

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОВЕРХНОСТНОГО И ОБЪЁМНОГО СОДЕРЖАНИЙ КОМПОНЕНТА В КУСКАХ С РАЗЛИЧНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИЕЙ

Т. Ю. Овчинникова<sup>1</sup>, Е. Ф. Цыпин<sup>1</sup>, Т. А. Ефремова<sup>2</sup>, К. Н. Аринов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, office@ursmu.ru;

<sup>2</sup> АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия, umbr@umbr.ru

**Аннотация:** Предварительное обогащение является активно развивающимся направлением в переработке полезных ископаемых. Использование информационных (сенсорных) методов сортировки предполагает использование как объёмных, так и поверхностных признаков разделения. При использовании поверхностных признаков разделения важно, как взаимосвязано оцениваемое ими поверхностное содержание компонента с объёмным содержанием и, в конечном итоге, с массовой долей. В работе на примере искусственных моделей в различной минерализацией компонента изучена взаимосвязь между поверхностным и объёмным содержаниями компонента. Оценка поверхностного содержания велась с использованием рентгенофлуоресцентного метода по величине спектрального отношения. Рассмотрено шесть видов моделей, из которых две были покрыты слоем однородного материала, представляющим породную или минеральную фазу, а четыре другие представляли различные виды минерализации с разными значениями поверхностного содержания компонента. Были выведены формулы для оценки поверхностного и объёмного содержаний и массовой доли для изученных моделей. Получены графические зависимости поверхностного содержания и среднего значения спектрального отношения от объёмного содержания и массовой доли, показавшие наличие краевого эффекта для моделей с различной минерализацией. Краевой эффект может негативно сказаться при применении поверхностного признака разделения при использовании рентгенофлуоресцентной сепарации в качестве метода предварительного обогащения, так как появляется вероятность неверной идентификации куска в зависимости от его положения относительно измерительной системы.

**Ключевые слова:** предварительное обогащение; рентгенофлуоресцентная сепарация (РФС); поверхностное содержание компонента; объёмное содержание компонента; массовая доля; минеральные сростки; модели минерализации; спектральное отношение; краевой эффект.

**Для цитирования:** Овчинникова Т. Ю., Цыпин Е. Ф., Ефремова Т. А., Аринов К. Н. Взаимосвязь поверхностного и объёмного содержаний компонента в кусках с различной минерализацией // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11-1. — С. 140–154. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_111\_0\_140.

### Correlation of the surface and volume component contents in lumps with different mineralization

T. Yu. Ovchinnikova<sup>1</sup>, E. F. Tsy-pin<sup>1</sup>, T. A. Efremova<sup>2</sup>, K. N. Arinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia, office@ursmu.ru;

<sup>2</sup> JSC "Uralmekhanobr", Yekaterinburg, Russia, umbr@umbr.ru

**Abstract:** Preliminary ore dressing is an actively developing direction in the minerals processing. The application of information (sensor-based) sorting methods involves the use of both volume and surface signs of separation. When using surface signs of separation, it is important how the component surface content estimated by them is interconnected with the volume content and, ultimately, with the mass content. In the work, on the example of artificial models with different mineralization of the component, the correlation between the surface and volume contents of the component was studied. The surface content was estimated using the X-ray fluorescence method by the magnitude of the spectral ratio. Six types of models are considered, of which two were covered with a layer of homogeneous material representing a gangue or mineral phase, and four others represented various types of mineralization with different values of the component surface content. Formulas were derived to estimate the surface and volume content and mass content for the studied models. Graphical dependences of the surface content and the average value of the spectral ratio on the volume content and mass content were obtained, which showed the presence of an edge effect for models with different mineralization. The edge effect can have a negative effect when using a surface separation feature when using X-ray fluorescence separation as a pre-concentration method, since there is a possibility of incorrect identification of a piece depending on its position relative to the measuring system.

**Key words:** preliminary ore dressing, X-ray fluorescence separation (XRF); component surface content; component volume content; mass content; mineral aggregates; mineralization models; spectral ratio; edge effect.

**For citation:** Ovchinnikova T. Yu., Tsypin E. F., Efremova T. A., Arinov K. N. Correlation of the surface and volume component contents in lumps with different mineralization. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11-1):140–154. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_111\_0\_140.

---

## Введение

В настоящее время в переработку всё больше вовлекаются руды с малыми содержаниями полезных компонентов, при этом возникает потребность в предварительной концентрации таких руд, так как предприятия, особенно построенные и запущенные в эксплуатацию в XX веке, не всегда могут усовершенствовать существующую годами технологию глубокого обогащения с учётом снижения содержания полезного компонента в исходной руде.

Одним из решений этой проблемы может являться использование предварительного обогащения таких бедных руд в крупнокусковом виде. Для предварительного обогащения на протяжении уже довольно длительного времени применяют методы гравитационного и магнитного обогащения. В последние двадцать лет в России и в мире значительно вырос интерес к применению в качестве методов предварительного

обогащения таких методов как информационные, в зарубежной практике называемые сенсорными.

В работе [1] дано определение «предварительное обогащение», а в [2] рассмотрены методы, применяемые в стадиях рудоподготовки для целей предварительной концентрации и предварительного обогащения. В отечественной практике для предварительного обогащения широкое распространение получил метод рентгенорадиометрической (рентгенофлуоресцентной) сепарации [3, 4], при этом, в работе [5] отмечается, что вопрос применения этого метода для предварительной концентрации требует детального изучения.

В обзоре материалов международного конгресса по обогащению [6, 7] отмечается необходимость увеличения применения методов предварительного обогащения. В последнее десятилетие за рубежом развиваются как гравитаци-

онные и магнитные [8], так и сенсорные методы предварительного обогащения [9, 10, 11, 12]. Предварительное обогащение в настоящее время предлагается внедрять не только в схемах рудоподготовки обогатительных фабрик [2], но и для применения в подземных обогатительных комплексах [13].

В настоящее время изучены возможности применения различных информационных (сенсорных) методов для предварительного обогащения руд 4 цветных [5, 14] и благородных [15, 16] металлов, а также при сортировке техногенного сырья [17], электронного лома [18] и отходов строительной отрасли [19].

Наибольшее распространение получили следующие методы предварительного обогащения: радиометрический для сортировки руд урана и тория [20], оптические (фотометрические) для сортировки золотосодержащих руд [13, 21], а также методы, использующие рентгеновское излучение — рентгенолюминесцентный для сортировки алмазосодержащего сырья [22], рентгеноабсорбционный [9] и рентгенофлуоресцентный [5].

Для информационных методов сортировки могут быть использованы объёмные (радиометрический, рентгеноабсорбционный) или поверхностные (оптические, рентгенолюминесцентный, рентгенофлуоресцентный) признаки разделения.

Объёмные признаки позволяют оценивать содержание полезного компонента в порции сортируемого материала или в куске с достаточно высокой точностью, что нашло широкое применение, например, в порционной сортировке радиоактивных, чаще всего урансодержащих руд, так как параметры регистрируемого излучения хорошо коррелируют с содержанием урана, тория и других радиоактивных

элементов. Недостатком радиометрического метода является ограниченная область применения — только для руд, обладающих естественной радиоактивностью. Измерение признака разделения, применяемого в рентгеноабсорбционном методе, также позволяет оценивать содержание компонента как в порции материала [9], так и в отдельном куске [23]. Рентгеноабсорбционный метод в свою очередь, обладая несомненным преимуществом при тесной корреляции между атомным номером элемента и его содержанием в порциях или кусках сортируемого материала, тем не менее будет малоэффективен, если материал будет представлен минералами, в состав которых входят элементы с близкими атомными номерами, что характерно, например, для руд цветных металлов.

Поверхностные признаки разделения, используемые при оптической, рентгенолюминесцентной и рентгенофлуоресцентной сепарации в основном применяются при покусковой сортировке и позволяют дать оценку поверхностного, а не объёмного содержания компонента. Для этих методов важно то, как минеральная фаза, имеющая в своём составе контролируемый компонент, представлена в куске сортируемого материала. Особенно важно это для рентгенофлуоресцентного метода, где оценка содержания ведётся по интенсивности излучения в характеристических рентгеновских областях одного или нескольких элементов, получаемой от поверхности куска сортируемого материала. Этот метод может одновременно оценить содержание нескольких элементов. Метод является весьма информативным и эффективным при условии отсутствия большого числа кусков со скрытой минерализацией.

Выявлению связи между объёмным (массовым) содержанием и оценкой

разными методами содержания компонента посвящён ряд работ зарубежных исследователей [24–27]. В работах [24, 25] предложена фрактальная модель, позволяющая теоретически учесть до девяти факторов, влияющих на показатели разделения при порционной сортировке руды. Те же авторы в работах [26, 27] показывают, что использование для оценки рентгенофлуоресцентного метода (XRF) приемлемо как для порционной, так и для покусковой сортировки, отмечая при этом, что существуют определённые ошибки при использовании данного метода. Авторы [26] выявляют три основных источника погрешностей: инструментальная погрешность, погрешность неоднородности материала и погрешность отбора проб. Из них наиболее значимой является погрешность неоднородности материала, так как рентгенофлуоресцентный метод оценивает лишь поверхность сортируемого материала с глубиной проникновения излучения не более 0,1 мм, следовательно, то, как минеральная фаза проявляется на поверхности сортируемого материала, требует дополнительных исследований для этого метода.

Авторами настоящей работы также ранее изучался вопрос связи между оценкой поверхностного и объёмного содержания компонента [28, 29].

**Целью работы** является выявление на примере искусственных моделей связи между объёмным содержанием, массовой долей компонента и оценкой поверхностного содержания компонента для различных вариантов минерализации.

#### **Методика исследований**

В работе [28] было выявлено, что оценка поверхностного содержания будет зависеть от характера проявления минерального слоя на поверхности куска и для разных типов минерализации

при одном и том же объёмном содержании в куске будет отличаться.

В работе [29] было изучено влияние крупности исходного материала на показатели разделения при предварительном обогащении методом рентгенофлуоресцентной сепарации. Исследование проводилось на искусственных образцах, представляющих собой пластины различного размера с равномерным покрытием материалом, имитирующим минеральный слой, с различными содержаниями компонентов. Определено, что параметры геометрии измерительной системы сепаратора должны быть согласованы с размерами сортируемых кусков. Реальные сортируемые куски имеют неправильную форму, при моделировании процесса введено допущение, что все куски имеют форму куба.

На основании выводов, полученных в работах [28, 29] для продолжения исследований были созданы искусственные образцы, представляющие собой кубы с размером ребра  $a = 50$  мм с нанесённым на них покрытием. Покрытие имитирует разные типы минерализации с различной высотой минерального слоя  $h$ . Всего было выбрано четыре типа различного срастания минерального и породного слоёв. Полагалось, что минеральный слой может располагаться на одной из граней куска (краевой сросток), внутри куска с выходом на поверхность четырёх граней (жильный сросток) и в углу куска (угловой кубический и угловой столбчатый сростки).

Общий вид моделей минерализации кусков приведён на рис. 1.

Покрытие толщиной более 0,1 мм, имитирующее минеральный слой, было выполнено из тонкоизмельчённого материала с известным значением массовой доли меди. Для покрытия,

имитирующего породный слой, был выбран кварц.

Для каждого типа минерализации были выполнены модели с соотношением высоты минерального слоя к высоте ребра  $k = h/a$ : 0,125; 0,25; 0,5; 1, стрелками показано направление увеличения  $h$ .

Модели минерализации обозначены как 1 — краевой сросток; 2 — жильный сросток; 3 — угловой кубический сросток; 4 — угловой столбчатый сросток; 5 — модель, полностью покрытая породным слоем; 6 — модель, полностью покрытая минеральным слоем ( $k = 0$ ). Дополнительно для варианта краевого сростка была сделана модель, где только одна грань покрыта минеральным слоем ( $k \rightarrow 0$ ), а пять остальных — породным.

На рис. 2 показаны модели с различными  $k$ , крайние правые модели для краевого и угловых сростков показывают модель с  $k = 1$  при осмотре в положении поворота модели на  $180^\circ$  относительно вертикальной и горизонтальной осей.

Для каждой из моделей была проведена оценка проявления поверхностного признака в различных статических положениях куска относительно

измерительной системы сепаратора СРФ100Л с длиной коллиматора 75 мм. Так как контролируемым элементом выбрана медь, то в качестве поверхностного признака выбрано спектральное отношение интенсивности излучения в характеристической рентгеновской области меди к интенсивности в характеристической рентгеновской области рассеянного излучения  $H_{Cu}$ , усл. ед., вычисляемого как

$$H_{Cu} = N_{Cu} / N_s, \quad (1)$$

где  $N_{Cu}$  интенсивность вторичного характеристического рентгеновского излучения в области меди,  $N_s$  — интенсивность вторичного характеристического рентгеновского излучения области рассеянного первичного излучения.

Измерения проводились для тридцати двух положений модели относительно измерительной системы сепаратора. В первой серии измерений первоначальное положение куска было следующим: грань перпендикулярна направлению излучения, затем кусок поворачивали по часовой стрелке относительно вертикальной оси восемь раз с шагом  $45^\circ$ . Для второй серии измерений кусок поворачивали из первоначального положения относительно горизонтальной оси на  $90^\circ$  и вновь

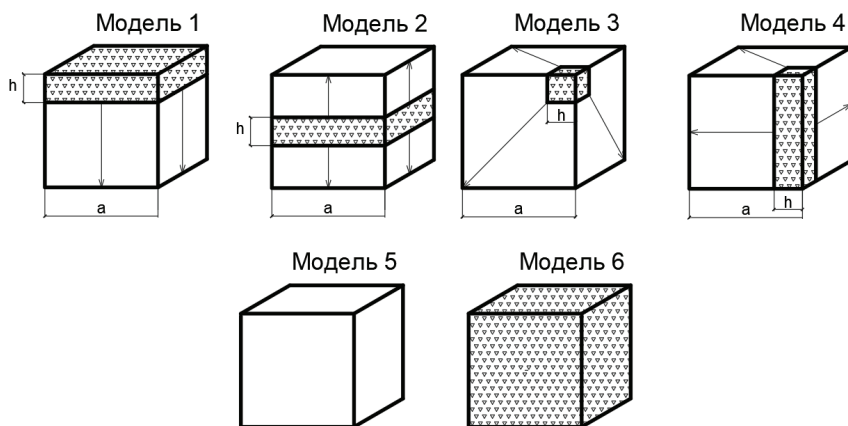


Рис. 1. Модели кусков с различным видом минерализации

Fig. 1. Models of lumps with different form of mineralization

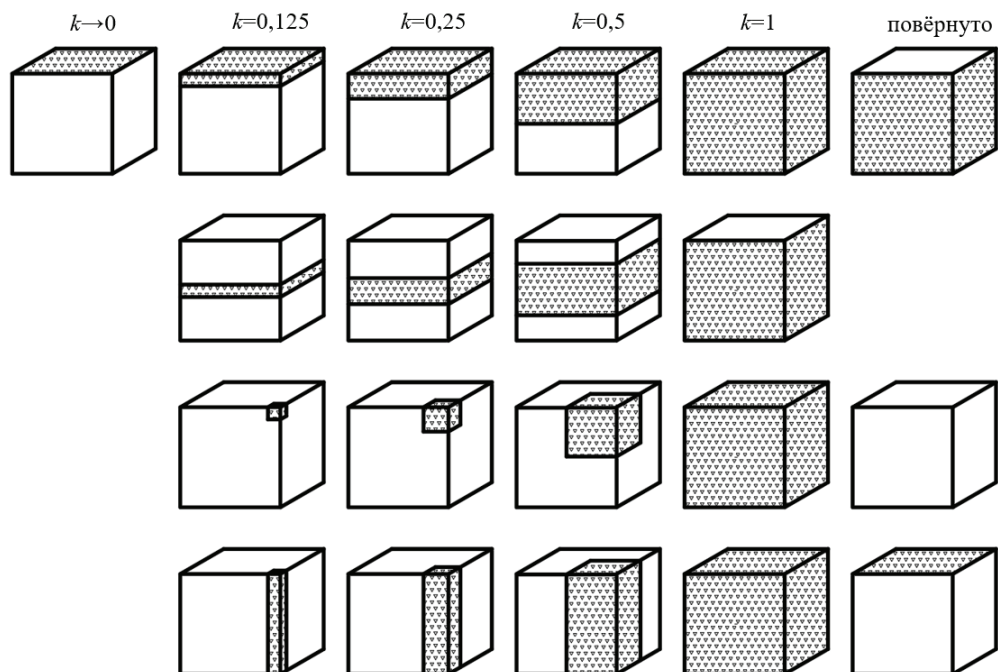


Рис. 2. Варианты видов моделей с различными  $k$   
 Fig. 2. Variants of model forms with different  $k$

проводили осмотр, вращая относительно вертикальной оси с шагом  $45^\circ$ . Для измерений третьей и четвёртой серий кусок поворачивали из первоначального положения относительно горизонтальной оси на  $180^\circ$  и  $270^\circ$  соответственно, с последующим измерением при вращении относительно вертикальной оси. Для каждого измерения было вычислено спектральное отношение  $H_{Cu}$ , выбранное в качестве оценки поверхностного содержания компонента.

В работе [29] были предложены формулы для вычисления поверхностного содержания компонента, а также объёмного содержания с учётом (массовая доля) и без учёта соотношения плотностей минеральной и породной фаз. Поверхностное и объёмное содержание рассчитаны исходя из геометрических размеров куска, при этом полагалось, что минеральный слой рас-

положен внутри тела, ограниченного гранями минерального слоя, выходящими на поверхность куска, а плотности минерального и породного слоёв одинаковы. В табл. 1 приведены расчётные формулы для изученных моделей минерализации, соотношение плотностей минеральной и породной фаз обозначено  $p = \rho_M/\rho_P$ .

### Результаты

Полученные результаты измерений были обработаны в табличном редакторе Excel с помощью функции «Анализ данных → Описательная статистика». Для каждого из вариантов моделей выявлены зафиксированные при измерении минимальное ( $H_{min}$ ) и максимальное ( $H_{max}$ ) значения спектрального отношения; рассчитаны среднее значение спектрального отношения  $H_{cp}$ , доверительный интервал при уровне надёжности 95% ( $\pm \Delta H_{cp}$ ),

среднее квадратическое отклонение (СКО) и коэффициент вариации ( $K_{\text{вар}}$ ) для этой величины, результаты приведены в табл. 2.

Таблица 1

Расчётные формулы для различных моделей минерализации  
Calculation formulas for various mineralization models

Модель	Содержание компонента, д. ед.		Массовая доля компонента, д. ед.
	поверхностное	объёмное	
1	$\alpha_s = \frac{a+4h}{6a} = \frac{1+4k}{6}$	$\alpha_v = \frac{h}{a} = k$	$\alpha_{\text{мас}} = \left(1 + \frac{a-h}{p \cdot h}\right)^{-1} = \left(1 + \frac{1-k}{p \cdot k}\right)^{-1}$
2	$\alpha_s = \frac{2h}{3a} = \frac{2k}{3}$	$\alpha_v = \frac{h}{a} = k$	$\alpha_{\text{мас}} = \left(1 + \frac{a-h}{p \cdot h}\right)^{-1} = \left(1 + \frac{1-k}{p \cdot k}\right)^{-1}$
3	$\alpha_s = \frac{h^2}{2a^2} = \frac{k^2}{2}$	$\alpha_v = \frac{h^3}{a^3} = k^3$	$\alpha_{\text{мас}} = \left(1 + \frac{a^3-h^3}{p \cdot h^3}\right)^{-1} = \left(1 + \frac{1-k^3}{p \cdot k^3}\right)^{-1}$
4	$\alpha_s = \frac{(h+a)h}{3a^2} = \frac{k+k^2}{3}$	$\alpha_v = \frac{h^2}{a^2} = k^2$	$\alpha_{\text{мас}} = \left(1 + \frac{a^3-ah^2}{p \cdot ah^2}\right)^{-1} = \left(1 + \frac{1-k^2}{p \cdot k^2}\right)^{-1}$
5	$\alpha_s=0$	$\alpha_v=0$	$\alpha_{\text{мас}}=0$
6	$\alpha_s=1$	$\alpha_v=1$	$\alpha_{\text{мас}}=1$

Таблица 2

Результаты статистической обработки НСu для различных видов моделей  
Results of statistical processing of НСu to different model forms

Модель	$k=h/a$	Спектральное отношение $H_{\text{Cu}}$ , усл. ед.			$\pm \Delta H_{\text{cp}}$ (95%)	СКО, усл. ед.	$K_{\text{вар}}$ , %
		$H_{\text{cp}}$	$H_{\text{min}}$	$H_{\text{max}}$			
1	$k \rightarrow 0$	0,1093	0,0193	0,7048	0,0667	0,1852	169,49
	0,125	0,1389	0,0210	0,7942	0,0758	0,2103	151,40
	0,25	0,1558	0,0214	0,7316	0,0753	0,2088	134,00
	0,5	0,3316	0,0351	0,7318	0,0883	0,2450	73,87
	1	0,6525	0,0757	0,8151	0,0745	0,2065	31,65
2	0,125	0,0631	0,0220	0,1342	0,0134	0,0371	58,82
	0,25	0,1399	0,0251	0,3685	0,0404	0,1121	80,11
	0,5	0,2425	0,0310	0,5619	0,0631	0,1750	72,17
	1	0,4495	0,0592	0,7688	0,0931	0,2583	57,46
3	0,125	0,0208	0,0156	0,0249	0,0008	0,0021	10,16
	0,25	0,0273	0,0164	0,0763	0,0043	0,0119	43,44
	0,5	0,0885	0,0171	0,4039	0,0380	0,1051	118,76
	1	0,3685	0,0437	0,7806	0,1065	0,2954	80,16
4	0,125	0,0397	0,0184	0,1705	0,0133	0,0369	92,95
	0,25	0,0598	0,0182	0,2800	0,0233	0,0646	107,97
	0,5	0,1748	0,0176	0,5791	0,0642	0,1783	102,01
	1	0,4681	0,0385	0,7789	0,1053	0,2922	62,41

Окончание табл. 2

Модель	$k=h/a$	Спектральное отношение $H_{cu}$ , усл. ед.			$\pm\Delta H_{cp}$ (95%)	СКО, усл. ед.	$K_{вар}$ , %
		$H_{cp}$	$H_{min}$	$H_{max}$			
5	$k=0$	0,0222	0,0178	0,0253	0,0007	0,0020	9,16
6	–	0,7921	0,7465	0,8626	0,01046	0,0290	3,66

Таблица 3

Результаты расчёта содержаний компонента в моделях

Table 3. Results of calculating component grades in models

Модель	$k = h/a$	Содержание компонента, д. ед.		Массовая доля, д. ед.	
		поверхностное	объёмное	$\rho_M/\rho_n=2/1$	$\rho_M/\rho_n=1/2$
1	$k \rightarrow 0$	0,1667	0,0000	0,0000	0,0000
	0,125	0,2500	0,1250	0,2222	0,0667
	0,25	0,3333	0,2500	0,4000	0,1429
	0,5	0,5000	0,5000	0,6667	0,3333
	1	0,8333	1,0000	1,0000	1,0000
2	0,125	0,0833	0,1250	0,2222	0,0667
	0,25	0,1667	0,2500	0,4000	0,1429
	0,5	0,3333	0,5000	0,6667	0,3333
	1	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000
3	0,125	0,0078	0,0020	0,0039	0,0010
	0,25	0,0313	0,0156	0,0308	0,0079
	0,5	0,1250	0,1250	0,2222	0,0667
	1	0,5000	1,0000	1,0000	1,0000
4	0,125	0,0469	0,0156	0,0308	0,0079
	0,25	0,1042	0,0625	0,1176	0,0323
	0,5	0,2500	0,2500	0,4000	0,1429
	1	0,6667	1,0000	1,0000	1,0000
5	–	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
6	$k=0$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

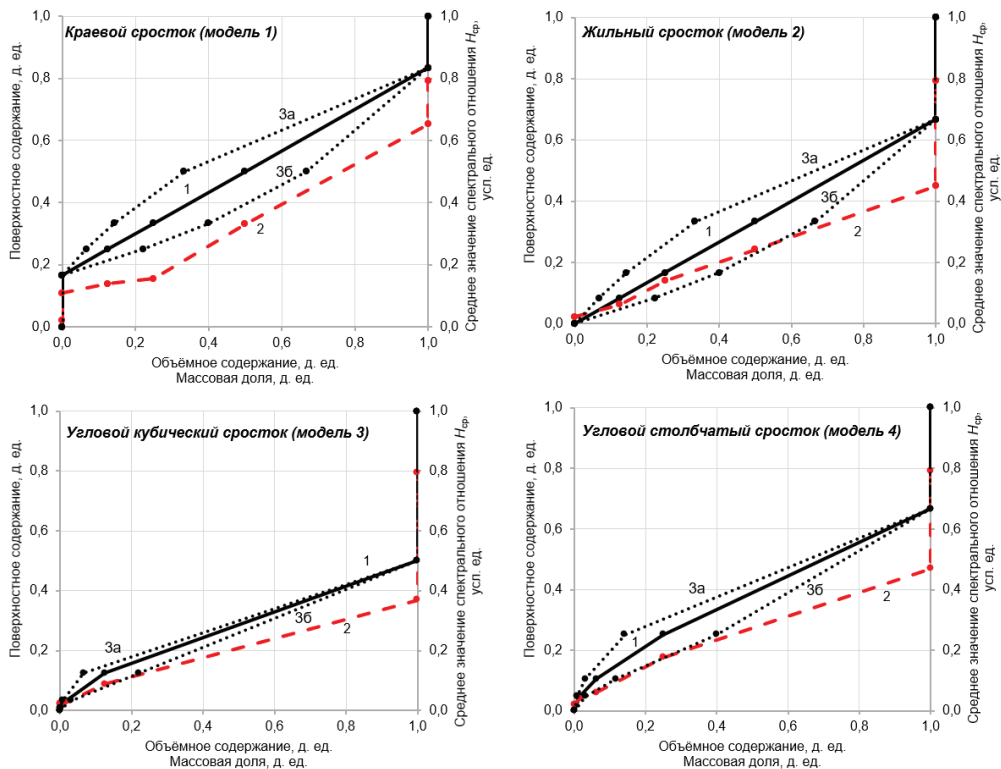
По формулам, приведённым в табл. 1, были рассчитаны поверхностное и объёмное содержание, а также массовая доля для всех измеренных моделей. Массовая доля рассчитана для двух соотношений плотностей минеральной и породной фаз  $\rho = \rho_M/\rho_n$ : 2:1 и 1:2. Результаты расчёта приведены в табл. 3.

На рис. 3 приведены зависимости оценки поверхностного содержания компонента от объёмного и массового содержания для моделей с разным видом минерализации.

### Обсуждение результатов

Как показали результаты статистической обработки для моделей 5 и 6, покрытых однородным слоем породной и минеральной фаз, колебания величины среднего значения спектрального отношения невелико, коэффициент вариации не превышает 10%. Этот факт позволяет предположить, что для кусков с равномерным распределением минеральных фаз по поверхности оценка поверхностного содержания по среднему значению спектрального отношения будет эффективной.





**Рис. 3. Зависимости поверхностного содержания (1) и среднего значения спектрального отношения (2) от объёмного содержания и массовой доли (3а, 3б): а –  $\rho_M/\rho_n=1/2$ ; б –  $\rho_M/\rho_n=2/1$**   
**Fig. 3. Dependences of the surface content (1) and the average value of the spectral ratio (2) on the volume content and mass content (3а, 3б): а –  $\rho_M/\rho_n=1/2$ ; б –  $\rho_M/\rho_n=2/1$**

Для моделей 1–4 коэффициент вариации более 30%, что свидетельствует о том, что для одной и той же модели при однократном измерении можно получить значения спектрального отношения, резко отличающиеся друг от друга. Особенно наглядно это видно по модели 1 при  $k \rightarrow 0$  (краевой сросток), где возможно получение от одного и того же куска, измеренного в разных положениях, как минимального, почти соответствующего величине от породного куска (модель 5), так и максимального, соответствующего величине от минерального куска (модель 6), спектрального отношения. Наличие бесконечно тонкого минерального слоя на одной из граней куска

( $k \rightarrow 0$ ) даёт появление краевого эффекта при оценке поверхностного содержания, который заключается в следующем: объёмное содержание компонента в таком куске, будет стремиться к нулю, тогда как поверхностное содержание всегда будет отличаться от нуля. Этот эффект выражается вертикальной линией в левой части зависимости поверхностного содержания от объёмного только для модели 1 (рис. 3, кривые 1 и 2, краевой сросток).

Поверхностное содержание для всех рассмотренных видов моделей 1–4 меньше 1, тогда как объёмное содержание и массовая доля может достигать 1, так как полагается, что грани, покрытые породным слоем для

моделей с  $k = 1$ , имеют толщину, стремящуюся к 0. Таким образом, можно наблюдать второй вариант краевого эффекта, выраженный вертикальной линией в правой части зависимости поверхностного содержания от объёмного (рис. 3, кривые 1 и 2 для всех вариантов моделей).

Вариант минерализации по модели 1 (краевой сросток) является самым неблагоприятным при разделении с использованием поверхностного содержания, так как существует вероятность неверной идентификации куска в зависимости от его положения относительно измерительной системы о чём свидетельствуют высокие значения коэффициента вариации для всех соотношений  $k$ .

Более благоприятным при разделении с использованием поверхностного содержания является вариант минерализации по модели 2 (жильный сросток), на это указывают наименьшие из всех рассмотренных вариантов колебания коэффициента вариации.

Для минерализации по модели 3 (угловой кубический сросток) при соотношении  $k \leq 0,125$  с большой вероятностью кусок будет идентифицироваться как породный, это связано с тем, что часть куска, занимаемая минеральным слоем, не будет попадать в зону осмотра, ограниченную размерами коллиматора.

Анализ зависимостей, приведённых на рис. 3, позволяет сделать следующие выводы: в целом, зависимости, построенные по результатам измерений спектрального отношения (2), повторяют зависимости поверхностного содержания от объёмного (1), для одних и тех же вариантов минерализации. Это указывает на то, что среднее значение спектрального отношения может применяться в качестве поверхностного признака разделения.

Учёт соотношения плотностей минеральной и породной фаз влияет на вид зависимости поверхностного содержания от объёмного, что раньше было показано на расчётных моделях по типу 1 и 2 в работе [29] и подтверждено для моделей 3 и 4.

### **Предложения по практическому применению**

Так как в современных рентгенофлуоресцентных сепараторах [2, 3, 4] в качестве признака разделения применяют спектральное отношение, то полученные результаты могут быть использованы при уточнении конструкций и алгоритмов функционирования сепараторов.

### **Направление будущих исследований**

Представленные результаты получены при статическом режиме измерения аналитического параметра разных видов моделей, тогда как при режиме сортировки измерение параметра происходит в динамике. В дальнейшем необходимо изучить как влияет вид минерализации на измерение аналитического параметра в динамическом режиме разделения.

В дополнительном изучении нуждается вопрос о том, как влияет полнота осмотра поверхности кусков сортируемого материала, так как, например, при варианте одностороннего осмотра, для кусков с  $k = 1$  существует явление краевого эффекта, приводящее к тому, что такие куски могут быть неверно идентифицированы, что может сказаться на показателях разделения при использовании рентгенофлуоресцентной сепарации в качестве метода предварительного обогащения. Для других видов модели полнота осмотра также будет влиять на потенциальные показатели разделения.

Полученные на искусственных образцах результаты нуждаются в про-

верке на имеющих неправильную форму реальных кусках рудного материала, с целью применимости к различным рудам с преобладанием того или иного вида минерализации.

### **Заключение**

Исследованиями показано, что использование рентгенофлуоресцентного метода для оценки содержания компонента может быть эффективным для всех видов минерализации за исключением случая скрытой минерализации. Оценка по поверхностному содержа-

нию с применением в качестве признака разделения спектрального отношения может быть коррелирована с объёмным содержанием, а, при использовании соотношения плотностей минеральной и породной фаз, — с массовой долей компонента. На искусственных моделях с разными видами минерализации экспериментально подтверждено наличие краевого эффекта, которое может негативно сказаться на показателях разделения при использовании рентгенофлуоресцентной сепарации в качестве метода предварительного обогащения.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Цыпин Е. Ф.* Предварительное обогащение // Известия вузов. Горный журнал. 2001. №4–5. С. 82–104.
2. *Цыпин Е. Ф.* Обогащение в стадиях рудоподготовки. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. — 303 с.
3. *Фёдоров Ю. О., Кацер И. У., Корнев О. В., Короткевич В. А., Цой В. П., Ковалев П. И., Фёдоров М. Ю., Поповский Н. С.* Опыт и практика рентгенорадиометрической сепарации руд // Известия вузов. Горный журнал. 2005. № 5. С. 21–37.
4. *Терещенко С. В., Шибаева Д. Н.* Повышение качественных показателей рудопотока с использованием методов предконцентрации: теория и практика // Горный журнал. 2020. № 9. С. 60–65. DOI 10.17580/gzh.2020.09.08.
5. *Цыпин Е. Ф., Овчинникова Т. Ю., Ефремова Т. А.* Эффективность применения рентгенофлуоресцентной сепарации для предварительной концентрации руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3–1. — С. 431–442. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-431-442.
6. *Максимов И. И.* XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых (часть 1) // Обогащение руд. 2015. № 3. — С. 3–11. DOI: 10.17580/or.2015.03.01.
7. *Максимов И. И., Баранов В. Ф., Богданович А. В., Кибирев В. И.* XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых (часть 2) // Обогащение руд. 2015. № 6. — С. 50–58. DOI: 10.17580/or.2015.06.10.
8. *Gleeson D.* Preceding processing // International Mining. March, 2019. — pp. 82–87.
9. *Robben C., Wotruba H.* Sensor-based ore sorting technology in mining — Past, present and future // Minerals. 2019. Vol. 9, Iss. 9. DOI: 10.3390/min9090523.
10. *Wotruba H., Robben C.* Sensor-based ore sorting in 2020 at — Automatisierungstechnik, vol. 68, no. 4, 2020, pp. 231–238. <https://doi.org/10.1515/auto-2019-0060>.
11. *Kolacz J.* New high definition X-ray sorting system based on X-MINE detection technology // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 641. Iss. 1, 19 November 2019. DOI 10.1088/1757-899X/641/1/012028.
12. *Veras M., Young A., Sampaio C., Petter C.* A mining breakthrough: Preconcentration by sensor-based sorting // Mining Engineering, Vol. 68, Iss. 3, March 2016, Pp. 38–42.
13. *Sotoudeh F., Nehring M., Kizil M. S., Knights P.* Integrated underground mining and pre-concentration systems; a critical review of technical concepts and developments // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2020. Vol. 35, Iss. 3. Pp. 153–182. DOI 10.1080/17480930.2020.1782573.

14. *Burdakova E. A., Bragin V. I., Usmanova N. F., Vashlaev A. O., D'yachenko L. E., Lesnikova L. S., Fertikov A. I.* Radiometric separation in grinding circuit of copper–nickel ore processing, *Journal of Mining Science*. 2019, Vol. 55. Iss. 5. Pp. 824–831, DOI 10.1134/S1062739119056197.

15. *Рассулов В. А., Нерущенко Е. В.* Лазерно-фотометрическая кусковая сепарация золотосодержащей руды // *Обогащение руд*. 2020. № 5. С. 16–22. DOI: 10.17580/ог.2020.05.03.

16. *Заболоцкий А. И., Нерущенко Е. В., Рассулов В. А.* Результаты исследования применимости методов предварительного обогащения золотосодержащих руд на месторождениях Highland Gold // *Рациональное освоение недр*. 2020. № 4. С. 64–70. DOI: 10.26121/RON.2020.57.68.008.

17. *Tsyplin E. F., Entaltsev E. V., Shemyakin V. S., Skopov S. V., Fedorov Y. O., Pestov V. V.* Enrichment by X-ray radiometric separation // *Steel in translation*. 2009. №6. pp. 521–524.

18. *Rapolti L., Rodica H., Grindei L., Grindei L., Purcar M., Dragan F., Copîndean R., Reman R.* Experimental stand for sorting components dismantled from printed circuit boards // *Minerals*. Vol. 11, Iss.11 November 2021. DOI 10.3390/min1111292.

19. *Sampaio C. H., Sampaio C. H., Ambrós W. M., Cazacliu B. G., Moncunill J. O., Veras M. M., Miltzarek G. L., Silva L. F. O., Kuerten A. S., Liendo M. A.* Construction and demolition waste recycling through conventional jig, air jig, and sensor-based sorting: A comparison // *Minerals*. Vol. 11, Iss. 8 August 2021. DOI 10.3390/min11080904.

20. *Татарников А. П., Асонова Н. И., Балакина И. Г., Наумов М. Е., Коновалов Г. Н., Воеводин И. В.* Современные технологии и оборудование для радиометрического обогащения урановых руд // *Горный журнал*. 2007. № 2. С. 85–87.

21. *Рябкин В. К., Литвинцев Э. Г., Тихвинский А. В., Корпенко И. А., Пичугин А. Н., Кобзев А. С.* Полихромная фотометрическая сепарация золотосодержащих руд // *Горный журнал*. 2007. № 12. С. 88–92.

22. *Яковлев В. Н., Макалин И. А., Иванов А. В.* Повышение извлечения алмазов и селективности процесса рентгенолюминесцентной сепарации при обогащении алмазосодержащих руд // *Горное оборудование и электромеханика*. 2009. № 6. — С. 50–53.

23. *Robben C., Condori P., Pinto A., Machaca R., Takala A.* X-ray-transmission based ore sorting at the San Rafael tin mine // *Minerals Engineering*. Vol. 145. 1 January 2020. DOI 10.1016/j.mineng.2019.105870.

24. *Li G., Klein B., Sun C., Kou J.* Investigation on influential factors of bulk ore sortability based on fractal modelling. *Minerals Engineering*. Vol. 177. February 2022. DOI 10.1016/j.mineng.2021.107362.

25. *Li G., Klein B., He C., Yan Z., Sun C., Kou J.* Development of a bulk ore sorting model for ore sortability assessment — Part II: Model validation and optimization // *Minerals Engineering*. Vol. 172. 1 October 2021. DOI 10.1016/j.mineng.2021.107143.

26. *Li G., Klein B., Sun C., Kou J.* Lab-scale error analysis on X-ray fluorescence sensing for bulk ore sorting // *Minerals Engineering*. Vol. 164. 1 April 2021. DOI 10.1016/j.mineng.2021.106812.

27. *Li G., Klein B., Sun C., Kou J.* Applying Receiver-Operating-Characteristic (ROC) to bulk ore sorting using XRF // *Minerals Engineering*. Vol. 146. 15 January 2020. DOI 10.1016/j.mineng.2019.106130.

28. *Цыпин Е. Ф., Аринов К. Н., Овчинникова Т. Ю.* Фракционные характеристики сырья при поверхностных способах получения информации // *Известия вузов. Горный журнал*. 2011. № 4. — С. 87–92.

29. *Овчинникова Т. Ю., Ефремова Т. А., Цыпин Е. Ф.* О нижних границах классов крупности при предварительном обогащении руды с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации // *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2021, №11–1. — С. 328–337. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_111\_0\_328. **МАБ**

## REFERENCES

1. Tsy-pin E. F. Preliminary concentration. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Gornyi Zhurnal*. 2001.no. 4–5. pp. 82–104. [In Russ]
2. Tsy-pin E. F. Mineral dressing in ore processing stages. Ekaterinburg, UGGU, 2015. 303 p. [In Russ]
3. Fedorov Yu. O., Katser I. U., Korenev O. V., Korotkevich V. A., Tsoy V. P., Kovalev P. I., Fedorov M. Yu., Popovskiy N. S. Experience and practice of X-ray radiometric separation of ores. Proceedings of higher schools. *Gornyi Zhurnal [Mining Journal]*, 2005, no. 5, pp. 21–37. [In Russ]
4. Tereshchenko S. V., Shibaeva D. N. Ore quality improvement by pre-concentration: Theory and practice. *Gornyi Zhurnal [Mining Journal]*, 2020. no. 9. pp. 60–65. [In Russ] DOI 10.17580/gzh.2020.09.08.
5. Tsy-pin E. F., Ovchinnikova T. Yu., Efremova T. A. Efficiency of X-ray radiometric separation in preliminary concentration of ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3–1):431–442. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-431-442.
6. Maksimov I. I. The XXVII International Congress on Mineral Dressing (Part 1). *Obogashcheniye Rud [Mineral Dressing]*, 2015, no. 3, pp. 3–11. DOI: 10.17580/or.2015.03.01. [In Russ]
7. Maksimov I. I. Baranov V. F., Bogdanovich A. V., Kibirev V. I. The XXVII International Congress on Mineral Dressing (Part 2), *Obogashcheniye Rud [Mineral Dressing]*, 2015, no. 6, pp. 50–58. DOI: 10.17580/or.2015.06.10. [In Russ]
8. Gleeson D. Preceding processing. *International Mining*. March, 2019. pp. 82–87.
9. Robben C., Wotruba H. Sensor-based ore sorting technology in mining Past, present and future. *Minerals*. 2019. Vol. 9, Iss. 9. DOI: 10.3390/min9090523.
10. Wotruba H., Robben C. Sensor-based ore sorting in 2020 at *Automatisierungstechnik*, vol. 68, no. 4, 2020, pp. 231–238. <https://doi.org/10.1515/auto-2019-0060>.
11. Kolacz J. New high definition X-ray sorting system based on X-MINE detection technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 641. Iss. 1, 19 November 2019. DOI 10.1088/1757-899X/641/1/012028.
12. Veras M., Young A., Sampaio C., Petter C. A mining breakthrough: Preconcentration by sensor-based sorting. *Mining Engineering*, Vol. 68, Iss. 3, March 2016, pp. 38–42.
13. Sotoudeh F., Nehring M., Kizil M. S., Knights P. Integrated underground mining and pre-concentration systems; a critical review of technical concepts and developments. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2020. Vol. 35, Iss. 3. pp. 153–182. DOI 10.1080/17480930.2020.1782573.
14. Burdakova E. A., Bragin V. I., Usmanova N. F., Vashlaev A. O., D'yachenko L. E., Lesnikova L. S., Fertikov A. I. Radiometric separation in grinding circuit of copper–nickel ore processing, *Journal of Mining Science*. 2019, Vol. 55. Iss. 5. pp. 824–831, DOI 10.1134/S1062739119056197.
15. Rassulov V. A., Nerushchenko E. V. Laser-photometric lump separation of gold-bearing ore. *Obogashcheniye Rud [Mineral Dressing]*, 2020. no. 5. pp. 16–22. [In Russ] DOI: 10.17580/or.2020.05.03.
16. Zabolotsky A. I., Nerushchenko E. V., Results of research on the applicability of pre-enrichment methods for gold ores from Highland Gold mining ltd deposits. *Ratsional'noye osvoyeniye nedr [Rational development of subsoil]* 2020. no. 4, pp. 64–70. [In Russ] DOI: DOI: 10.26121/RON.2020.57.68.008.
17. Tsy-pin E. F., Entaltsev E. V., Shemyakin V. S., Skopov S. V., Fedorov Y. O., Pestov V. V. Enrichment by X-ray radiometric separation. *Steel in translation*. 2009. no. 6. P. 521–524.

18. Rapolti L., Rodica H., Grindei L., Grindei L., Purcar M., Dragan F., Copîndean R., Reman R. Experimental stand for sorting components dismantled from printed circuit boards. *Minerals*. Vol. 11, Iss.11 November 2021. DOI 10.3390/min11111292.
19. Sampaio C. H., Sampaio C. H., Ambrós W. M., Cazacliu B. G., Moncunill J. O., Veras M. M., Miltzarek G. L., Silva L. F. O., Kuerten A. S., Liendo M.A. Construction and demolition waste recycling through conventional jig, air jig, and sensor-based sorting: A comparison. *Minerals*. Vol. 11, Iss. 8 August 2021. DOI 10.3390/min11080904
20. Tatarnikov A. P., Asonova N. I., Balkina I. G., Naumov M. E., Konovalov G. N., Voevodin I. V. Modern technologies and equipment for radiometric concentration of uranium ores. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], 2007, no. 2, pp. 85–87. [In Russ]
21. Ryabkin V. K., Litvintsev E. G., Tikhvinskii A. V., Korpenko I. A., Pichugin A. N., Kobzev A. S. Polychrome photometric separation of gold bearing ores. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], 2007, no. 12. pp. 88–92. [In Russ].
22. Yakovlev V. N., Makalin I. A., Ivanov F. V. Improvement of diamond recovery and selectivity of the X-ray luminescence separation in the course of processing diamond bearing ores. *Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika* [Mining equipment and electrical engineering], 2009, no. 6. pp. 50–53. [In Russ]
23. Robben C., Condori P., Pinto A., Machaca R., Takala A. X-ray-transmission based ore sorting at the San Rafael tin mine. *Minerals Engineering*. Vol. 145 1 January 2020. DOI 10.1016/j.mineng.2019.105870.
24. Li G., Klein B., Sun C., Kou J. Investigation on influential factors of bulk ore sortability based on fractal modelling. *Minerals Engineering*. Vol. 177. February 2022. DOI 10.1016/j.mineng.2021.107362.
25. Li G., Klein B., He C., Yan Z., Sun C., Kou J. Development of a bulk ore sorting model for ore sortability assessment Part II: Model validation and optimization. *Minerals Engineering*. Vol. 172. 1 October 2021. DOI 10.1016/j.mineng.2021.107143.
26. Li G., Klein B., Sun C., Kou J. Lab-scale error analysis on X-ray fluorescence sensing for bulk ore sorting. *Minerals Engineering*. Vol. 164. 1 April 2021. DOI 10.1016/j.mineng.2021.106812.
27. Li G., Klein B., Sun C., Kou J. Applying Receiver-Operating-Characteristic (ROC) to bulk ore sorting using XRF. *Minerals Engineering*. Vol. 146. 15 January 2020. DOI 10.1016/j.mineng.2019.106130.
28. Tsypin E. F., Arinov K. N., Ovchinnikova T. Yu., Fractional characteristics of raw materials with surface methods of obtaining information. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Gornyi Zhurnal*. 2011. no. 4. pp. 87–92. [In Russ].
29. Ovchinnikova T. Yu., Efremova T. A., Tsypin E. F. Lower size grade limits in ore pretreatment using X-ray fluorescent separation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11–1):328– 337. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_111\_0\_328.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Овчинникова Татьяна Юрьевна* — кандидат техн. наук, доцент, доцент,  
<https://orcid.org/0000-0001-7000-9295>,  
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (УГГУ), 620144,  
ГСП-126, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Россия,  
e-mail: [tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru](mailto:tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru);  
*Цыпин Евгений Федорович* — докт. техн. наук, профессор,  
<https://orcid.org/0000-0003-3921-2695>,

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (УГГУ), 620144, ГСП-126, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Россия, e-mail: tsipin.e@mail.ru;

*Ефремова Татьяна Александровна* – научный сотрудник лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья, отдел обогащения, <https://orcid.org/0000-0002-9917-6676>,

АО «Уралмеханобр», 620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87, Россия, e-mail: efremova\_ta@umbr.ru

*Аринов Кайрат Нурғалиевич* – аспирант, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (УГГУ), 620144, ГСП-126, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Россия.

**Для контактов:** *Овчинникова Татьяна Юрьевна*, e-mail: tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Ovchinnikova T. Yu.*, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mineral Dressing Department,

ORCID iD 0000-0001-7000-9295,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Mining University”, 30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, Russia, 620144,

tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru;

*Tsypin E. F.*, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Mineral Dressing Department,

ORCID iD 0000-0003-3921-2695,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Mining University”, 30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, Russia, 620144,

tsipin.e@mail.ru;

*Efremova T. A.*, Researcher of the Laboratory of Mineral Dressing of Non-ferrous Metal Ores and Technogenic Raw Materials, Mineral Dressing Department of JSC “Uralmekhanobr”, 87 Khokhryakova str., Yekaterinburg, Russia, 620144,

efremova\_ta@umbr.ru;

*Arinov K. N.*, Graduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Mining University”, 30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, Russia, 620144.

Получена редакцией 16.06.2022; получена после рецензии 14.09.2022; принята к печати 10.10.2022.

Received by the editors 16.06.2022; received after the review 14.09.2022; accepted for printing 10.10.2022.

