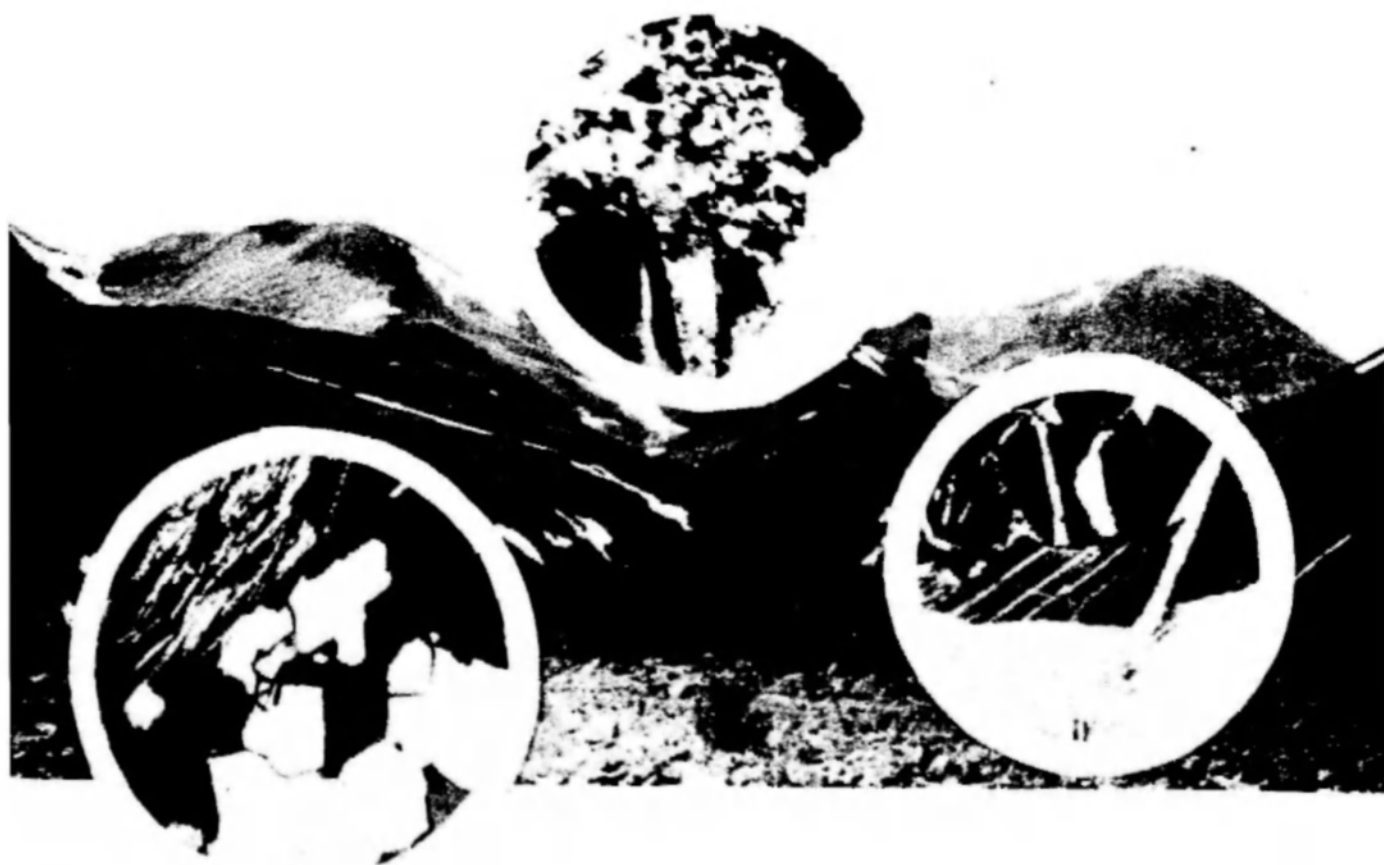


АКАДЕМИЯ НАУК СССР
КОМИ ФИЛИАЛ

ISSN 0568

ПРОБЛЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОЙ МИНЕРАЛОГИИ



Сыктывкар 1978

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ФАКТОРНОГО
АНАЛИЗА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ТИПОМОРФИЗМА
СФАЛЕРИТА

А.Б.Макеев, М.А.Урасин

Для выяснения главных факторов, определяющих типоморфизм состава и свойств сфалеритов Уральско-Новоземельского региона (см. статью Н.П.Юшкина, Н.И.Еремина, А.Б.Макеева и Т.Г.Петрова в этом сборнике), довольно продуктивной оказалась принятая нами попытка факторного анализа результатов физических и химических исследований этого минерала.

В анализе использованы 22 наиболее информативных типоморфных признака: содержание Zn, Fe, Mn, Cd и S по результатам химического анализа, содержание относительно часто встречающихся аксессуарных элементов-примесей $Sb, Pb, Ga, Ge, Mo, Cu, V, Ag, Ti, Co, Ni, Sn$ по результатам спектрального анализа, параметр элементарной ячейки (a_0), твердость (H_T), степень гексагональности (H), светосумма термолюминесценции (ΣTL) и цвет сфалерита ($C_{\text{в}}$).

Теснота и направленность связей между парами признаков определяется величиной и знаком коэффициента корреляции r (табл. 1). Взаимосвязь пары признаков считается установленной (при уровне значимости 0,05), если абсолютное значение коэффициента корреляции превышает величину 0,14, которая вычислена по формуле $r = \sqrt{t^2 / (N - 2 + t^2)}$ с помощью известного критерия t [1], а N — число проб сфалерита (в нашем случае $N = 192$).

Визуальный анализ корреляционной матрицы позволяет выделить наиболее тесные связи между парами признаков и целыми их группами.

Так, например, коэффициент корреляции между медью и ванадием $r = +0,87$. Эта высоконадежная связь объясняется наличием

Таблица 1

Матрица оценок парных коэффициентов корреляции

	Zn	Fe	Mn	Cd	S	Sb	Pb	Ga	Ge	Mo	Cu	V	Ag	Tl	Co	Ni	Sn	α ₀	Ht	H	ΣТЛ	Цвет	
Zn	1	-0,31	-0,78	-0,53	-0,18	-0,45	-0,18	-0,07	+0,21	-0,06	-0,27	-0,28	+0,07	-0,08	-0,23	-0,12	-0,24	-0,86	-0,04	-0,44	-0,04	-0,47	Zn
Fe		1	-0,27	-0,30	+0,58	-0,18	+0,38	-0,25	-0,08	+0,08	-0,15	-0,15	-0,08	+0,28	+0,78	-0,03	-0,13	-0,18	-0,30	-0,15	-0,08	+0,53	Fe
Mn			1	+0,50	+0,09	+0,63	-0,07	+0,18	-0,15	+0,02	+0,36	+0,33	-0,01	-0,10	-0,23	+0,12	+0,33	+0,93	+0,15	+0,53	-0,08	+0,20	Mn
Cd				1	-0,69	+0,21	-0,01	+0,22	-0,15	+0,02	+0,25	+0,27	-0,02	-0,04	-0,24	+0,14	+0,22	+0,75	+0,08	+0,54	+0,38	-0,05	Cd
S					1	+0,18	+0,15	-0,19	-0,01	+0,03	-0,08	-0,10	-0,05	+0,09	+0,44	-0,06	-0,10	-0,13	-0,10	+0,02	-0,40	+0,45	S
Sb						1	-0,04	+0,21	-0,01	-0,12	+0,27	+0,27	+0,11	-0,03	-0,15	+0,05	+0,24	+0,56	+0,03	+0,28	-0,04	+0,13	Sb
Pb							1	-0,13	-0,03	-0,13	-0,02	+0,03	+0,08	+0,29	+0,19	-0,07	-0,08	-0,01	-0,11	-0,07	+0,07	+0,17	Pb
Ga								1	-0,08	-0,07	+0,21	+0,25	+0,11	+0,10	-0,18	+0,23	+0,13	+0,21	-0,14	+0,25	-0,03	+0,11	Ga
Ge									1	+0,02	-0,07	-0,06	+0,28	-0,02	-0,07	-0,02	+0,04	-0,18	-0,12	-0,08	-0,03	-0,07	Ge
Mo										1	-0,02	-0,08	-0,08	-0,02	+0,04	+0,07	+0,03	+0,01	+0,08	+0,05	-0,04	+0,07	Mo
Cu											1	+0,37	+0,30	+0,21	-0,11	+0,08	+0,34	+0,36	-0,14	+0,22	-0,05	+0,31	Cu
V												1	+0,21	+0,33	-0,12	+0,09	+0,31	+0,35	-0,20	+0,22	-0,01	+0,28	V
Ag													1	+0,22	-0,13	-0,03	+0,39	-0,01	-0,15	+0,17	-0,11	+0,17	Ag
Tl														1	+0,25	-0,05	+0,09	-0,04	-0,18	+0,05	-0,08	+0,32	Tl
Co															1	-0,04	-0,10	-0,16	-0,25	-0,12	-0,05	+0,45	Co
Ni																1	+0,04	+0,16	-0,10	+0,10	-0,02	-0,01	Ni
Sn																	1	+0,34	-0,04	+0,26	-0,04	+0,17	Sn
α ₀																		1	+0,11	+0,53	+0,11	+0,21	α ₀
Ht																			1	+0,17	+0,07	-0,23	Ht
H																				1	-0,04	+0,15	H
ΣТЛ																					1	-0,20	ΣТЛ
Цвет																						1	Цвет

микроскопических вростков сульванита (Cu_3VS_4) в зернах марганцовистого сфалерита. Корреляционная связь между марганцем и сурьмой характеризуется величиной $r = +0,63$. Очевидно, что эти два элемента имеют одну и ту же геохимическую природу, возможно, совместно выщелачиваются из девонских сургучных яшм и концентрируются в марганцовистых сфалеритах путем соосаждения с сульфидом цинка из гидротермальных растворов, перерабатывающих каменноугольные отложения.

Очень тесные корреляционные связи отмечаются для большой группы признаков ($\text{Mn}, \text{Cd}, \text{Sb}, \text{Ga}, \text{Cu}, \text{V}, \text{Sn}, \text{As}, \text{H}$). Эта ассоциация признаков характерна для сфалеритопоявлений барит-целестин-флюорит-сульванит-сфалеритовой формации. Видимо, она в какой-то степени характеризует гидротермально-метасоматический процесс, в результате которого на Пай-Хойском антиклинории образовались марганцовистые и кадмиевые сфалериты.

Другая надежно выделенная группа тесно взаимосвязанных признаков ($\text{Fe}, \text{S}, \text{Pb}, \text{Ti}, \text{Co}, \text{Цб}$) характеризует совершенно иной процесс. Эта группа признаков принадлежит темноцветным высокожелезистым сфалеритам из самых высокотемпературных по геологическим данным рудопоявлений.

Наглядно проявляется зависимость физических свойств сфалерита от состава примесей. Так a_0 с высокой степенью надежности связан с изоморфными примесями: с Mn $r = +0,93$; с Cd $r = +0,75$. С помощью преобразования коэффициентов корреляции параметра элементарной ячейки (a_0) с основными изоморфными примесями получено уравнение регрессии:

$$a_0 = 5,4083 + 0,000456 \cdot X + 0,00210 \cdot Y + 0,00424 \cdot Z \text{ (Å)},$$

где X, Y, Z — $\text{FeS}, \text{MnS}, \text{CdS}$ мол. % соответственно.

Выявлены до этого не заметные связи между степенью гексagonalности (H) и концентрацией примесей $\text{Mn}, \text{Cd}, \text{Ga}, \text{V}, \text{Cu}, \text{Sn}$, также установлено влияние примесей на окраску сфалерита.

Для описания структуры корреляционной матрицы (табл. 1) был применен один из приемов факторного анализа — метод максимального правдоподобия [3]. Расчеты выполнялись на ЭВМ "Минск-22" по программе, составленной М. А. Урасиным.

Результаты расчетов на первые четыре фактора, которые описывают изменчивость типоморфных признаков сфалерита на 48%, представлены в таблице 2. Выделены обрамлением в рамку факторные нагрузки, отражающие существенные (при 5%-ном уровне значимости) связи между типоморфными признаками сфалерита и гипотетическими факторами. Интерпретация полученных факторов в

сочетании с геологическими и минералогическими наблюдениями привела нас к следующим выводам.

Фактор I, определяющий изменчивость группы признаков $+(a_0, Mn, Cd, Sb, H, Cu, V, Sn, Ga, H_T, Ni) - (Zn, Fe, Co, S, Ge)$, может быть интерпретирован как параметр, отражающий концентрацию компонентов, в первую очередь Cd, Mn, Zn , в рудоносных растворах.

Действие фактора II отражает изменчивость следующих признаков: $+(Fe, S, Co, Sb, Pb, Ti, Mn) - (Zn, Cd, H_T, \Sigma TL, Ga)$. Этот фактор очень близок к такому важному термодинамическому параметру, как температура минералообразования. И в самом деле, во многих литературных источниках отмечается, что высокожелезистые темноцветные сфалеритовые разности, содержащие повышенные концентрации кобальта, титана, марганца, относятся к наиболее высокотемпературным, в противоположность светлоокрашенным кадмиевым, галлийсодержащим сфалеритам, являющимся самыми низкотемпературными среди сфалеритовых разностей. Фигуративные точки всех изученных сфалеритов в координатах факторов F_I и F_{II} представлены на рис. 1. Четко обособились поля разновидностей сфалерита, характерных для различных типов полиметаллических месторождений. Самые высокотемпературные высокожелезистые сфалериты кварц-халькопирит-сфалеритовой и халькопирит-галенит-сфалеритовой формаций занимают почти вертикальное линейное поле I. Очень компактное поле II объединяет малопримесные сфалериты из среднетемпературных месторождений о-ва Вайгач, Амдермы и Шантым-прилукского рудного поля. Марганцовистые сфалериты барит-целестин-флюорит-сфалерит-сульванитовой формации объединяются в поле III; отчетливо прослеживается, что более высокомарганцовистые сфалериты являются более высокотемпературными. В линейном поле IV локализуются кадмиевые сфалериты Пайхойского антиклиналя — самые низкотемпературные образования.

Фактор III, определяющий изменчивость признаков $+(Cd, \Sigma TL, Fe, Co, Pb, Ti) - (S, Sb, Mn, Zn, H_T)$, очень близок к описанию действия pH среды минералообразования. Только изменчивость кислотности-щелочности среды минералообразования в результате единого процесса может способствовать возникновению таких разных по химизму разновидностей сфалерита, как марганцовистая и кадмиевая. Этот вывод следует из анализа термодинамических условий образования сульфидов кадмия, марганца и цинка [2, 4]. По нашим данным следует, что марганцовистые сфалериты и вюртциты образовались в значительно более кислой среде, чем кадмиевые сфалериты (рис. 2).

Матрица факторных нагрузок и вектор суммарных вкладов факторов в изменчивость элементов системы (V_{Σ})

Таблица 2

F	Zn	Fe	Mn	Cd	S	Se	Pb	Ga	Ge	Mo	Cu	V	Ag	Ti	Co	Ni	Sn	As	Hg	H	ΣТЛ	Цвет	Vk
I	-0,78	-0,34	+0,82	+0,76	-0,21	+0,58	-0,07	+0,29	-0,18	+0,01	+0,38	+0,39	-0,00	-0,08	-0,28	+0,18	+0,35	+0,80	+0,15	+0,53	+0,10	+0,12	20,1
II	-0,58	+0,86	+0,18	-0,28	+0,83	+0,16	+0,32	-0,19	-0,10	+0,07	-0,00	-0,03	-0,08	+0,21	+0,88	-0,00	-0,02	-0,13	-0,21	+0,08	-0,21	+0,83	13,8
III	-0,22	+0,33	-0,28	+0,66	-0,52	-0,30	+0,24	-0,02	-0,09	+0,03	-0,08	-0,02	-0,05	+0,18	+0,31	-0,08	+0,00	+0,08	-0,17	-0,10	+0,41	+0,07	6,2
IV	-0,03	-0,01	+0,02	-0,03	+0,01	-0,17	-0,03	-0,27	-0,14	+0,16	-0,58	-0,53	-0,67	-0,38	+0,01	-0,07	-0,36	-0,02	+0,21	-0,22	+0,04	-0,33	7,8
																							48,0%

Формулы для расчета факторных векторов для конкретных проб

$$F_I = 29,670 + 0,009 \cdot a_0 + 0,168 \cdot Mn + 0,047 \cdot Cd + 0,812 \cdot S + 0,00015H + 0,026 \cdot Cu + 0,135 \cdot V + 2,680 \cdot Sn + 0,872 \cdot Ga - 0,105 \cdot Zn - 0,118 \cdot Fe - 3,970 \cdot Co - 0,538 \cdot Se$$

$$F_{II} = -87,568 + 0,300 \cdot Fe + 2,250 \cdot S + 11,860 \cdot Co + 0,0012 \cdot Цвет + 0,048 Pb + 0,181 \cdot Ti + 0,020 \cdot Mn - 0,1087 \cdot Zn - 0,034 \cdot As - 0,00005 Hg$$

$$F_{III} = 144,258 + 0,145 \cdot Cd + 0,372 \cdot Fe + 17,080 \cdot Co + 0,088 \cdot Pb - 4,105 \cdot S - 0,1475 \cdot Zn - 0,237 \cdot Mn - 0,762 \cdot Se + 0,00085 a_0$$

$$F_{IV} = 85,280 - 0,378 \cdot Zn - 0,172 \cdot Fe + 0,2088 \cdot Mn - 0,188 \cdot Cd - 1,777 \cdot S - 9,435 \cdot Se - 0,328 \cdot Pb - 5,925 \cdot Ga - 0,704 \cdot Ge + 0,648 \cdot Mo - 2,140 \cdot Cu - 11,280 \cdot V - 144,17 \cdot Ag - 10,083 \cdot Ni + 18,046 \cdot Co - 10,170 \cdot Ni - 17,320 \cdot Sn - 0,0083 \cdot a_0 + 0,0021 \cdot Hg - 0,0055 \cdot H + 0,00024 \cdot \Sigma ТЛ - 0,119 \cdot Цвет$$

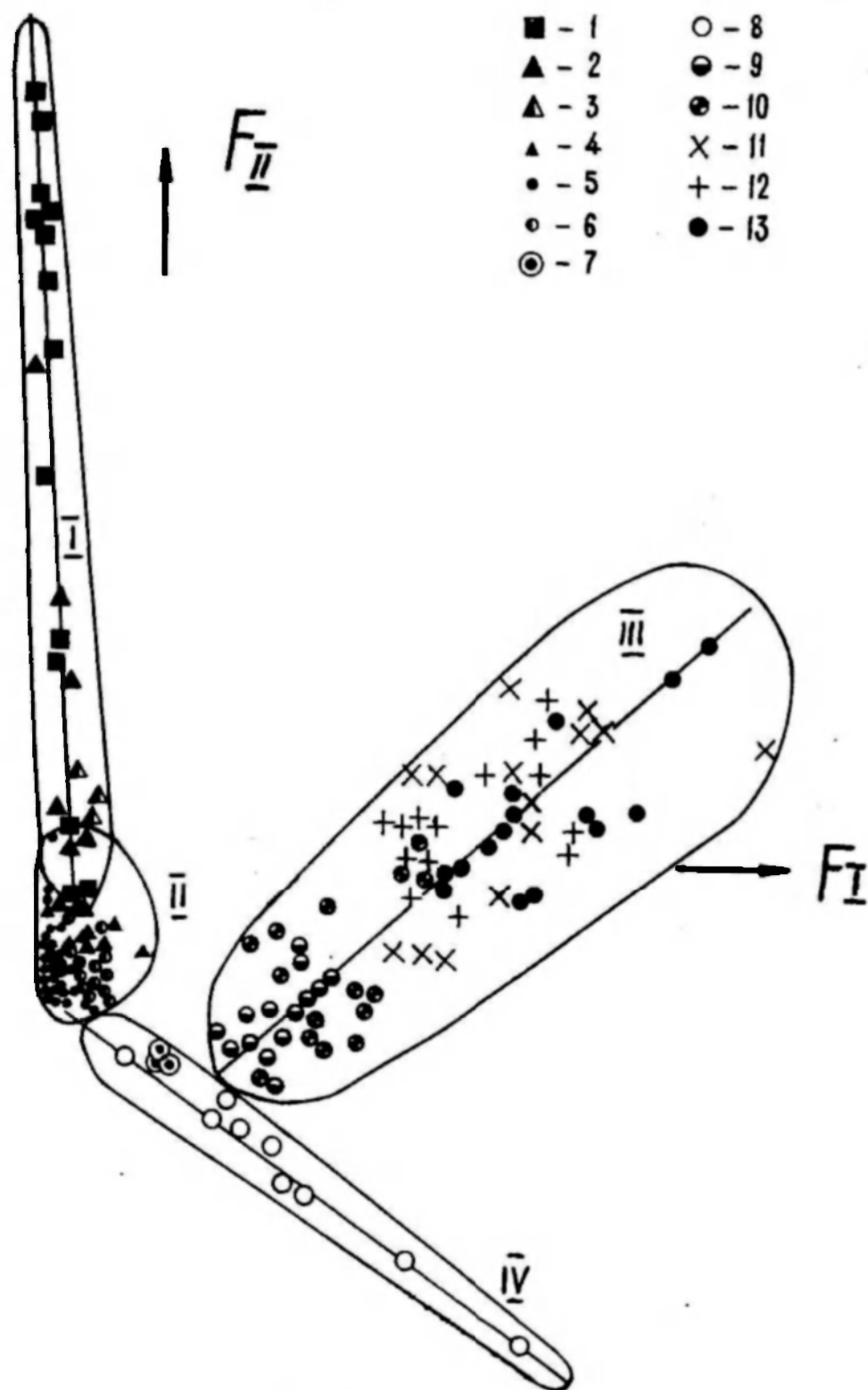


Рис. 1. Фигуративные точки составов сфалеритов из различных сфалеритопоявлений в координатах факторов F_I и F_{II} .

1-8 - сфалериты: 1 - высокожелезистые из рудопоявлений Северного и Приполярного Урала, 2 - железистые юшарских рудопоявлений, 3 - р.Крестовой, 4 - Амдерминского месторождения, 5 - о-ва Вайгач, 6 - Шантымприлукского рудного поля, 7 - руч. Буреданью, 8 - высококадмиевые р.Силова-Яхи. Сфалериты высокомарганцовистые разного цвета: 9 - желтые и желто-коричневые, 10 - коричневые, 11 - оранжевые, 12 - оранжево-коричневые р.Силова-Яхи, 13 - оранжево-коричневые р.Путью и руч.Верхнего.

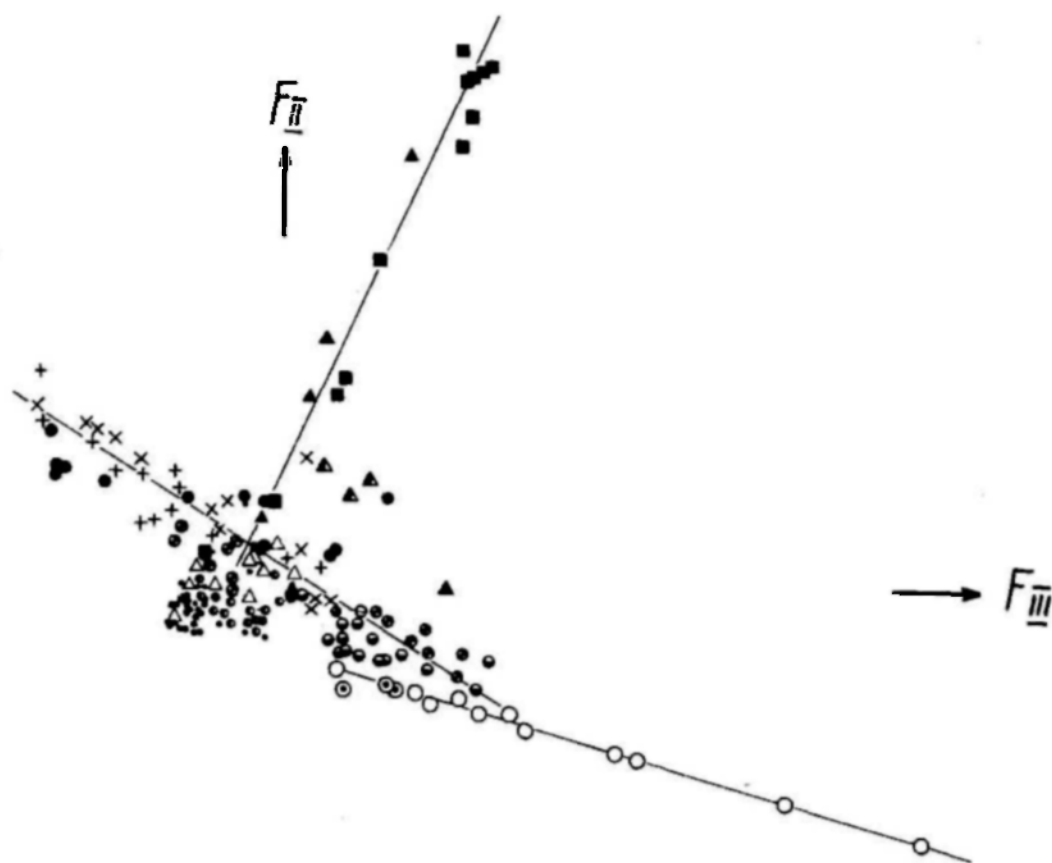


Рис. 2. Фигуративные точки составов сфалеритов из различных сфалеритопроявлений в координатах факторов F_{II} и F_{III} . Условные обозначения те же, что и на рис.1.

Действие фактора IV, описывающего изменчивость признаков + (H_T, Mo) - ($Aq, Cu, V, Ti, Sn, Zb, Ga, H, Sb, Ge$), пока не ясно, хотя он явно связан с химизмом гидротермально-метасоматического процесса, в результате которого образовались сфалериты, концентрирующие данный набор элементов-примесей, от которых зависят такие свойства, как твердость, политипия и цвет.

К сожалению, описание действия интерпретированных факторов может производиться только качественно (больше-меньше), так как нет еще достаточно надежных реперов, чтобы судить о параметрах процесса минералообразования количественно. Так как химизм изученных сфалеритов варьирует в необычно широких пределах, то можно считать, что нами рассмотрен общий случай изменчивости типоморфных признаков сфалерита. Поэтому определить по-

ложение других сфалеритопроявлений в разобранной схеме можно, не прибегая к ЭВМ: с помощью приведенных уравнений (табл.2) вычислить значение их факторов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ван дер Варден. Математическая статистика. М., "Иностр. лит.". 1960. 420 с.
2. Кузнецов В.А., Ефремова Е.П., Котельников А.Р. Термодинамический анализ условий образования сульфидов Cd, Mn, Zn, Pb и селенида цинка в высокотемпературных водных растворах. - "Геохимия", 1974, № 7, с. 963-977.
3. Лоули Д., Максвелл А. Факторный анализ как статистический метод. М., "Мир", 1967. 127 с.
4. Таусон В.Л., Чернышов Л.В., Макеев А.Б. Фазовые отношения и структурные особенности смешанных кристаллов в системе $ZnS-MnS$. - "Геохимия", 1977, № 5, с. 679-692.

УДК 549.321.1 (470.11)

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ТИПОМОРФИЗМА СФАЛЕРИТА. М а к е - е в А.Б., У р а с и н М.А. - В кн.: Проблемы региональной минералогии. Сыктывкар, 1978, с.53-60. (Труды Ин-та геологии Коми филиала АН СССР, вып. 24).

Рассматривается применение метода максимального правдоподобия факторного анализа для описания изменчивости типоморфных признаков сфалерита. Первые четыре фактора описывают изменчивость 22 признаков 192 полностью охарактеризованных проб сфалерита на 48%. Гипотетические факторы интерпретированы как некоторые термодинамические параметры среды минералообразования. Среди них температура, рН и химизм рудообразующих гидротерм. Рис. 2. Библиогр. 2.