УДК 553.411(571.65)

ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОДУКТИВНОГО ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ УЧАСТКА ФРОНТ (ЭНДОКОНТАКТ БЕРЕНТАЛЬСКОГО ШТОКА, МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

^{1,2}Ивасенко Р.Н., ^{2,3}Хасанов И.М.¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, e-mail: rivassenko@srfedu.ru;²ООО «Золотодобывающая корпорация», Магаданская обл. п. Ягодное;³Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт
им. Н.А. Шило ДВО РАН, Магадан

В статье представлено комплексное изучение гидротермального золоторудного проявления Фронт Лео-Мякитского рудного узла. Рудопоявление локализовано в южном окончании Мякитского интрузива басугунинского комплекса. Интрузивы басугунинского комплекса являются потенциально перспективными для обнаружения золото-редкометалльных месторождений. В пределах рудопоявления выделено два типа рудных тел, в результате исследования для каждого из них установлены ключевые особенности. Рудные тела 1-го типа непродуктивны, представляют собой прожилки кварца в силлах березитизированных гранитов. Продуктивные рудные тела 2-го типа локализованы в разломной зоне в аналогичных березитизированных гранитах. Установлено наличие двух этапов формирования золота – малопродуктивного площадного метасоматического и продуктивного гидротермального, локализованного в пределах разрывных нарушений. Рудные тела 1-го типа представляют собой кварцевые жилы и прожилки с арсенопиритом, леллингитом, висмутином и золотом. Рудные тела 2-го типа представляют собой кварцевые прожилки с теллуридами висмута, арсенопиритом, галенитом, сфалеритом и золотом. На основании изучения вторичных и первичных ореолов рассеяния выявлена геохимическая зональность. Методами корреляционного анализа установлены соответствующие типам рудных тел геохимические ассоциации – Au-As-Bi и Au-Zn-Bi. Методами декрипитации и газовой хроматографии выявлена схожесть термобарогеохимических особенностей кварцев обоих типов руд. Для кварцев обоих типов характерны максимумы интервалов газовой выделения при температурах 260–280 °, по составу выделенных газов отличий не выявлено. По результатам исследований выделены комплексные критерии продуктивного оруденения. Установлено, что продуктивное оруденение связано с тектонической зоной северо-восточного простирания, характеризуется наличием золота поздней генерации и наличием теллуридов висмута.

Ключевые слова: золото-редкометалльные месторождения, гидротермальные процессы, геохимические ассоциации

GEOLOGICAL AND GEOCHEMICAL PARAMETERS OF PRODUCTIVE GOLD MINERALIZATION FRONT GOLD ORE OCCURRENCE (ENDOCONTACT OF THE BERMENTAL STOCK, MAGADAN REGION)

^{1,2}Ivasenko R.N., ^{2,3}Khasanov I.M.¹South Federal University, Rostov-on-Don, e-mail: rivassenko@srfedu.ru;²«Zolotodobyvayushchaya korporatsiya» LLC, Magadan region, Yagodnoe village;³N.A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, FEB RAS, Magadan

The article deals with the results of a comprehensive study of the hydrothermal Front gold ore occurrence, Left-Myakitore cluster. The ore occurrence is localized at the southern end of this structure Basugun'inskiy intrusion complex. Basugun'inskiy intrusion complex is potentially likely for the strike of gold-rare-metal deposits. Within the ore occurrence two types of ore bodies are distinguished, as a result of research for each of them key features are established. Ore bodies of the 1st type is unproductive, they are veins of quartz in the sill of berezitized granites. The productive ore bodies of the 2nd type is localized in the fault zone in a similar berezitized granites. The presence of two stages of gold formation is established – unproductive, formed during metasomatism of the area and productive hydrothermally process, linked with faults. Ore bodies of the 1st type are quartz veins and veins with arsenopyrite, lellingite, bismuthin and high-fineness gold. Ore bodies of the second type are quartz veins with bismuth tellurides, arsenopyrite, galena, sphalerite and gold. Geochemical zonality is revealed on the basis of secondary and primary dispersion halos. Geochemical associations (Au-As-Bi and Au-Zn-Bi) associated with the corresponding types of ore bodies are established by the methods of correlation analysis. Identity of quartz features of both types of ores identified by methods of decrepitation and gas chromatography. For both types of quartz, the maxima of the gassing intervals are characteristic at temperatures of 260–280 °, no difference in gas composition. According to the results of research, complex criteria for productive mineralization have been identified. It is established that productive gold metallization is associated with the tectonic zone of the North-Eastern strike, it is characterized by the presence of late generation of gold and the presence of bismuth tellurides.

Keywords: gold-rare-metal deposits, hydrothermal processes, geochemical associations

Исследуемая территория относится к Яно-Колымской складчатой системе Верхояно-Колымской мезозойской складчатой области. Основным её структурным элементом является Мякит-Хурчанская

антиклиналь Балыгычанского поднятия. Северо-восточная часть ядра антиклинали прорвана Берентальским штоком гранитов нормального ряда, относящегося к выходам Мякитского плутона ба-

сугуньинского комплекса позднеюрского возраста. Шток прорывает терригенные алевро-песчанистые отложения раннего триаса. Массив конкордантно залегает по отношению к вмещающим складчатым структурам северо-западной и меридиональной ориентировки на зоне разломов субмеридионального направления и северо-западных разломов Мякит-Хурчанской зоны [1]. Для интрузий басугуньинского комплекса установлена генетическая связь с золото-редкометалльным (золото-теллуридно-висмутовым) оруденением [1, 2]. Для интрузивных пород характерен березитовый тип изменений. Новообразованные минералы представлены кварцем, мусковитом, железистым карбонатом, альбитом, пиритом.

Проявление Фронт расположено в южном эндоконтакте Берентальского гранитного штока, прорывающего и метаморфизирующего терригенные отложения

триаса. Южный контакт массива полого погружается на юг, о чем свидетельствует широкое поле роговиков, остатки кровли на гранитах и многочисленные апофизы, отходящие от массива в южном направлении (рис. 1). Рудные тела локализованы в силах гранит-порфиров, березитизированных, рассеченных малоамплитудными сбросами северо-восточного и меридионального простирания.

В результате исследований, основанных на материалах проводимых ООО «Золотодобывающая корпорация» поисковых работ (2011–2015, 2015–2018 гг.), установлены параметры продуктивного типа оруденения, определены поисковые признаки. В результате поисковых работ были установлены прогнозные ресурсы по категории Р1 290 кг золота. Столь незначительный объем связан с малой мощностью рудных тел и ограниченным распространением оруденения (только в силах березитов).

Рис. 1. Схема геологического строения участка: 1 – граниты Басугуньинского комплекса; 2 – зоны березитизации пород; 3 – кварцевые (q), сульфид-кварцевые (sq), арсенопирит-кварцевые (arq) жилы (a), прожилковые зоны (b), минерализованные зоны дробления (v); 4 – разломы достоверные (a), предполагаемые (б); 5 – Рудопроявления и пункты минерализации, содержания золота; 6 – рудные тела

Объектом исследования являлись золоторудные минеральные ассоциации рудопоявления Фронт Берентальского ППП. Подобные объекты – малые месторождения золота в гранитных штоках – являются одним из ключевых направлений геолого-поисковых геолого-разведочных работ в Магаданской области.

Ключевой целью исследования являлось установление геолого-геохимических характеристик рудных тел, особенностей их распределения в пределах рудопоявления, а также выявление признаков продуктивного оруденения.

Материалы и методы исследования

Изучение геохимических характеристик рудопоявления проводилось по лабораторным данным результатов опробования вторичных (ВОР) и первичных (ПОР) ореолов рассеяния (17948 и 3062 проб соответственно). В изучаемые выборки легли как результаты опробования ВОР ООО «ЗДК», так и результаты опробования предшественников. Пробы ООО «ЗДК» анализировались полуколичественным спектральным методом на 23 элемента в лаборатории ООО «СтюартГеокемикалЭндЭссей».

Неакцентированная (без применения весовых функций) классификация выполнялась программными средствами «АННА» (реализует эвристический алгоритм «Forel») и «Statistica». В результате классификации достигалось разбиение совокупности на несколько однородных классов. Ведущие элементы каждого класса (геохимический ряд привноса) рассчитывались путем нормирования среднего содержания элемента в классе на медианную величину генеральной выборки. Медианная величина генеральной выборки условно принята в качестве условного «геохимического фона». Степень схожести приведенных геохимических рядов анализировалась путем расчета коэффициентов ранговой корреляции. Коэффициенты ранговой корреляции рассчитывались по принципу кластеризации – Метод Уорда, в качестве меры межкластерных расстояний использовался коэффициент ранговой корреляции Пирсона.

Вещественный состав руд и рудовмещающих пород комплексно изучался методами оптической микроскопии, электронно-зондового микроанализа. Основной объем этих исследований выполнен на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием «Исследований минерального

сырья и состояния окружающей среды» Южного федерального университета (энерго-дисперсионный микроанализатор INCA Wave 700 на базе растрового электронного микроскопа VEGA II LMU).

Термобарогеохимические исследования монофракций кварцев рудоносных тел проводились методами вакуумной декриптометрии на декриптометре ВД-5. Пробо-подготовка и интерпретация результатов проводилась по общепринятой методике [3]. Учитывая возможное влияние эффектов, связанных с присутствием термоактивных фаз, для части образцов (дубликатов) применялось травление концентрированной соляной кислотой с последующей промывкой в дистиллированной воде [4].

Результаты исследования и их обсуждение

Для проявления Фронт характерны два типа рудных тел. Рудные тела 1-го типа представлены березитизированными гранит-порфирами и распространены практически повсеместно в области южного и восточного эндоконтактов. Породы пронизаны прожилками халцедоновидного кварца мощностью до первых сантиметров, иногда с адуляром, с максимальными концентрациями золота в первые г/т. Мощности подобных рудных тел не превышают первые метры, характеризуются крайне неравномерным распределением полезного компонента.

Рудные тела 2-го типа локализованы в зоне влияния разлома руч. Фронт и представляют собой катаклазированные и березитизированные гранит-порфиры с густым сульфидно-кварцевым прожилкованием, характеризующимся повышенной золотосодержимостью – до 10 и более г/т. Сульфиды в прожилках представлены гнездовой и рассеянной вкрапленностью арсенопирита, пирита, сфалерита, пирротина, помимо сульфидов отмечаются карбонаты и хлорит. Общая минерализация в прожилках составляет 1–5 %. Среднее содержание золота по выявленному рудному телу № 1 составляет 3,21 г/т. Прогнозные ресурсы категории P_1 при площади горизонтальной проекции рудной зоны 1 (осевая часть проявления) около 13500 м², средней суммированной мощности (в восточной части оно разделено на два фрагмента) рудного тела 2,7 м, среднем содержании 3,21 г/т, плотности руды – 2,56 т/м³, составят 0,09 млн т руды или 290 кг золота (данные ООО «Золотодобывающая корпорация», 2015 г).

Во ВОР выявляется Au-As-Bi-Pb-Sn потенциально золоторудная геохимическая ассоциация, приуроченная к рудным телам как первого (березиты), так и второго типа. Устойчивость этой ассоциации верифицируется результатами факторного анализа – ей отвечает третий из пяти выделенных факторов (таблица). Пространственная локализация проб с положительными значениями этого фактора совпадает с локализацией Au-As-Bi-Pb-Sn класса, выделенного при многомерной классификации.

В ПОР в результате многомерной не-иерархической классификации (алгоритм «Forel») выделены две золоторудные ассоциации (рис. 2). Первая ассоциация – Au-Bi (класс 1) – характеризуется привносом As, Bi, Au, Sn и Pb (таблица), приурочены пробы, относимые к этой ассоциации, к площадям развития рудных тел 2-го типа. По характеру корреляционных связей в ассоциации золото образует уверенную пару только с висмутом и никелем (0,9). Вторая ассоциация – Au-Zn (класс 2) – более контрастная, характеризуется рядом привноса Au-As-Bi-Zn (с коэффициентами корреляции между элементами не ниже 0,53 при уровне значимости 95 %).

По итогам факторного анализа результатов опробования ПОР были выделены 4 фактора, два из которых соответствуют геохимическим ассоциациям, выявленным с помощью неиерархической классифика-

ции. Области высоких нагрузок фактора 2 пространственно близки к областям метасоматической проработки гранит-порфиров. Элементы с высокими нагрузками (Bi, Sn, W, Mo, Ag, As, Au) в факторе 2 являются ведущими элементами геохимической ассоциацией класса 1, выделенной при многомерной классификации. Фактор 3 определяется отрицательными нагрузками – Au, Cd, Zn, Bi, максимум отрицательных нагрузок этого фактора приходится на осевую часть рудопоявления Фронт, локализованного в пределах разлома северо-восточного простирания и на плане совмещается с областями распространения класса 2. В целом фактор 3 отражает особенности второй, золото-цинковой ассоциации, пространственно связанной с зоной тектонической проработки в центральной части участка [5].

В пределах проявления выявлены две ключевые золоторудные минералогические ассоциации – арсенопирит-теллуридная и арсенопирит-сульфидная. Установлено, что арсенид-теллуридная ассоциация отвечает продуктивному типу рудных тел, локализованному в центральной части проявления. Для арсенопирита, образованного в виде мелкозернистой вкрапленности в прожилках, характерно наличие вкрапленных пирротина размером 10–20 мкм, теллуридов висмута размером до 10 мкм и тесно ассоциирующего с ними золота размером до 5 мкм.

Результаты многомерных исследований ПОР и ВОР

Ореолы	Классы*	Факторы**
ВОР	Класс 1 As(36,1), Au(7,3), Ag(2,3), Pb(2,2), Sn(2), Li(1,8), Bi(1,8), Cu(1,7) Проб в классе – 413; Всего классов – 12	Фактор 2, Prp.Totl 0,1: As _{0,71} Bi _{0,6} Sn _{0,37} Mo _{0,28} Cr _{0,24} Au _{0,09} Co _{0,23} Mn _{0,23} Zn _{0,17} Ni _{0,12} Ag _{0,08} Pb _{0,07}
ПОР	Класс 1 As(53,4), Au(7,4), Sn(3,7), Bi(3,1), W(2,7), Pb(2,4) Проб в классе – 40 Класс 2 Au(3458,3), (As350,2), Bi(114,9), Zn(60,4), Cd(29,6), (Ag11,6), Pb(6,1), Sn(4,8), W(3,7), Проб в классе – 18; Всего классов – 10	Фактор 2, Prp.Totl – 0,22: Bi _{0,84} Ag _{0,81} As _{0,80} Au _{0,74} Cd _{0,70} W _{0,47} Sn _{0,47} Mo _{0,44} Cr _{0,36} Pb _{0,22} Ni _{0,21} Zn _{0,20} Cu _{0,20} Mn _{0,13} Sb _{0,04} Фактор 3, Prp.Totl – 0,1: Zn _{-0,51} Cd _{-0,49} Au _{-0,43} Co _{-0,12} Li _{-0,11} Bi _{-0,10} Sn _{0,57} W _{0,51} Cr _{0,44} Mo _{0,29} Mn _{0,26} As _{0,21} Pb _{0,19} P _{0,09} Cu _{0,09}

Примечания: *в скобках указаны средние содержания элементов в классе по отношению к медиане элемента в пределах рудного узла; **в индексах указаны величины факторных нагрузок для элементов.

Рис. 2. А) Разноски класса 1 многомерной классификации проб ВОР;
Б) Разноски классов 1 и 2 многомерной классификации проб ПОР

Рис. 3. А) Декриптометрическая кривая и характер приращения непродуктивных гидротермалитов;
Б) Декриптометрическая кривая и характер приращения продуктивных гидротермалитов

Арсенопирит-сульфидная ассоциация характеризует рудные тела второго типа с низким содержанием золота, локализованные как в осевой части, так и на периферии проявления. Вторую золоторудную ассоциацию (арсенид-сульфидную) образуют арсенопирит, леллингит, пирит, висмутин, самородный висмут, сульфосоли висмута и серебра, золото. Сульфиды в этой ассоциации образуют включения в арсенопирите и леллингите. Висмутин отмечается в виде вкрапленников в арсенопирите в ассоциации с самородным висмутом и сульфосолями висмута и серебра. Микровключения золота размерностью $2 \cdot 10^{-6}$ м находятся в виде свободных вкрапленников в арсенопирите.

По результатам исследований ИГЭМ РАН и ЦНИГРИ [6] золото в агрегатах несет выраженные признаки стадийных диф-

фузионных преобразований и твердофазной перекристаллизации, что позволяет выделить в пределах участка три его последовательно образованных генетических группы [6]. Раннее относительно высокопробное золото первой группы (800–900‰) характеризуется наличием микропримесей меди и ртути (до 1 мас.%). Золото второй группы распространено ограниченно, оно характеризуется диффузионными взаимоотношениями с золотом первой группы. Относительно средне- и высокопробное (750–945‰) позднее золото третьей группы характеризуется микропримесями вольфрама и теллура до 0,08 мас.% [6].

Сопоставляя результаты исследований типов золота [6] с результатами изучения вещественного состава установлено предположительное соответствие золоту первой группы арсенопирит-сульфидной мине-

ральной ассоциации, золоту третьей группы – арсенопирит-теллуридной.

Наличие двух главных генетических типов золота подтверждается результатами исследований сотрудников СВКНИИ ДВО РАН [7]. Авторами выделяется мальдонит-сульфотеллуридный минеральный тип золото-редкометалльного оруденения.

Кварц жил и прожилков, содержащих продуктивную арсенид-теллуридную и непродуктивную арсенид-сульфидную ассоциации, различается декриптометрическими эффектами. При этом начало интервалов температур декрипитации в них приходится на близкие температуры – 200–210 °C и 470 °C, – что указывает на близость параметров. В непродуктивных гидротермалитах установлены три интервала газовыделения в температурных диапазонах ~100 °C (связанный с выделением гигроскопической влаги), 200–370 ° (с пиком ~270 °) и 420–500 °C (рис. 3). В продуктивных гидротермалитах пик наиболее показательного (фиксирующего процессы формирования кварцевых жил, сопряжённого с березитизацией) интервала смещено в более высокотемпературную область (290 °C). Наличие более низкотемпературного интервала (80–140 °C) указывает на наложенную гидротермальную переработку, что в целом типично для зоны контролирующего разлома и проявлено в развитии кварц-карбонатных жил.

Заключение

Приведённый комплекс данных позволяет определить в качестве продуктивной ассоциации арсенопирит-теллуридную. В качестве комплекса поисковых признаков продуктивного оруденения рекомендуется рассматривать:

- 1) наличие комплексных ореолов золота, висмута, мышьяка, олова, вольфрама, цинка во вторичных ореолах рассеяния с высокой степенью корреляции между этими элементами;
- 2) развитие в первичных ореолах рассеяния золото-висмут-цинковой геохимической ассоциации;
- 3) наличие теллуридов висмута и пирротина в золоторудных минеральных ассоциациях;
- 4) наличие микропримесей теллура в средне-высокопробном золоте до 0,1 мас %.

Рудные тела локализованы в областях совмещения зон березитизации гранитоидов и зон разломов северо-восточного простирания.

Список литературы / References

1. Горячев Н.А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1998. 210 с.
- Goryachev N.A. Geology of Mesozoic Gold Quartz Vein Belts in Northeastern Asia. Magadan: SVKNII DVO RAN, 1998. 210 p. (in Russian).
2. Кузнецов В.М., Горячев Н.А., Жигалов С.В., Савва Н.Е. Структура и рудоносность Маякит-Хурчанского рудно-россыпного узла // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2011. № 4. С. 37–51.
- Kuznetsov V.M., Goryachev N.A., Zhigalov S.V., Savva N.E. Structural setting and ore minerals of the Myakit-Khurchan mineral district // Bulletin of the NEISRI FEB RAS. № 4. P. 37–51 (in Russian).
3. Труфанов В.Н., Гамов М.И., Дудкевич Л.К., Майский Ю.Г., Труфанов А.В. Прикладная термобарогеохимия. Ростов н/Д.: РГУ, 1992. 220 с.
- Trufanov V.N., Gamov M.I., Dudkevich L.K., May-skiy Yu.G., Trufanov A.V. Fundamentals of applied thermobarogeochemistry. Rostov-on-Don: RGU, 1992. 220 p. (in Russian).
4. Попов Ю.В., Прокопов Н.С. Источники и пути снижения «фоновых шумов» в термовакuumной декриптометрии флюидных включений в минералах // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Материалы III Всероссийской научно-технической конференции. Грозный: АН Чеченской Республики, 2014. С. 66–70.
- Popov Yu.V., Prokopov N.S. Sources and ways to reduce «background noise» in thermal vacuum criptometeria of fluid inclusions in minerals // Sovremennyye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza. Materialy III Vse-rossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. Grozny: AS Chechen Republic, 2014. P. 66–70 (in Russian).
5. Ивасенко Р.Н., Шерстобитов П.А., Алевская Н.Л. Геохимические особенности первичных ореолов рассеяния участка Фронт прогнозируемого Берентальского рудного поля Лево-Мякитского рудного узла (Магаданская область) // VI Российская молодёжная научно-практическая школа «Новое в познании процессов рудообразования». ИГЕМ РАН. Сборник материалов. М., 2016. С. 129–134.
- Ivasenko R.N., Sherstobitov P.A., Alevskaya N.L. Geochemical characteristics of primary halos of Front mining site, projected Berental ore field of Left-Myakit ore cluster (Magadan oblast) // VI Rossiyskaya molodozhnaya nauchno-prakticheskaya shkola «Novoye v poznani protsessov rudoobrazovaniya». IGEM RAN. Sbornik materialov. M., 2016. P. 129–134 (in Russian).
6. Позднякова Н.Н. Внутреннее строение самородного золота Берентальского рудного поля (Яно-Колымский золотоносный пояс) // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии, материалы конференции. Сыктывкар, 2016. С. 54–55.
- Pozdnyakova N.N. The internal structure of native gold of the Berental ore field (Yano-Kolyma gold-bearing belt) // Sovremennyye problemy teoreticheskoy, eksperimental'noy i prikladnoy mineralogii, materialy konferentsii. Syktyvkar, 2016. P. 54–55 (in Russian).
7. Соломенцева Л.А., Литвиненко И.С. Типоморфизм самородного золота золото-редкометалльного рудного проявления Фронт (Северо-восток России) // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2015. № 2. С. 28–39.
- Solomentseva L.A., Litvinenko I.S. Native gold typomorphism at the Front Au lode, Nnorth-East of Russia // Bulletin of the NEISRI FEB RAS. 2015. P. 28–39 (in Russian).