РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

2020

УДК 622.121

ВЫБОР МЕТОДА ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ МЕДНОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МОУНЪЮА В МЬЯНМЕ

А. Д. Мванги^{1,2}, Ж. Джианхуа¹, М. М. Инноцент¹, Х. Ганг¹

¹Уханьский технологический университет, E-mail: huanggang2016@whut.edu.cn, г. Ухань, Хубэй, 430070, Китай ²Университет сельского хозяйства и технологий им. Джомо Кеньятта, г. Найроби, 62000-00200, Кения

Проведено сравнение методов индикаторного и ординарного кригингов и метода обратных взвешенных расстояний (*IDW*-метод) на примере месторождений Моунъюа *K* и *L*. Коэффициенты корреляции анализа состава породы в наклонной скважине методом статистической регрессии с ординарным кригингом месторождений *K* и *L* составляют 0.982 и 0.985 соответственно. Показано, что ординарный кригинг — лучший метод оценки для данных месторождений.

Индикаторный кригинг, ординарный кригинг, метод обратных взвешенных расстояний (IDW-метод), оценка запасов

DOI: 10.15372/FTPRPI20200110

Оценка минеральных запасов включает описание геологических зон и их минерального состава, анализ данных и использование подходящего метода интерполяции содержания металла в руде [1, 2]. Оценка минеральных запасов выполняется для прогнозирования содержания металла в рудном блоке, а также для определения геологических характеристик месторождения. Такая оценка является ключевым фактором горной деятельности, поскольку помогает принимать решения о целесообразности применения тех или иных операций по добычи. Согласно [3], оценка запасов — входной параметр для экономического анализа месторождения. Это означает, что если при оценке допущены ошибки, то они повлияют на капитальные и эксплуатационные затраты, выбор ставок дисконта и цену конечной продукции.

Для различных месторождений можно применять разные методы оценки запасов. Широкое распространение получил метод ординарного кригинга (ОК) [4-6]. Еще один метод оценки — индикаторный кригинг позволяет проанализировать крайне несимметричные и сложные распределения данных [7]. Как указано в [8], индикаторный кригинг является простым применением ординарного кригинга для оценки переменной, преобразованной в индикаторную переменную. Данная переменная преобразуется в единицу или ноль в зависимости от ее отношения к заданному минимальному содержанию руды [9], которое делает методику устойчивой по отношению к промахам [10]. Метод обратных взвешенных расстояний

Nº 1

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы открытых исследований CRSRI (Программа SN: CKWV2018471/KY) и Национального фонда естественных наук Китая (проект № 51804235 и № 41672320).

(*IDW*-метод) представляет собой надежный метод оценки запасов [11, 12]. В нем применяется весовой коэффициент, в основе которого лежит экспоненциальная функция расстояния для каждого образца с определенной окрестностью поиска вокруг центральной точки рудной залежи. Для выбора метода оценки запасов рассматриваются различные факторы: характер исходных данных, простота применения, а также точность и устойчивость [7].

Экономическая модель месторождений построена на основе геологического анализа, в который входит оценка тоннажа и содержания полезного ископаемого в породе. Рассмотрены три различных метода оценки запасов указанных месторождений — ординарный кригинг, индикаторный кригинг и *IDW*-метод. Проанализированы результаты оценки, проведено их сравнение на месторождениях и выбран наилучший метод.

ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Меднорудные месторождения Моуньюа находятся на юге региона Сагаин в северозападной части Республики Союз Мьянма, примерно в 10 км от г. Моуньюа. Географические координаты месторождений: $22^{\circ}07'$ с.ш. $95^{\circ}02'$ в.д., общая площадь горного отвода составляет 55.8 км². Данная область включает три меднорудных месторождения: рудник *K*, рудник S&S Юг, рудник *L*. Месторождение *K* граничит с месторождением S&S Юг и имеет площадь около 2.8 км². Месторождение *L* расположено в 7 км южнее месторождения S&S и занимает площадь около 6 км². Меднорудные месторождения зоны Моуньюа характеризуются содержанием Cu \geq 0.15%. Пласты медной руды в основном горизонтальные, мощные, листообразные, эллиптической формы. На рис. 1 представлена карта данной области.



Рис. 1. Область добычи Моунъюа

СБОР И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Оценка запасов начинается со сбора и анализа данных, а заканчивается составлением заключения по запасам. Перечень этапов оценки запасов приведен на рис. 2. Необходимые данные для работы представляют собой информацию по скважинам разведочного бурения. Данные преобразованы в формат *CSV* ПО Gemcom Surpac. Информация по скважине включает тип породы, литологию и размеры сетки скважин для месторождений K и L. На месторождении K отобрано 20 672 образца из 236 скважин, на месторождении L - 34 477 образцов из 265 скважин.



Рис. 2. Перечень этапов процесса оценки запасов в общем виде

Проверка достоверности данных выполнялась для исключения ошибок и несоответствий до проведения анализа. Проверялись недостающие координаты, недостающие пробы, литологическая оценка, двойные записи, перекрытие интервалов, максимальные длины скважин и ошибки по высоте устья скважин.

Для повышения эффективности статистического анализа данные по пробам корректировались по структуре и составу через 1 м длины для каждого месторождения. Для месторождений K и L получено общее количество образцов, которое составило 51 610 и 68 952 соответственно. Образцы использовались для оцифровки областей минерализации в направлении на восток для обоих месторождений. Минимальное содержание меди в этих областях составило 0.15 % для обоих месторождений. Некоторые образцы с содержанием меди менее 0.15 %, но расположенные между участками с более высоким содержанием меди, также добавлены в модель. На рис. 3 представлен поперечный разрез оцифрованной секции в направлении на восток по разведочной линии (р. л.) 67 800 месторождения K.



Рис. 3. Поперечный разрез оцифрованной секции в направлении на восток по р. л. 67 800 месторождения *К*

В процессе цифрового моделирования каждая рудная зона обозначена определенным цветом для различия областей друг от друга. Для построения 3*D*-модели сегменты, созданные в каждой секции, добавлены к соответствующим сегментам в другой граничной секции. Для месторождения *K* моделируемый массив расположен от р. л. 67200 до р. л. 68800 (восток), а для месторождения L — от р. л. 61160 до р. л. 62760 (восток). Далее массивы проверялись, чтобы формирующие массив треугольники не пересекались между собой.

Модели массива горных пород использовались при выборе образцов для оценки запасов. Образцы, находящиеся внутри массива, классифицированы как руда, а образцы, находящиеся вне контура массива, — как пустая порода. Для статистического анализа рассматривались только образцы, находящиеся внутри массива. Таким образом исследовано 27951 и 53869 образцов из скважин месторождений *K* и *L* соответственно.

Статистический анализ является обычной операцией при оценке запасов. Его цель — определить содержание металла в руде и создать статистику образцов. Статистика 1 м композитных образцов в каждом карьере приведена в табл. 1. На основе анализа кумулятивных кривых распределения и вероятностных диаграмм наибольшие содержания металла 8.312 и 7.62% использованы для того, чтобы отсеять выпадающие значения в месторождениях *K* и *L* соответственно.

Месторождение	Значение, %			CKO	Коэффициент
	минимальное	максимальное	среднее	СКО	вариации
1 м композитных образцов					
Κ	0.001	24.150	0.406	0.747	1.840
L	0.001	25.300	0.469	0.786	1.676
После удаления выпадающих значений (промахов)					
Κ	0.001	8.312	0.403	0.673	1.670
L	0.001	7.762	0.465	0.717	1.542

ТАБЛИЦА 1. Статистическое описание содержания металла в руде

Перегиб кривой на вероятностной диаграмме означает изменение совокупности от одной к другой [13]. На вероятностной диаграмме месторождения K присутствует перегиб на вероятности 0.92, чей антилогарифм составляет 8.312 %, а на диаграмме месторождения L присутствует перегиб на вероятности 0.89, чей антилогарифм составляет 7.762 %. На рис. 4 представлены кумулятивная кривая распределения и вероятностная диаграмма для месторождения K, на которых показаны перегибы. Статистика данных после удаления выпадающих значений отражена в табл. 1.





ВАРИОГРАФИЯ

Вариография выполнена для определения пространственной изменчивости распределения медной руды на месторождениях K и L. Она позволяет понять, как изменяется содержание металла в руде в зависимости от расстояния и направления [14]. Для определения остаточной вариации месторождений K и L построены всенаправленные вариограммы на основе используемого массива данных (рис. 5). Диаграмма установлена при угловом расхождении 90° при отсутствии конкретной ориентации поиска. Таким образом вариограмма позволяет определить остаточную вариацию по всем направлениям. Параметры всенаправленных диаграмм обоих месторождений представлены в табл. 2.



Рис. 5. Всенаправленная вариограмма распределения руды для месторождений К (а) и L (б)

Месторождение	В		
	остаточная	пространственная	Степень влияния
K	0.579	0.393	38.355
L	0.654	0.381	39.472

ТАБЛИЦА 2. Параметры всенаправленных диаграмм

Далее проведено построение первичной и вторичной карт вариограмм для определения анизотропии пространственного распределения металла в месторождении. Карты вариограмм обоих месторождений показывают варьирующую степень пространственного распределения металла в руде с минимальным изменением по расстоянию и направлению. Установлено, что оба месторождения характеризуются анизотропным пространственным распределением. Анизотропные отношения между длинами главной оси и большой полуоси для месторождения *К* составило 1.092, для месторождения *L* — 1.026, между длинами главной и малой осями соответственно 1.173 и 1.740.

Для построения моделей рудных блоков на обоих месторождениях использовано ПО Gemcom Surpac. Модели блоков необходимы для оценки запасов месторождений. Размеры моделей блоков $20 \times 20 \times 10$ м установлены на север, восток и по отметке высоты соответственно. Данные размеры выбраны исходя из геомеханических условий месторождений. В каждой модели учтены свойства, используемые для оценки массива: содержание металла в руде, удельная плотность и тип породы. Модели блоков ограничены моделями массивов, построенных для месторождений K и L.

ОРДИНАРНЫЙ КРИГИНГ

Ординарный кригинг — один из наиболее применяемых методов оценки запасов на рудниках [4]. Он является линейным, так как использует линейные методы оценки предложенных данных, и несмещенным, поскольку сокращает число ошибок до нуля [4].

Для месторождений *K* и *L* оценка ординарным кригингом ограничена контуром моделей массива. Оцениваемые блоки проверены путем их наложения на значения проб из скважин с помощью цветового кодирования [15]. На рис. 6 представлена проверка секции по р. л. 68200 (восток) месторождения *K*. Проведен анализ и сравнение результатов ординарного крикинга с другими методами оценки.



Рис. 6. Проверка ординарного кригинга наложением модели блока со значениями проб из скважин секции по р. л. 68200 (восток) месторождения *К*

ИНДИКАТОРНЫЙ КРИГИНГ

Начальным этапом при использовании индикаторного кригинга является преобразование переменных в показатели [8]. Это достигается путем установки порогового значения, которое проводит границу между нулями и единицами. Индикаторный крикинг — бинарное кодирование данных в нули и единицы в соответствии с их причастностью к заданному значению минимального содержания металла в руде Z_k [16].

Для заданного значения Z(x):

$$i(x, Z_k) = \begin{cases} 1, & \text{if } Z(x) \le Z_k, \\ 0, & \text{if } Z(x) > Z_k. \end{cases}$$

Для месторождений K и L минимальное содержание металла в руде составляет 0.15%. Значения данных, которые меньше или равны минимальному содержанию, обозначаются единицей, которые больше минимального содержания — нулем. После преобразования строятся индикаторные полувариограммы и заполняются вариограммные модели. На рис. 7 представлены полувариограммы распределения запасов руды на месторождениях K и L. Затем проводится оценка месторождений индикаторным кригингом. На рис. 8 приведена проверка секции по р. л. 61360 (восток) месторождения L. Выполняется анализ и сравнение результатов с другими методами оценки.



Рис. 7. Полуиндикаторная вариограмма месторождений K (a) и L (δ) при минимальном содержании 0.15 % металла в руде вдоль большой полуоси



Рис. 8. Проверка индикаторного кригинга наложением модели блока со значениями проб из скважин секции по р. л. 61360 (восток) месторождения *L*

МЕТОД ОБРАТНЫХ ВЗВЕШЕННЫХ РАССТОЯНИЙ (IDW)

IDW-метод использует весовой коэффициент, в основе которого лежит экспоненциальная функция расстояния для каждого образца с определенной окрестностью поиска вокруг центральной точки рудной залежи. Весовым коэффициентом является обратное расстояние между центром рудной залежи (блока) и каждым образцом.

С помощью метода перекрестной проверки для месторождений K и L испытаны различные индексы (1-4). Образцы с различными индексами, полученные по разведочным скважинам из месторождений K и L, представлены в табл. 3. На рис. 9 приведены графики рассеяния содержания металла в руде, которые сравнивают индексы с данными по скважинам месторождений K и L.

Данные по скважинам (фактические)



ТАБЛИЦА 3. Образцы для *IDW*-метода по направлению скважин на месторождениях *K* и *L*



РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно рис. 9, оценка *IDW*-методом наиболее близка к данным по скважинам, так как коэффициент корреляции *r* составляет 0.979 для месторождения *K* и 0.961 для месторождения *L*. Далее результаты *IDW*-метода сравнивались с таковыми ординарного (ОК) и индикаторного (ИК) кригингов для месторождений *K* и *L* (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Результаты оценки запасов методами индикаторного, ординарного кригингов и *IDW* для месторождений *K* и *L*

Направление на восток	Ланные по скважинам	ИК	ОК	ID^2W	
$K \text{ or } \mathbf{p} \neq 67500 \text{ go } \mathbf{p} \neq 68500 \text{ (poctor)}$					
67500 67600	0 482	0.518	0.510	0.515	
07300 - 07000	0.482	0.316	0.310	0.515	
6/600-6//00	0.495	0.478	0.494	0.501	
67700 - 67800	0.486	0.489	0.467	0.477	
67800 - 67900	0.470	0.444	0.466	0.471	
67900 - 68000	0.448	0.438	0.443	0.446	
68000-68100	0.398	0.405	0.404	0.410	
68100-68200	0.442	0.385	0.450	0.455	
68200-68300	0.400	0.294	0.405	0.431	
68300-68400	0.330	0.325	0.331	0.345	
68400 - 68500	0.314	0.324	0.325	0.327	
<i>L</i> от р. л. 61500 до р. л. 62500 (восток)					
61500-61600	0.504	0.495	0.504	0.501	
61600 - 61700	0.525	0.516	0.528	0.529	
61700-61800	0.515	0.521	0.521	0.518	
61800-61900	0.489	0.488	0.489	0.494	
61900-62000	0.488	0.475	0.487	0.492	
62000-62100	0.500	0.482	0.498	0.491	
62100-62200	0.498	0.493	0.504	0.506	
62200-62300	0.466	0.455	0.472	0.473	
62300-62400	0.492	0.472	0.498	0.501	
62400 - 62500	0.457	0.426	0.460	0.462	

Для статистического обоснования выбора наиболее эффективного метода оценки запасов выполнен анализ методом статистической регрессии (табл. 5). На рис. 10 показаны рассеяния данных по скважинам в сравнении с результатами индикаторного и ординарного кригингов для обоих месторождений. Установлено, что ординарный кригинг является наиболее эффективным методом оценки запасов месторождений *K* и *L* со значениями коэффициента корреляции 0.982 и 0.985 соответственно.

ТАБЛИЦА 5. Результаты анализа статистической регрессии индикаторным, ординарным кригингами и *IDW*-методом для месторождений *K* и *L*

Месторождение	Метод оценки	r
K	ИК	0.8540
	ОК	0.9820
	ID^2W	0.9750
L	ИК	0.9525
	ОК	0.9850
	ID^2W	0.9610



Рис. 10. Сравнение данных по скважинам с результатами анализа индикаторного (ИК), ординарного (ОК) кригингов методом статистической регрессии для месторождений K(a) и $L(\delta)$

На рис. 11 показано распределение оценочного и фактического содержания металла в руде на месторождениях *K* и *L*. Для месторождения *K* значения распределились от р. л. 67500 до р. л. 68500 (восток), для месторождения *L* — от р. л. 61500 до р. л. 62500 (восток). Видно, что индикаторный кригинг оценивает содержание металла в руде недостаточно корректно, в то время как оценка ординарным кригингом наиболее близка к данным по скважинам, что делает ее наиболее эффективной.



Рис. 11. Сравнение фактического содержания металла в руде с результатами индикаторного, ординарного кригингов и *IDW*-метода для месторождений *K* (*a*) и *L* (*б*)

В табл. 6 представлен объем запасов и среднее содержание металла в руде, полученные тремя методами оценки для обоих месторождений. Для месторождений *K* и *L* построены диаграммы "содержание – запасы" (рис. 12), где показано среднее содержание запасов руды свыше минимального и содержание металла в руде свыше минимального [17]. Анализируя кривые месторождений, можно сделать вывод, что индикаторный кригинг предлагает меньшее содержание в каждом значении запасов, которое изменяется от высокого к низкому по причине увеличения минимального содержания. На заданном минимальном содержании ординарный кригинг и *IDW*-метод не обнаружили существенных различий в обоих месторождениях. Наиболее эффективным признан ординарный крининг, так как другие проверочные методы подтвердили его эффективность для месторождений K и L.



ТАБЛИЦА 6. Значения запасов и среднего содержания руды в месторождениях *К* и *L* по результатам индикаторного, ординарного кригингов и *IDW*-метода





вывод

Анализ статистической регрессии оценочного содержания металла в руде различными методами и сравненение с данными по скважинам для месторождений K и L показывает, что результаты *IDW*-метода наиболее близки к данным по скважинам с коэффициентами корреляции r=0.979 для месторождения K и r=0.961 для месторождения L. Сравнение диаграмм распределения содержания руды и графиков рассеяния данных выявило, что наиболее эффективным методом оценки запасов обоих месторождений является ординарный кригинг. Статистическая регрессия дает следующие коэффициенты корреляции r: ординарный кригинг — 0.982 для месторождения K и 0.985 — для месторождения L. Ординарный кригинг рекомендуется использовать для оценки запасов в месторождения X моунъюа K и L.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Emery J. Estimation of mineral resources using grade domains: critical analysis and a suggested methodology, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 2005, Vol. 105, No. 4. P. 247–255.
- 2. Glacken I., SNowden D., and Edwards A. Mineral resource estimation, Mineral resource and ore reserve estimation the AusIMM guide to good practice, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, 2001, Vol. 23, No. 1. P. 189–198.

- Morley D. Financial impact of resource / reserve uncertainty, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 1999, Vol. 99, No. 6. — P. 293–301.
- 4. Kiš I. M. Comparison of ordinary and universal kriging interpolation techniques on a depth variable (a case of linear spatial trend), case study of the Šandrovac Field, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 2016, Vol. 31, No. 2. P. 41–58.
- 5. Wackernagel H. Multivariate geostatistics, Springer, 2003. P. 79-88.
- Ozturk D. and Kilic F. Geostatistical approach for spatial interpolation of meteorological data, An. Acad. Bras. Ciênc., 2016, Vol. 88, No. 4. — P. 2121–2136.
- Al-Hassan S. and Boamah E. Comparison of ordinary kriging and multiple indicator kriging estimates of asuadai deposit at adansi gold ghana limited, Ghana Min. J., 2015, Vol. 15, No. 2. — P. 42–49.
- 8. Sinclair A. J. and Blackwell G. H. Applied mineral inventory estimation, Cambridge University Press, 2002.
- **9.** Lin Y.-P., Chang T.-K., Shih C.-W., and Tseng C.-H. Factorial and indicator kriging methods using a geographic information system to delineate spatial variation and pollution sources of soil heavy metals, Environ. Geol., 2002, Vol. 42, No. 8. P. 900–909.
- Rahimi H., Asghari O., Hajizadeh F., and Meysami F. Assessment the number of thresholds on tonnage-grade curve in IK estimation. Case study: Qolqoleh gold deposit (NW of Iran), 4th Int. Mine & Mining Industries Congr. & Expo, 2016.
- 11. Mei G., Xu L., and Xu N. Accelerating adaptive inverse distance weighting interpolation algorithm on a graphics processing unit, R. Soc. Open Sci., 2017, Vol. 4, No. 9. P. 1–19.
- Li L., Losser T., Yorke C., and Piltner R. Fast inverse distance weighting-based spatiotemporal interpolation: a web-based application of interpolating daily fine particulate matter PM2. 5 in the contiguous US using parallel programming and kd tree, Int. J. Env. Res. Public Health, 2014, Vol. 11, No. 9. — P. 9101–9141.
- 13. Bronshtein I. N. Handbook of mathematics, Springer, 2004.
- Samal A. R., Sengupta R. R., and Fifarek R. H. Modelling spatial anisotropy of gold concentration data using GIS-based interpolated maps and variogram analysis: Implications for structural control of mineralization, J. Earth Syst. Sci., 2011, Vol. 120, No. 4. — P. 583–593.
- 15. Rossi M. E. and Deutsch C. V. Mineral resource estimation, Springer Netherlands, 2013.
- 16. Glacken I. and Blackney P. A practitioners implementation of indicator Kriging, Beyond Ordinary Kriging, 1998.
- 17. Silva F. and Soares A. Grade tonnage curve: How far can it be relied upon, Annual Conf. of the Int. Association for Math. Geology, Cancún, 2001. P. 1–11.

Поступила в редакцию 12/X 2018 После доработки 19/III 2019 Принята к публикации 04/II 2020