

Л. Г. СУХОВ

**ДИАГНОСТИКА МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ХИМИЧЕСКИХ АНАЛИЗОВ
(НА ПРИМЕРЕ ХАРАЕЛАХСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ)**

(Представлено академиком В. И. Смирновым 26 I 1970)

Хараелахское рудное поле, расположенное на севере Енисейской рудной провинции, включает в себя Талнахское и Октябрьское месторождения, в которых наряду с довольно значительными телами сплошных сульфидов широко распространены вкрапленные и прожилково-вкрапленные промышленные руды. Выделяются пять минеральных типов руд ⁽¹⁾: пиритовый, пирротиновый, кубанитовый, халькопиритовый и борнитовый. Отнесение руд к одному из них позволяет получить информацию первого порядка об их минеральном составе, что необходимо для селективной выемки руд, рационального разделения рудных концентратов и их дальнейшей переработки. Однако на всех стадиях разведки месторождений и при добыче руд основным критерием для суждения о свойствах последних являются результаты массовых химических анализов на отдельные элементы. Для оценки минерального состава иногда используется способ пересчета на нормативные минералы. Главным его недостатком является ограниченное количество используемых химических параметров и как результат узкий круг нормативных минералов. Увеличение их числа значительно затрудняет расчеты и вносит в них элемент субъективности или требует предварительного микроскопического исследования ⁽²⁾.

Несмотря на различия в средних содержаниях отдельных компонентов руд (меди, никеля, кобальта, платиноидов и серы), нет ни одного такого признака, по которому можно было бы с уверенностью отличать представителей одного минерального типа от других. Очевидно, следует использовать весь набор этих признаков совместно. Осуществить этот прием позволяет линейный дискриминантный анализ, задача которого заключается в выявлении нового параметра

$$z = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n, \quad (1)$$

представляющего собой линейную функцию от исходных признаков x_1, x_2 и т. д. и содержащего максимум информации из последних. Данная функция является уравнением гиперплоскости в многомерном признаковом пространстве, проходящей так, чтобы оптимально разделить объекты, относящиеся к одной группе, от объектов другой. В геологии этот метод был впервые применен А. Б. Вистелиусом ⁽³⁾; позднее был выполнен ряд литолого-петрографических исследований по Сибирской платформе ⁽⁴⁻⁶⁾ и по другим регионам. Нами сделана попытка приложить дискриминантный анализ к диагнозу медно-никелевых руд.

Параметры линейных дискриминантных функций были определены по методу Андерсона — Бахадура ⁽⁷⁾, пригодному для случая неравных ковариационных матриц. Для этого использовались выборки из химических анализов, проведенных при разведке и эксплуатации месторождений, заведомо соответствующие определенному минеральному типу (всего 113 анализов по 4 типам) с особым вниманием к переходным или граничным с другими типами разновидностям. Этим преследовалась цель учета

самых неблагоприятных для диагноза случаев и выявления ошибки классификации, близкой к максимальной. Вычисления производились на ЭЦВМ БЭСМ-4 во Всесоюзном научно-исследовательском институте геологии при участии и любезных консультациях сотрудника отдела математических методов В. В. Грузы.

Уравнение (1) легко трансформируется в

$$D(x) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (2)$$

перенесением z в правую часть и обозначением его через a_0 . Диагностическая процедура сводится к определению знака дискриминанты $D(x)$, так как ее значение, принимаемое за границу между исследуемыми группировками, в этом случае равно нулю. Поскольку мы имеем дело с пятью признаками ($n=5$): x_1 — содержание никеля (вес. %); x_2 — содержание меди (вес. %); x_3 — содержание кобальта (г/т); x_4 — содержание платиноидов (г/т); x_5 — содержание серы (общей) (вес. %), — (2) в частном случае можно записать в виде

$$a_0 + a_1\text{Ni} + a_2\text{Cu} + a_3\text{Co} + a_4\text{Pt} + a_5\text{S} = 0 \quad (3)$$

Последовательная подстановка соответствующих значений коэффициентов a_0, a_1, a_2 и т. д. (табл. 1, №№ 1, 2, 3) в (3) превращает его в три уравнения гиперплоскостей в пятимерном пространстве. Первое из них используется для выделения руд пиритового типа из всего сообщества, второе — для отделения руд пирротинового типа от кубанитового и халькопиритового типов и третье — для разделения двух последних. Ошибки классификации невелики (см. табл. 1) и лежат в пределах вероятности неправильной классификации p , которая определяется как

$$p = 1 - \Phi(d), \quad (4)$$

Таблица 1

№ №	Классифир. группировки (минер. типы руд)	Группы признаков	Коэффициенты уравнений (3) и (5)						Знак (3) или (5) для отнесения к определенному группировке		Вероятность неправильной классиф. (P)	Ошибки классиф., %	
			a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	k_1	k_2		на использованных выборках	по контр. того же объема
1	Py	Ni, Cu, Co, Pt, S	-20,32	+25,95	+0,169	-0,000896	-0,169	+0,000896		+++	0,002	0	9
2	Po	To же	+0,916	-0,335	+1,466	+0,000108	-0,0224	-0,332		+++	0,003	0	3
3	Cub	Cu, Co, Co, Ni, Cu	-3,546	-0,450	+0,959	+0,00756	+0,0192	-0,316		+++	0,009	0	6
4	Py	Pt, Cu, Cu, Co	+12,81	-0,506	-0,00401	+0,00176	+0,222	-0,130		+++	0,150	8	40
5	Po	Ni, Cu, Co, Pt, S	-3,202	+1,456	-0,000547	+0,00750	-0,00459	-0,0459		+++	0,063	4	6
6	Cub	To же	-19,04	+16,68	-0,291	+0,0156	-0,274	+2,438		+++	0,017	0	2
7	Po	Ni, Cu, Co, Pt, S	-1,54	-0,564	-0,750	+0,00824	-0,0285	+0,424		+++	0,017	0	3
8	Cub	To же	+10,50	-0,462	-0,888	+0,0165	-0,0337	+0,108		+++	0,017	0	4

где $\Phi(d)$ — функция нормального распределения ⁽⁶⁾, а $2d^2$ — аналог обобщенного расстояния Махаланобиса между сравниваемыми группами в n -мерном пространстве в случае неравных ковариационных матриц ⁽⁷⁾.

Данный способ диагностики руд обладает тем недостатком, что пригоден лишь для сплошных сульфидных руд, так как уравнения построены на основе содержаний компонентов именно в этих рудах, поскольку при количестве сульфидов ниже 70% содержания компонентов будут в боль-

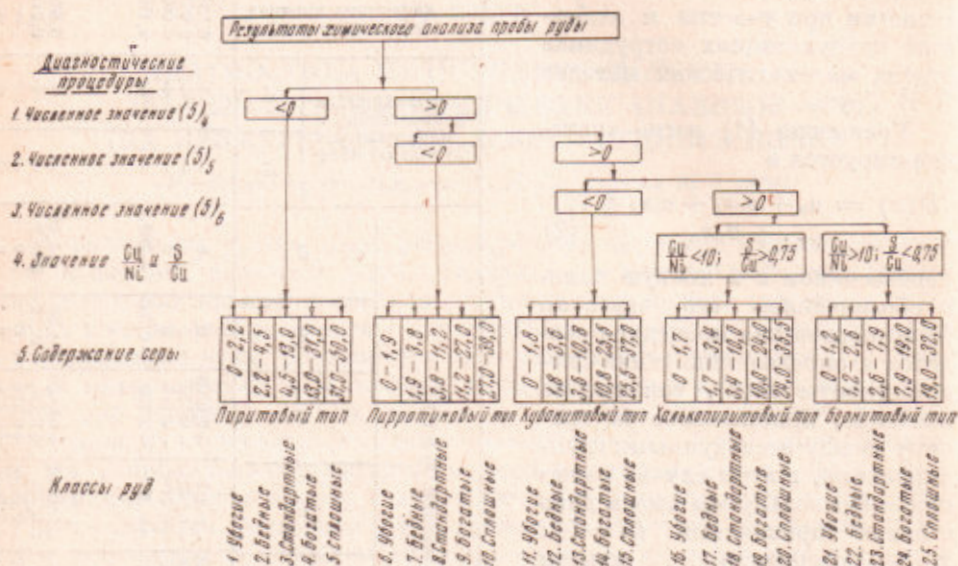


Рис. 1. Диагностическая классификация медно-никелевых руд

шей степени зависеть от доли сульфидов в руде, нежели от ее минерального состава. Кроме того, из-за отсутствия необходимого минимума представительных анализов достоверных сплошных борнитовых руд (ввиду их редкости на месторождениях рудного поля), они попадают формально в одну группу с халькопиритовыми. Однако, в отличие от последних, для руд борнитового типа характерно отношение меди к никелю >10 , а серы к меди $<0,7-0,8$.

Чтобы устранить первый из этих недостатков, при тех же условиях были вычислены уравнения трех гиперплоскостей в семимерном пространстве, координатными осями которого являются отношения содержаний компонентов руд. Эти параметры являются не менее важными характеристиками отдельных минеральных типов, но при этом относительно выдерживаются и при содержании сульфидов ниже 70%, т. е. в различных разновидностях вкрапленных, прожилково-вкрапленных и прожилковых руд. Поэтому уравнение

$$a_0 + a_1 \frac{Cu}{Ni} + a_2 \frac{Co}{Ni} + a_3 \frac{Co}{Cu} + a_4 \frac{Pt}{Ni} + a_5 \frac{Pt}{Cu} + a_6 \frac{S}{Cu} + a_7 \frac{S}{Co} = 0 \quad (5)$$

можно использовать для разделения на минеральные типы не только сплошных, но и других классов руд. Подстановкой соответствующих значений a_0, a_1, a_2 и т. д. (см. табл. 1, №№ 4, 5, 6) (5) аналогично (3) трансформируется в три уравнения, при помощи которых схема классификации руд по сравнению с (3) не меняется. Вероятность неправильной классификации и ошибки последней остаются во вполне допустимых пределах.

Содержание сульфидов в руде (об. %) в пределах одного минерального типа руд наиболее тесно связано с количеством серы (вес. %), которое, в силу этого, позволяет выделять классы руд внутри типов в зависимости от количества сульфидов в породе.

Из изложенного выше вытекает вероятностно-статистический алгоритм «распознавания образа»⁽⁹⁾, являющийся основой общей диагностической классификации руд. Начальная его часть представляет собой последовательный линейный дискриминантный анализ с использованием уравнений (5), что не более чем тремя альтернативными операциями позволяет установить принадлежность конкретной пробы руды к пиритовому, пирротинному или кубанитовому типу. В случае, если диагностические операции приведут к халькопиритовому типу, следует провести проверку, не относится ли данная проба к борнитовому типу руд. Затем по содержанию сульфидной серы определяется разновидность руды по признаку объемного количества сульфидов в принятой пятиразрядной шкале. Схема алгоритма распознавания приведена на рис. 1.

Предлагаемая диагностическая классификация поможет получить довольно обширную объективную информацию о вещественном составе руды по данным любого из массовых химических анализов, производимых на всех стадиях разведки, включая эксплуатационную, что особенно важно при бескерновом бурении скважин. С ее помощью можно вероятностно оценить количественно-минеральный состав, а следовательно, и набор минералов — носителей основных полезных компонентов, примерный выход рудной фракции при обогащении и ее состав. Опробация на руднике «Маяк» Талнахского месторождения показала хорошую сходимость расчетных данных с минераграфическими определениями типов руд.

Подобная классификация может быть построена и без применения ЭЦВМ, однако расчет коэффициентов дискриминантных функций в этом случае связан с большими затратами времени и возможностью ошибок, сводящих на нет всю работу. Поэтому «вручную» рекомендуется определять дискриминатор z_0 , полученный из дискриминантной функции при допущении, что все коэффициенты корреляции между отдельными признаками равны нулю⁽¹⁰⁾. Последнее условие, естественно, не соблюдается, но наши расчеты показали, что процедура различения ухудшается не на много (см. табл. 1, №№ 7, 8). Общий вид формул (1), (3) и схема классификации при этом сохраняются. Тем не менее, использование ЭЦВМ дает более надежные результаты.

Автор признателен геологам рудника «Маяк» Н. И. Коргун, В. Я. Медведеву, Ю. И. Пермякову за помощь во время работы на руднике, а также коллегам из Западно-Хараелахской геолого-разведочной партии за предоставление материалов по другим частям Хараелахского рудного поля.

Норильская опытно-методическая
тематическая экспедиция
Института геологии Арктики

Поступило
19 I 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Г. А. Митенков и др., Матер. 1-й конф. норильских геологов, Норильск, 1968. ² В. В. Ершов, Г. Б. Попова, Разведка и охрана недр, № 1 (1968). ³ А. Б. Вистелиус, ДАН, 71, № 2 (1950). ⁴ С. В. Гольдин, В. А. Кутолин, Сов. геол., № 12 (1964). ⁵ В. А. Кутолин, Ю. И. Томаповская, Уч. зап. инст. геол. Арктики, регион. геол., в. 8 (1966). ⁶ В. А. Кутолин, Г. Н. Каратаева, Тр. инст. геол. Арктики, 151 (1967). ⁷ T. W. Anderson, R. R. Bahadur, Ann. Matem. Statistics, 33, № 2 (1962). ⁸ И. П. Шарапов, Применение математической статистики в геологии, М., 1965. ⁹ Ю. А. Воронин и др., Геология и математика, Новосибирск, 1967. ¹⁰ О. М. Калинин, Б. З. Докторов, Тр. Вычислит. центра Ленингр. гос. ун-в., в. 4 (1967).