

ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ,  
МЕТОДИКА ИХ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 553.048

*И.А. МАРАЕВ*

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОСТАТИСТИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАПАСОВ  
ОДНОГО ИЗ БОКСИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГВИНЕЙСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

Для оценки содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в блоке при разведке одной из площадей бокситового месторождения Сангареди в Гвинейской республике (Западная Африка) применен один из методов геостатистики — дискретный краингинг. Использование дискретного краингинга в данных условиях позволяет с большей достоверностью обеспечить жестко контролируемую величину — не менее 48 % содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в концентрате при отгрузке его с обогатительной фабрики на сухогрузы. Эта проблема с каждым годом становится все более актуальной, поскольку богатых участков месторождения становится все меньше.

**Ключевые слова:** геостатистика; краингинг; вариограмма; модель де Вийса; дисперсия приращения; распределение запасов.

Геостатистика применяется в геологии для оценки геологических параметров, таких как содержание химических элементов в рудном теле, мощность рудного тела и других, между разведочными горными выработками на основе дискретного опробования полезного ископаемого в этих выработках. В геостатистике как объект исследования используют понятие пространственной переменной [3], в качестве которой может быть принят любой геологический параметр. При решении практических геологических задач в качестве математической модели пространственной переменной принята случайная функция [3].

В основу геостатистики положено предположение южно-африканского геолога Д. Криге [5], что существует конечная дисперсия приращений пространственной переменной, т. е. существует стационарность приращений. Это предположение подтверждается для многих месторождений. В таком случае математическое ожидание приращения пространственной переменной равно нулю:

$$M[Z(x_i - h) - Z(x_i)] = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^N [Z(x_i - h) - Z(x_i)] = 0, \quad (1)$$

где  $N$  — число пар значений пространственной переменной в точках  $x_i$  и  $x_i + h$ ,  $h$  — расстояние между

этими точками;  $Z$  — значение пространственной переменной в точках  $x_i$  и  $x_i + h$ .

При сделанном допущении дисперсией приращения:

$$D[Z(x_i - h) - Z(x_i)] = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^N [Z(x_i - h) - Z(x_i)]^2 = D(h), \quad (2)$$

где

$$D(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N [Z(x_i - h) - Z(x_i)]^2, \quad (3)$$

называется полувариаграммой или вариограммой. В геостатистике вариограмма является основным средством для структурных исследований и оценки месторождения.

Один из наиболее эффективных методов геостатистики получил название краингинг.

Краингинг — это метод поиска оценки среднего значения пространственной переменной (например, среднего содержания полезного компонента в рудной залежи) в блоке с использованием результатов опробования как внутри, так и вне оцениваемого блока. Результаты опробования используются с такими весами, чтобы дисперсия среднего значения полезного компонента была минимальной.

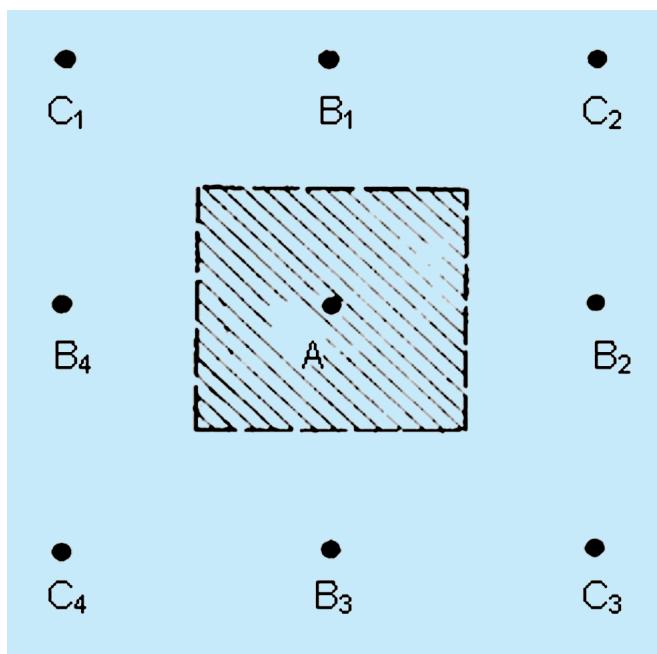


Рис. 1. Схема расположения скважин при дискретном краингинге  
 А — центральная скважина (заштрихованный квадрат): оцениваемый блок;  $B_1, B_2, B_3, B_4$  — скважины ближней зоны вокруг оцениваемого блока;  $C_1, C_2, C_3, C_4$  — скважины удаленной зоны

Пусть рудное тело разбурено по квадратной разведочной сети. Необходимо оценить среднее содержание пространственной компоненты в блоке, в центре которого пробурена скважина  $A$  (рис. 1). В этом случае проблема краингинга состоит в определении весов, которые нужно присвоить значениям пространственной переменной в центральной скважине  $A$  и в окружающих её скважинах  $B_1, B_2, B_3, B_4$  и  $C_1, C_2, C_3, C_4$ , равноудаленных от скважины  $A$ . Выбранные значения весов должны обеспечить минимальную ошибку оценки среднего значения пространственной переменной в оцениваемом блоке.

Пусть  $Z_A$  — среднее значение пространственной переменной в скважине  $A$ ;  $Z_B$  — среднее значение пространственной переменной в контуре, образованном скважинами  $B_1, B_2, B_3, B_4$ ;  $Z_C$  — среднее значение пространственной переменной в контуре, образованном скважинами  $C_1, C_2, C_3, C_4$ ;  $t = \frac{h}{d}$ , где  $h$  — мощность тела полезного ископаемого;  $d$  — шаг разведочной сети, тогда среднее значение пространственной переменной  $Z^*$  в оцениваемом блоке рассчитывается по следующей формуле краингинга:

$$Z^* = Z_A + Z_B + Z_C, \quad (4)$$

где  $, ,$  — веса, причем  $1.$

Значения весов зависят от модели вариограммы и от пространственной производной. Для логарифмической модели вариограммы де Вийса

(de Wijs) формулы для весов при  $t < 1$  следующие [2]:

$$\frac{(0,4277 \ln(t)) 0,5173 \frac{1}{4} \ln(t)}{0,9121 1,4739 \ln(t) \frac{9}{16} \ln^2(t)}; \quad (5)$$

$$\frac{(0,4277 \ln(t)) 0,0841 \frac{1}{4} \ln(t)}{0,9121 1,4739 \ln(t) \frac{9}{16} \ln^2(t)} \cdot 1. \quad (6)$$

### Оценка распределения запасов одного из участков бокситового месторождения Сангареди

Месторождение полигенных бокситов Сангареди в Западной Африке (Гвинея) образовалось в результате глубокого химического выветривания девонских сланцев [7]. Качество руд весьма высокое ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  до 65 %). Месторождение разрабатывается карьерным способом. Бортовое содержание бокситов 42 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Разведочная сеть — 37,5 × 37,5 м. Содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также  $\text{SiO}_2, \text{TiO}_2, \text{Fe}_2\text{O}_3$  и потеря при сгорании в блоке оценивается по содержаниям этих компонентов в керне, извлеченном из скважины, пробуренной в центре блока. Отработка месторождения ведется взрывным способом. Взрывные скважины бурятся между разведочными скважинами по сети 6 × 6 м. После отбойки руда складируется на площади в определенном месте по блокам. Содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в блоке и его координаты в месте складирования заносятся в базу данных. Руду с места складирования в вагонетках отправляют на обогатительную фабрику. После обогащения руда грузится на сухогрузы и отправляется на металлургические заводы. На борту сухогруза содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  должно быть не менее 48 %. Если содержание в блоке не обеспечивает это значение, то руду из этого блока смешивают с бокситами из других блоков с более высоким содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Автором содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в блоке оценивалось способом краингинга. Условия для применения краингинга на данном бокситовом месторождении благоприятные. Во-первых, месторождение имеет четкие границы, во-вторых, отсутствуют разрывные нарушения; в-третьих, не выявлено резких изменений содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  между разведочными скважинами.

Для применения краингинга взята площадь Бунду Вааде месторождения Сангареди, содержащая 287 скважин. Статистические данные результатов опробования этой площади представлены в табл. 1.

На рис. 2 представлена вариограмма содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на площади Бунду Вааде. Дисперсия пространственной переменной (в нашем случае содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) или порог вариограммы равна

Таблица 1

Статистические данные опробования площади Бунду Вааде

Статистика	Опробование	Крайгинг
Среднее содержание $\text{Al}_2\text{O}_3$ , %	46,18	46,18
Максимальное содержание $\text{Al}_2\text{O}_3$ , %	62,80	56,80
Минимальное содержание, $\text{Al}_2\text{O}_3$ , %	27,30	27,60
Средняя толщина пласта руды, м	9,12	9.12
Максимальная толщина пласта руды, м	18,00	18.00
Минимальная толщина пласта руды, м	1,00	1.00
Дисперсия содержания $\text{Al}_2\text{O}_3$	35,49	20,45

35,59, что хорошо согласуется с данными табл. 1 (дисперсия 35,49). Интервал влияния пространственной переменной или радиус автокорреляции равен 112,5 м, что позволяет использовать крайгинг для оценки среднего содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в блоке при разведочной сети 37,5–37,5 м.

На рис. 3 представлена вариограмма с логарифмической горизонтальной шкалой. Можно отметить, что эта вариограмма хорошо согласуется с логарифмической моделью де Вийса:  $Y(h)=A + B\lg(h)$ . Это позволяет осуществить крайгинг с использованием формул (5) и (6) для оценки среднего содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в блоке. Отметим также, что максимальная толщина рудного пласта (18 м) существенно меньше (в 2 раза) по сравнению с шагом разведочной сети (37,5 м), что также позволяет использовать эти формулы для крайгинга. Результаты крайгинга для части площади Бунду Вааде приведены в табл. 2, статистические данные крайгинга — в табл. 1.

Если исключить аномальные значения разности между результатами геологического опробования и крайгингом (-13,77–10,11–9,1), что объясняется очевидно ошибками химического анализа керна,

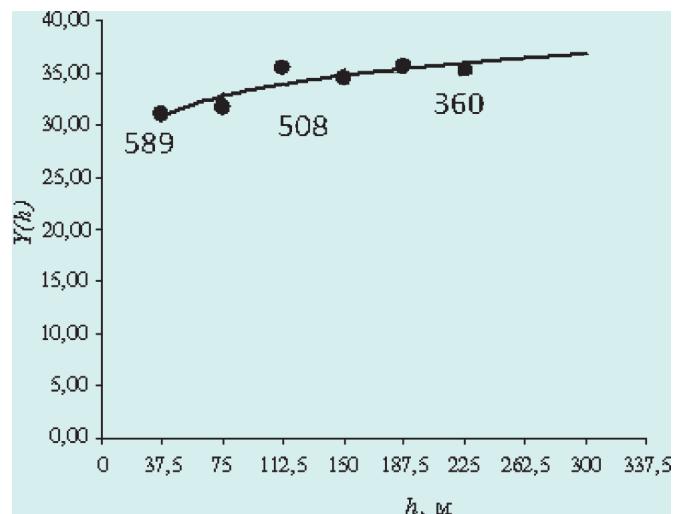


Рис. 2. Вариограмма содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на площади Бунду Вааде; цифры рядом с точками вариограммы — пары пространственной переменной, используемых при расчете вариограммы для данного значения  $h$

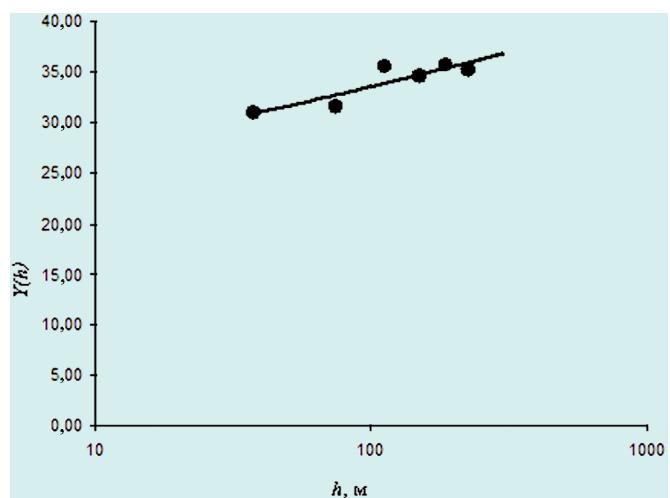


Рис. 3. Логарифмическая вариограмма содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на площади Бунду Вааде

Таблица 2

Результаты крайгинга для части площади Бунду Вааде

Линии	Профили								
	XV			XVI			XVII		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
14	48,1	50,45	-2,35	53	51,10	1,90	48,8	48,91	-0,11
13	54,7	49,35	5,35	49	47,61	1,39	34,9	45,01	-10,11
12	38,3	41,20	-2,90	45	44,07	0,93	47,9	45,38	2,52
11	38,9	38,45	0,45	39,8	40,86	-1,06	45	43,35	1,65
10	40,1	40,74	-0,64	38,6	40,86	-2,26	38,3	40,52	-2,22
9	53,3	48,99	4,31	43	45,10	-2,10	48,3	45,15	3,15
8	52	49,79	2,21	50,1	47,41	2,69	48	45,60	2,40
7	39,6	45,29	-5,69	43,8	44,66	-0,86	31,4	40,57	-9,17
6	54,8	49,28	5,52	49,7	46,21	3,49	47,6	45,59	2,01
5	52,6	48,14	4,46	29,3	43,07	-13,77	45,6	45,83	-0,23

Приложение. Столбцы: 1 — результаты химических анализов керна ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  %); 2 — содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (%), рассчитанное по методу дискретного крайгинга, т. е. по содержанию  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в данной скважине и в 8 скважинах, близких к данной (рис. 1); 3 — разность между результатами химического анализа керна в данной скважине и крайгингом.

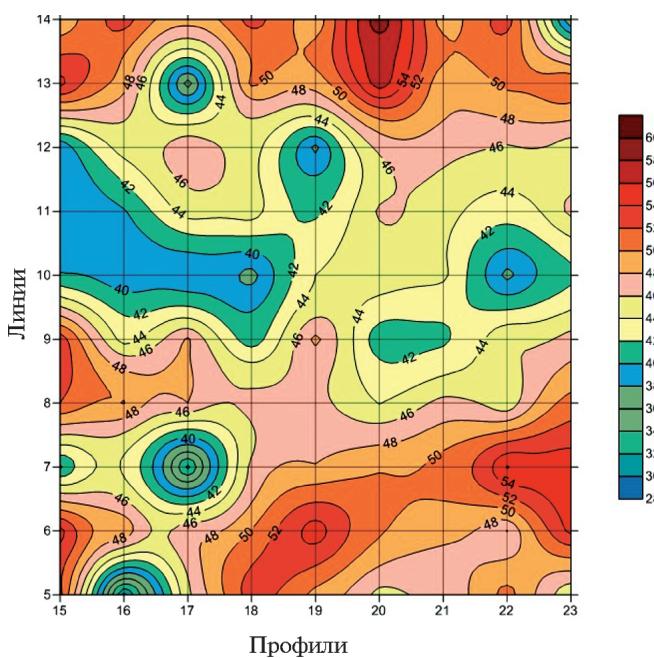


Рис. 4. Карта распределения запасов на части площади Бунду Вааде по результатам опробования

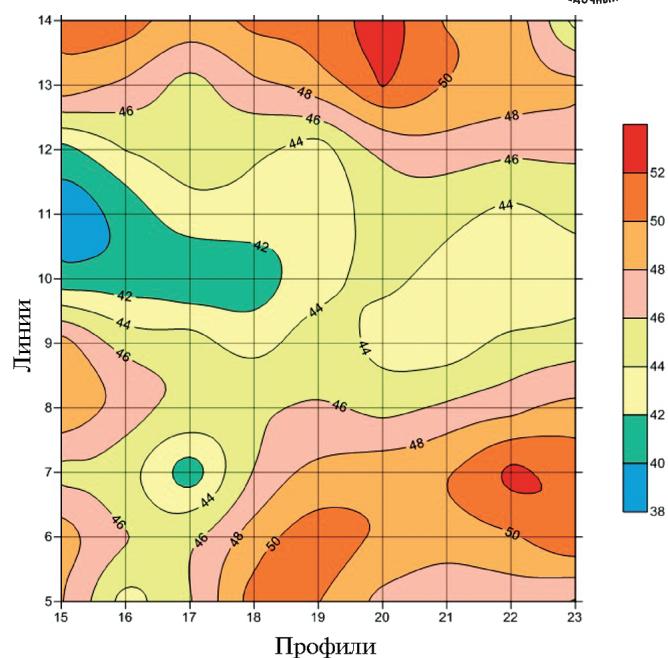


Рис. 5. Карта распределения запасов на части площади Бунду Вааде по результатам дискретного краинга

то разность между результатами опробования и краингом изменяется от -5,69 до 5,52 %.

На рис. 4, 5 представлены карты распределения запасов на части площади Бунду Вааде (9 профилей и 10 линий — 90 скважин) по результатам опробования и после краинга.

Можно отметить очевидный эффект сглаживаний после применения краинга. Распределение запасов бокситов на данной площади становится более спокойным после применения процедуры дискретного краинга. Безусловно, что такого же эффекта можно достичь при применение других способов, например, расчёта среднего значения в

окне заданного размера. Однако применение краинга имеет преимущество перед другими методами в том, что обеспечивается минимальное значение дисперсии истинного содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при правильно выбранных весовых коэффициентов. Применение дискретного краинга в данных условиях позволяет с большей достоверностью обеспечить жестко контролируемую величину, а именно не менее 48 % содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в концентрате при отгрузке его с обогатительной фабрики на сухогрузы. Эта проблема с каждым годом становится всё более актуальной, поскольку богатых участков месторождения становится всё меньше.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Давид М. Геостатистические методы при оценке запасов руд: Пер. с англ. Л.: Недра, 1980. 360 с.
2. Демьяннов В.В, Савельева Е.А. Геостатистика теория и практика М.: Наука, 2010. 327 с.
3. Капутин Ю.Е., Ежов А.И., Хенли С. Геостатистика в горно-геологической практике. Апатиты.: Кольский научный центр, 1995. 189 с.
4. Матерон Ж. Основы геостатистики. М., Мир.: 1968. 408 с.
5. Сапожников Д.Г., Богатырев С.А. Типы бокситовых месторождений Гвинейского щита // Коры выверивания и гипергенное рудообразование. М.:Наука, 1977. С.188–208.
6. Armstrong Margaret et Carigan Jacques. Geostatistique linéaire, Paris, 1997. 152 p.
7. Krige D.G. Geostatistics and the definition of uncertainty. Trans.Inst.Min.Metall. 1984. Vol 93. April. P. A41–A47.
8. Matheron G. Principes de la Geostatistique, Paris, 1968, 435 с.

Российский государственный  
 геологоразведочный университет  
 (117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 23;  
 e-mail: igorech@rambler.ru)

Рецензенты — О.И. Гуськов, А.Н. Роков