

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОЛОТА И ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В МИНЕРАЛАХ РУД БЕРИКУЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Н. В. РОСЛЯКОВА (ИГиГ СО АН СССР)

Поведение золота в процессе рудообразования, и в частности в процессе выполнения жил, до сих пор остается в значительной степени невыясненным. Установление места золота в рудах является одной из возможностей приблизиться к решению данного вопроса. С этой целью нами было проведено исследование по распределению золота и элементов-примесей в ведущих минералах руд Бериккульского месторождения.

Золоторудное месторождение Старый Бериккуль представлено довольно крупной пологопадающей (в среднем $10-20^\circ$) на юго-восток четвертой жилой, приуроченной к плоскости надвига северо-западного направления, и серией (около 60) крутопадающих ($35-50^\circ$) на северо-запад жил, выполнивших оперяющие трещины отрыва, залегающих как в лежачем, так и висячем боках пологой.

Формирование жил происходило в 5 стадий. Первая (дорудная) стадия представлена кварцем, слагающим значительную часть жил, отложившимся при температуре свыше 400°C . С ним ассоциируют (в порядке распространенности) хлорит, рутил и гематит. Вторая стадия — пирит-пирротиновая — с кварцем и арсенопиритом. Температура гомогенизации газовой-жидких включений в кварце второй стадии $390-315^\circ\text{C}$. Третья стадия — кварц-пирит-арсенопиритовая — с паранкеритом. Газово-жидкие включения в кварце, сопровождающем отложение пирита и арсенопирита, гомогенизируются при $380-300^\circ\text{C}$, а в кварце, завершающем эту стадию минерализации, — при $270-240^\circ\text{C}$. В четвертую стадию отлагалась продуктивная карбонатно-сульфидная ассоциация: халькопирит, сфалерит, галенит, теннантит, тетраэдрит (?), шапбахит, серебро, золото, кальцит, кварц, небольшое количество пирротина, пирита и арсенопирита. Температура формирования $230-170^\circ$. Золото отлагалось при $190-170^\circ\text{C}$. Пятая стадия представлена пострудным кальцитом, кварцем, хлоритом и серицитом: температура менее 150°C .

Кобальт-никелевая минерализация в докладе не рассматривается.

Распределение золота и элементов-примесей изучено в пирротине, пирите, арсенопирите, халькопирите, сфалерите, галените, кварце, паранкерите и кальците, отобранных из различных жил и горизонтов месторождения. Золото определялось нейтронно-активационным (Л. К. Павловой, ИГиГ СО АН СССР) и спектрохимическим (В. Г. Цимбалит, ИГиГ СО АН СССР) методами; элементы-примеси — приближенным количественным спектральным анализом (Л. Г. Изюмовой, ИГиГ СО АН СССР).

Минералы разные как по составу, так и стадиям содержат золото в разных количествах. Наибольшие они в сульфидах III и IV стадий. В пирите из околорудноизмененных пород оно составляет 0,7 г/т, в пирротине II стадии — 0,014 г/т, в пирите и арсенопирите (III стадия) — от десятков до сотен г/т. В минералах IV стадии золото наряду с диспергированным в других минералах (до десятков г/т) уже образует и сравнительно крупные (до 0,4 мм) самостоятельные выделения.

Элементы-примеси, обнаруженные в минералах руд, приведены в табл. I. Кроме того, в кварце III стадии встречены германий и ниобий, а в сфалерите — молибден.

Из таблицы видно, что количество и содержание элементов-примесей увеличивается от начальных стадий к конечным, где они образуют уже самостоятельные минералы: самородное серебро, шапбахит. Исключение составляют никель и кобальт и в некоторой степени медь, которые проявляют обратную тенденцию.

Поскольку приуроченность элементов-примесей к тем или иным минералам в значительной степени определяется кристаллохимическими факторами дифференциации элементов, то их поведение в процессе минералообразования наиболее наглядно при рассмотрении нескольких генераций одного минерала. Таковыми у нас являются пирит и кварц.

Если в кварце I стадии обнаружено всего 9 элементов, то в IV — уже весь список их. Интересным оказалось то, что новый элемент-примесь, обнаруженный в кварце какой-либо стадии, по сравнению с предыдущей встречен в сульфидах на стадию раньше.

В. В. Щербина и К. И. Якубович [9] вслед за А. Е. Ферсманом считают, что для большинства веществ изоморфная смесимость с повышением температуры возрастает. Ранние генерации какого-либо минерала содержат примесей в качественном и количественном отношении больше по сравнению с поздними. Но при этом данные авторы отмечают: «Несомненно, что в первую очередь присутствие тех или иных элементов (в минерале. — *H. P.*) и их содержания зависят от наличия и концентрации этих элементов в исходном растворе...». Следовательно, можно думать, что если бы все обнаруженные нами в минералах IV стадии элементы присутствовали в растворах, давших минералы начальных стадий, они, по-видимому, входили бы в последние, причем, возможно, в больших количествах. Затруднение в решении этого вопроса возникает в связи с тем, что формы вхождения элементов-примесей в минералы остались неизученными. Тем не менее выявленное нами распределение элементов-примесей в минералах руд Берикольского месторождения можно объяснить тем, что количество и содержание большинства элементов в рудообразующих растворах эволюционировало в сторону увеличения от ранних стадий к поздним. При этом появление нового элемента в растворе вначале фиксировалось сульфидами и только, по-видимому, при достаточном увеличении концентрации его в растворе он увлекался и кварцем.

В отношении золота можно думать, что его содержание в растворе, по крайней мере, до III стадии минерализации было сравнительно низким. Об этом свидетельствуют очень небольшие содержания золота в пирротине ($n \cdot 10^{-6}$ — $n \cdot 10^{-5}\%$), отложившемся одним из первых среди сульфидов. Температура образования пирротина немногим отличается от таковой пирита и арсенопирита III стадии (в обоих случаях выше 300°C). Но в последних содержание золота составляет десятки и даже сотни граммов на тонну. На Дарасунском, по данным Г. П. Воларовича [2] и Д. А. Тимофеевского, и на Советском, по данным О. Е. Звягинцева [3], месторождениях с пиритом, отложившимся одним из ранних среди сульфидов, золото связано в меньшей степени, чем с другими сульфидами.

Содержание золота и элементов-примесей в ведущих минералах руд
Берикуйского месторождения

Стадии	I		II		III				IV				
Температура	400° С		390—315° С		380 (?)—240° С				230—170° С				
Минералы	кварц I	кварц II	пирротин	пирит I	пирит II	арсенопирит	паранкерит	кварц III	кальцит	халькопирит	сфалерит	галенит	кварц IV
Элементы													
Au (г/т)	0,1	0,009	0,014	не опр.	120	165	0,009	не опр.	0,006	10,0	12	10	0,012
Ag	—	сл.	0,003	0,002	0,002	0,002	—	0,0006	—	0,08	0,0069	0,6	0,005
As	0,06	0,05	—	0,1	1,0	мн.	—	1,0	—	—	0,32	0,2	0,3
Pb	—	0,0001	0,005	0,002	0,027	0,408	—	0,005	0,0002	1,0	0,508	мн.	0,06
Zn	—	0,002	0,03	0,02	0,473	0,359	—	0,04	—	1,0	мн.	0,52	0,11
Cu	0,002	0,004	0,115	0,2	0,031	0,0018	0,0001	0,0044	0,0001	мн.	0,587	0,033	0,05
Cd	—	—	0,001	—	0,004	0,0086	—	0,004	—	0,08	1,0	0,024	сл.
Bi	—	—	0,002	0,001	0,0015	0,0014	—	0,0006	—	0,03	0,0396	0,7	0,002
Sb	—	—	—	—	0,0016	0,087	—	—	—	—	0,124	0,369	0,0001
Ni	—	—	0,023	0,02	0,008	0,0032	—	сл.	—	0,0008	сл.	сл.	0,0001
Co	—	—	0,0019	0,002	0,0024	0,0014	—	0,0014	—	—	0,0006	сл.	0,001
Ti	0,0005	0,0006	—	—	0,003	0,0006	0,0005	0,04	0,0006	0,0008	0,0003	0,001	0,03
Mn	0,0001	0,0001	0,006	0,002	0,002	0,0011	0,5	0,015	0,35	0,01	0,021	0,003	0,03
V	сл.	сл.	—	—	—	—	0,0003	0,0007	0,0003	0,0003	0,0006	0,0006	0,001
Ga	—	—	сл.	—	—	—	—	0,00015	—	0,0001	0,0014	—	0,0001
Ba	—	—	—	—	—	—	0,01	0,01	0,005	—	—	—	0,003
Zr	0,001	0,001	—	—	0,0003	—	—	0,0025	—	—	—	—	0,0013
Cr	—	—	—	—	—	—	не опр.	1,0005	не опр.	—	—	—	0,0001
Sr	0,01	0,005	—	—	—	—	0,05	—	0,05	—	0,0004	—	0,015
Yb	—	—	—	—	—	—	0,0003	—	0,0001	—	—	—	0,0001
La	—	—	—	—	0,0003	—	0,003	0,0005	0,0015	—	0,0001	0,0002	0,001
Sn	—	—	—	—	сл.	—	0,0002	—	0,0002	0,002	сл.	сл.	—
Y	—	—	—	—	—	—	0,002	0,0004	не опр.	—	—	—	0,0005
In	—	—	—	—	—	—	не опр.	—	не опр.	0,0006	0,0017	сл.	—
Sc	—	—	—	—	—	—	не опр.	0,0001	не опр.	—	—	—	0,0001
Bi	сл.	сл.	—	—	—	—	не опр.	0,0002	не опр.	—	—	—	0,001
Кол-во анализов	5	4	6	1	10	7	1	6	3	1	17	9	5

В то же время имеются примеры, когда пирротин содержит золото в значительных количествах, не уступая пириту ($n \cdot 10^{-4} — n \cdot 10^{-3}\%$, по данным М. С. Сахаровой, для того же Дарасунского месторождения). По-видимому, можно полагать, что изменение содержания золота от стадии к стадии в рудообразующих растворах имеет широкое распространение и, как показывают приведенные примеры, оно увеличивается в направлении минералообразования, за исключением самых поздних стадий его.

О взаимосвязях между элементами-примесями в отдельных минералах в некоторой степени можно судить по коэффициентам корреляции между ними. Так, в пирротине (II стадия) высокая прямая корреляционная связь наблюдается между свинцом, висмутом, медью и серебром; между кадмием и цинком, сурьмой и никелем. В пирите (III стадия) — между титаном и цирконием, кадмием и цинком, кадмием и серебром. В арсенопирите — между свинцом и цинком, титаном и кобальтом; медью, серебром и цинком с марганцем и кадмием; никелем и титаном; обратная связь у никеля с кобальтом. В сфалерите — между висмутом и серебром. В галените кадмий хорошо коррелируется с медью и цинком, а обратная связь проявляется у висмута с сурьмой. Кроме того, здесь намечается повышенная прямая зависимость между содержаниями золота и сурьмы и обратная зависимость — между золотом и висмутом.

В пространственном распределении элементов-примесей, которое изучалось отдельно в пирите, арсенопирите, сфалерите и галените, также намечается определенная закономерность.

В пирите и арсенопирите в пределах рудного столба содержания этих элементов (свинца, висмута, цинка, кадмия, сурьмы и титана) с глубиной увеличиваются, других (никеля, кобальта, серебра, меди и марганца) — уменьшаются. При сравнении содержаний элементов-примесей в верхних частях столбов крутопадающих жил вдоль плоскости надвига (пологой жилы) оказывается, что количество никеля, кобальта, серебра и меди увеличивается в юго-восточном направлении рудного поля, а свинца, висмута, цинка, кадмия и сурьмы — в северо-западном. Суммарное содержание элементов-примесей в пирите и арсенопирите несколько увеличивается в северо-западном направлении (рис. 1).

В сфалерите и галените (IV стадия) в пределах рудного столба содержание большинства элементов увеличивается вверх с приближением к плоскости полой жилы. Содержание этих же элементов увеличивается в юго-восточном направлении. Никель ведет себя противоположно. Часть элементов (галлий, марганец, индий, медь, сурьма, ванадий и титан) распределена равномерно. Из рис. 1 видно, что рост суммарного содержания элементов-примесей у минералов IV стадии выражен значительно резче, чем III стадии.

Чем же обусловлено выявленное нами распределение элементов-примесей?

Рассмотренное В. Н. Анфиловым и др. [1] поведение изоморфных примесей в сфалерите в процессе сокристаллизации в открытых системах позволяет сделать вывод, что при кристаллизации из раствора одной стадии какого-либо минерала первые порции его берут наибольшие количества примесей. Кроме того, Л. Н. Овчинников [6] отмечает, что подвижность элементов-примесей вследствие их малой концентрации в растворе значительно меньше подвижности основных рудообразующих элементов. На основании этих двух работ можно считать, что увеличение содержания элементов-примесей в одном и том же минерале одной стадии должно наблюдаться в том направлении, откуда шли отложившие этот минерал растворы.

Если теперь вернуться к пространственному распределению элементов-примесей в минералах руд Берикюля, то можно сказать, что в начальный период формирования месторождения, включая III стадию, раство-

ры, в общем идя снизу, попадали в жильные трещины буквально отовсюду. Это естественно, так как всевозможные трещинки, поры вмещающих пород и сами жильные трещины, будучи еще не заполненными, способствовали такому явлению. Некоторым преимуществом, особенно в III стадию, пользовалось движение растворов, содержащих свинец, висмут, цинк, кадмий и сурьму, с северо-запада, по трещиноватой зоне, сопровождающей надвиг. Об этом же направлении говорил и В. К. Монич [5], изучая сульфидные залежи Берикюля. В IV стадию направление движения растворов было другим. Растворы шли главным образом

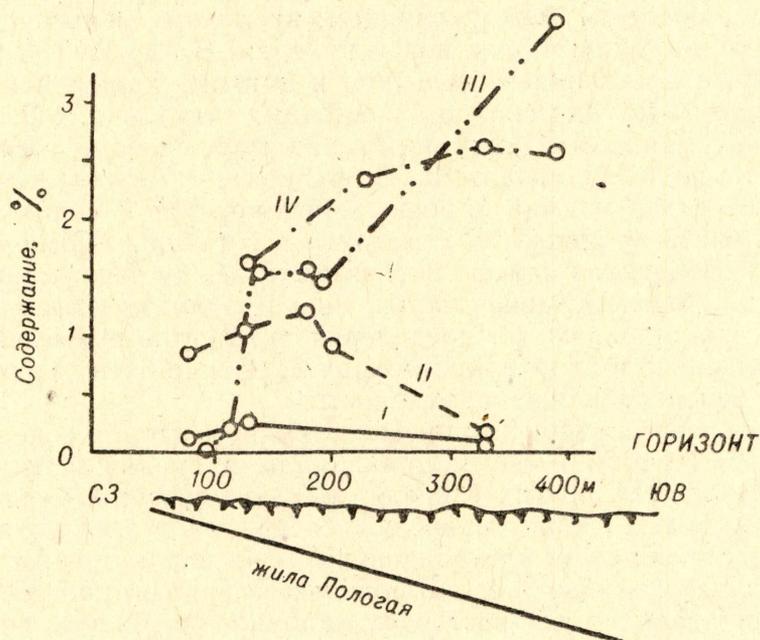


Рис. 1. Пространственное распределение суммарного содержания элементов-примесей в минералах III и IV стадий, I — арсенопирит, II — пирит, III — сфалерит, IV — галенит.

с юго-востока вдоль трещиноватой зоны, сопровождающей надвиг, и попадали в те участки жил, которые подверглись дроблению. И действительно, поскольку интенсивность трещиноватости вмещающих порфириров возрастает с приближением к плоскости пологой жилы (надвига), а сами жильные трещины к этому времени были заполнены минералами ранних стадий, то в участках, прилегающих к пологой жиле, растворы могли двигаться быстрее. Достигнув крутопадающей жилы, они могли перемещаться по вновь образовавшимся полостям в ней вверх и вниз от плоскости надвига, т. е. в жилы висячего и лежащего боков пологой жилы. Этому же соответствует и распределение минералов IV стадии (сфалерита, галенита, золота) в крутопадающих жилах.

Исходя из того, что золотоносные растворы (IV стадия) двигались с юго-востока, и учитывая общую структуру месторождения, следует признать возможность обнаружения рудных жил в юго-восточном направлении настолько далеко, насколько проявился надвиг.

На основании закономерного изменения содержания элементов-примесей на сравнительно небольших интервалах, увеличения их содержания к концу процесса минералообразования, отношения серебра к золоту более 1, а также неоднократного проявления внутриминерализационных подвижек [4, 8, 7] можно сказать о сравнительно неглубоком формировании руд исследованной части Берикюльского месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анфилов В. Н., Белов Б. И., Трошин Ю. П. О поведении изоморфных примесей в процессе сокристаллизации в открытых системах. «Геохимия», 1966, № 2.
 2. Воларович Г. П. О геологическом строении Дарасунского золотоносного района Восточного Забайкалья. Труды ин-та НИГРИзолото, вып. 16, 1947.
 3. Звягинцев О. Е. Геохимия золота. Изд. АН СССР, 1941.
 4. Кузнецов К. Ф. Редкие и рассеянные элементы в рудах полиметаллических месторождений Нерчинско-Заводской группы Восточного Забайкалья. Труды ИМГРЭ, вып. 2, 1959.
 5. Монич В. К. Колчеданные залежи Берикуля. Труды ТГУ, т. 96, 1939.
 6. Овчинников Л. Н. Элементы-примеси как индикаторы процессов рудообразования и использование закономерностей их распределения при поисках и разведке рудных месторождений. В сб.: «Химия земной коры», т. 2, Изд. «Наука», 1964.
 7. Шахов Ф. Н. Текстуры руд. Изд. «Наука», 1961.
 8. Щербина В. В. О геохимическом значении количественного отношения серебра к золоту. «Геохимия», 1956, № 3.
 9. Щербина В. В. Якубович К. И. Границы изоморфной смесимости в зависимости от генетических условий. Труды геох. конфер. «Химия земной коры», т. 1, 1963.
-