© В.В. Гладышев, 2008

УДК 622.272

В.В. Гладышев

ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗИ СОДЕРЖАНИЙ КОМПОНЕНТОВ В СПЛОШНЫХ РУДАХ ТАЛНАХСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Сплошные сульфидные руды являются наиболее важным типом руд Талнахского месторождения. Они пересечены большим числом разведочных скважин на всех трех основных его участках: юго-западном, северо-западном и северо-восточном.

В качестве объекта для исследований был выбран юго-западный участок Талнахского месторождения. С позиций особенностей взаимосвязи содержаний компонентов в сплошных рудах наибольший интерес здесь представляет центральная, наиболее мощная часть залежи.

Пирротиновая залежь центральной части юго-западного участка Талнахского месторождения сложена рудами одного химико-минералоги-ческого типа, с точки зрения статистического анализа представляющего собой однородную статистическую совокупность. Поэтому изучение взаимосвязи содержаний компонентов, слагающих пирротиновые руды, правомочно проводить только в пределах этой совокупности, соответственно результаты можно распространять только на пирротиновую залежь.

Исследовались взаимосвязи содержаний Ni, Cu, Fe, S_{Po}[1)], S, Co, Pt, Pd, Rh, Au и основных сульфидных минералов путем построения простых (парных) и многофакторных моделей с числом переменных факторов от 2 до 9. В результате было получено большое число уравнений прямой и сопряженной регрессии и соответствующие каждой зависимости параметры (коэффициент корреляции r, корреляционное отношение η, коэффициент детерминации d, оценка коэффициента множественной корреляции $\overline{R}$, оценка коэффициента множественной детерминации $\overline{D}$, критерий Фишера F, критерий Стьюдента t, стандартная ошибка уравнения регрессии $S_{y.x}$ и др.).

Рассмотреть и интерпретировать все полученные зависимости в рамках настоящей статьи не представляется возможным. Поэтому ниже мы анализируем только те корреляционные модели, функциями в которых являются кобальт и благородные металлы. Изучение зависимостей содержаний именно этих металлов в пирротиновых рудах Талнахского месторождения, исходя из насущных потребностей горной технологии, является наиболее актуальной задачей.

При изучении взаимосвязи содержаний кобальта и благородных металлов с другими компонентами руд пирротиновой залежи исследования проводились в следующем порядке. Прежде всего рассматривались простые (парные) корреляционные модели. После анализа полученных на их основе данных исследовались многофакторные корреляционные модели.

[1)] содержание серы в пирротине

Изучалась зависимость содержаний кобальта и благородных металлов от содержаний рудообразующих элементов Ni, Cu, Fe, S, химические анализы которых легко осуществимы благодаря несложности методики и сравнительно небольшой стоимости. Затем из моделей исключались последовательно Fe и S и изучались зависимости содержаний кобальта и благородных металлов только от Ni и Cu, химические анализы которых имеются для всех проб, отобранных из рудной залежи. Необходимость установления зависимостей от Ni и Cu совершенно очевидна, поскольку методика их химического определения довольно проста и анализ этих металлов проводится в химической лаборатории Норильского комбината в первую очередь.

Далее изучались зависимости содержаний кобальта и благородных металлов от содержаний всех прочих компонентов пирротиновых руд. С помощью коэффициентов частной корреляции проводился отбор наиболее существенных факторов и в дальнейшем изучались зависимости содержаний интересующих нас металлов только от наиболее существенных факторов.

При рассмотрении результатов изучения корреляционной зависимости содержаний кобальта и благородных металлов от различных компонентов пирротиновых руд примем указанную выше последовательность изложения материалов, полученных по каждому металлу (Co, Pt, Pd, Rh, Au).

Кобальт. Кобальт обнаруживает наиболее тесную связь с Ni, меньшую с S_{Po}, Rh и Au. Наименьшую ошибку определения содержания кобальта (11,1 отн. %) дает следующее уравнение:

$$Co = 2{,}25 + 1{,}914Ni + 0{,}195S_{Po} - 0{,}281Pt + 0{,}772Rh - 2{,}259Au, \quad (1)$$

$\overline{D} = 65{,}99$, $\overline{R} = 0{,}812$, $S_{\overline{R}} = 0{,}026$, $t_{\overline{R}} = 31{,}3$, $F = 2{,}94$, $S_{Co.Ni...Au} = 1{,}64$.

Однако данное уравнение требует знания содержаний пяти компонентов. Поэтому для вычислений содержаний кобальта вполне пригодно одно из уравнений парной зависимости Co – Ni, основная ошибка которых не превышает 12,3 – 13 отн. %:

1. $Co = 4{,}77 + 2{,}190Ni$, $r = 0{,}706$; (2)
2. $\ln Co = 1{,}717 + 0{,}642\ln Ni$, $r = 0{,}750$; (3)
3. $Co = 1{,}55 + 3{,}97Ni - 0{,}226Ni^2$, $\eta = 0{,}712$. (4)

Уравнение (1) необходимо использовать для контроля результатов.

Платина. Наибольшую точность в вычислении содержаний платины (ошибка 23,4 отн. %) дает следующее уравнение, учитывающее все существенные факторы:

$$Pt = 0{,}22 + 0{,}288Cu - 0{,}063Co + 0{,}155Pd + 0{,}253Rh + 0{,}996Au, \quad (5)$$

$\overline{D} = 72{,}15$, $\overline{R} = 0{,}849$, $S_{\overline{R}} = 0{,}022$, $t_{\overline{R}} = 38{,}6$, $F = 3{,}59$, $S_{Pt.Cu...Au} = 0{,}71$.

Однако применение данного уравнения требует знания содержаний пяти компонентов. Для практических расчетов целесообразно использовать какое-либо из уравнений парной зависимости Pt – Cu, поскольку точность вычисления содержаний платины с их помощью вполне удовлетворительная (33,4 отн. %), или уравнения парной зависимости Pt – Pd (25 отн. %):

1. $Pt = -0{,}91 + 0{,}911Cu$, $r = 0{,}748$; (6)
2. $\ln Pt = -1{,}055 + 1{,}422\ln Cu$, $r = 0{,}760$; (7)
3. $Pt = -1{,}33 + 1{,}080Cu - 0{,}017Cu^2$, $\eta = 0{,}748$; (8)
4. $Pt = 0{,}15 + 0{,}231Pd$, $r = 0{,}856$; (9)

5. $\ln Pt = -1{,}394 + 0{,}978 \ln Pd$, $r = 0{,}848$; (10)

6. $Pt = -0{,}56 + 0{,}334Pd - 0{,}003Pd^2$, $\eta = 0{,}865$. (11)

Необходимо отметить, что поскольку методика определения палладия допускает высокую аналитическую ошибку, предпочтительнее использовать уравнения зависимости содержаний Pt от содержаний Cu.

Для проверки результатов, полученных с помощью уравнений парной зависимости, следует воспользоваться множественным корреляционным уравнением (5) или уравнением:

$Pt = -0{,}11 + 0{,}755Cu + 2{,}229Au - 0{,}050Co$, (12)

$\overline{D} = 59{,}34$, $\overline{R} = 0{,}770$, $S_{\overline{R}} = 0{,}031$, $t_{\overline{R}} = 24{,}8$, $F = 2{,}46$, $S_{Pt.Cu\ Au\ Co} = 0{,}90$.

Палладий. При определении содержаний палладия в пирротиновых рудах следует использовать уравнения парной зависимости Pd – Cu, основная ошибка которых не превышает 24,3 отн. %:

1. $Pd = -3{,}79 + 3{,}761Cu$, $r = 0{,}833$; (13)

2. $\ln Pd = 0{,}489 + 1{,}355 \ln Cu$, $r = 0{,}835$; (14)

3. $Pd = -1{,}38 + 2{,}731Cu + 0{,}102Cu^2$, $\eta = 0{,}835$. (15)

Данные уравнения удобно использовать в практических целях, поскольку Cu анализируется во всех пробах без исключения в первую очередь.

С достаточной надежностью и высокой точностью контролировать полученные результаты позволяют уравнения регрессии Pd – Pt (16 – 18), относительная ошибка которых не превышает 22,5 отн. %, и многофакторная модель (19), относительная ошибка которой составляет 19,3 отн. %:

1. $Pd = 2{,}91 + 3{,}171Pt$, $r = 0{,}856$; (16)

2. $\ln Pd = 1{,}707 + 0{,}736 \ln Pt$, $r = 0{,}848$; (17)

3. $Pd = 2{,}41 + 3{,}492Pt - 0{,}041Pt^2$, $\eta = 0{,}856$; (18)

4. $Pd = -0{,}37 + 2{,}078Ni + 0{,}927Cu + 0{,}026S - 0{,}505Co + 1{,}902Pt$ (19)

$\overline{D} = 76{,}43$, $\overline{R} = 0{,}874$, $S_{\overline{R}} = 0{,}019$, $t_{\overline{R}} = 46{,}1$, $F = 4{,}23$, $S_{Pd.Ni\ldots Pt} = 2{,}39$.

Родий. Для вычисления содержаний родия с некоторыми допущениями можно рекомендовать уравнения парной зависимости Rh – Ni и Rh – Co:

1. $\ln Rh = -2{,}645 + 1{,}540 \ln Ni$, $r = 0{,}477$; (20)

2. $\ln Rh = -5{,}875 + 2{,}081 \ln Co$, $r = 0{,}491$. (21)

Данные уравнения характеризуются высокой стандартной ошибкой, не превосходящей, однако, аналитическую ошибку родия, и вполне пригодны для предварительной оценки содержания этого металла в рудах.

Контроль получаемых результатов следует осуществлять с помощью уравнения вида:

$Rh = -1{,}19 + 0{,}012Ni + 0{,}121Co + 0{,}033Pt + 0{,}812Au$, (22)

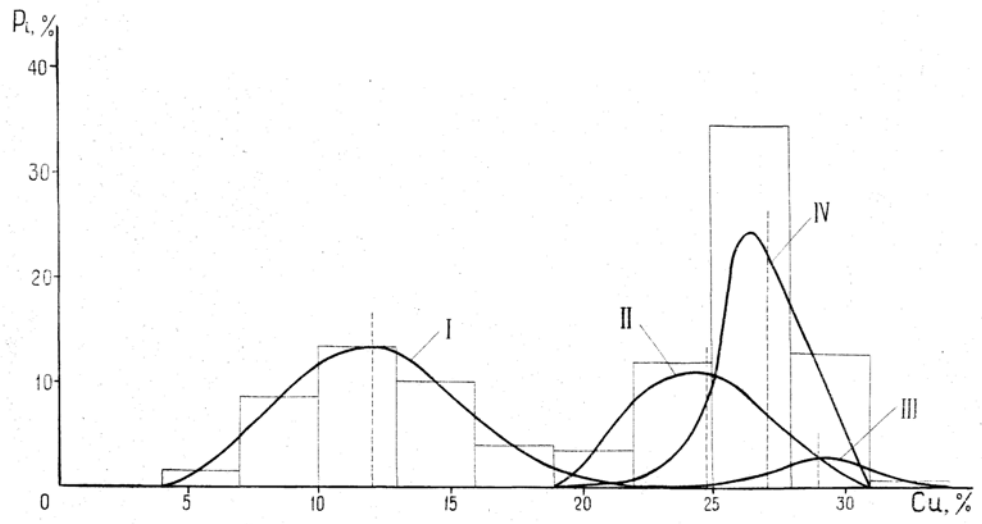
$\overline{D} = 28{,}46$, $\overline{R} = 0{,}533$, $S_{\overline{R}} = 0{,}055$, $t_{\overline{R}} = 9{,}6$, $F = 1{,}40$, $S_{Rh.Ni\ldots Au} = 0{,}59$.

Золото. Для вычисления содержаний золота целесообразно применять уравнения регрессии Au – Pt (23 – 24) и многофакторные модели (25 – 26):

1. $Au = 0{,}02 + 0{,}096Pt$, $r = 0{,}507$; (23)

2. $Au = 0{,}08 + 0{,}059Pt + 0{,}005Pt^2$, $r = 0{,}512$; (24)

4. $Au = 0{,}48 - 0{,}044Cu - 0{,}029Co +$



Распределение содержаний меди в рудах халькопиритового типа: P_i – частость распределения; I – пирротин-кубанитовые руды; II – кубанит-халькопиритовые руды; III – халькопиритовые руды; IV – руды кубического халькопирита

+ 0,105Pt + 0,010Pd + 0,077Rh, (25)

$\overline{D}$ = 38,43, $\overline{R}$ = 0,620, $S_{\overline{R}}$ = 0,048, $t_{\overline{R}}$ = 12,9, F = 1,63, $S_{Au.Cu...Rh}$ = 0,20.

5. Au = 0,52–0,037Co + 0,069Pt+ + 0,130Rh, (26)

$\overline{D}$ = 32,84, $\overline{R}$ = 0,573, $S_{\overline{R}}$ = 0,052, $t_{\overline{R}}$ = 11,0, F = 1,49, $S_{Au.Co\ Pt\ Rh}$ = 0,22.

Приведенные выше уравнения регрессии позволяют определять содержания золота в рудах с достаточной точностью и поэтому вполне пригодны для практических целей.

Таким образом, изучение корреляционных связей золота с компонентами пирротиновых руд дало несколько неожиданные результаты. Имеющийся материал позволяет объяснить только зависимость содержаний Au от содержаний Pt и Pd. Положительная корреляция с Rh и отрицательная с Cu и Co в настоящее время не находит удовлетворительного объяснения.

Халькопиритовая залежь центральной части юго-западного участка Талнахского месторождения образована рудами сложного состава, представляющими собой в целом неоднородную совокупность, которая может быть разделена на 4 статистически однородные совокупности.

Поскольку в основу классификации руд халькопиритового типа положены содержания меди, разделение общей совокупности на однородные составляющие также производится по содержаниям меди, приведенным к 100 % сульфидов (рисунок). Такое приведение к 100 % исключает возможность попадания анализов богатых медью руд в интервалы с низкими ее содержаниями из-за низкого суммарного содержания сульфидов в руде.

В связи с изложенным, изучение корреляционных зависимостей содержаний компонентов правомочно проводить отдельно в каждой разновидности руд халькопиритового типа.

Однако макроскопически из всех разновидностей наиболее отчетливо выделяются руды кубического халькопирита своеобразием химико-минералогического состава, особенностями структур и специфическими физическими свойствами. Поэтому, излагая результаты исследований корреляционных зависимостей содержаний компонентов в однородных статистических совокупностях – разновидностях руд, мы одновременно рассматриваем и корреляционные зависимости в объединенной совокупности, представленной рудами пирротин-ку-банитовыми, кубанит-халькопиритовыми и существенно халькопиритовыми. Во всех случаях уравнения регрессии, составленные по данным объединенной халькопиритовой совокупности, дают более высокую погрешность при определении содержаний компонентов, нежели уравнения для разновидностей руд. Тем не менее, применение этих уравнений в практических целях для предварительной оценки содержаний

Изучены взаимосвязи содержаний всех без исключения компонентов халькопиритовых руд путем построения парных и многофакторных моделей. Ниже мы рассмотрим практически наиболее важные результаты исследования корреляционной взаимосвязи содержаний кобальта и благородных металлов и их зависимости от содержаний рудообразующих компонентов.

Кобальт. Во всех разновидностях руд халькопиритового типа наиболее тесной и устойчивой является корреляция Co – Ni:

1. $\ln Co = 1{,}298 + 0{,}720 \ln Ni$,

$r = 0{,}635$ – пирротин-кубанитовые руды (27)

2. $\ln Co = 1{,}023 + 0{,}616 \ln Ni$,

$r = 0{,}648$ – кубанит-халькопиритовые руды (28)

3. $\ln Co = 0{,}896 + 0{,}603 \ln Ni$,

$r = 0{,}858$ – существенно (29)

халькопиритовые руды

4. $\ln Co = 0{,}837 + 0{,}721 \ln Ni$,

$r = 0{,}597$ – руды кубического халькопирита (30)

Данные уравнения регрессии обеспечивают невысокую погрешность при вычислениях содержаний кобальта (11,3–14,2 отн. %).

Парные уравнения регрессии для объединенной халькопиритовой совокупности (таблица) хорошо отражают общую тенденцию, наблюдаемую в рудах халькопиритового типа, – увеличение содержаний кобальта при возрастании содержаний пирротина и при уменьшении содержаний меди, халькопирита и благородных металлов (кроме родия). Минимальные погрешности в определении содержаний кобальта по содержаниям металлов и минералов составляют 11,5 – 12 отн. %. Наличие столь тесной связи содержаний кобальта с содержаниями компонентов в рудах объединенной совокупности отражает устойчивость и закономерность дифференциации сульфидного расплава на всех этапах его кристаллизации. В этом отношении особенно характерна связь Co – Cu.

При $q = 5$ % $r > 0{,}213$ значимы; при $r > 0{,}552$ уравнения регрессии адекватно представляют результаты наблюдений.

Для контроля результатов вычисления по парным уравнениям регрессии целесообразно использовать многофакторные зависимости, обусловливающие наименьшую погрешность в определении кобальта:

1. Для пирротин-кубанитовых руд:

$$Co = 4{,}97 + 1{,}595Ni - 0{,}034Pd + 1{,}472Rh - 0{,}451Au; \quad (31)$$

Зависимость содержаний кобальта от содержаний некоторых компонентов в объединенной халькопиритовой совокупности

Аргументы	
Металлы	**Минералы**
Co = 1,66 + 1,487Ni r = 0,362; d = 13,10; $S_{Co.Ni}$ = 2,02	Co = 1,66 + 0,509Pnt r = 0,362; d = 13,10; $S_{Co.Pnt}$ = 2,02
Co = 14,66 – 0,309Cu r = -0,836; d = 69,89; $S_{Co.Cu}$ = 1,11	Co = 11,30 – 0,038/Po η = 0,877 (r = 0,791); d = 76,91; $S_{Co.Po}$ = 1,05
Co = 12,05 – 0,848Au – 0,032Au^2 η = 0,805 (r = -0,676); d = 64,80; $S_{Co.Au}$ = 1,29	Co = 7,44 + 0,039/Cp η = 0,877 (r = -0,796); d = 76,91; $S_{Co.Cp}$ = 1,05
Co = 11,89 – 0,192Pt + 0,0016Pt^2 η = 0,732 (r = -0,548); d = 53,58; $S_{Co.Pt}$ = 1,49	Co = 6,24 + 0,073Cub r = 0,612; d = 37,45; $S_{Co.Cub}$ = 1,72
Co = 13,45 – 0,086Pd + 0,00026Pd^2 η = 0,800 (r = -0,622); d = 64,00; $S_{Co.Pd}$ = 1,31	–
Co = 7,12 + 22,674Rh – 28,472Rh^2 η = 0,864 (r = 0,776); d = 74,65; $S_{Co.Rh}$ = 1,10	–
Pnt – пентландит; Po – пирротин; Cp – халькопирит; Cub – кубанит	

$\overline{D}$ = 59,85, $\overline{R}$ = 0,774, $S_{\overline{R}}$ = 0,042, $t_{\overline{R}}$ = 18,4, F = 2,49, $S_{Co.Ni...Au}$ = 1,17.

2. Для кубанит-халькопиритовых руд:

Co = 1,30 + 0,432Ni – 0,205Cu + + 0,277S; (32)

$\overline{D}$ = 57,92, $\overline{R}$ = 0,761, $S_{\overline{R}}$ = 0,046, $t_{\overline{R}}$ = 16,2, F = 2,38, $S_{Co.Ni...S}$ = 1,11.

3. Для существенно халькопиритовых руд:

Co = 2,57 + 0,929Ni – 0,006Pd; (33)

$\overline{D}$ = 60,69, $\overline{R}$ = 0,779, $S_{\overline{R}}$ = 0,077, $t_{\overline{R}}$ = 10,1, F = 2,55, $S_{Co.Ni\ Pd}$ = 0,94.

4. Для руд кубического халькоприта:

Co = 2,01 + 1,245Ni – 0,127Au; (34)

$\overline{D}$ = 35,88, $\overline{R}$ = 0,599, $S_{\overline{R}}$ = 0,087, $t_{\overline{R}}$ = 6,9, F = 1,56, $S_{Co.Ni\ Au}$ = 0,56.

Платина. Во всех разновидностях руд халькопиритового типа платина тесно связана только с палладием и золотом:

1. Пирротин-кубанитовые руды:

Pt = 12,43 – 0,500Pd + 0,011Pd^2,

η = 0,850 (57,4 отн. %); (35)

Pt = 2,12 + 4,210Au,

r = 0,647 (83,1 отн. %). (36)

2. Кубанит-халькопиритовые руды:

Pt = -7,29 + 0,370Pd,

r = 0,876 (29,6 отн. %); (37)

Pt = -6,37 + 5,021Au,

r = 0,798 (37,0 отн. %). (38)

3. Существенно халькопиритовые руды:

lnPt = -2,048 + 1,162lnPd,

r = 0,916 (31,1 отн. %); (39)

lnPt = 1,561 + 1,086lnAu,

r = 0,910 (32,1 отн. %). (40)

4. Руды кубического халькопирита:

Pt = -18,28 + 0,417Pd,

r = 0,696 (41,2 отн. %); (41)

$Pt = -1{,}51 + 3{,}720Au$,

$r = 0{,}654$ (43,3 отн. %). (42)

Эта связь проявляется при анализе частных корреляций в многофакторных моделях и свидетельствует о наличии в рудах устойчивой ассоциации минералов платины, палладия и золота, не приуроченной к каким-либо определенным рудообразующим компонентам. Поэтому нами не получены уравнения регрессии для определения содержаний платины по содержаниям рудообразующих компонентов в каждой однородной совокупности.

Парные модели для объединенной халькопиритовой совокупности, отражающие взаимосвязь компонентов в процессе рудообразования, с вполне приемлемой стандартной ошибкой (51,3 – 53 отн. %) позволяют предварительно оценивать содержания платины по содержаниям меди, кобальта и минералов:

1. $\ln Pt = -2{,}682 + 1{,}909 \ln Cu$, $r = 0{,}809$; (43)
2. $\ln Pt = 8{,}071 - 2{,}458 \ln Co$, $r = -0{,}711$; (44)
3. $\ln Pt = 2{,}729 + 0{,}166 \ln Cp$, $r = 0{,}810$; (45)
4. $\ln Pt = 2{,}480 - 0{,}170 \ln Po$, $r = -0{,}758$. (46)

Для контроля результатов вычисления по парным уравнениям регрессии целесообразно использовать многофакторные зависимости, обусловливающие наименьшую погрешность в определении платины:

1. Для пирротин-кубанитовых руд:

$Pt = 2{,}19 - 0{,}384Cu + 2{,}317Au + 0{,}201Pd$; (47)

$\bar{D} = 76{,}06$, $\bar{R} = 0{,}872$, $S_{\bar{R}} = 0{,}024$, $t_{\bar{R}} = 36{,}3$, $F = 4{,}17$, $S_{Pt.Cu\,Au\,Pd} = 2{,}19$.

2. Для кубанит-халькопиритовых руд:

$Pt = 12{,}02 - 5{,}220Ni + 0{,}415Pd$; (48)

$\bar{D} = 67{,}03$, $\bar{R} = 0{,}819$, $S_{\bar{R}} = 0{,}037$, $t_{\bar{R}} = 22{,}1$, $F = 3{,}03$, $S_{Pt.Ni\,Pd} = 11{,}32$.

3. Для существенно халькопиритовых руд:

$Pt = -7{,}99 + 0{,}217Pd + 3{,}056Au$; (49)

$\bar{D} = 78{,}55$, $\bar{R} = 0{,}886$, $S_{\bar{R}} = 0{,}041$, $t_{\bar{R}} = 21{,}6$, $F = 4{,}64$, $S_{Pt.\,Pd\,Au} = 16{,}90$.

4. Для руд кубического халькоприта:

$Pt = -14{,}61 + 0{,}279Pd + 1{,}514Au$; (50)

$\bar{D} = 54{,}35$, $\bar{R} = 0{,}737$, $S_{\bar{R}} = 0{,}059$, $t_{\bar{R}} = 12{,}5$, $F = 2{,}19$, $S_{Pt.\,Pd\,Au} = 8{,}91$.

Палладий. Для вычисления содержаний палладия в разновидностях руд следует рекомендовать следующие парные и множественные уравнения регрессии:

1. Пирротин-кубанитовые руды:

$Pd = 26{,}58 - 4{,}720Fe + 1{,}200Cu + 1{,}738Ni + 5{,}517S$ (34,8 отн. %); (51)

$\bar{D} = 28{,}64$, $\bar{R} = 0{,}535$, $S_{\bar{R}} = 0{,}076$, $t_{\bar{R}} = 7{,}0$, $F = 1{,}40$, $S_{Pd.\,Fe\ldots S} = 11{,}14$.

2. Кубанит-халькопиритовые руды:

$Pd = 207{,}14 - 101{,}270Ni + 16{,}270Ni^2$, $\eta = 0{,}572$ (35,7 отн. %); (52)

$\ln Pd = 0{,}304 + 1{,}386 \ln Cu$,

$r = 0{,}559$ (36,1 отн. %); (53)

$\ln Pd = 1{,}809 + 1{,}146 \ln Ni + 1{,}381 \ln Cu - 1{,}351 \ln S$ (34,5 отн. %) (54)

$\bar{D} = 49{,}15$, $\bar{R} = 0{,}701$, $S_{\bar{R}} = 0{,}057$, $t_{\bar{R}} = 12{,}3$, $F = 1{,}96$,

$S_{Pd.Ni\ldots S} = 32{,}09$ ($S_{\ln} = 0{,}401$).

3. Существенно халькопиритовые руды:

$\ln Pd = 2{,}467 + 1{,}525 \ln Ni$,

$r = 0{,}818$ (34,8 отн. %). (55)

4. Руды кубического халькопирита:

$Pd = 61{,}56 + 2{,}320Pt - 0{,}021Pt^2$,

$\eta = 0{,}717$ (15,7 отн. %); (56)

$\ln Pd = 3{,}770 + 0{,}445 \ln Au$, $r = 0{,}847$ (11,9 отн. %). (57)

В качестве контрольных необходимо использовать множественные уравнения зависимости содержаний палладия от содержаний в рудах наиболее существенных компонентов, обусловливающие наименьшую погрешность в определении платины:

1. Для пирротин-кубанитовых руд:

Pd = 7,23 + 7,558Ni – 2,362Co + +1,822Pt; (58)

$\overline{D}$ = 63,39, $\overline{R}$ = 0,796, $S_{\overline{R}}$ = 0,036, $t_{\overline{R}}$ = 22,1, F = 2,73, $S_{Pd.Ni...Pt}$ = 7,69.

2. Для кубанит-халькопиритовых руд:

Pd = -28,88 + 12,927Ni + 0,976Pt + +5,415Au; (59)

$\overline{D}$ = 86,16, $\overline{R}$ = 0,928, $S_{\overline{R}}$ = 0,015, $t_{\overline{R}}$ = 61,9, F = 7,22, $S_{Pd.NiAu}$ = 16,77.

3. Для существенно халькопиритовых руд:

Pd = -24,73 + 10,810Co + 1,601Pt + +3,847Au; (60)

$\overline{D}$ = 76,70, $\overline{R}$ = 0,876, $S_{\overline{R}}$ = 0,046, $t_{\overline{R}}$ = 19,0, F =4,28, $S_{Pd.Co...Au}$ = 44,18.

4. Для руд кубического халькоприта:

Pd = 51,31 + 0,652Pt + 0,499Au; (61)

$\overline{D}$ = 66,76, $\overline{R}$ = 0,817, $S_{\overline{R}}$ = 0,043, $t_{\overline{R}}$ = 19,0, F = 3,01, $S_{Pd.Pt\ Au}$ = 13,62.

Высокие содержания палладия можно вычислять по парным уравнениям регрессии для объединенной халькопиритовой совокупности:

1. lnPd = -0,437 + 1,617lnCu,

r = 0,871; (62)

2. lnPd = 8,609 – 2,054lnCo,

r = -0,756; (63)

3. lnPd = 4,140 + 0,137lnCp,

r = 0,849; (64)

4. lnPd = 3,930 – 0,147lnPo,

r = -0,836; (65)

5. Pd = 180,28 – 4,078Cub + 0,031Cub^2, η = 0,652. (66)

Данные уравнения дают погрешность 35,2–54,2 отн. %, при этом наименьшая ошибка достигается при использовании логарифмически линейной зависимости Pd – Cu.

Родий. Для разновидностей руд халькопиритового типа все парные и многофакторные зависимости родия от содержаний различных компонентов не существенны. Поэтому для вычисления содержания родия в рудах рекомендуются уравнения для объединенной совокупности, обеспечивающие получение результатов с достаточно высокой точностью, при этом логарифмические зависимости более тесные, нежели линейные:

1. Rh = 0,61 – 0,024Cu,

r = -0,736 (73,7 отн. %); (67)

2. lnRh = 8,640 – 4,048lnCu,

r = -0,834 (63,2 отн. %); (68)

3. Rh = -0,452 – 0,069Co,

r = 0,776 (68,4 отн. %); (69)

4. lnRh = -16,285 + 6,147lnCo,

r = 0,858 (57,8 отн. %); (70)

5. Rh = 0,30 – 0,005Pt,

r = -0,585 (89,4 отн. %); (71)

6. lnRh = 1,695 – 1,630lnPt,

r = -0,818 (63,2 отн. %); (72)

7. Rh = 0,35 – 0,002Pd,

r = -0,625 (84,2 отн. %); (73)

8. lnRh = 6,191 – 2,166lnPd,

r = -0,838 (57,8 отн. %). (74)

Анализ приведенных выше линейных уравнений регрессии показывает, что родий практически отсутствует в рудах с содержаниями Cu > 25,4 %, Co < 6,5%·10^{-2}, Pt > 60%·10^{-4} и Pd > 175%·10^{-4}. Уравнения не объясняют истинных взаимосвязей родия в рудах, однако хорошо отражают процессы рудообразования, заключающиеся в дифференциа-

ции рудного вещества и в снижении в ходе ее содержаний родия по мере возрастания медистости расплава.

Золото. Для вычисления содержаний золота в разновидностях руд следует рекомендовать следующие уравнения парной регрессии:

1. Пирротин-кубанитовые руды:

Au = -1,55 + 35,451/Co,

η = 0,588 (74,3 отн. %); (75)

Au = 0,74 + 0,099Pt,

r = 0,647 (70,2 отн. %). (76)

2. Кубанит-халькопиритовые руды:

Au = 3,79 + 0,120Pt,

r = 0,770 (29,0 отн. %); (77)

Au = 1,85 + 0,054Pd,

r = 0,855 (23,6 отн. %). (78)

3. Существенно халькопиритовые руды:

lnAu = -0,875 + 0,763lnPt,

r = 0,910 (29,0 отн. %); (79)

lnAu = -2,718 + 0,944lnPd,

r = 0,887 (32,2 отн. %). (80)

4. Руды кубического халькопирита:

Au = 4,01 + 0,115Pt,

r = 0,654 (26,6 отн. %); (81)

Au = -1,73 + 0,084Pd,

r = 0,802 (21,0 отн. %). (82)

Для контроля результатов необходимо использовать многофакторные зависимости содержаний золота от содержаний значимых факторов, обусловливающие наименьшую погрешность в определении золота:

1. Для пирротин-кубанитовых руд:

Au = 1,24 – 0,079Co + 0,143Pt; (83)

$\overline{D}$ = 54,97, $\overline{R}$ = 0,741, $S_{\overline{R}}$ = 0,045, $t_{\overline{R}}$ = 16,6, F = 2,22, $S_{Au.Co\ Pt}$ = 0,63.

2. Для кубанит-халькопиритовых руд:

Параметры уравнения Au = f(Ni, Cu, Pd) не вычислены.

3. Для существенно халькопиритовых руд:

Au = 1,70 + 0,077Pt + 0,016Pd; (84)

$\overline{D}$ = 69,69, $\overline{R}$ = 0,835, $S_{\overline{R}}$ = 0,058, $t_{\overline{R}}$ = 14,4, F = 3,30, $S_{Au.Pt\ Pd}$ = 2,69.

4. Для руд кубического халькоприта:

Au = 3,93 – 0,729Co + 0,082Pd; (85)

$\overline{D}$ = 65,03, $\overline{R}$ = 0,806, $S_{\overline{R}}$ = 0,046, $t_{\overline{R}}$ = 17,5, F = 2,86, $S_{Au.Co\ Pd}$ = 1,49.

Парные модели для объединенной халькопиритовой совокупности позволяют предварительно оценивать содержания золота по содержаниям меди и кобальта:

1. lnAu = -5,330 + 2,325lnCu,

r = 0,879 (39,8 отн. %); (86)

2. lnAu = -7,940 – 3,074lnCo,

r = -0,794 (50,7 отн. %). (87)

Выводы

В результате статистической обработки данных разведки Талнахского месторождения установлены зависимости между компонентами Ni, Cu, Fe, S, S_{Po}, Co, Pt, Pd, Rh, Au в сплошных сульфидных рудах. Установленные зависимости являются объективной основой для геометризации месторождения и управления качеством руд на стадиях проектирования, планирования горных работ, а также оперативного управления добычей для формирования руд с заданными технологическими свойствами. ГИАБ

Коротко об авторе

Гладышев В.В. – аспирант кафедры геологии Московского государственного горного университета.

Рецензент канд. техн. наук, доцент *М.В. Щекина.*