Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXIV, вып. 2, 1974 г.

ВЫЯВЛЕНИЕ СТАДИЙНОСТИ РУДООТЛОЖЕНИЯ МЕТОДОМ МНОГОКРАТНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ

И. Н. Крицук

При поисках глубокозалегающих рудных тел по первичным ореолам обычно используют два основных параметра: зональность и градиент содержаний элементов в первичных ореолах по восстанию, вкрест и по простиранию рудных зон. Для изучения зональности важное значение имеет оценка стадийности рудоотложения. Лишь оценив стадийность рудоотложения, можно изучать зональность и использовать ее как для поисков слепых рудных тел, так и для оценки уровня эрозионного среза и перспектив глубоких горизонтов рудных тел, не вскрытых эрозией. При решении этих вопросов в последнее время широко используют корреляционный анализ в простейшем варианте расчета парных линейных коэффициентов корреляции [1—3]. В настоящей работе использованы коэффициенты многократной корреляции, методика расчета которых предложена Ю. К. Бурковым [4] с целью установления ассоциаций химических элементов при решении вопросов седиментогенеза.

Расчеты коэффициентов многократной корреляции позволяют изучить не только сами связи, но и характер их изменения между элементами, а на основе последнего выделить определенные ассоциации химических элементов, характерные для разных стадий минерализации. Если мы имеем выборку из m проб, где каждая проба проанализирована на n элементов, то можно рассчитать парные линейные коэффициенты корреляции для каждой пары, получив в итоге матрицу

	x_1	x_2	x_3	.	.	.	.	x_{n-1}	x_n
x_1	1	$r_{1,2}$	$r_{1,3}$	.	.	.	.	$r_{1,n-1}$	$r_{1,n}$
x_2	$r_{1,2}$	1	$r_{3,2}$	.	.	.	.	$r_{2,n-1}$	$r_{2,n}$
x_3	$r_{1,3}$	$r_{2,3}$	1	.	.	.	.	$r_{3,n-1}$	$r_{3,n}$
.	.	.	.	1	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	1	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	1	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	1	.	.
x_{n-1}	$r_{1,n-1}$	$r_{2,n-1}$	$r_{3,n-1}$	.	.	.	.	1	$r_{n-1,n}$
x_n	$r_{1,n}$	$r_{2,n}$	$r_{3,n}$	.	.	.	.	$r_{n,n-1}$	1

Для рассматриваемых элементов x_1 и x_2 можно рассчитать коэффициент корреляции второго порядка между рядом величин $r_{1,3}$, $r_{1,4}$, $r_{1,5}$, ..., $r_{1,n}$ и соответственно рядом $r_{2,3}, r_{2,4}$, $r_{2,5}$, ..., $r_{2,n}$. Коэффициенты корреляции второго порядка отражают статистическую связь между элементами группы на более высоком уровне их взаимоотношений. Такую операцию можно повторить многократно, вычисляя коэффициенты корреляции n-го порядка на основе рассчитанных ранее коэффициентов корреляции $(n-1)$-го порядка. На каждом последующем этапе при многократной корреляции статистическая оценка отразит все более и более высокий уровень взаимоотношений между элементами. При этом $r \underset{n \to \infty}{\to} \pm 1$, т. е. вся совокупность элементов разделится на две генеральные ассоциации. Для элементов каждой из них характерны высокие положительные связи. Элементы из разных ассоциаций связаны между собой отрицательными связями $r = -1$.

Для расчетов коэффициентов корреляции использованы материалы по Ново-Широкинскому полиметаллическому месторождению (Восточное Забайкалье).

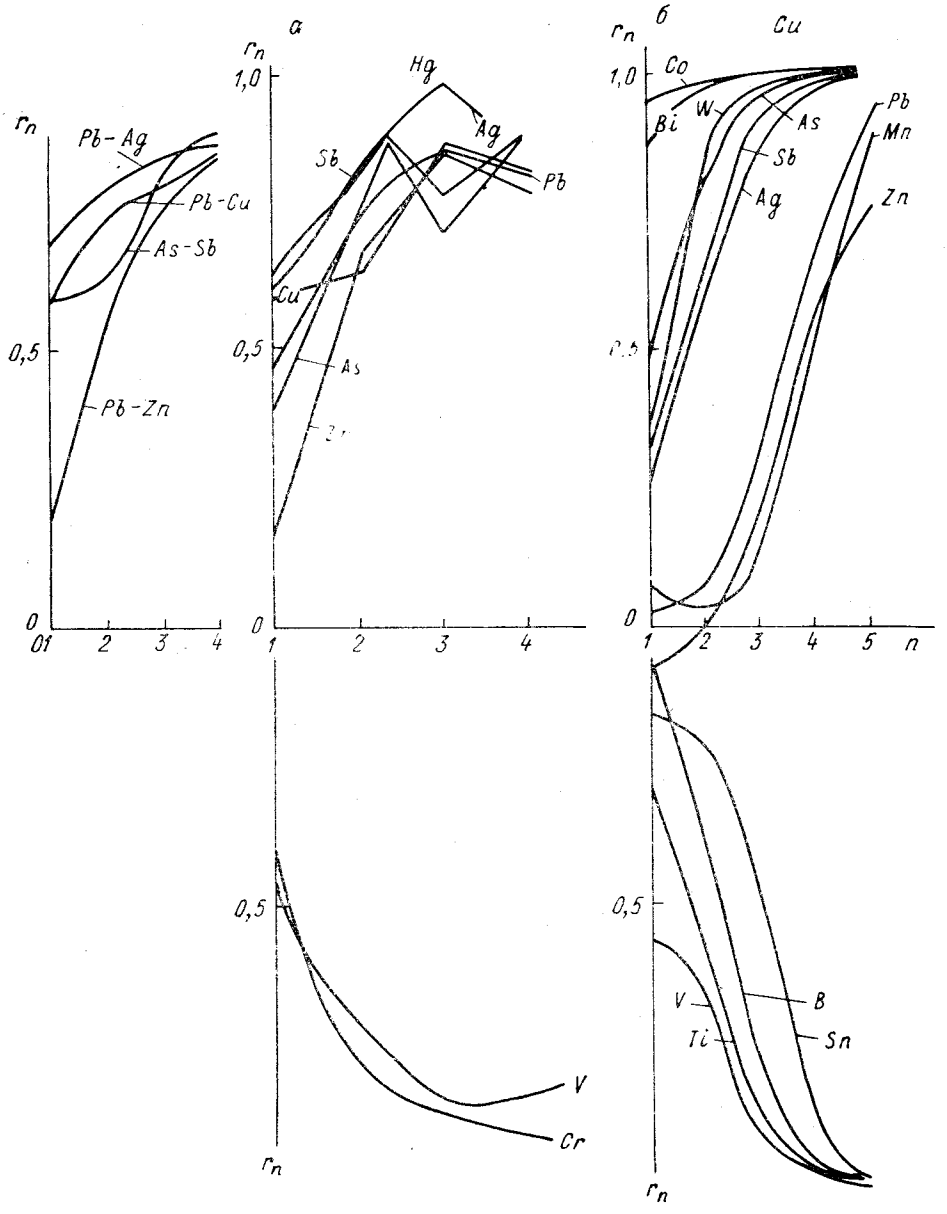
Месторождение залегает среди эффузивно-осадочных пород верхней юры и приурочено к тектонической зоне, нацело измененных брекчированных пород. Породы интенсивно карбонатизированы, пиритизированы и окварцованы. Развиты процессы хлоритизации, милонитизации, серицитизации. Морфологически рудное тело представлено сложно ветвящейся жилой, залегающей в центральной части зоны. Руды месторождения сложены в основном (в порядке убывания) галенитом, сфалеритом, пиритом, халькопиритом, блеклой рудой, гематитом, бурнотитом, арсенопиритом, марказитом, магнетитом, буланжеритом. Текстуры их брекчиевые, кокардовые, массивные, прожилково-вкрапленные, метаколлоидные, полосчатые и крустификационные. По геологическим данным, на месторождении выделяются шесть стадий минералообразования: турмалиново-кварцевая медисто-серно-колчеданная, кварц-полиметаллическая, карбонат-полиметаллическая и две пострудные доломитовые. Продуктивными из них считают лишь три: вторую, третью и четвертую.

Стадии минералообразования принадлежат единому этапу гидротермальной деятельности. Медисто-серно-колчеданная характеризуется отложением значительных количеств пирита, халькопирита и блеклой руды. Галенит и сфалерит в составе этих руд имеют второстепенное значение. Кварцево-полиметаллическая стадия является основной продуктивной стадией, в которую сформировалась почти вся масса руды на месторождении. В это время выделилось наибольшее количество галенита, сфалерита с эмульсионной вкрапленностью халькопирита, в незначительных количествах — блеклой руды. Карбонат-полиметаллическая стадия характеризуется образованием многочисленных мелких и крупных жил существенно-карбонатного состава с вкрапленностью светло-окрашенного сфалерита и блеклой руды.

На месторождении в 1964 г. изучались первичные ореолы. На основе этих работ выявлена слабовыраженная обратная вертикальная зональность. Нижние горизонты (глубина 300—500 *м* от дневной поверхности) относительно обогащены ртутью и мышьяком, средние горизонты (100—400 *м*) — свинцом, серебром, сурьмой и, наконец, верхние (0—100—150 *м*) — медью и цинком.

Для расчетов коэффициентов корреляции использованы данные спектральных анализов дубликатов бороздовых проб для девяти элемен-

тов: Pb, Zn, Cu, As, Sb, Ag, Hg, Cr и V. Пробы (их 34) отобраны по одной скважине на центральной части рудной зоны с содержанием свинца больше 0,1%. Многократные парные линейные коэффициенты корреляции рассчитывали до восьмого порядка. Однако уже на четвертом порядке корреляции значения коэффициентов для всех элементов достаточно велики и близки к единице. На этом этапе все элементы разделя-



Зависимость парного многократного коэффициента корреляции r_n от порядка корреляции

а — Ново-Широкинское полиметаллическое месторождение; *б* — сульфидно-касситеритовое месторождение Комсомольского района

ются на две «генеральные» ассоциации: ванадия и хрома, с одной стороны, и семи основных рудных элементов, с другой (см. рисунок, *а*). Первая группа элементов характеризуется отрицательными связями со второй. Это и понятно, так как свинец, цинк, медь, мышьяк, сурьма, серебро и ртуть привносятся гидротермальными растворами в процессе формирования месторождения и образуют вокруг рудного тела первичные ореолы. Ванадий и хром, наоборот, выносятся из основного канала «рудоотложения», образуя как бы «отрицательные» первичные ореолы «выноса». Однако, помимо этого общего деления на две генеральные группировки, можно выделить в первой генеральной ассоциации дополнительные группы элементов. Так, анализируя характер изменения связей по мере увеличения порядка корреляции, следует выделить, во-первых, пары: свинец—цинк, свинец—серебро, мышьяк—сурьма и свинец—медь.

Для этих пар элементов характерно непрерывное возрастание силы связи с увеличением порядка корреляции. Наличие первых двух пар обусловлено, по-видимому, существованием кварцево-полиметаллической стадии минералообразования, когда одновременно из рудных растворов отлагались основные массы галенита и сфалерита. При этом тесная связь серебра и свинца оправдана высокими содержаниями серебра в галенитах месторождений Забайкалья. Наличие пары мышьяк—сурьма связывается нами с существованием низкотемпературной карбонат-полиметаллической стадии минералообразования, во время которой, вероятно, основное значение приобретали блеклые руды сложного состава, а также отлагались галенит и буланжерит.

Следует отметить, что, помимо мышьяка, сурьма, как видно из рисунка, наиболее тесно связана со свинцом и медью.

Выделить характерные ассоциации элементов для первой, наиболее высокотемпературной медисто-серно-колчеданной стадии минерализации затруднительно по имеющимся данным, так как, кроме меди, в нашем коротком списке нет элементов, характерных лишь для этой стадии минералообразования. Однако более сильные связи для четвертого порядка корреляции наблюдаются у меди с цинком и свинцом, а не с сурьмой и мышьяком, что подтверждает последовательность выделения трех основных стадий рудоотложения.

Материалы по ртути создают двойственное положение: с одной стороны, исходя из формы кривых изменения связи с увеличением порядка корреляции, получается, что ртуть наиболее тесно связана с медью и свинцом, с другой — наиболее тесная связь ртути на последнем порядке (см. рисунок, *а*) наблюдается с мышьяком. Вероятно, отложение ртути происходило по тем же каналам, но составляло самостоятельный более поздний этап.

Таким образом, изучение изменений связей при многократной корреляции позволяет наметить на месторождении четыре стадии рудоотложения и общий порядок выделения рудных элементов из растворов:

$$Cu \longrightarrow (Zn\ Pb\ Ag) \longrightarrow (As\ Sb) \longrightarrow Hg.$$

Полученный материал является лишь предварительным, так как круг элементов, привлеченных к рассмотрению, ограничен.

Коэффициенты многократной корреляции рассчитаны также для одного из сульфидно-касситеритовых месторождений Комсомольского рудного района. Сульфидно-касситеритовые месторождения в районе генетически связаны с малыми интрузиями гибридного состава. Северный фланг рудной зоны залегает в песчано-сланцевой толще нижней

юры, а южный — в верхнемеловых покровах кварцевых порфиров и их туфов. В рудной зоне намечается вертикальная зональность в распределении на глубину минеральных ассоциаций. На верхних горизонтах рудной зоны интенсивно развиты пропилиты, пересекаемые густой сетью кварц-лимонитовых прожилков. С глубиной пропилитовая фация сменяется кварц-серицитовой гидротермальных метасоматитов, в составе руд начинают преобладать сульфиды, представленные арсенопиритом, галенитом, сфалеритом, халькопиритом, станнином, пирротином, с редкими включениями касситерита. Сульфидные руды далее на глубину сменяются кварц-касситеритовыми прожилками, пересекающими кварц-турмалиновые метасоматиты.

Расчеты проводили на основе спектральных анализов дубликатов 37 бороздовых проб по одной скважине, вскрывающей рудную зону. Пробы анализировали на 15 элементов (Pb, Zn, Sn, As, Sb, W, Ag, Bi, Cu, Ni, Co, V, Ti, Mn, B). Результаты расчетов коэффициентов многократной корреляции наносили на график для всех элементов относительно какого-либо одного. В качестве примера на рисунке *б* рассмотрены коэффициенты корреляции для меди со всеми остальными элементами, графики для которых построены по аналогичному признаку. Как видно из рисунка, всю совокупность химических элементов можно разделить на две генеральные ассоциации. В первую входят Ti, V, B и Sn, во вторую— все остальные одиннадцать элементов. Первая ассоциация отражает состав наиболее высокотемпературной стадии рудообразования. Интересно, что в этой ассоциации можно также провести некоторое разделение, объединив вместе V, Ti, B и выделив в отдельную группу Sn. Действительно, для месторождений района характерны кварц-турмалиновые метасоматиты. Образование их связано с поступлением первых наиболее высокотемпературных порций гидротермальных растворов, при этом в них присутствовали, наряду с бором, вероятно, и титан, и ванадий, являясь характерными элементами интрузий повышенной основности. С некоторым отрывом во времени, но также на ранней стадии рудообразования из последующих порций раствора отлагалось олово в виде касситерита совместно с кварцем, создавая кварц-касситеритовую стадию рудообразования.

Затем, вероятно, со значительным разрывом во времени отлагалась вторая генеральная ассоциация химических элементов — Pb, Zn, As, Sb, W, Ag, Bi, Cu, Ni, Mn, Co, где также можно выделить несколько самостоятельных групп элементов: 1) Pb, Zn, Mn с наиболее тесной связью Pb и Zn; 2) сурьма и серебро; 3) медь, кобальт, висмут; 4) пара мышьяк—вольфрам. Эти группы элементов, вероятно, также отлагались с небольшим временным разрывом при постепенном снижении температуры в следующей последовательности:

$$(W\,As) \longrightarrow (Cu,\ Co,\ Bi) \longrightarrow (Zn,\ Pb,\ Mn) \longrightarrow (Sb\,Ag).$$

Таким образом, в целом по месторождению можно составить ряд выделения химических элементов при рудообразовании

$$Sn \longrightarrow (W\,As) \longrightarrow (Cu,\ Co,\ Bi) \longrightarrow (Zu,\ Pb,\ Mn) \longrightarrow (Sb\,Ag).$$

В общих чертах он совпадает с группами элементов и последовательностью отложения, рассмотренной Н. В. Никитиным [1]. Он выделяет две основные рудные стадии минерализации: кварц-касситеритовую и кварц-сульфидную. К первой стадии он относит олово, вольфрам, висмут и кобальт, ко второй — медь, цинк, свинец и серебро.

По нашим данным, олово привносилось в самую раннюю стадию с незначительным разрывом во времени после образования турмалиновых метасоматитов. Однако значительного разрыва во времени между отложением вольфрама и сульфидов не происходило. Следует учитывать при этом, что результаты получены на ограниченном фактическом материале и, безусловно, являются предварительными.

Подводя итог всему сказанному, отметим, что использование многократной корреляции для оценки стадийности рудообразования может дать важный дополнительный материал при изучении первичных ореолов рудных месторождений. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят уточнить методику, выявить ее недостатки и положительные стороны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитин Н. В. Использование вертикальной зональности первичных ореолов в оценке эрозионного среза оловорудных тел Приморья. Зап. ЛГИ, 1969, т. LVI, вып. 2.

2. Григорян С. В., Янишевский Е. М. Эндогенные геохимические ореолы рудных месторождений и их использование при поисках скрытого оруденения. Недра, 1968.

3. Малахов А. С. Коэффициент корреляции как индикатор вертикальной зональности оруденения на одном из месторождений Казахстана. В сб.: Применение математических методов в геологии. Наука, Алма-Ата, 1968.

4. Бурков Ю. К., Боровиков Л. И. Корреляционный анализ закономерностей распределения малых элементов для решения вопросов седиментогенеза. Международн. геол. конгр., XXIII сессия. Докл. сов. геологов Наука, 1968.