

УДК 553.22:553.411(571.65)

ОКОЛОРУДНЫЙ МЕТАСОМАТОЗ НА ЗОЛОТО-КВАРЦЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ВЕРХНЕ-КОЛЫМСКОГО РЕГИОНА

© 2003 г. С. В. Ворошин, Е. Э. Тюкова, член-корреспондент РАН В. И. Гончаров

Поступило 22.10.2002 г.

Для околорудных пород золото-кварцевых месторождений Верхне-Колымского региона характерны карбонатизация, окварцевание, серицитизация, сульфидизация и альбитизация [1]. Обычно наблюдается совмещение различных метасоматитов с вариациями их количественных отношений. Цель настоящей работы – описание эталонной метасоматической колонки и реконструкция главных процессов привноса–выноса вещества, характерных для околорудных изменений на месторождениях этого типа.

Исследования проведены на примере Штурмовского месторождения, приуроченного к дайке диоритовых порфириров. Изучен фрагмент минерализованной дайки с зональным распределением метасоматических минералов около кварцевого прожилка. Отметим, что дайки, аналогичные вмещающим оруденение, за пределами месторождений всегда содержат равномерно рассеянную вкрапленность пирита и карбонатизированы. Мы связываем это с воздействием метаморфических флюидов, мобилизованных при реакциях декarbonатизации и десульфидизации в терригенных породах, которые приводили к частичной гомогенизации содержаний CO_2 и S во всем объеме метаморфизируемых пород и не имеют отношения к околорудным метасоматитам. Изучение метасоматической колонки в пределах одного образца (вместо пересечения рудной зоны сложного строения) позволяет свести к минимуму влияние первичной неоднородности вмещающих пород и тектонических факторов на конечные результаты. Образец был распилен на 9 пластинок мощностью 1.5 см, параллельных контакту прожилка. Первая пластинка представляет сам кварцевый прожилок, вторая – зону, непосредственно примыкающую к нему, а каждая последующая удалена от контакта с прожилком на расстояние, крат-

ное 1.5 см (рис. 1). Визуально зоны различаются между собой плавным изменением цветовых оттенков (в зеленой гамме), а также количеством и размерами метакристаллов арсенопирита. Все пластинки были проанализированы на содержание главных компонентов и элементов-примесей. Проведены также специальные исследования сульфидной составляющей пород, для чего силикатная матрица растворялась с помощью концентрированной плавиковой кислоты, а сульфиды и нерастворимый остаток дополнительно разделялись в бромформе. Чистый сульфидный концентрат был расситован, а выделение мономинеральных фракций арсенопирита и пирита для последующих анализов проведено вручную под бинокулярной лупой. Результаты анализов отражены в табл. 1–3.

Расчеты привноса–выноса вещества выполнялись различными способами, но поскольку значения плотности пород в разных зонах различаются более чем на 2%, применен метод $\text{TiO}_2 = \text{const}$ [2]. В качестве “первичной” породы принята зона 9, наиболее удаленная от кварцевой жилы. Результаты расчетов приведены на рис. 2.

Как видно из данных таблиц и рис. 2, Al_2O_3 относится к числу инертных компонентов. Незначительный вынос на всем протяжении метасоматической колонки зафиксирован для суммы окисного и закисного железа. SiO_2 и Na_2O выносились из околожильного пространства. Для SiO_2 отчетливое обеднение установлено для интервала от 5 до 2 зоны. Логично предположить, что вынесенный кремнезем локализован непосредственно в трещинной полости в виде кварцевого прожилка. Диапазон выноса Na_2O – от 4 до 2 зоны. В изученном образце визуально не отмечена концентрация минералов натрия в самом прожилке. Однако широко распространенная форма локализации альбита в зальбандах кварцевых жил на других подобных объектах [1] свидетельствует о том, что вынесенный оксид натрия, как и кремнезем, может участвовать в образовании жильных минералов. Об этом, в частности, свидетельствует положительный баланс Na_2O в призальбандовой зоне 2 по сравнению с зоной 3, а низкое содержание

*Северо-Восточный комплексный
научно-исследовательский институт
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Магадан*

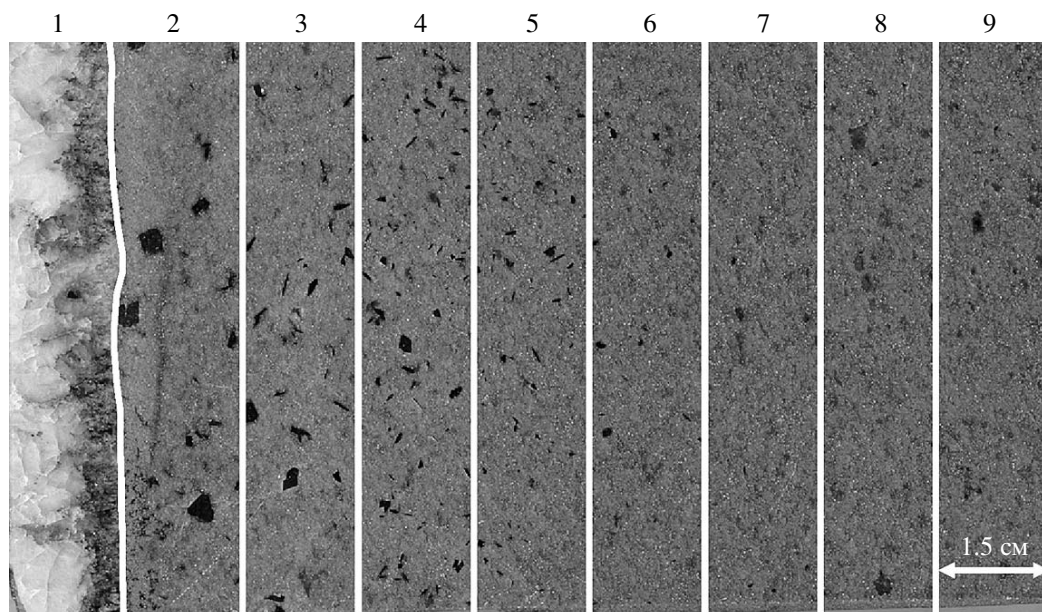


Рис. 1. Метасоматическая колонка обр. 3174/В-88. Пояснения в тексте. Результаты анализов по зонам приведены в табл. 1–3.

этого компонента в прожилке, которое не компенсирует его вынос из вмещающих пород, можно объяснить неравномерным распределением альбита в жильной массе.

K_2O , CaO , CO_2 и S привносились в околожильное пространство. Поведение K_2O противоположно Na_2O – с 5 по 2 зону метасоматиты постепенно обогащаются оксидом калия, причем его максимальный привнос приходится на зону, ближайшую к кварцевому прожилку (зона 2). На минеральном уровне это проявляется в образовании серицита и гидрослюда. Привнос CaO , CO_2 имеет максимальные значения в зоне, непосредственно примыкающей к кварцевому прожилку, и, постепенно уменьшаясь, сходит на нет в зоне 5. Эти два компонента характеризуют карбонатизацию пород. В соответствии с графиком привноса–выноса можно предположить, что соединения, принимавшие участие в образовании околожильного кальцита, находились в растворе. Железо, необходимое для формирования магнезиально-железистых карбонатов, заимствовалось из вмещающих пород, а источник магния, судя по незначительному повышению содержаний MgO по направлению к кварцевому прожилку, имеет двойственную природу (привнос растворами и выщелачивание из вмещающих пород).

Сульфиды околожильных метасоматитов формировались, подобно анкериту, за счет железа вмещающих пород. Сера при этом поступала с гидротермальными растворами: в зонах от 2 до 5 наблюдается привнос серы с максимальными его значениями в зоне 3. Отсутствие повышенных содержаний серы в самом кварцевом прожилке (см.

табл. 1), как и в случае с Na_2O , можно объяснить неравномерным распределением сульфидов в жильном материале.

Поведение элементов-примесей в метасоматитах в значительной степени обусловлено распределением сульфоарсенидов и сульфидов. Пик содержания золота, мышьяка, сурьмы, никеля, кобальта соответствует зоне 4 (см. табл. 1), а максимальное количество арсенопирита сосредоточено в зоне 3 (см. табл. 2). Несовпадение зон с пиковыми значениями содержаний может быть обусловлено представительностью материала в навесках для анализов и не влияет на общие выводы. Высокая корреляция золота с мышьяком характерна для золото-кварцевых месторождений региона как на геохимическом, так и на минеральном уровнях. Самородное золото обычно присутствует в виде микровключений в арсенопирите. Сурьма, никель и кобальт – распространенные изоморфные примеси сульфоарсенидов железа. Причем, если содержание мышьяка (а соответственно и арсенопирита) по мере удаления от жилы резко падает начиная с зоны 5, то содержания никеля и кобальта сохраняют высокие значения вплоть до зоны 7, что на минеральном уровне выражается в локализации во внешних зонах метасоматитов золото-кварцевых месторождений региона сульфоарсенидов никеля и кобальта [3, 4]. Серебро образует слабый пик, соответствующий максимальным значениям содержания золота в метасоматитах, что связано с вхождением его в состав самородного золота. Распределение серебра и цветных металлов не коррелирует с количеством метасоматического арсенопирита. Для

Таблица 1. Состав зон метасоматической колонки образца 3174/В-88 Штурмовского месторождения

Компонент	№ зоны								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	97.64	34.89	36.72	39.44	42.06	44.32	44.26	44.51	44.69
TiO ₂	0.07	1.94	1.84	1.83	1.84	1.82	1.82	1.87	1.91
Al ₂ O ₃	0.9	14.92	14.52	14.91	15.22	15.17	14.88	14.94	14.78
Fe ₂ O ₃	0	0.57	1.71	1.27	0.9	0	0	0	0
FeO	0.38	6.27	6.1	6.44	7.03	7.85	8.25	8.07	8.27
MnO	0.01	0.14	0.13	0.12	0.13	0.12	0.13	0.13	0.13
MgO	0.29	6.81	6.68	6.73	6.44	6.76	6.77	6.59	6.64
CaO	0	10.03	8.71	7.74	7.17	6.61	6.55	6.74	6.86
Na ₂ O	0.2	1.58	1.49	1.75	1.93	1.84	1.88	2	1.89
K ₂ O	0.2	2.43	2.2	2.13	1.99	1.47	1.45	1.57	1.56
H ₂ O ⁻	0.08	0.26	0.1	0.18	0.12	0.16	0.18	0.42	0.56
H ₂ O ⁺	0.44	3.96	4.3	4.43	4.18	4.88	3.97	3.93	4.29
P ₂ O ₅ + As ₂ O ₅	0.03	1.44	1.68	1.39	0.54	0.65	0.47	0.42	0.39
CO ₂	0	13.83	12.02	10.42	9.06	7.93	8.76	8.87	8.68
S	0.01	0.93	1.33	1.12	0.69	0.21	0.17	0.17	0.23
Сумма	100.18	99.83	99.55	99.86	99.29	99.76	99.48	99.92	100.43
Плотность	2.73	2.89	2.89	2.86	2.86	2.85	2.72	2.73	2.76
Au	0.026	0.21	0.393	0.75	0.433	0.093	0.063	0.06	0.06
Ag	0.0621	0.0747	0.0729	0.091	0.0731	0.0679	0.0621	0.0794	0.0631
Cu	5.02	6.43	6.08	7.15	5.76	10.5	14.2	9.7	15
Zn	17.6	55.7	52.1	76.9	75	79	66.7	29.3	43.2
Pb	1.64	2.98	2.26	3.69	2.44	2.26	1.64	14.7	7.78
Sb	1.73	8.97	9.2	16.2	9.3	1.73	1.73	1.73	1.73
As	92.5	24865.7	29372.3	48675.1	19233.5	2777.9	590.4	27.5	27.5
Mo	0.239	0.544	0.476	0.749	0.474	0.475	0.369	1.21	0.205
Sn	0.73	2.49	1.89	2.62	1.87	1.75	1.53	5.07	2.08
Ni	2.96	43.4	43.2	67.5	53.1	43.4	41.7	2.38	45.1
Co	35.9	35	48.4	100.5	83.1	69	60.5	6.97	25.9
Cr	5.88	63.6	42.3	75.5	56.4	62	50.6	6.62	17.9

Примечание. Силикатный анализ выполнен в ЯИГМ ЯНЦ СО РАН, г. Якутск, аналитик Г.Н. Охлопкова, содержания – в %. Анализ золота проведен атомно-абсорбционным методом в СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан, аналитик Т.В. Крячко, содержания – в г/т. Остальные элементы проанализированы эмиссионным количественным спектральным анализом (ЭКСА) в СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан, под руководством Л.А. Поповой, содержания – в г/т.

меди и свинца характерно повышение содержания во внешних зонах колонки. Такое поведение не противоречит минералогическим данным: в кварцевом прожилке и ближних околожильных зонах образца отсутствуют сульфиды цветных металлов.

Зональное распределение сульфидных минералов в околожильном пространстве не вызывает сомнений. Околожильный арсенопирит, по минералогическим наблюдениям, замещает метаморфогенный пирит, что типично для золото-

кварцевой минерализации региона [3]. Причем вплоть до зоны 5 включительно происходит полное замещение пирита, и только во внешних зонах начинают появляться сначала реликты пирита (зона 6), а затем этот минерал становится преобладающим (зона 9). Поскольку арсенопирит формируется за счет компонентов пирита, можно считать эту реакцию забуферированной, по крайней мере до тех пор, пока не прореагировал весь пирит. В этом случае мы вправе ожидать постоянства состава вновь образованного арсенопирита. В действительности, начиная от кварцевого

Таблица 2. Состав и содержание сульфидных концентратов в метасоматических зонах обр. 3174/В-88

№ зоны	Масса обр., г	Масса сульфидов, г	Содержание сульфидов в пробе, %	Сульфид	$\delta^{34}\text{S}$ арсенопирита, ‰	$\delta^{34}\text{S}$ пирита, ‰	Содержание As в арсенопирите, ат. %
1	70.26	2.09	2.97	Арсенопирит	-4.4	-	30.9 (18)
2	106.50	5.77	5.42	То же	-4.5	-	31.1 (33)
3	134.35	8.56	6.37	»	-4.5	-	31.3 (33)
4	173.60	9.54	5.50	»	-4.3	-	31.5 (36)
5	190.96	6.90	3.61	»	-4.3	-	31.4 (39)
6	188.61	2.64	1.40	Арсенопирит, пирит	-4.5	-6.1	31.5 (42)
7	134.87	0.76	0.56	То же	-4.5	-6.1	31.4 (60)
8	81.51	0.41	0.50	»	-4.5	-6.3	31.4 (97)
9	26.32	0.10	0.38	»	-4.9	-6.4	31.4 (72)

Примечание. Анализы изотопного состава серы выполнены в ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) Л.В. Боровиком по стандартной методике с CuO при 800°C на серийном масс-спектрометре МИ-1201В с точностью не хуже $\pm 0.2\text{‰}$ на 95% доверительном уровне. В качестве стандарта использован троилит метеорита Каньон-Дьябло (CDT). Состав арсенопирита определен на микрозонде "Samebaх" в СВКНИИ ДВО РАН, аналитик Г.А. Меркулов. Условия съемки: ускоряющее напряжение 25 кВ, ток на препарате 30 нА, время интегрирования 5 с, аналитические линии для Fe, As, S – K_{α} . В скобках приведено число анализов.

Таблица 3. Гранулометрический состав (%) сульфидных концентратов в метасоматических зонах обр. 3174/В-88

№ зоны	Интервал крупности, мм										Всего
	0.063	0.063–0.1	0.1–0.16	0.16–0.25	0.25–0.5	0.5–0.8	0.8–1.25	1.25–1.6	1.6–2.5	>2.5	
1	0	0	0	1.1	4.7	6.3	5.3	15.8	35.8	31.0	100
2	0	0	0	0.5	4.3	9.5	8.7	16.9	34.9	25.2	100
3	0	0.4	0.6	1.1	8.4	21.6	13.0	17.5	35.4	2.0	100
4	0	0	0.8	0.9	11.9	30.4	15.2	31.1	9.7	0	100
5	0	0	0	1.5	18.2	37.6	16.2	26.5	0	0	100
6	0	0	0	1.2	27.8	37.7	23.4	9.9	0	0	100
7	0	0	0	0	28.7	34.3	11.0	26.0	0	0	100
8	0	0	0	0	6.5	29.0	32.3	32.2	0	0	100
9	0	0	0	18.2	0	36.4	0	45.4	0	0	100
По всему образцу	0	0	0.2	2.7	12.3	27.0	13.9	24.5	12.9	6.5	100

прожилка (зона 1) до зоны 4, в арсенопирите происходит незначительное увеличение среднего содержания мышьяка от 30.9 до 31.5 ат. % (см. табл. 2). Во всех более внешних зонах состав арсенопирита постоянен со средними значениями 31.4–31.5 ат. % As. Другими словами, при наличии пирита в качестве буфера состав арсенопирита не меняется при переходе от одной зоны к другой, а в случае полного замещения пирита и образования мономинеральной ассоциации арсенопирита наблюдается увеличение среднего содержания серы в последнем. Это явление невозможно объяснить простым уходом с линии равновесия арсенопирит–пирит на фазовой диаграмме системы Fe–As–S по бинарному сечению пирит–леллингит [5]: в соответствии с диаграммой состав арсенопи-

рита в γ -области должен был бы сопровождаться увеличением содержания мышьяка. Вероятным объяснением может быть более низкая, по сравнению с вмещающими породами, температура поступающих в трещинную полость растворов.

Изотопный состав серы пирита и арсенопирита постоянен во всех зонах метасоматической колонки: $\delta^{34}\text{S}$ пирита составляет около -6.4‰ , арсенопирита -4.5‰ (см. табл. 2). Крайние значения этих параметров (-4.9‰ для арсенопирита и -6.1‰ для пирита) обусловлены взаимным засорением монофракций этих минералов друг другом при отборе проб, так как аномальный состав характерен для зон, где количество анализируемого материала составляет незначительную долю от ассоциирующего с ним сульфида.

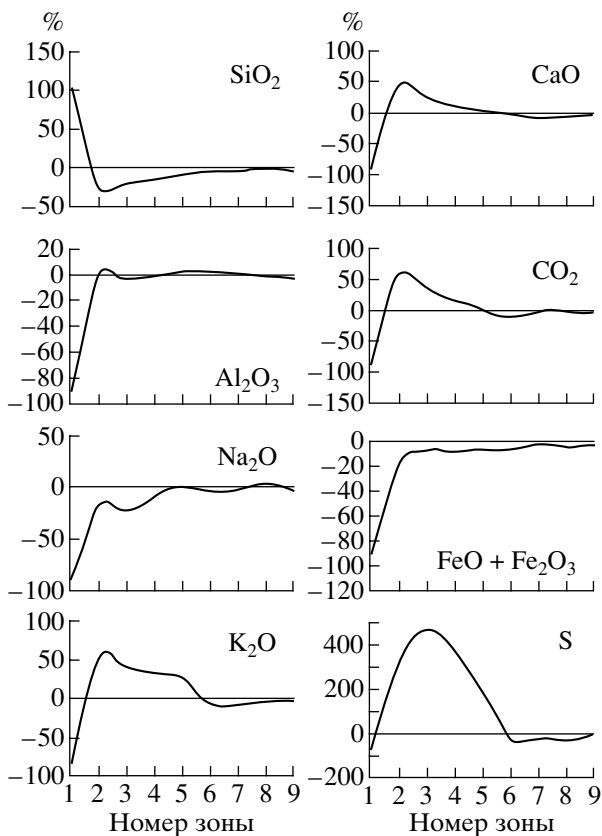


Рис. 2. Графики привноса–выноса вещества в метасоматических зонах обр. 3174/В-88, построенные на основании расчетов по методу $TiO_2 = \text{const}$ [2].

Единственная характеристика арсенопирита, которая имеет отчетливо зональное распределение в метасоматической колонке, – это гранулометрический состав (см. табл. 3). Наибольшее количество минералов крупных фракций (от 1.6 мм и более) локализуется в кварцевом прожилке и двух ближайших к нему зонах. Далее идет постепенное снижение крупности кристаллов, и в зонах 6 и 7 преобладает размерность от 0.25 до 0.8 мм. В целом можно говорить, что преобладание крупных фракций соответствует зонам с наиболее высоким содержанием серы и мышьяка. Зональность гранулометрического состава арсенопирита, скорее всего, связана с постепенным затуханием проникновения мышьяксодержащих растворов в стороны от осевого прожилка. Кро-

ме того, породы в непосредственной близости от прожилка, по-видимому, имели высокую флюидонасыщенность, что способствовало собирательной перекристаллизации сульфидов.

Таким образом, расчеты привноса–выноса вещества показывают, что формирование жильного кварца и альбита происходило за счет кремнезема и Na_2O , мобилизованных из ближайших окolorудных пород. Карбонатизация является следствием привноса растворами CaO , CO_2 и, частично, MgO , а железо было заимствовано из вмещающих пород. Сульфидизация осуществлялась за счет автохтонного железа и аллохтонных серы и мышьяка. Серицитизация проходила с использованием привнесенного гидротермальными растворами K_2O и мобилизацией остальных компонентов из вмещающих пород. Похожее поведение породообразующих компонентов при околожильном метасоматозе характерно и для других золотоносных регионов [6]. Следует отметить, что в случае привноса и катионов, и анионов (например, Ca^{2+} , HSO_3^-) наибольшее количество новообразованных минералов фиксируется в зоне, ближайшей к кварцевому прожилку или к оси движения растворов. Если извне поступает только один компонент (например, сера), то пик кристаллизации метасоматических минералов смещается от кварцевого прожилка в сторону неизменных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фирсов Л.В. Золото-кварцевая формация Яно-Колымского пояса. Новосибирск: Наука, 1985. 214 с.
2. Казицын Ю.В., Рудник В.А. Руководство к расчету баланса вещества и внутренней энергии при формировании метасоматических пород. М.: Недра, 1968. 364 с.
3. Ворошин С.В., Еремин Н.И. // Вестн. МГУ. 1995. Сер. 4. Геология. № 2. С. 60–74.
4. Ворошин С.В., Шарафутдинов В.М., Тюкова Е.Э. // Тихоокеан. геология. 2000. Т. 19. № 5. С. 91–104.
5. Козлов Вл.К., Тюкова Е.Э., Борходоев В.Я., Козлов Вик.К. Субсолидусные фазовые взаимоотношения арсенопирита ниже $400^\circ C$ в псевдобинарной системе пирит–лелингит. Деп. ВИНТИ. М., 1986. № 5171–В86. 26 с.
6. Шер С.Д. // Тр. ЦНИГРИ. 1968. В. 79. С. 97–102.