УДК 553.411

А.Л.ПОПОВ, *аспирант, alpopov06@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

A.L.POPOV, *post-graduate student, alpopov06@mail.ru*
National Mineral Resources University (*Mining University*), *Saint Petersburg*

РАСПОЗНАВАНИЕ РУДНЫХ АССОЦИАЦИЙ ПО ХАРАКТЕРУ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ РУДООБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТОЕ (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ)

Сопоставляются геохимические спектры различных ореолов рассеяния месторождения Золотое с фактическими данными, полученными при детальных минералогических исследованиях, с целью распознавания руд месторождения по характеру изменчивости геохимического спектра рудообразующих элементов.

Несмотря на достаточно стойкую рудную ассоциацию, прослеживаемую на всех этапах эволюции геохимических ореолов (золото – арсенопирит – пирит), процессы окисления и выветривания руд месторождения в значительной степени сказываются на индикаторных возможностях элементов-спутников золота.

***Ключевые слова*:** Енисейский кряж, геохимический спектр, индикаторные возможности элементов, эволюция геохимических ореолов, рудообразующие элементы

IDENTIFICATION OF ORE ASSOCIATION BY VARIATION OF GEOCHEMICAL SPECTRUM OF ORE-FORMING ELEMENTS ON THE EXAMPLE OF ZOLOTOE DEPOSIT (YENISEI RIDGE)

This paper presents a comparison of the spectrum of different geochemical dispersion patterns of Zolotoe deposit with actual data obtained from detailed mineralogical studies, in order to identify mineral composition of ore by variability of the geochemical spectrum of ore-forming elements.

Despite the fairly resistant ore associations, traceable at all stages of the evolution of geochemical patterns (gold-arsenopyrite-pyrite), the processes of oxidation and weathering of ore deposits greatly affect the possibilities of indicator satellite elements of gold.

***Key words*:** Yenisei ridge, geochemical spectrum, possibilities of indicator elements, evolution of geochemical patterns, ore-forming elements.

Этап интенсивного опоискования Нойбинской площади, в пределах которой расположено месторождение Золотое, пришелся на вторую половину XIX в., в связи с «золотой лихорадкой». В результате в пределах площади были выявлены и вовлечены в эксплуатацию свыше 11 золотоносных россыпей [2]. В 1990-1993 годах геологи Березовской экспедиции выявили обширные вторичные ореолы золота и его спутников в пределах Тейско-Уволжского рудного узла. Активные поисковые и разведочные работы здесь начались в 2005 г. и ведутся до сих пор. В 2009 г. по итогам оценочных работ в пределах Тейско-Уволжского рудного узла обнаружено месторождение Золотое.

Оруденение месторождения Золотое имеет гидротермально-метасоматическую

природу и приурочено к зонам наиболее интенсивного метасоматического преобразования пород. Однако состав вмещающих пород не может служить определяющим при оконтуривании рудных зон. Визуальное выделение рудных зон невозможно и осуществляется лишь по результатам опробования. Таким образом, возникает необходимость в распознавании руд месторождения по характеру геохимического спектра, что повысит точность выделения рудных зон.

В распределении золота по площади просматривается четкая приуроченность его максимальных концентраций к фронтальной зоне надвига. Практически все повышенные концентрации золота установлены в области распространения пород кординской свиты, где отмечается их очень хорошая пространственная корреляция с метасоматитами березитовой направленности. Наиболее контрастные аномальные поля золота отмечаются на месторождении Золотое [6]

Месторождение относится к золото-кварц-сульфидной формации. Наиболее близким аналогом данного объекта можно считать месторождение Благодатное, находящееся в 25 км южнее, локализующееся в тех же структурах и имеющее схожую геологическую природу [4]. Средние содержания золота на месторождении 2 г/т. На флангах рудных зон распределение полезного компонента становится крайне неравномерным и выделение рудных тел носит весьма условный характер.

Золоторудная минерализация месторождения Золотое заключена внутри тектонического блока, ограниченного разрывными нарушениями сбросо-сдвигового характера северо-западного простирания. Все рудные зоны сложены серицит-кварцевыми и хлорит-серицит-кварцевыми метасоматитами, частично подвергшимися березитизации и окварцеванию, с пирит-арсенопиритовой минерализацией и многочисленными кварцевыми и сульфидно-кварцевыми прожилками и жилами (до 0,5 м) [6]. Породы рудных зон подвержены пликативной тектонике, местами наблюдаются зоны дробления до тектонических брекчий.

Основными золотосодержащими минералами являются пирит и арсенопирит, реже встречаются халькопирит и пирротин. В зоне окисления они замещаются гетитом и скородитом. Среди нерудных минералов на месторождении главенствующую роль играют кварц, мусковит, хлорит, турмалин.

Пирит является одним из главных золотосодержащих минералов месторождения Золотое. Содержание его в рудах в основном 1-3 %, на обогащенных участках до 12 %. За пределами рудных зон количество пирита снижается до 1 % и ниже.

Арсенопирит в рудах месторождения встречается в виде крупных выделений. Форма зерен короткостолбчатая, редко игольчатая. Среднее содержание в рудах 1-3 %, местами до 6 %. На флангах рудных зон содержание его резко падает. Содержание золота в арсенопирите варьирует от 17 до 78 г/т, в составе арсенопирита также отмечаются цинк, кобальт и свинец. Для арсенопирита установлена отчетливая пространственная связь с кварцевыми прожилками и их экзоконтактовыми зонами.

Пирротин и халькопирит в рудах встречаются редко. Их присутствие более характерно для околорудной зоны. Среднее содержание халькопирита в руде менее 0,1 %. Пирротин в рудах присутствует в виде единичных вкраплений. Характерна ассоциация халькопирита с кальцитом. Также отмечаются достаточно крупные выделения этого минерала в зонах интенсивного смятия в ассоциации с кварцем и карбонатом, а также в виде тонких пленок на зеркалах скольжения.

Помимо прочего для руд месторождения характерно наличие в значительных количествах (до 2 %) минералов титана (рутил, анатаз). Данные минералы тяготеют к зонам метасоматической переработки пород. Также в породах и рудах месторождения отмечаются единичные выделения и следы присутствия сульфосолей сурьмы, висмута и свинца [6]. Факты обнаружения этих минералов единичны.

Золото в рудах месторождения встречается в двух формах: самородное и изоморфное в сульфидах. Количественное со-

отношение самородного и изоморфного золота точно не определено, но по косвенным данным можно судить о том, что большая часть полезного компонента находится в изоморфном состоянии.

Находки видимого самородного золота отмечены практически во всех скважинах, вскрывших рудные зоны месторождения. Размеры выделений достигают 1,5 мм. Большая часть находок связана с кварцевыми прожилками и просечками. Золото в прожилках представлено как отдельными включениями, так и более сложными агрегатами. Такие выделения имеют звездообразную форму.

Часть самородного золота тяготеет к зальбандам кварцевых прожилков. Золото находится в сростках с арсенопиритом, занимая трещинки в нем, или в сростках с кварцем. В пирите также обнаружены частицы золота размером 0,015 мм. В собственно метасоматитах золото встречается очень редко в виде тонкой вкрапленности в мусковите. Размеры выделений составляют сотые доли миллиметра.

Парные коэффициенты корреляции рассчитаны на основе результатов лито- и биогеохимических площадных работ, проводимых на месторождении в 2005-2010 годах. Для изучения корреляционных связей первичных геохимических ореолов использовали результаты анализов геохимического опробования по полотну канав, траншей и керна скважин. Отдельно рассматривали породы и руды зоны окисления до глубины 50 м и неизмененную часть разреза. Размер выборки для неокисленной части разреза составил 3400 результатов. Выборка для расчета парных коэффициентов корреляции элементов в зоне окисления включала 2800 проб.

Для анализа вторичных ореолов рассеяния использовались данные площадных литогеохимических работ масштаба 1:25 000. Размер выборки составил 350 значений.

Анализ биогеохимического поля месторождения производился на основании площадной биогеохимической съемки масштаба 1:25 000. Расчетная выборка включала около 400 значений.

В качестве аналитических методов использовался полуколичественный атомно-эмиссионный спектральный (АЭС) на 30 элементов а также полуколичественный химико-спектральный анализ на золото. Анализ биоматериала производился рентген-флюоресцентным методом (РФА). Статистическая обработка результатов производилась с использованием пакета программ для всестороннего статистического анализа Statistica 7.

Для пород в неокисленной зоне характерна значимая корреляционная связь между золотом, серебром и мышьяком (рис.1). Также наблюдается значимый коэффициент корреляции с железом, бором, медью, свинцом, кобальтом и висмутом.

Значимый коэффициент корреляции свидетельствует в первую очередь о нахождении золота в сульфидах: арсенопирите и пирите. Присутствие кобальта и свинца в спектре также связано с арсенопиритом, так как эти элементы присутствуют в минерале в качестве изоморфных примесей.

Наличие в геохимическом спектре бора связано с турмалином. Содержание турмалина в отдельных образцах руд достигает 5 %. Турмалин, как золото и сульфиды, тяготеет к кварцевым прожилкам и их экзоконтактовым зонам. Общий характер раздробленности зерен кварца и турмалина и их парагенезис может свидетельствовать (с учетом характерных примесей мусковита, хлорита, пирита и арсенопирита для аркозовых глинистых песчаников [1]) об их совместном образовании на ранней стадии метасоматоза.

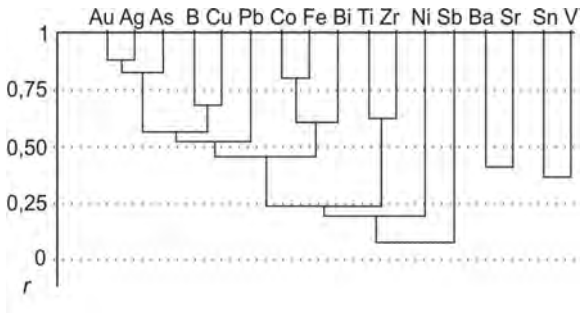


Рис.1. Дендрограмма парных коэффициентов корреляции элементов в первичных неизмененных породах

Наличие в рудной ассоциации меди указывает на присутствие в рудах небольшого количества халькопирита, а также сульфосолей, характерных для объектов подобного типа [3]. С этими же минералами связано присутствие в ассоциации висмута и части кобальта.

Для коренных пород зоны окисления тесная корреляционная связь установлена между золотом, серебром и висмутом (рис.2). Также стоит отметить значимую связь с мышьяком, сурьмой, ванадием, железом, титаном и бором.

Связь мышьяка с золотом достаточно слаба. Это говорит о высвобождении золота в процессе окисления арсенопирита. В зоне окисления этот минерал замещается скородитом. Связь золота и железа установлена, но сила ее незначительна, что также связано с процессами окисления и переходом золота в свободную форму, а также частичным переходом железа в более подвижную форму под действием биогенных факторов. Пирит и пирротин, присутствующий в ограниченном количестве, замещаются гидроксидами

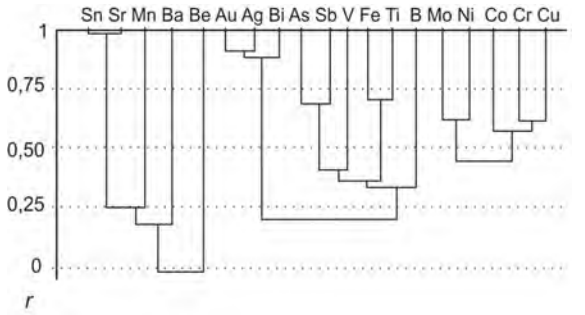


Рис.2. Дендрограмма парных коэффициентов корреляции элементов в зоне окисления месторождения

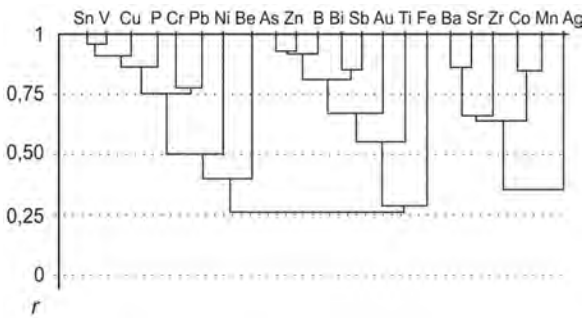


Рис.3. Дендрограмма парных коэффициентов корреляции элементов во вторичных ореолах рассеяния месторождения Золотое

железа, а именно гетитом. Судя по всему, золото, находящееся в тонкодисперсных вкраплениях в сульфидах, переходит в свободную форму.

Для руд месторождения Золотое характерно также присутствие в значительных концентрациях (до 2 %) рутила и анатаза. Высокая активность титана в геохимическом поле месторождения связана именно с этими минералами. Они, как и турмалин, не являются рудными, а лишь прослеживают зоны метасоматического преобразования пород, продуктивные на обнаружение золотого оруденения. С рутилом и анатазом также можно связать и присутствие в рудной ассоциации ванадия, который, по всей видимости, является примесным элементом для этих минералов. Присутствие сурьмы и висмута связано, скорее всего, с наличием в составе пород сульфосолей этих элементов.

Во вторичных ореолах значимый коэффициент корреляции устанавливается между золотом и мышьяком, что в очередной раз указывает на то, что мышьяк является основным элементом-индикатором для золота (рис.3). Коэффициент корреляции серебра и золота отрицателен. После разрушения коренных пород серебро приобретает достаточно высокую миграционную способность и выносится из рудной зоны, этим обусловлено наличие аномалий серебра на участке Заручейном, непосредственно прилегающем к площади месторождения. Связь золота с железом и кобальтом также утрачивается. По-видимому, после разрушения арсенопирита, содержащего в своем составе кобальт, железо и кобальт выносятся из продуктивных зон на фланги месторождения.

В рудообразующий геохимический спектр рыхлых отложений месторождения входят мышьяк, цинк, бор, висмут, сурьма и, в незначительной степени, титан.

Мышьяк и цинк, входящие в состав арсенопирита, сохраняют свою связь с золотом после разрушения арсенопирита. Общий повышенный геохимический фон бора, как и на предыдущих этапах эволюции геохимических ореолов, является индикатором зон метасоматоза. В процессе частичной переработки процессами выветривания мине-

ралов титана часть этого элемента также высвобождается, но в силу очень слабой миграционной способности элемент из продуктивных зон не выносится. Наличие в рудной ассоциации висмута и сурьмы можно связать с присутствием в коренных рудах сульфосолей и высвобождением этих элементов в процессе переработки продуктивных минералов.

В биогеохимическом поле месторождения устанавливается значимый коэффициент корреляции между мышьяком, железом, титаном, калием и рядом других элементов (рис.4). Содержание золота в биогеохимическом поле месторождения не определялось из-за технических возможностей используемого оборудования.

Железо, как было сказано выше, приобретает высокую миграционную способность, вследствие чего в биогеохимическом материале регистрируются повышенные содержания этого элемента. Слабые индикаторные показатели на предыдущих стадиях эволюции геохимических ореолов в биогеохимическом спектре приобретают весомую роль. Связь железа и мышьяка обусловлена наличием в рудной ассоциации арсенопирита, являющегося также минералом-спутником золота. Присутствие цинка также связано с этим минералом; наличие титана – с присутствием в исходных породах рутила и анатаза. Калий и марганец являются индикаторами зоны метасоматоза, к которой тяготеют рудные тела месторождения. Основным источником этих элементов можно считать мусковит и хлорит, которые в достаточных количествах присутствуют в рудах месторождения, содержания этих минералов достигают своих максимумов в зоне окисления.

Подытоживая вышесказанное, можно говорить о том, что, несмотря на достаточно стойкую рудную ассоциацию, прослеживаемую на всех этапах эволюции геохимических ореолов (золото – арсенопирит – пирит), процессы окисления и выветривания руд месторождения в значительной степени сказываются на индикаторных возможностях элементов-спутников золота. Связь золота с железом и мышьяком, достаточно сильная в неокисленных рудах, в процессе окисления ослабевает. Причем индикаторные возможности железа в литогеохимическом поле месторождения полностью утрачиваются и приобретают значимость лишь в биогеохимическом поле месторождения. Это вызвано высвобождением золота в процессе разрушения арсенопирита и пирита и частичным переходом железа в подвижную форму под действием биогенных факторов. Мышьяк сохраняет свою значимость на всех уровнях, но связь его с золотом заметно ослабевает. Серебро также продуктивно только при анализе коренных руд, как неизмененных, так и окисленных. Во вторичном геохимическом поле месторождения серебро из продуктивных зон выносится.

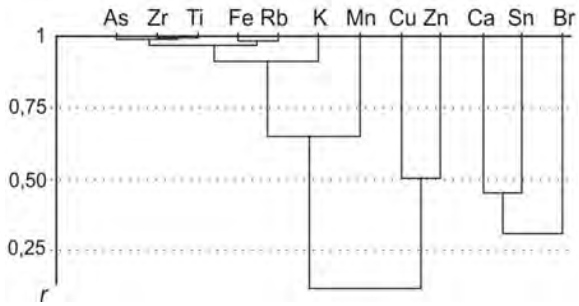


Рис.4. Дендрограмма парных коэффициентов корреляции элементов в биогеохимическом поле месторождения Золотое по данным РФА

Таким образом, опираясь лишь на геохимические спектры различных уровней геохимического поля месторождения, можно еще на ранних стадиях изучения месторождения судить об ожидаемом минеральном составе руд изучаемого объекта, а также делать более достоверный прогноз ожидаемого геолого-промышленного типа оруденения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Курек Н.Н.* Серицитсодержащие породы / Н.Н.Курек, А.И.Курек // Измененные околорудные породы и их поисковое значение. М.: ГНТИ, 1954. С.101-142.

2. *Левченко С.В.* За рудами в Сибирь / С.В.Левченко, Д.Л.Мозесон. М.: Наука, 1978. 144 с.

3. *Сазонов А.М.* Золоторудная металлогения Енисейского кряжа: геолого-структурная позиция, структурные типы рудных полей / А.М.Сазонов, А.А.Ананьев // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2010, № 4. С.371-395.

4. *Сердюк С.С.* Прогнозные ресурсы золота и платины Красноярского края (по состоянию на 01.01.2006) / КНИИГиМС. Красноярск, 2006. 169 с.

5. *Стороженко А.А.* Метасоматиты и золотоносность северной части Енисейского кряжа (Нойбинская площадь)/ А.А.Стороженко, Н.Ф.Васильев, Е.В.Дмитриева // Геология и полезные ископаемые Красноярского края. 2008. Вып.9. С.112-115.

6. Рудные тела, первичные ореолы, вторичные ореолы и потоки рассеяния Нойбинской золотоносной площади Енисейского кряжа / В.А.Макаров, В.В.Межубовский, С.М.Макеев и др. // Поисковые геолого-геохимические модели рудных месторождений: Материалы II Всероссийской конференции по прикладной геохимии. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. 2009. С.197-200.

REFERENCES

1. *Kurek N.N.*, *Kurek A.I.* Sericite rocks // Altered rocks near ore and the search value. Moskow: GNTI, 1954. P.101-142.

2. *Levchenko S.V.*, *Mozeson D.L.* For ores in Siberia. Moscow: Nauka, 1978. 144 p.

3. *Sazonov A.M.*, *Ananyev A.A.* Gold-ore Metallogeny of the Yenisey Ridge: Geological-Structural Province, Structural Types of ore Fields // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2010. № 4. P.371-395.

4. *Serdyuk S.S.* Predicted resources of gold and platinum of the Krasnoyarsk region (as of 01.01.2006) / KNIIGiMS. Krasnoyarsk, 2006. 169 p.

5. *Storozhenko A.A.*, *Vasiliev N.F.*, *Dmitrieva E.V.* Metasomatic rocks and gold-bearing of northern part of Yenisei Ridge (Noybinskaya area) // Geology and Mineral Resources of the Krasnoyarsk region. 2008. N.9. P.112-115.

6. *Makarov V.A.*, *Mezhubovsky V.V.*, *Makeev S.M. at al*. The ore bodies, primary, secondary dispersion patterns and secondary leakage fluxes of Noybinskay gold area of the Yenisei Ridge // Search geological and geochemical models of ore deposits: Proceedings of the II All-Russian Conference on Applied Geochemistry. Voronezh: VSU, 2009. P.197-200.