

УДК 622.03

В.В. Руденко, А.Ю. Ведяев, Г. Рафат

МНОГОМЕРНЫЙ МЕТОД КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ КОМПЛЕКСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Предлагается новый многомерный метод квалиметрической оценки месторождений на основе статистической модели геометризации полезных ископаемых. В отличие от известных геостатистических технологий предлагаемый метод позволяет не просто определить среднее значение каждого из показателей (компонентов) в выемочном блоке, но и указать геолого-технологический тип, с которым эта оценка связана. Тем самым обеспечивается управление качеством и полнотой извлечения полезного ископаемого из недр.

Ключевые слова: квалиметрическая оценка месторождений, скважины, полезные ископаемые.

Семинар № 2

**Prof. V. Rudenko, A. Vedyayev
(Moscow State Mining University),
Prof. G. Rafat (DMT, Germany)**

MULTIDIMENSIONAL METHOD OF QUALIMETRICAL ESTIMATION OF COMPLEX MINERAL DEPOSITS

A new multidimensional method of qualimetric estimation of deposits based on a statistical model of geometrization of mineral resources is presented. In contrast to known geostatistical technologies, our method allows not only the estimation of the mean value of each quality feature (component) in the block, but the determination of the geologic-technological type the estimation is connected with. Thus the quality control and the mineral extraction completeness are ensured.

Key words: qualimetric evaluation of deposits, wells, mineral resources.

Развитие рыночных отношений в горнодобывающем производстве приводит к тому, что объектом промышленной оценки запасов становится уже не только геологический блок, но и выемочный участок (микроблок), т.е. небольшая часть месторождения, размеры которой определяются горными, геолого-технологическими и экономическими факторами. При этом нередко

утверждается, что для оценки запасов выемочных участков уже не подходит моделирование геологических показателей с помощью случайных величин, т.е. методами математической статистики, поскольку основные статистические характеристики (среднее и дисперсия) будто бы «принимаются постоянными на всем изучаемом пространстве». Предпочтение в этих условиях отдается представлению геологических показателей в виде пространственных переменных, зависящих от координат и позволяющих с помощью интерполяции (кригинга) оценить значение того или иного показателя в любом заданном блоке.

Следует отметить, что в этом случае месторождение рассматривается как объект геометризации **отдельных** горно-геологических показателей, измеренных в системе пространственных координат. Очевидно, что каждый из показателей будет иметь свое пространственное размещение, т.е. свою геометрию. Однако управление качеством и полнотой извлечения полезного ископаемого из недр предполагает установление единой пространственно-

качественной структуры месторождения, характеризующейся участками стабильного поведения всего **комплекса** показателей (природными типами руд) и зонами нарушения этой стабильности (границами типов и сортов руд). На этой основе выделяются и картируются геолого-технологические типы, которые обрабатываются отдельно и перерабатываются по индивидуальным технологическим схемам.

Следовательно, чтобы оценка оказалась эффективной, необходимо не просто определить среднее значение каждого из компонентов в заданном блоке, но и указать геолого-технологический тип, с которым эта оценка связана, причем еще до отработки блока, т.е. в массиве. Иначе говоря, необходимо позиционировать оцениваемый блок по отношению к скрытой пространственной **многомерной** структуре месторождения.

Данная задача может быть решена с помощью статистических методов **разграничения** геологического пространства по комплексу признаков. Моделью

наблюдения в данном случае является многомерная случайная величина, которая, не будучи функцией пространственных координат, позволяет использовать для квалиметрической оценки информацию по всему месторождению (при кригинге в оценке участвуют только ближайшие к блоку наблюдения). И это вовсе не означает, что статистические характеристики случайной величины, и, следовательно, однородных совокупностей наблюдений, предполагаются постоянными на всем изучаемом пространстве (месторождении). Достаточно, чтобы они были таковыми лишь в пределах **локальных однородных** подпространств (участков, слоев, столбов), соответствующих типам и сортам руд. При этом статистическим аналогом упоминавшейся выше геостатистической интерполяции является **прослеживание** однородных совокупностей наблюдений над комплексом изучаемых показателей в пределы оцениваемого блока. Соответственно, предлагаемый метод геометризации и оценки месторождений включает в себя следующие

Таблица 1
Данные опробования и разграничения разведочной скважины

Номер пробы	Значения содержаний			Сравнение интервалов по критерию Родинона $t > 3,0$			
	Fe	Cu	Zn	Fe	Cu	Zn	Комплекс
1	16	5	1	- 0.4321	- 0.4041	0.5566	- 0.1614
2	15	6	1	0.0346	1.0165	2.0147	1.7700
3	17	6	2	0.2553	2.8579	2.0019	2.9532
4	13	4	2	1.2374	1.9506	2.2147	3.1193
5	17	3	3	1.6019	0.4861	1.3163	1.9655
6	20	2	2	1.4682	- 0.6285	1.7510	1.4957
7	17	4	2	2.0091	- 0.6645	2.3035	2.1062
8	16	4	3	2.9421	- 0.6882	1.7391	2.3054
9	26	3	3	1.7786	- 0.6285	1.3051	1.4175
10	37	5	3	- 0.4278	- 0.7071	0.9651	- 0.0980
11	31	4	4	- 0.6682	- 0.7011	- 0.1112	- 0.8548
12	27	6	1	- 0.1484	- 0.2357	1.7092	0.7651
13	18	3	5	- 0.2475	- 0.6663	- 0.4550	- 0.7903
14	13	3	2	- 0.7065	- 0.4041	0.4491	- 0.3819
15	20	5	4	-	-	-	-

Таблица 2

**Результаты опробования и разграничения
(показаны заливкой) скважины № 14**

Проба	Cu	Zn	Pb	Fe	Ba	Ag	Au
14/30	1,52	1,77	0,77	28,2	1,58	46,0	1,7
14/29	3,78	4,41	1,21	34,0	4,7	85,0	1,6
14/28	2,13	3,01	0,91	33,9	4,0	70,0	1,2
14/27	9,06	1,21	0,98	31,3	2,958	80,0	0,8
14/26	9,8	1,2	0,58	32,1	1,44	37,0	1,1
14/25	7,43	2,23	1,4	36,2	3,621	66,0	0,6
14/24	7,1	2,71	1,84	36,9	2,721	77,0	0,8
14/23	8,1	2,36	0,56	33,8	2,746	53,0	0,7
14/22	9,48	1,26	0,41	36,4	1,92	49,0	1,2
14/21	4,69	0,36	0,019	40,9	0,36	22,0	0,4
14/20	4,99	0,34	0,062	43,1	0,13	22,0	0,4
14/19	4,76	0,569	0,048	49,7	0,37	33,0	0,9
14/18	7,36	0,979	0,048	45,6	0,17	36,0	0,5
14/17	7,04	1,158	0,043	42,7	0,026	41,0	0,7
14/16	8,92	0,568	0,053	46,6	0,036	60,0	0,8
14/15	8,9	0,476	0,054	49,4	0,027	54,0	0,5
14/14	10,0	0,397	0,057	50,5	0,4215	61,0	0,5
14/13	9,06	0,164	0,052	51,0	0,317	56,0	0,6
14/12	9,94	0,169	0,05	47,9	0,3115	62,0	0,4
14/11	9,15	0,225	0,052	48,9	0,215	69,0	0,5
14/10	14,6	0,575	0,039	44,4	0,216	69,0	0,6
14/9	15,5	0,182	0,035	41,2	0,17	43,0	0,3
14/8	9,68	0,37	0,039	44,3	0,131	54,0	0,4
14/7	11,5	0,068	0,041	46,8	0,03	70,0	0,5
14/6	5,9	0,031	0,008	16,9	0,011	9,0	0,075
14/5	4,94	0,025	0,008	5,99	0,025	13,0	0,05
14/4	0,15	0,014	0,008	7,83	0,047	2,0	0,05
14/3	0,067	0,0041	0,002	4,43	0,016	1,0	0,05
14/2	0,076	0,0031	0,002	4,23	0,021	3,0	0,05
14/1	4,34	0,018	0,006	7,78	0,12	4,0	0,05

процедуры: 1) разграничение месторождения на однородные подпространства по всему комплексу показателей; 2) прослеживание однородных подпространств в пределы того или иного заданного блока и 3) подсчет запасов по всем компонентам как внутри отдельных блоков, так и по месторождению в целом.

Проиллюстрируем многомерный подход на следующем простом примере. Пусть на полиметаллическом месторождении пройдена буровая скважина,

в которой отобрано 15 метровых керновых проб, проанализированных на содержание Fe, Cu и Zn. Полученные результаты приведены в табл. 1. Там же показаны результаты поиска границ между однородными интервалами, т.е. природными типами руд, причем сначала отдельно по каждому компоненту, а затем сразу по всему комплексу из трех компонентов. Для нахождения границы использовался критерий Родионова τ (R^2) в условиях линейно упорядоченной последовательности наблюдений, когда про-

Таблица 3

Статистические характеристики однородных интервалов (типов руд) скв. № 14

Интервал	Тип руд	Компонент	Среднее	Дисперсия	Вариация %
14/22 – 14/30	Полиметаллический	Cu	6.488889	10.175433	49.159344
		Zn	2.240000	1.107625	46.983814
		Pb	0.962222	0.209545	47.573250
		Fe	33.644447	7.807559	8.305089
		Ba	2.854000	1.230541	38.868160
		Ag	62.555557	285.777527	27.023907
		Au	1.077778	0.151944	36.167046
14/7 – 14/21	Медно-цинковый	Cu	9.072666	10.095322	35.020725
		Zn	0.440000	0.091609	68.788719
		Pb	0.046133	0.000112	22.938124
		Fe	46.200008	11.205056	7.245443
		Ba	0.195400	0.018379	69.380775
		Ag	50.133335	266.980774	32.592178
		Au	0.533333	0.026667	30.618597
14/1 – 14/6	Серно-колчеданный	Cu	2.578833	7.635935	107.153862
		Zn	0.015867	0.000124	70.290108
		Pb	0.005667	0.000009	51.951523
		Fe	7.860000	22.033514	59.719933
		Ba	0.040000	0.001690	102.786163
		Ag	5.333333	21.866665	87.678383
		Au	0.054167	0.000104	18.842293

Таблица 4

Треугольная матрица сравнения выделенных типов руд скв. № 14

	Полиметаллический	Медно-цинковый	Серно-колчеданный
Полиметаллический		21,2516	16,4963
Медно-цинковый			21,3572
Серно-колчеданный			

веряемая граница последовательно пробегает все возможные положения от 1 до $n-1$ (в нашем случае от 1-й до 14-й пробы) без перестановки наблюдений. Если величина критерия превосходит 3,0, то различия между сравниваемыми совокупностями проб считаются статистически значимыми и между соответствующими интервалами проводится граница.

Как видим, ни по одному из отдельно взятых компонентов граница не

фиксируется (нулевая гипотеза не отклоняется), поскольку максимальные значения критерия (выделены жирным шрифтом) не превышают 3,0. А вот по всему комплексу из трех компонентов граница четко устанавливается (соответствующее значение критерия выделено заливкой), т.е. рассматриваемый разрез скважины разграничивается на два однородных интервала: с 1-й по 4-ю и с 5-й по 15-ю пробы.

Таблица 5

Статистические характеристики однородных интервалов (типов руд) скв. № 18

Интервал	Тип руд	Компонент	Среднее	Дисперсия	Вариация %
18/17 – 18/22	Полиметаллический	Cu	3.351667	1.923815	41.382896
		Zn	5.844999	15.266674	66.847900
		Pb	2.145000	0.804469	41.814545
		Fe	38.516666	18.661644	11.215696
		Ba	2.841666	5.514418	82.637413
		Ag	82.500000	515.900024	27.531433
		Au	1.483333	0.297667	36.781258
18/4 – 18/16	Медно-цинковый	Cu	9.656923	41.569550	66.765007
		Zn	1.788615	20.517729	253.248962
		Pb	0.055308	0.004313	118.740532
		Fe	32.753841	109.926300	32.010212
		Ba	0.427462	0.158658	93.182373
		Ag	38.615383	407.923187	52.303272
		Au	0.442308	0.185353	97.336357
18/1 – 18/3	Серно-колчеданный	Cu	0.078333	0.011108	134.548187
		Zn	0.019400	0.000156	64.315346
		Pb	0.007000	0.000001	14.285661
		Fe	5.860000	5.792397	41.070648
		Ba	0.016000	0.000127	70.433891
		Ag	1.333333	0.333333	43.301258
		Au	0.050000	0.000000	0.000000

Таблица 6

Треугольная матрица сравнения выделенных типов руд скв. № 18

	Полиметаллический	Медно-цинковый	Серно-колчеданный
Полиметаллический		11.7252	8.2745
Медно-цинковый			5.1044
Серно-колчеданный			

Таблица 7

Треугольная матрица сравнения типов руд скв. № 14 и № 18

	Полимет. (14)	Полимет. (18)	Медно-цинков.	Серно-колчед.
Полимет. (14)		3.3704	19.9877	21.9623
Полимет. (18)			23.2182	16.3800
Медно-цинков.				20.6431
Серно-колчед.				

Характерно, что полученная граница не совпадает ни с одним из максимумов по отдельным компонентам, а те, в свою очередь, не совпадают между со-

бой (каждый имеет «свою геометрию»). Это означает, что даже в простых случаях поиск границ не может быть выполнен с помощью известных

Таблица 8

Статистические характеристики однородных интервалов (типов руд) скв. № 11

Интервал	Тип руд	Компонент	Среднее	Дисперсия	Вариация %
11/20 – 11/25	Полиметаллический	Cu	4.328333	0.586416	17.692211
		Zn	4.161667	0.604293	18.679127
		Pb	0.961667	0.315057	58.367336
		Fe	34.450001	5.746898	6.958690
		Ba	1.884333	0.708538	44.670818
		Ag	62.000000	44.000000	10.698790
		Au	1.166667	0.066667	22.131351
11/9 – 11/19	Медно-цинковый	Cu	11.245455	2.366719	13.680323
		Zn	0.622909	0.127074	57.227356
		Pb	0.079455	0.005112	89.988747
		Fe	42.709087	10.091304	7.437952
		Ba	0.399000	0.950358	244.326630
		Ag	41.454544	35.272854	14.326766
		Au	0.675455	0.083987	42.905266
11/1 – 11/8	Серно-колчеданный	Cu	1.006875	0.920357	95.280174
		Zn	0.016425	0.000080	54.569603
		Pb	0.007500	0.000052	95.883537
		Fe	12.076250	31.188232	46.244839
		Ba	0.100625	0.005470	73.499954
		Ag	3.687500	4.138393	55.167568
		Au	0.118750	0.007098	70.948112

Таблица 9

Треугольная матрица сравнения выделенных типов руд скв. № 11

	Полиметаллический	Медно-цинковый	Серно-колчеданный
Полиметаллический		18.2117	18.7355
Медно-цинковый			19.1413
Серно-колчеданный			

Таблица 10

Треугольная матрица значений критерия после агрегирования трех скважин

	Полиметаллический	Медно-цинковый	Серно-колчеданный
Полиметаллический		40.8569	44.4156
Медно-цинковый			37.4257
Серно-колчеданный			

графических приемов и требует применения специально разработанного математического аппарата, в основе которого лежат принципы многомерной статистики и теории исследования опе-

раций. К тому же объем вычислений в реальных задачах столь велик, что может быть выполнен только при помощи компьютера и специального программного обеспечения

Таблица 11

Статистические характеристики типов руд после агрегирования скважин

Интервалы	Тип руд	Компонент	Среднее	Дисперсия	Вариация %
14/22 – 14/30; 18/17 – 18/22; 11/20 – 11/25	Полиметаллический	Cu	4.975238	6.645086	51.812729
		Zn	3.819047	6.799379	68.277809
		Pb	0.976190	0.171095	42.372478
		Fe	35.266670	13.778097	10.525195
		Ba	2.573428	2.247421	58.254585
		Ag	68.095238	341.490540	27.137674
		Au	1.219048	0.182619	35.055164
14/7 – 14/21; 18/4 – 18/16; 11/9 – 11/19	Медно-цинковый	Cu	9.880256	18.283422	43.277340
		Zn	0.941128	6.920629	279.527130
		Pb	0.058590	0.002940	92.537148
		Fe	40.733337	76.205956	21.431099
		Ba	0.330179	0.318747	170.990982
		Ag	43.846153	263.081024	36.992462
		Au	0.543077	0.099043	57.949623
14/1 – 14/6; 18/1 – 18/3; 11/1 – 11/8	Серно-колчеданный	Cu	1.397824	3.716186	137.910187
		Zn	0.016753	0.000095	58.222118
		Pb	0.006765	0.000026	75.653412
		Fe	9.491177	28.065720	55.817200
		Ba	0.064294	0.004256	101.466240
		Ag	3.852941	10.711396	84.943596
		Au	0.083824	0.004292	78.158852

Покажем это на следующем примере из геологоразведочной практики. В табл. 2 приведены данные опробования и результаты линейного разграничения подземной скважины (условно № 14), пройденной снизу вверх вкрест простирания одного из линзообразных рудных тел Орловского колчеданно-полиметаллического месторождения.

Как видим, границы достаточно четкие и никаких проблем с разграничением этой скважины не возникает. То же самое касается и соседней скважины № 18 (для краткости приводятся только характеристики типов и результаты их сравнения между собой).

Предположим, что требуется оценить линейный блок, ограниченный на разрезе скважинами № 14 и № 18. Результаты сопоставления этих скважин

приводятся в табл. 7. При этом оказывается, что интервалы, соответствующие серно-колчеданному типу руд, уверенно объединяются (прослеживаются) в один тип. То же самое касается и медно-цинковых руд. Однако полиметаллические руды скважин обнаруживают значимые различия. Следовательно, общее число типов в блоке возрастает до четырех.

Рассмотрим теперь еще одну скважину № 11, расположенную на некотором удалении от двух предыдущих:

Теперь выполняется процедура агрегирования всех трех скважин. После ее завершения треугольная матрица значений критерия примет следующий вид:

Это ключевой момент. Мы видим, что полиметаллические руды, обнару-

Таблица 12

Статистические характеристики выделенных типов минерализации

Тип	Pt	Pd	Mn	Ni	Co	Cr
(1)	0,45	0,31	1290.69	902.35	71.12	1996.08
(2)	0.04	0.05	1287.63	1861.86	88.91	5569.59
(3)	0.07	0.06	900.00	475.00	47.06	1129.91
(4)	0.09	0.05	1200.00	548.85	76.08	1278.31
(5)	0.00	0.01	829.82	241.23	48.42	527.89

Ti	Cu	Zn	Sc	V	Pb	P
417.65	778.60	75.69	26.57	90.78	4.72	251.47
327.84	243.61	65.26	11.19	59.38	4.55	265.46
416.98	212.83	57.55	25.24	78.40	3.75	262.26
860.38	796.38	76.77	28.85	129.69	4.87	290.38
403.51	302.81	72.28	27.28	166.67	8.32	380.70

жившие по данным скважин № 14 и № 18 хотя и небольшие, но значимые различия, с учетом скважины № 11 вновь объединились в единый тип, т.е. произошло их **прослеживание внутрь** оцениваемого блока. Данная операция, по смыслу аналогичная **кригингу**, поскольку скважина № 11 лежит **вне** оцениваемого блока, приводит к уточнению (**сглаживанию**) соответствующих характеристик:

Предположим теперь, что нам необходимо вычислить оценки истинных средних содержаний Cu и Zn в рассматриваемом блоке (оценка объемного блока выполняется аналогично). Поскольку длины однородных интервалов известны (исходя из длины пробы 1 м), то соотношение площадей, занимаемых в пределах блока соответствующими типами руд, составит (снизу вверх) 0,17 : 0,54 : 0,29. Тогда оценка содержания по каждому компоненту будет равна средне-взвешенному по данным табл. 11:

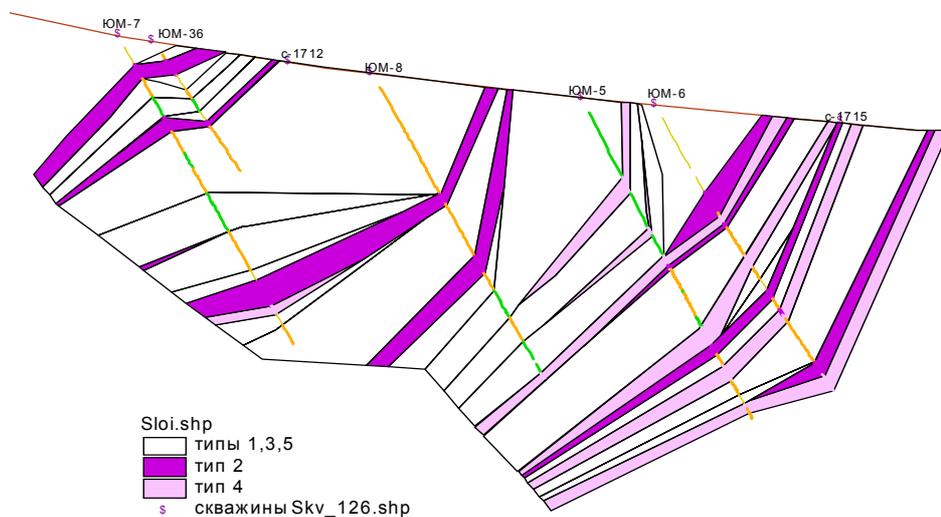
$$X_{Cu} = 0.17 \times 1.3978 + 0.54 \times 9.8803 + 0.29 \times 4.9752 = 7.0158$$

$$X_{Zn} = 0.17 \times 0.0168 + 0.54 \times 0.9411 + 0.29 \times 3.8190 = 1.6186$$

Для сравнения вычислим обычные средние содержания внутри блока (без дифференциации по типам руд). Они составят соответственно 6.8432 и 1.6391.

Таким образом, даже на примере всего трех скважин, включающих несколько десятков проб, проявляется разница обычных и дифференцированных оценок. В частности, данный блок оказывается более богатым по Cu, чем это можно было бы предположить традиционными способами. Подчеркнем, что в условиях реальных геологоразведочных задач данные по месторождению включают десятки тысяч наблюдений над комплексами из десятков компонентов и показателей. Поэтому процесс многомерной статистической геометрии, рассмотренный выше только схематически, в действительности настолько сложен и включает в себя перебор такого огромного числа вариантов, что результат прослеживания типов руд и других геологических тел может быть самым непредсказуемым. Получаемая в итоге многомерная модель месторождения не только позволяет оценить запасы для любого заданного блока, но и дает реальные границы типов и сортов руд в массиве, обеспечивая возможность управления качеством и полнотой извлечения полезных компонентов.

Продемонстрируем данный метод на примере прослеживания и оценки платиноносной медно-никелевой минерализации в пределах расслоенного ба-



Стратификация и прослеживание различных типов минерализации в пределах расслоенного базит-ультрабазитового Мончетундровского массива

зит-ультрабазитового Мончетундровского массива (данные любезно предоставлены В.В. Шолохневым).

Исходные данные представляют собой результаты опробования 5 скважин с определением в них содержания 13 элементов (Pt, Pd, P, Ti, V, Pb, Zn, Mn, Cr, Ni, Co, Cu, Sc). Общее количество проб по всем скважинам равняется 798.

С помощью разработанного авторами

комплекса программ для обычного персонального компьютера была выполнена многомерная геометризация рудных тел. В результате разграничения и прослеживания установлено 5 типов однородных слоёв, распределение которых в структуре месторождения показано на рис. 1. В табл. 12 приводятся статистические характеристики соответствующих однородных групп наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В.Н., Бадамсурэн Х., Буянов М.И., Руденко В.В. Квалиметрия недр. – М.: Изд-во Академии Горных наук, 2000. – 303 с.
2. Авдонин В.В., Ручкин Г.В., Шатагин Н.Н., Лыгина Т.И., Мельников М.Е. Поиски и разведка месторождений полезных иско-

паемых. – М.: Академический Проект; Фонд «Мир», 2007 – 540 с.

3. Родионов Д.А. Статистические решения в геологии. – М.: Недра, 1981, 231 с.

ГИАБ

Коротко об авторах

Руденко В.В. – профессор, доктор технических наук,

Ведяев А.Ю. – аспирант,

Московский государственный горный университет, ud@msmu.ru

Рафат Г. – профессор, DMT, Германия.