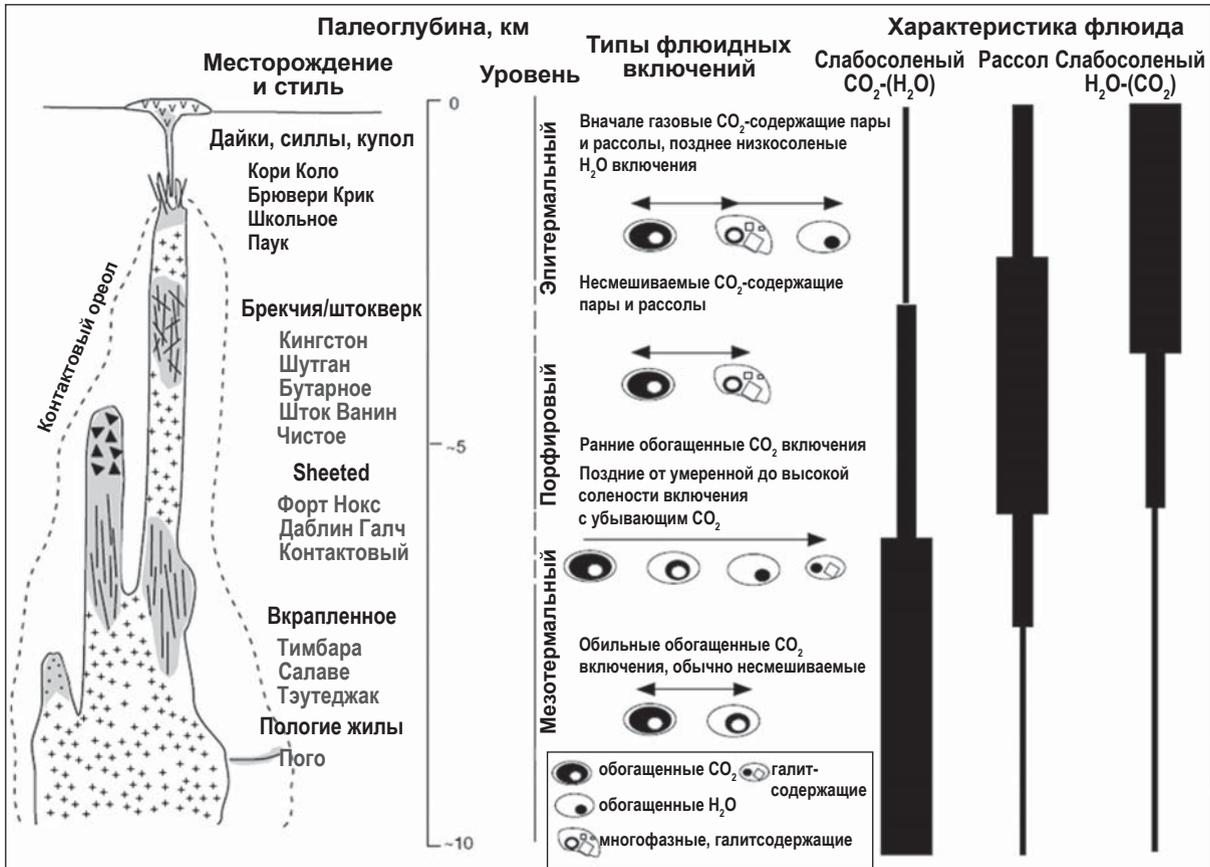


Рис. 7. Термобарогеохимические условия формирования ЗРМ [24], с изменениями

Сарылах, Сентачан и др.), объединяемых нами в рамках самостоятельной золото-сульфидной вкрапленной рудной формации [19].

Известно, что геохимическая зональность в масштабе плутона отражает элементную зональность, связанную с постепенным охлаждением гидротермальных флюидов под влиянием эффекта буферизации вмещающих пород. Геохимическое влияние плутона проявляется, как правило, на глубинах порядка от 1 до 3 км, но может быть больше в кровельной зоне над плутоном, например более 10 км на месторождении Шеелит Дом [14].

Подчеркнем, что локализованные в интрузивах руды провинции Тинтин характеризуются доминирующей Au-W-Bi-Te геохимической ассоциацией и высокой корреляцией Au с Bi и Te, но не всегда с W.

Геохимическая специализация ЗРМ в целом хорошо выражена единообразными спектрами отношений индикаторных геохимических элементов отдельных месторождений. Показатели, рассчитанные по Бутарному месторождению, полностью отвечают общей картине, а жильные руды месторождения Школьное резко отличаются (рис. 8).

Геохимическая ассоциация, присущая высокотемпературным скарнам, прилегающим к плутону, может быть сходна с вышеупомянутой, но в некоторых месторождениях влияние As и W может быть

более существенным, чем Bi и Te [14]. На глубине предполагается обогащение плутона W или Mo [21], а уменьшение содержаний Au с глубиной очевидно в рудах месторождения Форт-Нокс [14].

Генетическая модель

Генетическая модель ЗРМ, созданная в результате изучения многочисленных месторождений пояса Тинтин, предусматривает, что рудогенерирующее охлаждение плутона обусловило насыщение летучими веществами флюида, выделяющегося из расплава [14]. Металлы и летучие вещества, такие как сера и галогены, предположительно выделялись преимущественно из расплава в водно-углекислую фазу рудного флюида. Давление или глубина заложения контролируют насыщение флюида летучими веществами, особенно потому, что последние легко растворяются в кислых расплавах при более высоких давлениях [30]. Однако насыщение летучими веществами также индуцируется магматическими процессами, такими как фракционная кристаллизация магмы, смешивание или простое охлаждение. Глубина становления плутона может быть критическим фактором, который объясняет, почему ЗРМ обычно связаны со свитой плутонов, располагающихся на большой территории. Такие плутоны, вероятно, кристаллизовались на одном общем коровом

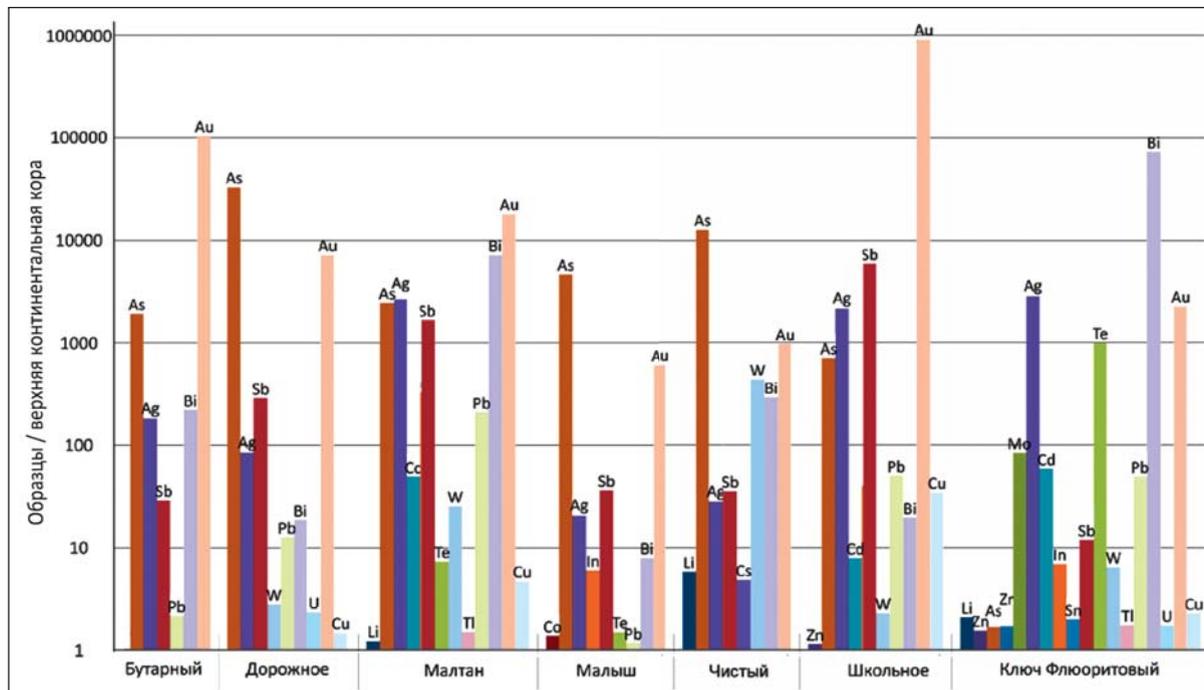


Рис. 8. Распределение основных микроэлементов в рудах ЗРМ северо-востока России, нормированных по отношению к средним значениям для верхней коры [40]

уровне. В масштабе плутона минерализация локализуется выше и по периферии области насыщенности летучими веществами. Менее плотные, чем расплав, флюиды будут мигрировать в самую верхнюю часть менее вязкого уровня магматической камеры, который обычно представлен обогащенным летучими веществами магматическим куполом сразу под ранее сформировавшимся панцирем [31]. Флюиды, пройдя через трещины в панцире, будут реагировать с вмещающими породами. Рудопроявления, следовательно, наиболее часто приурочены к вершине плутона, в самом интрузивном панцире или в ороговикованных вмещающих породах, прилегающих к плутону или выше его.

Материнские плутоны многих ЗРМ, вероятно, по объемам магмы слишком малы, чтобы обеспечить большое количество металлов, содержащихся в этих месторождениях, и можно предположить участие большего объема первичных магматических флюидов и металлов [32]. Это подразумевает наличие на глубине неэкспонированных батолитов или мафического лампрофирового расплава. Металлогения месторождений полезных ископаемых, связанных с интрузивными породами, в основном контролируется состоянием первичного окисления магмы [33] и степенью магматического фракционирования [34]. Высокоокисленные магмы островных дуг, относительно нефракционированные, будут иметь металлический профиль с преобладанием Cu и, потенциально, Au. В восстановленных магматических системах Cu скорее всего вылетит наружу с ранее осажденными сульфидными пузырьками расплава, тогда как W с ними несовместим и, следовательно,

накапливается во время фракционирования. Вольфрам относительно легко мобилизуется редуцированными обогащенными CO₂ гидротермальными системами. Контроль выделения Au в магматических системах еще плохо изучен, но эмпирически Au связано с обогащением обеих сильно окисленных и умеренно восстановленных систем [35], причем в последнем случае это может привести к формированию ЗРМ. Знание физических и химических свойств магматических флюидов для большинства связанных с интрузивами месторождений полезных ископаемых первоначально базировалось на сравнении с порфировой моделью, в которой подчеркнута роль сильно соленых водных флюидов в транспортировке металлов в окисленных магматических условиях [36]. В ЗРМ, однако, преобладают водно-углекислые флюиды, которые содержат большие объемы CO₂ и отличаются низкой соленостью, в значительной степени редуцированы и только локально содержат рассолы [22; 37]. Поскольку основа типизации ЗРМ — прямая генетическая связь оруденения с материнской магмой, геохронология имеет принципиальное значение в процессе исследований. Многие факты указывают на то, что эти магматические системы охлаждались быстро, причем магматические и гидротермальные процессы должны быть одновременными. Сравнительная геохронология магматических и гидротермальных фаз с помощью различных аналитических методов показывает, что срок жизни всей магматическо-гидротермальной системы не превышал 2—3 млн лет [14].

В результате изучения ЗРМ в Яно-Колымском поясе и других регионах северо-востока России была

выявлена вполне определенная положительная связь между ними и ранними допорфировыми зонами тонкорассеянной золотоносной сульфидизации различного генезиса [38]. Масштабы сульфидизации и мобилизационные возможности тонкорассеянных в черносланцевых толщах рудных минералов позволяют рассматривать эти зоны в качестве важных источников рудного вещества для ЗРМ. Есть основания полагать, что степень постмагматической золотоносности интрузивов ЗРМ определяется не только и, возможно, не столько петрохимическим составом гранитоидных комплексов, а взаимоотношениями магматических гидротермальных флюидов с более ранними зонами золотоносной сульфидизации и, разумеется, особенностями постмагматических процессов. С другой стороны, тесная связь ЗРМ с постаккреционным этапом эволюции террейнов и зонами тектоно-магматической активизации (ТМА) свидетельствует, что дифференциация рудного вещества и особенности рудообразования обусловлены коровыми и подкоровыми процессами и что часть рудных компонентов привнесена из подкоровых мантийных очагов [39].

Главные прогнозно-поисковые критерии

В табл. 1 сведены некоторые наиболее важные индикаторные особенности формирования ЗРМ, которые рекомендуется использовать в качестве

прогнозно-поисковых критериев новых объектов в Арктической зоне России.

Экономические факторы

Запасы и содержания. Встречаются ЗРМ разных масштабов, от мелких (жильных) до крупных по запасам параллельных жильных систем и штокверков. Обычно из месторождений добывается только золото. Некоторые жильные месторождения также дают вольфрам, который рассматривается как стратегический металл с высокой рыночной ценой. Запасы основных эксплуатируемых месторождений, представленных системами параллельных жил и прожилков, значительно превышают 100 т золота. Тоннаж (запасы руды) этих месторождений варьирует от 10 до нескольких сотен миллионов тонн при содержаниях 0,8—1,4 г/т. Знаменитое месторождение Форт-Нокс включает более 250 т золота (суммарная добыча плюс текущие запасы и ресурсы) при среднем содержании в активных запасах 0,82 г/т Au (бортовые содержания 0,39 г/т), ежегодная добыча на нем составляет 11—12 т золота [12]. Бонанцевое жильное месторождение Пого (со средними содержаниями 17,8 г/т и бортовыми содержаниями 3,43 г/т) имеет запасы более 210 т золота. Годовая добыча на этом жильном месторождении достигает 9—10 т золота [8].

Способ отработки и технология обогащения. Обычно прожилково-вкрапленные залежи, штокверки

Таблица 1. Прогнозно-поисковые признаки ЗРМ

Группа	Критерии
Региональные геологические критерии	Орогенные пояса, коллизионная до постколлизионной конвергентной континентальной окраины тектоническая обстановка, задуговая вмещающая среда, магматические пояса. Тектономагматическая активизация древних структур контролирует развитие IRGS. Присутствие восстановленного от среднего до фельзитового состава магматизма I-типа. Исторически установленная ассоциация месторождений Au с гранитоидами, геохимические аномалии золота и россыпи золота, окружающие плутоны. Региональное развитие золото-кварцевых месторождений (Яно-Колымский складчатый пояс). Известны приуроченные к гранитам W-Mo и W-Sn рудопроявления и месторождения. Месторождения-сателлиты представлены W и Au скарнами, Au-антимонит-кварцевой и Au-кварцевой рудными формациями, иногда полиметаллическими жилами, Sn и W грейзенами. Добыча россыпного золота значительно выше добычи рудного золота
Локальные геологические критерии	Современный уровень эрозионного среза магматической системы определяет морфологию рудных тел месторождений от брекчий и жил верхнего уровня (шток Ванин, Школьное, Паук) через параллельные системы жил и прожилков (Бутарное, Неченхая, Приискатель), штокверки (Чистое, Дубач, Тэутэджак) до более глубоких скарновых залежей (Ночное) и жильных систем. Карбонатные пласты, благоприятные для формирования скарнов (Ночное). Восстановленные вмещающие породы могут представлять собой ловушку для гидротермальных растворов, эти породы — основная причина широкого распространения восстановленных гранитных интрузий. Сдвиги хрупкие, квазипластичные и пластичные (на глубине). Сдвиги не имеют явной генетической связи с магматизмом, а связаны с региональными разломами. Широкий диапазон морфологических типов гидротермальных образований: расслоенные жилы, скарны, брекчии, жилы, штокверки, вкрапленность

Группа	Критерии
Магматические критерии	<p>Месторождения связаны главным образом с субщелочными интрузиями от среднего (гранодиориты) I-типа ($\text{SiO}_2 = 60\text{—}70\%$) до фельзитового ($\text{SiO}_2 = 70\text{—}76\%$) высококальциевого I-типа. Минеральные ассоциации с низким содержанием FO_2. Гибридная система магм. Сложный петрогенезис — смешение поверхностных и глубинных компонентов.</p> <p>Интрузии сильно радиогенны ($\text{Sr} > 0,71$).</p> <p>Широкое развитие золото- и/или шеелитсодержащих пегматитовых жил.</p> <p>Обычен тяжелый $\delta^{18}\text{O}$ (фельзитовые интрузии более 11‰, среднего состава — 9—11‰).</p> <p>Сложная магматическая система указывает на наличие и глубинного, и поверхностного воздействия.</p> <p>Последовательность внедрения: ранние фельзитовые интрузии (кварц-монцитонитовые) — дайки лампрофиоров (минетты и спессартит), обогащенные летучими веществами — дайки гранит-порфиоров.</p> <p>Однородное распределение РЗЭ во всех породах магматического комплекса.</p> <p>Микроэлементы беризитов включают F, B, Cs, Rb, Li, Y-, Th- и редкоземельные минералы, такие как ксенотим, могут присутствовать в ассоциации с грейзенами.</p> <p>Признаки смешивания, закаливания и экссолюции летучих компонентов (появление кальцита в миаролитовых пустотах указывает, что CO_2 — главный летучий компонент в магматическом комплексе пояса Тинтин).</p> <p>Взаимодействие расплавов с восстановленными вмещающими породами.</p> <p>Минерализация отчетливо контролируется высокодифференцированными интрузиями и сосредоточена в наиболее развитой интрузивной фазе. Индекс дифференциации более 80</p>
Минералого-геохимические критерии	<p>Малосульфидный (Форт-Нокс, Бутарное, содержание сульфидов от 3% до менее 1%) или высокосульфидный (Чепак, более 15%) состав руд, в котором золото встречается с варьирующими количествами Bi, As, Mo, Te, W, Sb и обычно имеет низкие концентрации полиметаллов; низкий объем флюидов.</p> <p>Сравнительно невыраженные зоны гидротермальных околорудных изменений.</p> <p>Отсутствует минералогическая или геохимическая зональность вдоль по простиранию или концентрическая (т. е. во внешнюю сторону от плутона).</p> <p>Широко развиты минералы висмута.</p> <p>Березитизация вмещающих пород широко варьируют и по объему, и по интенсивности.</p> <p>Тонкодисперсное золото (1—30 мкм) в ассоциации с теллуридами золота, висмута и самородным висмутом в сульфидах железа.</p> <p>На большинстве месторождений присутствуют поздние и/или перефирийные полиметаллические и антимонитовые и арсенопиритовые жилы.</p> <p>Бонанцевые месторождения несут в себе черты полигенности, полихронности и полиформационности минерализации.</p> <p>Флюиды гидротермальные, содержащие CH_4, CO_2, характерна переменная соленость.</p> <p>Полосчатая буровато-серо-белая зона окисления верхних горизонтов месторождений</p>
Геохимические критерии	<p>Россыпи золота в ручьях, дренирующих граниты.</p> <p>Геохимические потоки и ореолы с высокими значениями Au-W-Bi-As±(Sn-Sb-Ag-Mo-Cu-Pb-Te-Zn) развиваются от центра интрузивных тел.</p> <p>Удаленные от интрузий аномалии Sb и сопровождающие интрузии интенсивные аномалии Bi — типичное сочетание для Юкона.</p> <p>Геохимическая и петрографическая характеристики гранитов — ключевой критерий потенциальной перспективности и выбора участка для постановки работ.</p> <p>Содержания полиметаллов сильно варьируют и не могут быть использованы в качестве поисковых критериев.</p> <p>Отношение золота к серебру обычно меньше единицы</p>

и системы параллельных жил и прожилков обрабатываются карьерами, иногда в сочетании с подземной добычей. Богатые жилы (Пого, Школьное) разрабатываются подземным способом. Хотя содержание золота на многих месторождениях очень низкое (Форт-Нокс), руды относятся к технологически простым малосульфидным с низкими содержаниями

меди и других металлов. Золото мелкозернистое, иногда тонкодисперсное, не образует крупных россыпей. Золото из руд хорошо извлекается методом кучного цианидного выщелачивания.

Экономические ограничения. Месторождение Форт-Нокс характеризуется низким коэффициентом вскрыши и рудами, окисленными на всю глубину

Группа	Критерии
Геофизические критерии	Граниты имеют низкую магнитную восприимчивость — $(0—20)10^{-3}$, низкие аэромагнитные показатели. Показатель Fe_2O_3/FeO — 0,15—0,4. Характеризуются кольцевыми положительными магнитными аномалиями — «магнитными бубликами», фиксирующими пирротинизацию в контактовых ореолах. Высокофракционированные гранитоиды содержат повышенные К и U, а умеренно-глиноземистые разновидности I-типа также имеют высокие содержания Th, которые фиксируются белыми аномалиями на сложных К-Th-U аэрорадиометрических изображениях. Грейзенизированные зоны отличаются высокими содержаниями Th и К. Большие батолитовые массы фиксируются отрицательными аномалиями в гравитационном поле. Комбинированные геофизические аномалии позволяют оконтурить скрытые гранитные плутоны
Термобаро-геохимические критерии	Допродуктивная минерализация отлагалась из высокотемпературных, соленых флюидов. Продуктивные золотосодержащие минеральные ассоциации отлагались из низкосолёных и низкотемпературных флюидов, обычно содержащих CO_2 . Расплавные включения содержат золото, что свидетельствует о его магматическом происхождении ¹

отработки (более 300 м). Руды характеризуются высоким извлечением золота (более 90%) высокоэффективным и недорогим методом угольной адсорбции. ЗРМ представляют потенциально важный ресурс золота, который выявлен в районах, имевших до этого ограниченные разведанные запасы этого драгоценного металла. Видимо, все арктические регионы, где было раньше добыто много золота из россыпей (такие как Юкон, Клондайк, Чукотка, Кулар, Якутия), в связи с открытием ЗРМ получают на длительную перспективу возможность производить значительное количество рудного золота (примеры — Форт-Нокс, Пого). Следует отметить, что для

организации добычи золота из крупнотоннажных ЗРМ, как показывает опыт Форт-Нокса, необходима развитая транспортная и энергетическая инфраструктура, отсутствующая в большинстве регионов Арктической зоны России.

Перспективы открытия ЗРМ в Арктической зоне России

Арктическая зона России, расположенная на протяженной континентальной окраине с огромным количеством разновозрастных интрузивных массивов (рис. 9), имеет очень высокий потенциал открытия крупных и богатых ЗРМ. На всем протяжении



Рис. 9. Ареалы распространения гранитоидов и размещение основных рудных месторождений в российской Арктике (по данным ГИС-анализа)

¹ Mustard R., Ulrich T., Kamenetsky V. S., Mernagh T. Gold and metal enrichment in natural granitic melts during fractional crystallization // *Geology*. — 2006. — Vol. 34. — P. 85—88.

Арктической зоны (на Кольском полуострове, Полярном Урале, Таймыре, Куларе и Чукотке) открыто большое количество рудопоявлений золота, связанных с интрузивами гранитоидов различного возраста. Таким образом, только за счет разведки обнаруженных ранее проявлений можно существенно нарастить минерально-сырьевую базу золота в Арктической зоне.

Наибольшие перспективы открытия новых перспективных ЗРМ на основе рассмотренной выше модели мы связываем с разновозрастными зонами ТМА, пересекающих террейны кратонного типа. В пределах последних зоны ТМА накладываются на выступы пород докембрийского фундамента, а также перекрывающие толщи фанерозойского чехла (гнейсы, кристаллические сланцы, амфиболиты и др., а также высокометаморфизованные породы), благоприятные для формирования структурных ловушек, в которых могут формироваться богатые ЗРМ типа месторождения Пого [8]. В отмеченных зонах ТМА широко развиты системы надвигов, образующие в благоприятных вмещающих породах пологие системы трещин, экранирующие гидротермальные золотоносные флюиды [8]. В размещении богатых ЗРМ (типа Школьное и Кекурное) в зонах ТМА определяющая роль принадлежит интрузивно-купольным структурам [15; 38]. Здесь процесс совмещения разных типов минерализации ведет к формированию богатых рудных столбов, которые во многих случаях определяют промышленную ценность ЗРМ [15]. Месторождение золота мирового класса Пого [8], а также месторождения Школьное (Магаданская область) [15] и Кекурное (Чукотка) [12], по нашему мнению, могут быть эталонами для поисков богатых ЗРМ в Арктической зоне России.

В старопромышленных районах Мурманской области [12] и в районах с развитой очаговой инфраструктурой (полярный Урал, Норильский, Чаунский) при высоких рыночных ценах на золото промышленное значение могут иметь и типичные крупнотоннажные штокерковые ЗРМ с рядовыми рудами, такие как месторождения пояса Тинтин — Форт-Нокс и др.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-70001.

Литература/References

1. Шило Н. А., Желнин С. Г., Сидоров А. А. Основные закономерности размещения коренных месторождений золота и связь с ними россыпей на северо-востоке СССР // Актуальные проблемы геологии золота на северо-востоке СССР. — Магадан: СВКНИИ, 1972. — С. 23—34. — (Вып. 44).
Shilo N. A., Zhelnin S. G., Sidorov A. A. Osnovnyye zakonornosti razmeshcheniya korennykh mestorozhdeniy zolota i svyaz s nimi rossypey na severo-vostoke SSSR. [The Main regularities of the placement of indigenous gold deposits and the relationship them

with placers in the North-East of the USSR]. Aktualnyye problemy geologii zolota na severo-vostoke SSSR. Magadan, SVKNII, 1972, pp. 23—34. (Vol. 44). (In Russian).

2. Осипов А. П., Сидоров А. А. Особенности и перспективы золото-редкометальной формации // Новые данные по геологии северо-востока СССР. — Магадан: СВКНИИ, 1973. — С. 40—52. (Вып. 5).

Osipov A. P., Sidorov A. A. Osobennosti i perspektivy zoloto-redkometalnoy formatsii. [Features and prospects of the gold-rare-metal formation]. Novyye dannyye po geologii severo-vostoka SSSR. Magadan, SVKNII, 1973, pp. 40—52. (Vol. 55). (In Russian).

3. Петровская Н. В. Самородное золото. — М.: Наука, 1973. — 348 с.

Petrovskaya N. V. Samorodnoye zoloto. [Native gold]. Moscow, Nauka, 1973, 348 p. (In Russian).

4. Фирсов Л. В. Золото-кварцевая формация Яно-Колымского пояса. — Новосибирск: Наука, 1985. — 220 с.

Firsov L. V. Zoloto-kvartsevaya formatsiya Yano-Kolymского пояса. [Gold quartz formation of the Yana-Kolyma belt]. Novosibirsk, Nauka, 1985, 220 p. (In Russian).

5. Горячев Н. А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов северо-востока Азии. — Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1998. — 210 с.

Goryachev N. A. Geologiya mezozoyskikh zoloto-kvartsevyykh zhilnykh poyasov severo-vostoka Azii. [Geology of Mesozoic gold-quartz veins zones of northeast Asia]. Magadan, SVKNII, 1998, 210 p. (In Russian).

6. Горячев Н. А. Происхождение золото-кварцевых жильных поясов северной Пацифики. — Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2003. — 143 с.

Goryachev N. A. Proiskhozhdeniye zoloto-kvartsevyykh zhilnykh poyasov severnoy Patsifiki. [Origin of gold quartz vein belts throughout the Northern Pacific Area]. Magadan, SVKNII, 2003, 143 p. (In Russian).

7. Lang J. R., Baker T., Hart C. J., Mortensen J. K. An exploration model for intrusion related gold systems. SEG Newsletter. 2000, no. 40, pp. 6—15.

8. Волков А. В., Сидоров А. А., Савва Н. Е. и др. Перспективы открытия на северо-востоке России богатых золото-редкометалльных месторождений // Вестн. СВНЦ. — 2015. — № 4. — С. 16—27.

Volkov A. V., Sidorov A. A., Savva N. E., Prokofiev V. Yu., Kolova E. E. Perspektivy otkrytiya na severo-vostoke Rossii bogatykh zoloto-redkometalnykh mestorozhdeniy. [Prospects of discovery of rich rare-metal deposits in the North-East of Russia]. Vestn. SVNTs DVO RAN, 2015, no. 4, pp. 16—27. (In Russian).

9. Freeman C. J. Geology and mineralization of the Shorty Creek project, Livengood-Tolovana mining district, Alaska. Geologic report sc-10exe1. Summary. 2010. 7 p. Available at: <http://trivalleycorp.com/docs/N1%2043-101es.pdf>.

10. Гамянин Г. Н., Гончаров В. И., Горячев Н. А. Золото-редкометалльное оруденение северо-востока России // Тихоокеан. геология. — 1998. — № 3. — С. 88—94.

- Gamyanin G. N., Goncharov V. I., Goryachev N. A. Zoloto-redkometallnoye orudneniye severo-vostoka Rossii. [Gold-rare metal mineralization of the North-East of Russia]. *Tikhookean. geologiya*, 1998, no. 3, pp. 88—94. (In Russian).
11. Гамянин Г. Н., Горячев Н. А., Бахарева А. Г. Условия зарождения и эволюции гранитоидных золоторудно-магматических систем в мезозоидах северо-востока Азии. — Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. — 196 с.
- Gamyanin G. N., Goryachev N. A., Bakharev A. G. Usloviya zarozhdeniya i evolyutsii granitoidnykh zolotorudno-magmaticheskikh sistem v mezozoidakh severo-vostoka Azii. [Conditions of origin and evolution of granitoid gold-magmatic systems in Mesozooid of the North-East Asia]. *Magadan, SVKNII DVO RAN*, 2003, 196 p. (In Russian).
12. Бортников Н. С. Геохимия и происхождение рудообразующих флюидов в гидротермально-магматических системах в тектонически активных зонах // *Геология руд. месторождений*. — 2006. — Т. 48, № 1. — С. 1—26.
- Bortnikov N. S. Geokhimiya i proiskhozhdeniye rudoobrazuyushchikh flyuidov v gidrotermalno-magmaticheskikh sistemakh v tektonicheski aktivnykh zonakh. [Geochemistry and origin of ore-forming fluids in hydrothermal-magmatic systems in tectonically active zones]. *Geologiya rud. mestorozhdeniy*, 2006, vol. 48, no. 1, pp. 1—26. (In Russian).
13. Волков А. В., Савва Н. Е., Сидоров А. А. О плутоногенных месторождениях с тонкодисперсным золотом // *Докл. РАН*. — 2007. — Т. 412, № 1. — С. 76—80.
- Volkov A. V., Savva N. E., Sidorov A. A. O plutonogennykh mestorozhdeniyakh s tonkodispersnym zolotom. [Plutonic deposits with fine gold]. *Dokl. RAN*, 2007, vol. 412, no. 1, pp. 76—80. (In Russian).
14. Hart C. J. R. Reduced intrusion-related gold systems. *Mineral deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 2007, no. 5, pp. 95—112.
15. Волков А. В., Савва Н. Е., Сидоров А. А. и др. Золоторудное месторождение Школьное (северо-восток России) // *Геология руд. месторождений*. — 2011. — Т. 53, № 1. — С. 3—31.
- Volkov A. V., Savva N. E., Sidorov A. A., Prokofyev V. Yu., Goryachev N. A., Voznesenskiy S. D., Alshevskiy A. V., Chernova A. E. Zolotorudnoye mestorozhdeniye Shkolnoye (severo-vostok Rossii). [School Gold mine (North-east of Russia)]. *Geologiya rud. mestorozhdeniy*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 3—31. (In Russian).
16. Волков А. В., Черепанова Н. В., Прокофьев В. Ю. и др. Месторождение золота в Бутарном гранитоидном штоке (северо-восток России): геологическое строение, минералогия и условия формирования руд // *Геология руд. месторождений*. — 2013. — Т. 55, № 3. — С. 214—237.
- Volkov A. V., Cherepanova N. V., Prokofyev V. Yu., Savva N. E., Smilgin S. V., Trubkin N. V., Alekseev V. Yu. Mestorozhdeniye zolota v Butarnom granitoidnom shtoke (severo-vostok Rossii): geologicheskoye stroeniye. mineralogiya i usloviya formirovaniya rud. [Gold Deposit in Butarny granitoid stock (Northeast of Russia): geological structure, mineralogy and ore formation conditions]. *Geologiya rud. mestorozhdeniy*, 2013, vol. 55, no. 3, pp. 214—237. (In Russian).
17. Волков А. В., Галямов А. Л., Сидоров А. А. Перспективы развития добычи золота в Чукотском автономном округе // *Арктика: экология и экономика*. — 2017. — № 4 (28). — С. 83—97.
- Volkov A. V., Galyamov A. L., Sidorov A. A. Perspektivy razvitiya dobychi zolota v Chukotskom avtonomnom okruge. [Prospects of gold mining development in the Chukotka Autonomous district]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2017, no. 4 (28), pp. 83—97. (In Russian). DOI: 10.25283/2223-4594-2017-83-97.
18. Бортников Н. С., Лобанов К. В., Волков А. В. и др. Арктические ресурсы золота в глобальной перспективе // *Арктика: экология и экономика*. — 2014. — № 4 (16). — С. 28—37.
- Bortnikov N. S., Lobanov K. V., Volkov A. V., Galyamov A. L., Murashov K. Yu. Arkticheskiye resursy zolota v globalnoy perspektive. [Arctic Gold Resources in Global Prospect]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2014, no. 4 (16), pp. 28—37. (In Russian).
19. Волков А. В., Сидоров А. А., Гончаров В. И., Сидоров В. А. Золото-сульфидные месторождения вкрапленных руд северо-востока России // *Геология руд. месторождений*. — 2002. — Т. 4, № 3. — С. 179—197.
- Volkov A. V., Sidorov A. A., Goncharov V. I., Sidorov V. A. Zoloto-sulfidnyye mestorozhdeniya vkraplennykh rud severo-vostoka Rossii. [Gold-sulfide deposits of disseminated ores of the North-East of Russia]. *Geologiya rud. mestorozhdeniy*, 2002, vol. 44, no. 3, pp. 179—197. (In Russian).
20. Сидоров А. А., Волков А. В., Чехов А. Д. О металлогенической эволюции палеоукраинноморской литосферы мезозоид северо-востока России // *Вестн. СВНЦ ДВО РАН*. — 2012. — № 1. — С. 2—8.
- Sidorov A. A., Volkov A. V., Chekhov A. D. O metallogenicheskoy evolyutsii paleookrainnomorskoy litosfery mezozoid severo-vostoka Rossii. [On the metallogenic evolution of the Mesozoic paleoceanological lithosphere of the North-East of Russia]. *Vestnik SVNTs DVO RAN*, 2012, no. 1, pp. 2—8. (In Russian).
21. Bakke A. A. The Fort Knox 'porphyry' gold deposit — Structurally controlled stocwork and shear quartz vein, sulphide-poor mineralization hosted by a Late Cretaceous pluton, east-central Alaska. *Porphyry deposits of the Northwestern Cordillera of North America*. T. G. Schroeter, editor. CIM Special vol. 46, 1995, pp. 795—802.
22. Baker T., Lang J. R. Fluid inclusion characteristics of intrusion related gold mineralization, tombstone-Tungsten magmatic belt, Yukon Territory, Canada. *Mineral. Depos.* 2001, vol. 36, pp. 563—582.

23. Волков А. В., Сидоров В. А., Сидоров А. А. Золото-скарновые месторождения северо-востока России // Докл. Акад. наук. — 2008. — Т. 418, № 6. — С. 797—801.
- Volkov A. V., Sidorov V. A., Sidorov A. A. Zoloto-skarnovyye mestorozhdeniya severo-vostoka Rossii. [Gold-scar deposits of the North-East of Russia]. Dokl. Akad. nauk, 2008, vol. 418, no. 6, pp. 797—801. (In Russian).
24. Baker T. Emplacement depth and carbon dioxide-rich fluid inclusions in intrusion-related gold deposits. Econ. Geol., 2002, vol. 97, pp. 1111—1117.
25. Шаповалов В. С., Савва Н. Е. Некоторые генетические особенности формирования плутоногенных золото-редкометалльных месторождений северо-востока СССР // Колыма. — 1979. — № 8. — С. 33—35.
- Shapovalov V. S., Savva N. E. Nekotoryye geneticheskiye osobennosti formirovaniya plutonogennykh zoloto-redkometallnykh mestorozhdeniy severo-vostoka SSSR. [Some genetic peculiarities of formation of plutogenic gold-rare-metal deposits of Northeast USSR]. Kolyma, 1979, no. 8, pp. 33—35. (In Russian).
26. Прокофьев В. Ю., Волков А. В., Горячев Н. А., Сидоров А. А. Новые данные об условиях формирования и составе рудообразующих флюидов золоторудного месторождения Школьное (северо-восток России) // Докл. Акад. наук. — 2005. — Т. 401, № 5. — С. 673—678.
- Prokofyev V. Yu., Volkov A. V., Goryachev N. A., Sidorov A. A. Novyye dannyye ob usloviyakh formirovaniya i sostave rudoobrazuyushchikh flyuidov zolotorudnogo mestorozhdeniya Shkolnoye (severo-vostok Rossii). [New data on conditions of formation and composition of ore-forming fluids of Shkolnoye gold Deposit (North-East of Russia)]. Dokl. Akad. nauk, 2005, vol. 401, no. 5, pp. 673—678. (In Russian).
27. Marsh E. E., Hart C. J. R., Goldfarb R. J., Allen T. L. Geology and geochemistry of the Clear Creek gold occurrences, Tombstone gold belt, central Yukon Territory. Exploration and Geological Services Division, Yukon Region, Indian and Northern Affairs Canada, 1999, pp. 185—196.
28. Mair J. L., Goldfarb R. J., Johnson C. A., Hart C. J. R., Marsh E. E. Geochemical constraints on the genesis of the Scheelite Dome intrusion-related gold deposit, Tombstone Gold Belt, Yukon, Canada. Econ. Geol., 2006, vol. 101, pp. 523—553.
29. Maloof T. L., Baker T., Thompson J. F. H. The Dublin Gulch intrusion-hosted deposit, Tombstone Plutonic Suite, Yukon Territory, Canada. Mineral. Depos. 2001, vol. 36, pp. 583—593.
30. Burnham C. W., Ohmoto H. Late-stage processes of felsic magmatism. Kozan Chishitsu (Mining Geology), 1980, vol. 8, pp. 1—11.
31. Candela P. A., Blevin L. P. Do some miarolitic cavities preserve evidence of magmatic volatile phase permeability? Economic Geology, 1995, vol. 90, pp. 2310—2316.
32. Candela P. A., Piccoli P. M. Magmatic processes in the development of porphyry-type ore systems. Economic Geology 100th Anniversary Volume, 2005, pp. 25—38.
33. Ishihara S. The granitoid series and mineralization. Economic Geology 75th Anniversary Volume, 1981, pp. 458—484.
34. Thompson J. F. H., Sillitoe R. H., Baker T., Lang J. R., Mortensen J. K. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces. Mineral. Depos., 1999, vol. 34, pp. 323—334.
35. Mungall J. E. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. Geology, 2002, vol. 30, pp. 915—918.
36. Burnham C. W. Magma and hydrothermal fluids. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. 2nd edition. New York, Wiley, 1979, pp. 71—136.
37. Marsh E. E., Goldfarb R. J., Hart C. J. R., Johnson C. A. Geology and geochemistry of the Clear Creek intrusion-related gold occurrences, Tintina gold province, Yukon, Canada. Canadian J. of Earth Sciences, 2003, vol. 40, no. 5, pp. 681—699.
38. Волков А. В., Сидоров А. А., Савва Н. Е. и др. Зоны тонкорассеянной сульфидной минерализации северо-востока России — эффективные источники вещества рудных месторождений // Тихоокеанский рудный пояс: материалы новых исследований (к 100-летию Е. А. Радкевич) / Гл. ред. А. И. Ханчук. — Владивосток: Дальнаука, 2008. — С. 36—51.
- Volkov A. V., Sidorov A. A., Savva N. E., Tomson I. N., Alekseev V. Yu. Zony tonkorasseyannoy sulfidnoy mineralizatsii severo-vostoka Rossii — effektivnyye istochniki veshchestva rudnykh mestorozhdeniy. [Zone of finely dispersed sulphide mineralization of the North-East of Russia — effective sources of substance of ore deposits]. Tikhookeanskiy rudnyy poyas: materialy novykh issledovaniy (k 100-letiyu E. A. Radkevich), Gl. red. A. I. Khanchuk. Vladivostok, Dalnauka, 2008, pp. 36—51. (In Russian).
39. Волков А. В. Закономерности размещения и условия формирования золоторудных месторождений в зонах тектоно-магматической активизации северо-востока России // Геология руд. месторождений. — 2005. — Т. 47, № 3. — С. 211—229.
- Volkov A. V. Zakonomernosti razmeshcheniya i usloviya formirovaniya zolotorudnykh mestorozhdeniy v zonakh tektono-magmaticheskoy aktivizatsii severo-vostoka Rossii. [Patterns of distribution and conditions of formation of gold deposits in areas of tectonic-magmatic activation in the North-East of Russia]. Geologiya rud. mestorozhdeniy, 2005, vol. 47, no. 3, pp. 211—229. (In Russian).
40. Тейлор С. Р., Мак-Леннан С. М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. — М.: Мир, 1988. — 384 с.
- Taylor S. R., McLennan S. M. Kontinentalnaya kora: eye sostav i evolyutsiya. [Continental crust: its composition and evolution]. Moscow, Mir, 1988, 384 p. (In Russian).

Информация об авторах

Волков Александр Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., 35), e-mail: tma2105@mail.ru.

Сидоров Анатолий Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., 35), e-mail: Kolyma@igem.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Волков А. В., Сидоров А. А. Прогнозно-поисковая модель месторождений золота, связанных с интрузивами гранитоидов Арктической зоны России // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 3 (31). — С. 84—99. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-84-99.

FORECAST-EXPLORATION MODEL OF GOLD DEPOSITS ASSOCIATED WITH GRANITOID INTRUSIONS OF THE RUSSIAN ARCTIC ZONE

Volkov A. V., Sidorov A. A.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (Moscow, Russian Federation)

Abstract

The article presents a forecast-exploration model that summarizes the most important characteristics of gold deposits associated with intrusions of granitoids (IRGS), as applied to the Arctic zone of Russia. In the North-East of Russia, such deposits are called gold-rare-metal deposits (GRMD), due to the noticeable admixture in ores of Bi, Te, W, Co and Sn. The presented model is based mainly on the results of GRDM studies of the North-East of Russia, as well as on the data of foreign researchers who studied IRGS deposits of the Tintin metallogenic belt, located in Northern Canada (Yukon) and Alaska. In the geological part of the model, GRDM classification features in relation to other types of hydrothermal magmatic systems are emphasized. The most important indicator factors in the GRDM formation are put on the forefront. It is shown that in economically undeveloped regions of the Russian Arctic zone the most interesting are the rich GRDM vein of Pogo type deposit (Alaska, USA), Shkolnoe (Magadan region) and Kekurnoe (Chukotka). On the territory of the European part of the Arctic zone, in the more developed old industrial regions of the Kola Peninsula, Karelia, Arkhangelsk region and the Polar Urals there are also industrially important stockwork large-capacity GRMDs (such as Fort Knox, Alaska, USA).

Keywords: Arctic zone, granitoid magmatism, intrusion, gold, exploration model, deposit, forecast, criteria.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, program № 18-05-70001.

Information about the authors

Volkov Alexander Vladimirovich, Doctor of Science, Head of Laboratory, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetny per., Moscow, 119017, Russia), e-mail: tma2105@mail.ru.

Sidorov Anatoliy Alekseyevich, Doctor of Geologo-Mineralogical Sciences, Corresponding member RAS, Chief Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetny per., Moscow, 119017, Russia), e-mail: Kolyma@igem.ru.

Bibliographic description

Volkov A. V., Sidorov A. A. Forecast-exploration model of gold deposits associated with granitoid intrusions of the Russian Arctic zone. The Arctic: ecology and economy, 2018, no. 3 (31), pp. 84—99. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-84-99. (In Russian).