

УДК 622.03:553.81

Т.В. Тищенко

ОБОСНОВАНИЕ ГЕОИНДИКАТОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СОРТНОСТИ КИМБЕРЛИТОВЫХ РУД ТРУБКИ «УДАЧНАЯ»

Проведена геостатистическая оценка и установлены пространственные закономерности распределения алмазов в рудных телах кимберлитовой трубки «Удачная», выделены технологические сорта руд этого месторождения с помощью геоиндикатора, основанного на физико-механических и люминесцентных свойствах.

Ключевые слова: кимберлитовая трубка, геостатистическая оценка, геоиндикатор, алмазоносность.

Семинар № 1

В настоящее время на предприятиях алмазодобычи РФ геолого-маркшейдерской службой ГОКов накоплена обширная информация по ряду качественных показателей кимберлитовых руд. В частности, это данные о крепости руды, содержании шламов, алмазов тяжелой фракции, измельчаемости, а также о наличии и свойствах люминесцирующих минералов. С другой стороны, обогатители располагают данными об извлечении, выходе концентрата, потерях в отвальные хвосты и другой информацией о работе обогатительных фабрик. Эмпирически выявлены чисто качественные зависимости типа «шламы отрицательно влияют на флотацию», однако корреляции характеристик процессов (извлечение и т. д.) с геолого-минералогическими данными руды не установлены.

Вышеприведенные сведения доказывают необходимость обследования ГОКов алмазодобычи на предмет установления связей геолого-минералогических особенностей руды с извлечением и другими характеристиками процессов обогащения с целью установления показателей качества кимберлита, влияющих на техноло-

гию, а также выяснения допустимых пределов колебания этих показателей.

Геологическое строение кимберлитовой трубки «Удачная». Трубка «Удачная» находится в Далдыно-Алакитском районе на северо-восточной окраине Тунгусской синеклизы и выходит на поверхность на склоне долины ручья Пиропового. Вмещающими породами являются ордовикские известняки, состоит из двух сопряженных трубок («Удачная-западная» и «Удачная-восточная») (рис. 1).

Они представлены тремя разновидностями: кимберлитовой брекчийей, слагающей западную половину трубки, и промежуточного между ними относительно узкого участка, породы которого представляют собой сильно измененную и разрыхленную кимберлитовую брекчию. Кимберлиты базальтового облика трубки «Удачная» представляют собой плотную породу порфириовидного строения от темно-зеленого до черно-зеленого цвета. В отличие от кимберлита западной части трубки, описываемые разности в большом количестве содержат неизменный оливин,

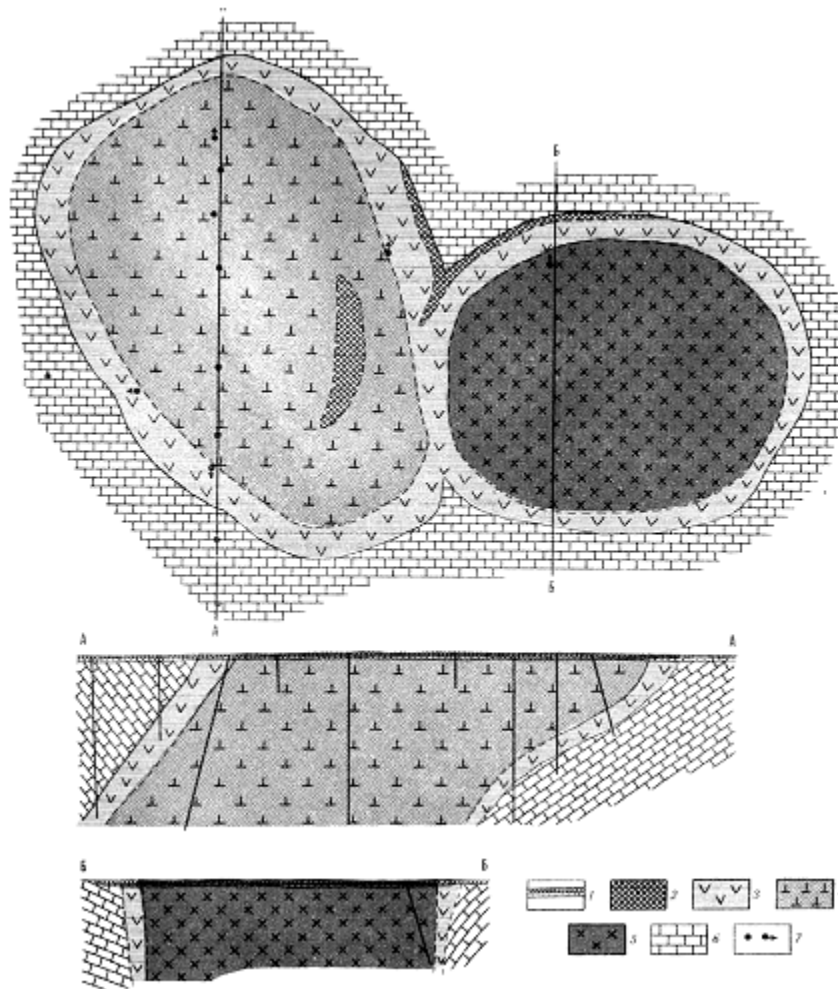


Рис. 1. Геологический план и разрезы по линии АА и ББ кимберлитовой трубки «Удачная» («Удачная-западная» и «Удачная-восточная»): 1 – делювий кимберлита с почвенно-растительным слоем; 2 – глинистый кимберлит зоны интенсивного изменения; 3 – кимберлит приконтактной зоны, карбонатизированный, желтого цвета; 4 – кимберлитовая брекчия голубовато-серого цвета; 5 – разновидность кимберлита базальтового облика; 6 – карбонатные породы мархинской свиты; 7 – скважины

а также встречаются округлые зерна пирропа и ильменита. Распространены ксенолиты пород осадочного происхождения, ксенолиты кристаллических сланцев, змеевиков, перидотитов, эклогитов и эклогитоподобных пород размером от долей миллиметра до 10–30 см. Породы, слагающие

трубку «Удачная-западная», представляют типичную брекчию с высоким (до 80 %) содержанием ксенолитов различного происхождения. Осветленные и рыхлые породы промежуточной зоны интенсивно изменены гидротермальными процессами, пронизаны густой сетью маломощных жил

и прожилков с кальцитом и гипсом, в значительной степени ожелезнены за счет оксидов железа.

Трубка «Удачная-восточная» более поздняя по времени образования. Промежуточный участок, разделяющий обе трубки, представляет собой зону интенсивного нарушения, возникшую в краевой части трубки «Удачная-западная», при ее внедрении и впоследствии, в силу ее трещиноватости, измененную гидротермальными растворами. Здесь развита столбчатая, а также шаровая отдельность и эмиссионная отдельность.

С трещиноватостью кимберлитов связано газопроявление, причем выделяющиеся газы выходят под напором по трещинам с характерным шумом, а мелкообломочный материал трещин (дресва, щебенка) отбрасывается во все стороны. Газ представлен в основном метаном с высоким содержанием углекислого газа.

По содержанию алмазов трубка «Удачная» является наиболее богатой из всех известных кимберлитовых трубок Далдыно-Алакитского района.

В разрезе до глубины 250 метров оба рудных тела трубки «Удачная» примыкают друг к другу, причем примыкание настолько тесное, что контакт между ними большей частью характеризуется как постепенный. Начиная с 250 м, трубки постепенно расходятся, и на глубине 1000 метров мощность перемычки между ними достигает 130 метров. Разведка месторождения была проведена в 3 этапа. На первом этапе (1958–1961 гг.) разведочными работами были охвачены верхние горизонты трубок до глубины 400 метров; второй этап разведочных работ (1968–1972 гг.) позволил оценить запасы алмазов промышленных категорий по месторождению до глубины 830–900 метров; на основании разведочных работ

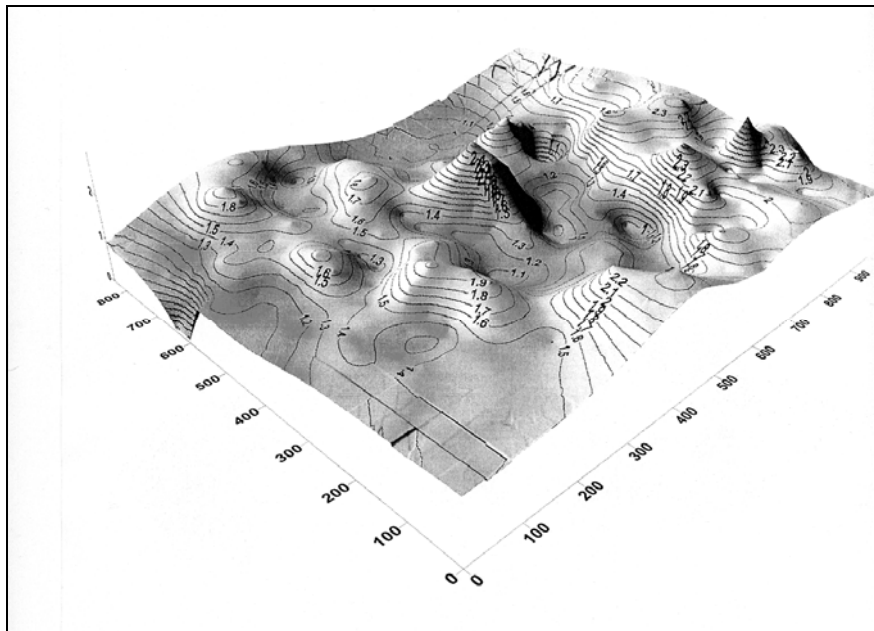
третьего этапа (1996–2000 гг.) запасы алмазов промышленных категорий были утверждены до глубины 1200 м, хотя кимберлиты единичными скважинами были прослежены и опробованы до глубины 1400 метров.

Геостатистическая оценка распределения алмазов в кимберлитах трубки «Удачная». Характеристика распределения алмазов в плане месторождения приведена для горизонта +190 метров трубки «Удачная». Выбор этого сечения обусловлен тем, что оно было одним из базовых горизонтов, прошедших наиболее полное эксплуатационно-разведочное опробование. Достаточно отметить, что западное тело здесь было опробовано 304 скважинами, восточное тело пересечено 162 керновыми пробами.

Уровни неравномерности распределения содержаний алмазов, зафиксированных пробами, соответствуют классическим представлениям о характере алмазоносности кимберлитовых месторождений. По западному телу коэффициент вариации содержаний алмазов относительно среднего равен $V_C = 25,7 \%$, по восточной трубке несколько ниже $V_C = 24,6 \%$.

Статистическая неравномерность распределения алмазов в плане месторождения не означает, что локализация участков с различной алмазоносностью имеет бессистемный характер. Наоборот, рельеф поверхности, построенной по данным опробования гор.+190 м трубки «Удачной», демонстрирует закономерную изменчивость содержания алмазов (рис. 2.), а также показывает четко выраженную зональность в размещении участков разных уровней алмазоносности. Так, отчетливо выделяется рудный столб с повышенной алмазоносностью в юго-восточной части западной трубки.

а



б

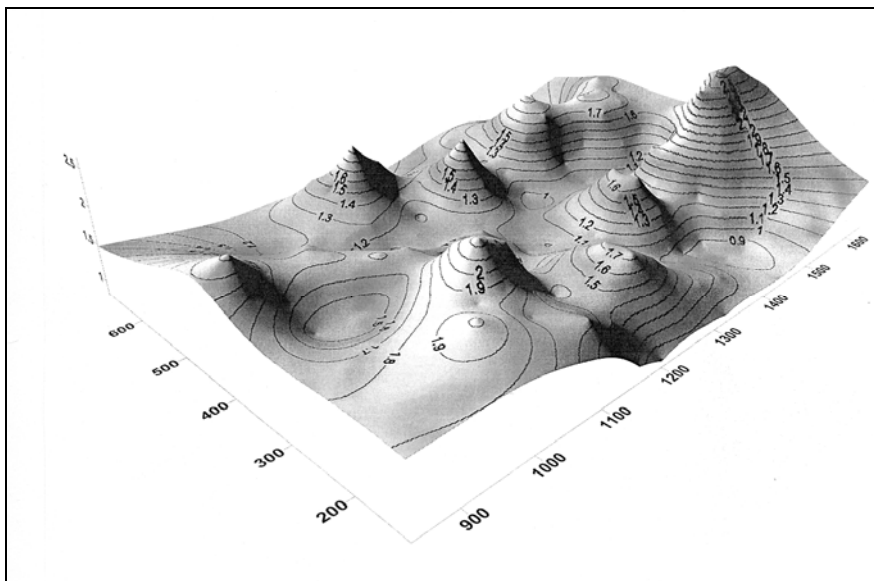


Рис. 2. Объемная модель распределения алмазов в кимберлите трубки «Удачная» (гор. + 190 м): а – западное тело; б – восточное тело

В южной и северо-западной частях той же трубки выделяются выдержанные зоны повышенных концентраций алмазов, разделенные между

собой протяженными зонами с относительно низкими содержаниями алмазов. Разница в средних содержаниях алмазов по зонам составляет 1,5-

1,6 раза. При этом следует отметить, что выраженных связей между фациальным составом кимберлитов и уровнем их алмазоносности не отмечается. Лишь в центральной части трубки полоса низких содержаний, вытянутая в северо-восточном направлении подчеркивается повышенным содержанием ксеногенного материала в кимберлите.

Для восточного тела также характерна зональность в распределении алмазов. Здесь выделяются два участка повышенных концентраций полезного компонента – на западном и восточном флангах трубки, разделенные обширной полосой кимберлитов с пониженной алмазоносностью. Выраженной связи концентрации алмазов с вещественным составом кимберлитов также не наблюдается.

Причем, в распределении алмазов наблюдаются некоторые особенности. Во-первых, закономерность распределения алмазов имеет линейный характер. В пределах западного тела зоны повышенной и пониженной алмазоносности вытянуты в двух взаимно пересекающихся направлениях – северо-западном (простираение СЗ 305–310°) и северо-восточном (простираение СВ 35–45°). Протяженность этих зон 250–300 метров при ширине 60–100 метров. В границах восточного тела зона пониженных содержаний алмазов, несколько неоднородная по своему внутреннему строению (в ней может быть выделена расположенная согласно с основной линейная зона 2-го порядка), пересекает всю трубку в том же северо-западном направлении, практически совпадающем с простираением зональности западного тела. Северо-восточное направление зональности также прослеживается, но выражено не столь отчетливо. В общем, оценивая изменчивость распределения алмазов в

рудных телах трубки «Удачная» можно сделать следующие выводы:

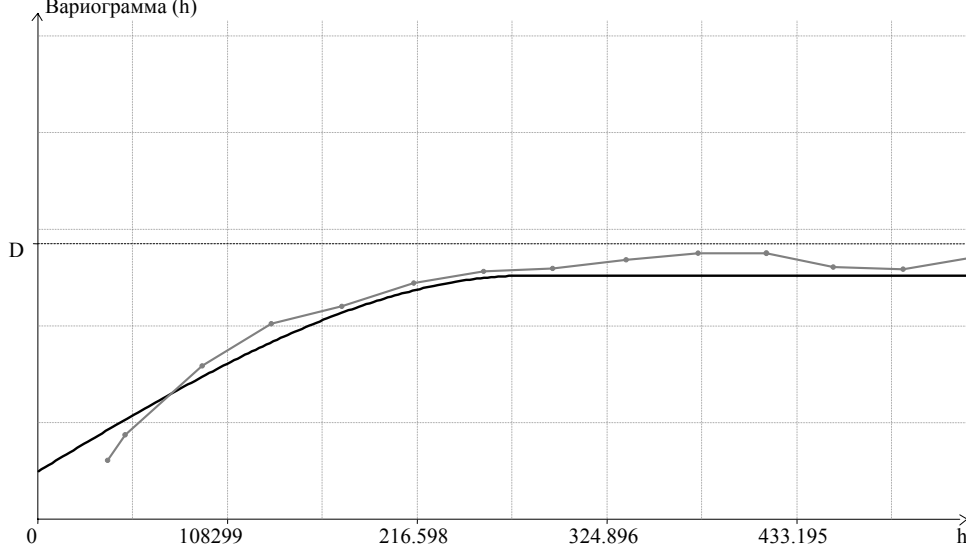
- изменчивость распределения алмазов в западном рудном теле адекватно аппроксимируется сферической моделью изменчивости с эффектом самородков (рис. 3);

- изменчивость распределения алмазов в восточном рудном теле адекватно аппроксимируется сферической моделью изменчивости без эффекта самородков (рис. 4).

Установленные закономерности пространственного распределения алмазов в рудных телах являются объективной основой выделения однородных геолого-технологических зон, т.е. технологических сортов кимберлитовых руд. Результаты выделения геолого-технологических зон по содержанию «тяжелых» компонентов и физико-механических свойств кимберлитов, влияющих на гравитационные методы обогащения приведены в табл. 1.

Обоснование геоиндикатора технологической сортности кимберлитовых руд трубки «Удачная». Особенностью кимберлитовых руд является то, что руды содержат конечный продукт - кристалл, ценность которого определяется, как правило, его крупностью (линейными размерами, весом, уровнем сохранности), а также целым набором признаков, обуславливающих его дальнейшее использование в различных отраслях промышленности. При этом отмечается существенное отличие кимберлитовых руд от большинства категорий руд черных и цветных металлов, состоящее в том, что качество алмазного сырья, поступающего на переработку, зависит не только от его природных свойств, но и от технологических процессов добычи и переработки руд, снижающих его. -

Объект: Западный участок; признак : С
Вариограмма (h)



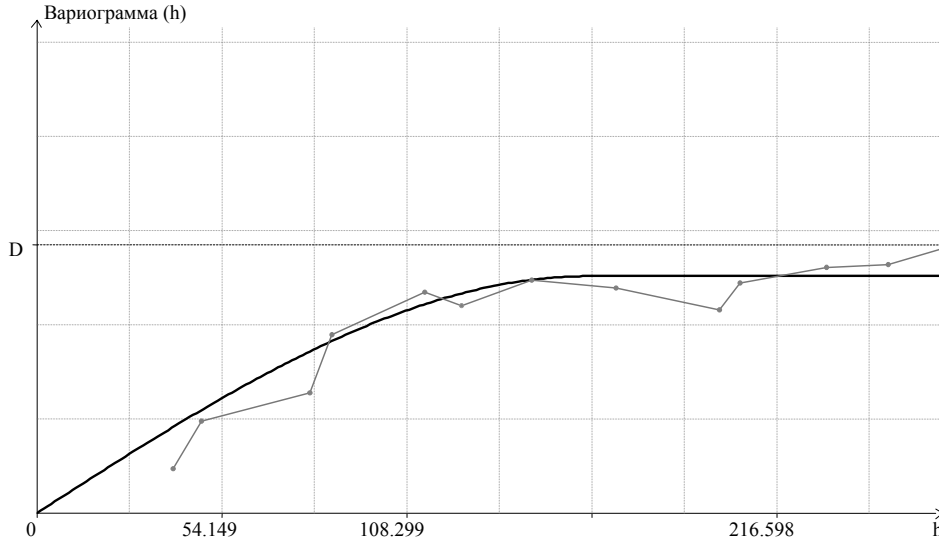
Направление: осредненная; ломаная – выборочная, гладкая – аппроксимированная

Структура 1: Эффект самородков, коэффициент 0.17268.

Структура 2: Сферическая, коэффициент 0.76891, радиус 243.20767; анизотропия Аффинная, модуль XY 0.67012.

Рис. 3. Изменчивость распределения алмазов в западном рудном теле

Объект: Восточный участок; признак : С
Вариограмма (h)



Направление: осредненная; ломаная – выборочная, гладкая – аппроксимированная

Структура 1: Эффект самородков, коэффициент 0.

Структура 2: Сферическая, коэффициент 0.88392, радиус 185.61259; анизотропия Аффинная, модуль XY 1.28336.

Рис. 4. Изменчивость распределения алмазов в восточном рудном теле

Таблица 1

Статистические характеристики геотехнологических зон по Восточному телу, гор. 190 м трубки «Удачная»

Содержание пирита	Ед. изм.	Зоны	C	σ^2	V, %	A	Э	min знач.	max знач.	χ^2 , эм.
	кг/т	I	0,45	0,29	121	1,15	0,33	0	2,1	38
		II	0,13	0,03	136	1,35	1,52	0	0,7	17
		III	1,1	1,44	110	1,34	0,57	0	4,1	18
Содержание магнетита и ильменита	кг/т	I	4,89	0,33	12	-0,58	0,64	3,4	5,8	20
		II	3,71	0,19	12	-0,47	0,82	2,8	4,3	18
		III	5,37	8,13	11	-0,66	1,02	1,4	12,0	14
Объемный вес	т/м ³	I	2,58	0,001	1,6	-0,67	-0,63	2,37	2,68	2
		II	2,61	0,005	2,6	-1,08	2,03	2,36	2,72	11
		III	2,50	0,009	3,0	0,33	-0,67	2,5	2,69	13
Коэффициент крепости	по Пр.	I	5,07	0,09	5,9	0,15	-1,26	4,6	5,6	6
		II	6,12	1,14	6,0	-0,003	-1,25	5,48	6,76	10
		III	4,11	0,68	16,0	0,63	-0,51	2,95	6,13	6
Коэффициент измельчаемости	усл. ед.	I	1,93	0,1	17	-0,28	-0,86	1,28	2,49	5
		II	1,83	0,08	15	0,46	-0,8	1,36	2,45	3
		III	2,68	0,68	27	0,85	0,67	1,2	4,79	4

Известно, что кристаллы алмазов разрушаются в процессе буровых и взрывных работ, а также при дроблении и измельчении руд, снижающих ценность сырья (общие потери среднего веса кристаллов составляют 40–60 %).

Обогащение кимберлитов производится по технологической схеме, включающей процессы рудоподготовки, рентгенолюминесцентной сепарации, отсадки, жировой сепарации и флотации. Эффективность каждого из этих процессов, как показывает опыт работы обогатительных фабрик, зависит от качества руд, поступающих на переработку.

Так, например, при подаче кимберлитовых руд с повышенным содержанием люминесцентных минералов происходит снижение извлечения алмазов на 2–3 %. Увеличение содержания в руде минералов, близких

по плотности к плотности алмазов, влечет за собой снижение извлечения ценного компонента при обогащении гравитационными методами. Основным в технологии кимберлитовых руд является процесс рентгенолюминесцентной сепарации. Он включает облучение потока минерального сырья рентгеновским излучением, идентификацию полезного компонента по характеристикам его люминесценции и отделение порции материала, содержащей идентификационный компонент, в концентрат. Кроме алмазов, в кимберлитах содержатся минералы, люминесцентные характеристики которых близки к характеристикам свечения алмазов. Люминесцирующие минералы в кимберлитах представлены кальцитом, доломитом, полевыми шпатами, плагиоклазами.

Эффективность работы рентгенолюминесцентного сепаратора харак-

теризуется уровнем извлечения полезного компонента и степенью сокращения обогащаемого материала.

При постоянном значении количества частиц, направляемых в концентрат (N_k), степень сокращения обогащаемого материала (S) определяется содержанием в руде алмазов (W_a) и люминесцирующих минералов (W_l) и вероятностью их обнаружения (P).

Вероятность обнаружения при распознавании алмазов и минералов кимберлитовых руд по двум характеристикам люминесцентного излучения (силе излучения и постоянной времени) определяется из выражения

$$P = \iint_{I(t)I(t)} W(j, t) dj dt ,$$

где $W(j, t)$ – двумерное распределение характеристик излучения алмазов и минералов; $I(t)$ – функция, которая разделяет плотность характеристик излучения на области алмазов и минералов; $I(\varepsilon)$ – сила излучения эталона, по которому настраивается уровень разделения системы обнаружения сепаратора.

Таким образом, извлечение алмазов зависит от вероятности их обнаружения, которое, в свою очередь, определяется содержанием люминесцирующих минералов. При обогащении кимберлитовой руды с повышенным содержанием люминесцирующих минералов на входе рентгенолюминесцентных сепараторов резко возрастает число срабатываний (что и является единственным сигналом об изменении качества руды), т.е. степень сокращения уменьшается и увеличивается выход концентрата.

В соответствии с действующей схемой управления процессом рентгенолюминесцентной сепарации для поддержания допустимой степени

сокращения (S) после регистрации изменения качества руд производится корректирование режима работы сепаратора. Цель корректирования состоит в уменьшении вероятности отсечки люминесцирующих минералов (W_l). Это влечет за собой неизбежное снижение извлечения алмазов.

Отсутствие классификации кимберлитов по содержанию в них люминесцирующих минералов не позволяет оптимизировать управление процессом рентгенолюминесцентной сепарации в условиях высокой изменчивости качества перерабатываемого минерального сырья.

Исследование люминесцентных характеристик с целью определения рациональных режимов работы процесса рентгенолюминесцентной сепарации позволили выделить сорта руд, характеризующихся различным содержанием люминесцирующих минералов и отличающихся качественным составом. В результате исследований люминесцентных характеристик алмазов и минералов кимберлитовых руд (силы излучения и постоянной времени, характеризующей скорость изменения интенсивности люминесценции алмазов и минералов) получены распределения плотности вероятности силы излучения и постоянной времени (рис. 5, 6).

На основании установленных зависимостей выделены два типа люминесцирующих минералов, отличающихся величиной постоянной времени. К первому типу M_1 отнесены минералы, постоянная времени которых менее $1,0 \cdot 10^{-3}$ с. Ко второму типу M_2 – минералы, имеющие значение постоянной времени, равное $1,0 \cdot 10^{-3}$ – $15,0 \cdot 10^{-3}$ с. К минералам первого типа относятся альбит и олигоклаз, а к минералам второго – андезин и анор-

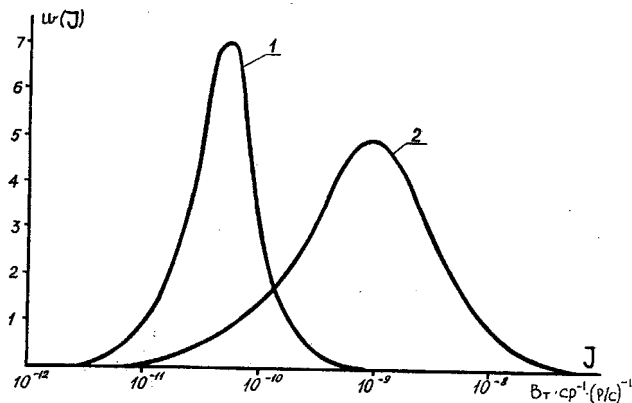


Рис. 5. Графики распределения плотности вероятности силы излучения минералов (1) и алмазов (2)

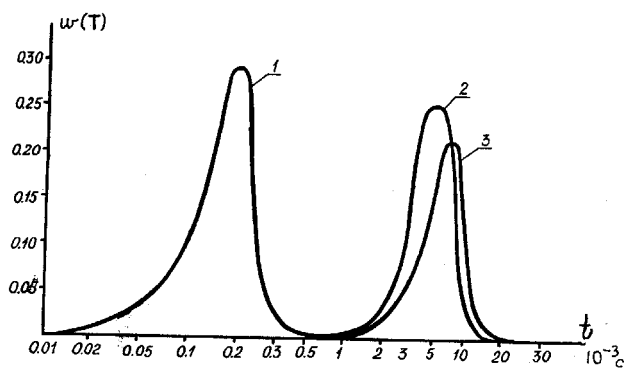


Рис. 6. Графики распределения плотности вероятности постоянной времени излучения алмазов (2) и минералов типа M_1 (1) и типа M_2 (3)

тит. К первому сорту (C_1) относятся руды, содержание в которых люминесцирующих минералов составляет менее 0,01 %. Ко второму (C_2) и третьему (C_3) сортам – руды, содержание люминесцирующих минералов в которых более 0,15 %. Различие между этими сортами руд заключается в вещественном составе содержащихся в них люминесцирующих минералов. Сорт руды C_2 содержит преимущественно минералы типа M_1 , а сорт C_3 – минералы типа M_2 (табл. 2). При обогащении руд сорта C_1 для получения заданного показателя сокращения пороговое значение уровня разделения устанавливаются равным

$$I_p = 1,5 - 2,0 \cdot 10^{-11} \frac{B_r}{C_p} \left(\frac{P}{C} \right)^{-1}$$

При этом вероятность обнаружения алмазов крупностью $-10+5$ мм составит $P = 98,5 - 99\%$, т.е. обеспечиваются наивысшие показатели работы процесса рентгенолюминесцентной сепарации.

Заданный показатель сокращения при подаче руд второго сорта достигается путем увеличения порогового уровня разделения силы излучения до величины

$$I_p = 2,0 - 4,0 \cdot 10^{-11} \frac{B_r}{C_p} \left(\frac{P}{C} \right)^{-1}$$

Вероятность обнаружения алмазов для руд сорта C_2 составит $P = 96 - 97\%$. Обогащение сорта C_3 до

$$I_p = 2,0 - 5,0 \cdot 10^{-11} \frac{B_r}{C_p} \left(\frac{P}{C} \right)^{-1}$$

$P = 95,5 - 97\%$ (табл. 2).

В соответствии с геологией кимберлитовых трубок на долю руд, содержащих более 0,15 % люминесцирующих минералов, приходится порядка 15–20 % общего объема руды. При этом повышение эффективности рассматриваемого процесса обогащения может обеспечиваться путем поддержания содержания люминесци-

Таблица 2

Характеристики технологических сортов кимберлитовых руд

Сорт руды	Наименование минералов	Люминесцентные характеристики минералов		Содержание люминесцентных минералов, %	Режим работы сепаратора, $I \cdot 10^{-11} \frac{B_T(P)}{C_P}^{-1}$
		$I \cdot 10^{-11} \frac{B_T(P)}{C_P}^{-1}$	$t \cdot 10^{-3}$		
C ₁	Тип M ₁ +M ₂	–	–	< 0,01	1,5 – 2,0
C ₂	Тип M ₁ (альбит, олигоклаз)	2,0 – 5,0	0,01 – 1,0	> 0,15	2,0 – 4,0
C ₃	Тип M ₂ (андезин, анортит)	1,0 – 8,0	1,0 – 18,0	> 0,15	2,0 – 5,0
C ₄	Тип M ₁ +M ₂	–	–	0,01 – 0,15	1,5 – 2,0

рующихся минералов на уровне не более 0,15 %.

Стабилизация качества руды достигается выбором порядка и направления отработки рудных блоков на основе прогнозирования изменчивости качественных показателей руд или усреднением руды (внутри карьера и на усреднительном складе). В результате усреднения кимберлитовых руд на вход рентгенолюминесцентных сепараторов подается минеральное сырье, содержание люминесцирующих минералов в котором составляет 0,01–0,15 %. Руда с таким качеством отнесена к четвертому сорту С₄ (табл. 2).

В случае, если указанными способами не обеспечивается получение руды сорта С₄, то целесообразно производить селективную выемку руд по сортам.

При обогащении руды сорта С₂ и сорта С₃ получение заданного показателя сокращения материала в первую очередь должно осуществляться

снижением производительности сепараторов. Это позволяет сохранить уровень извлечения, но требует вовлечения в работу дополнительных мощностей. При отсутствии резерва мощности по рентгенолюминесцентной сепарации производится увеличение порогового значения уровня разделения в рекомендуемых пределах. На основе предложенной классификации кимберлитовых руд на технологические сорта по содержанию люминесцирующих минералов разработана схема управления качеством руд, включающая определение в массиве люминесцирующих минералов при опробовании, выделение

однородных зон по комплексу показателей, выбор способа стабилизации качества рудопотока, прогнозирование качества рудопотока на входе обогатительной фабрики, передачу информации о параметрах рудопотока на управление процессом рентгенолюминесцентной сепарации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анистратов К.Ю., Волков А.М., Ермолов В.А., Сельменев А.И. Обоснование технологических сортов кимберлитовых руд // Проблемы горнопромышленной геологии

(Материалы первых Ершовских чтений по горнопромышленной геологии). – М. – 1990. – С. 73–78.

2. Бобриевич А.П., Бондаренко М.Н., Гневушев М.А. и др. Алмазные месторождения Якутии / Под ред. Соболева М.А. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1959. – 527 с.

3. Зинчук Н. Н., Котиль В.И., Борис Е.И. Основные аспекты разномасштабного районирования территорий по типоморфным особенностям алмазов (на примере Сибирской платформы, Россия) // Геология

рудных месторождений. – Том 41. – 1999. – № 6. – С. 516–526.

4. Меньшиков Н.А. Специфика геолого-технологического картирования кимберлитовых месторождений на стадии эксплуатации // Проблемы горнопромышленной геологии (Материалы первых Ершовских чтений по горнопромышленной геологии). — М. – 1990. – С. 116–120. **ГИАБ**

Коротко об авторе

Тищенко Т.В. – кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный горный университет,
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru



ДЕПониРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

РУКОПИСИ,

Мельник В.В., д.т.н., профессор кафедры ПРПМ,
Кайдо И.И., к.т.н., доцент кафедры ПРПМ,
Хрисанов П.Е., аспирант кафедры ПРПМ,
Московский государственный горный университет,
ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОД ЗАВАЛЬНЫХ ЦЕЛИКОВ
НА ОПОРНОЕ ДАВЛЕНИЕ В КОРОТКИХ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЯХ (744/03-10 от 23.12.09
г.) 6 с.

Дано научное геомеханическое обоснование влияния подзавальных целиков на опорное давление в коротких очистных забоях.

Ключевые слова: короткий очистной забой, подзавальные целики, опорное давление.

Melnik V.V., T.D., the professor of UDBD subdepartment,
Kajdo I.I., candidate of technics, the associate professor of UDBD subdepartment,
Hrisanov P.E., the post-graduate student of UDBD subdepartment,
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru
GEO-MECHANICAL SUBSTANTIATION OF UNDER-BLOCKAGE PILLARS INFLUENCE
ON BEARING PRESSURE IN SHORT CLEARING FACES

It is given the scientific geomechanical substantiation of under-blockage pillars influence on bearing pressure in short clearing faces.

Key words: short clearing face, under-blockage pillars, bearing pressure.