Экономическая эффективность предварительной концентрации с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации

Цыпин Е. Ф.¹, Ефремова Т. А.², Овчинникова Т. Ю.^{1*}

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

² Научно-исследовательский и проектный институт «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru

Реферат

Введение. Прогрессивным направлением совершенствования технологий переработки минерального сырья является сочетание предварительной концентрации и глубокого обогащения. Для этого с высокой эффективностью используется рентгенофлуоресцентная сепарация (РФС). Особенностью технологии является наличие операций дробления, грохочения исходной горной массы на машинные и несортируемый классы, сепарации в машинных классах. От качества выполнения операций формирования гранулометрического состава зависит эффективность использования комплекса предварительной концентрации.

Методика. Оценена рентгенорадиометрическая обогатимость проб полиметаллической руды, выбраны схемы и оборудование для предварительной концентрации с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации горной массы с различным гранулометрическим составом, выполнены технико-экономические расчеты.

Результаты. Определены экономические показатели применения рентгенофлуоресцентной сепарации для предварительной концентрации полиметаллической руды различного гранулометрического состава. Показаны возможности значительного повышения экономического эффекта за счет формирования гранулометрического состава обогащаемой горной массы.

Выводы. Применение рентгенофлуоресцентной сепарации для предварительной концентрации полиметаллической руды является высокоэффективным. Оптимизация гранулометрического состава взорванной горной массы за счет специальной организации буровзрывных работ и подбора режимов дробления и грохочения приводит к повышению экономического эффекта от применения РФС в 2,1–2,7 раза.

Ключевые слова: предварительная концентрация; рентгенофлуоресцентная сепарация; рудосортировочный комплекс; полиметаллическая руда; гранулометрический состав; экономический эффект.

Введение. Одним из прогрессивных путей совершенствования технологий переработки различных видов минерального сырья является применение предварительной концентрации в стадиях рудоподготовки [1] как в России [1, 2], так и за рубежом [3–6].

Особое место среди методов, используемых для предварительной концентрации, занимает группа информационных методов. Среди них наибольшее распространение получили: радиометрический (авторадиометрический) для предварительного обогащения урановых руд [7]; оптические (фотометрические) в видимой и инфракрасной областях спектра для сортировки золотосодержащих руд [8], неметаллических видов минерального сырья, угля [9], окисленных медных руд [10]; рентгенолюминесцентные для обогащения алмазов [1]; рентгеноабсорбционные для предварительного обогащения железных руд и угля [11, 12].

Широкое распространение благодаря универсальности получили рентгенофлуоресцентные (рентгенорадиометрические) методы [13]. Они нашли промышленное применение или успешно испытаны при предварительном обогащении урановых [14, 15], золотосодержащих [16], свинцово-цинковых [17], медных и медно-цинковых [1, 18] руд, а также руд черных металлов и других видов минерального сырья [1].

Предварительная концентрация осуществляется на рудосортировочных комплексах (РСК), использующих помимо сепарации операции дробления и грохочения. На технологическую эффективность работы РСК влияет ряд факторов [19], среди которых одним из важнейших является качество подготовки руды к сепарации, которое определяется формированием гранулометрической характеристики руды после дробления [20], а также числом и границами крупности машинных классов [21]. Надо заметить, что следует стремиться к гранулометрической характеристике дробленной руды с максимальным размером куска, равным допустимому максимальному размеру куска для использования сепараторов, минимальным выходом несортируемого класса ($-30(-20)+0$ мм) и преобладанием крупных классов. Формирование гранулометрической характеристики осуществляется в две стадии и достигается сочетанием должной организации буровзрывных работ (БВР), минимизации выхода мелочи, что возможно при использовании специальных режимов взрывания [22], и подбора для конкретных условий режимов дробления и грохочения в РСК.

Если технологическая эффективность от формирования гранулометрической характеристики уже оценивалась в упомянутых работах, то экономическая эффективность требует оценки.

Целью исследования является оценка экономической эффективности применения рудосортировочного комплекса на базе рентгенофлуоресцентных сепараторов для предварительной концентрации полиметаллических руд.

Методика. Исследования выполнены на основе использования результатов изучения рентгенорадиометрической обогатимости проб полиметаллической руды, отличающихся гранулометрическими характеристиками, включают выбор схемы и оборудования для РСК, а также технико-экономические расчеты.

Полученные результаты. Предварительная концентрация при переработке минерального сырья позволяет снизить затраты на обогащение в целом. Специфические условия, схемы, режимы добычи и переработки различного сырья определяют уровень и характер снижения затрат.

Сопоставляя варианты технологий обогащения по традиционной схеме переработки и схеме с предварительной концентрацией (рис. 1), предполагая, что (для простоты) учитывается снижение затрат на переработку в целом (РСК и обогатительная фабрика) и требуются дополнительные капитальные вложения для создания рудосортировочного комплекса, можно оценить экономическую эффективность от изменения технологии.

Анализ выполнен на примере переработки полиметаллической руды в объеме 1500 тыс. т/год при условии, что рудник и располагающийся в непосредственной близости от него РСК удалены от обогатительной фабрики на 70 км.

Для определения экономического эффекта внедрения в схему обогащения полиметаллической руды рентгенорадиометрической сепарации (РПС) произведен ориентировочный расчет капитальных и эксплуатационных затрат, выполненный для трех проб полиметаллической руды с исходными (реальными) гранулометрическими характеристиками (табл. 1) по технологическим показателям, представленным в табл. 2.

Рассмотрены потенциальные технологические показатели работы РСК, полученные по результатам экспериментального исследования рентгенорадиометри-

Рис. 1. Движение продуктов горно-обогатительного комплекса при удаленном расположении месторождения от обогатительной фабрики:

a – без предварительной концентрации; *б* – с предварительной концентрацией в рудосортировочном комплексе (РСК)

Fig. 1. Travel of mining and processing complex products in case of deposit's remoteness from the processing plant:

a – without preconcentration; *б* – with preconcentration in an ore sorting complex (OSC)

ческой обогатимости отобранных на предприятии трех проб руды, отличающихся друг от друга содержанием ценных компонентов и гранулометрическими характеристиками (табл. 1, 2). Кроме того, при технико-экономических расчетах

Таблица 1. Гранулометрические характеристики проб полиметаллической руды
Table 1. Granulometric characteristics of polymetallic ore samples

Класс крупности, мм	Выход, %			
	проба № 1	проба № 2	проба № 3	при типовой гранулометрической характеристике
+120	8,55	5,11	4,57	44,00
–120+60	15,00	22,14	17,01	32,00
–60+30	28,19	18,88	16,68	12,00
–30+0	48,26	53,87	61,74	12,00
Исходная проба:	100	100	100	100

(табл. 3, 4) в сравнение включены гипотетические варианты руды с аналогичными пробам № 1, 2, 3 параметрами в предположении, что в каждом случае гранулометрическая характеристика подаваемой на сепарацию руды соответствует типовой гранулометрической характеристике при дроблении руды средней крепости

Таблица 2. Результаты рентгенорадиометрической сепарации трех проб полиметаллической руды
Table 2. Results of X-ray radiometric separation of three samples of polymetallic ore

Продукт	Выход, %		Массовая доля, %			Извлечение, %		
	к питанию PPC	к исходной руде	медь	свинец	цинк	медь	свинец	цинк
<i>Проба № 1</i>								
Концентрат PPC	77,73	40,22	0,386	2,49	7,94	48,52	61,82	54,59
Хвосты PPC	22,27	11,52	0,0474	0,049	0,475	1,71	0,35	0,94
Несортируемый класс	–	48,26	0,33	1,27	5,39	49,77	37,83	44,47
Итого:	100,00	100,00	0,32	1,62	5,85	100,00	100,00	100,00
<i>Проба № 2</i>								
Концентрат PPC	61,31	28,28	0,623	2,654	8,43	45,18	65,27	57,31
Хвосты PPC	38,69	17,85	0,051	0,034	0,23	2,33	0,53	0,99
Несортируемый класс	–	53,87	0,38	0,73	3,22	52,49	34,20	41,70
Итого:	100,00	100,00	0,39	1,15	4,16	100,00	100,00	100,00
<i>Проба № 3</i>								
Концентрат PPC	49,42	18,91	1,00	1,43	8,65	36,37	53,02	55,64
Хвосты PPC	50,58	19,35	0,083	0,026	0,231	3,08	0,98	1,52
Несортируемый класс	–	61,74	0,51	0,38	2,04	60,55	46,00	42,84
Итого:	100,00	100,00	0,52	0,51	2,94	100,00	100,00	100,00

(что соответствует физико-механическим свойствам руды проб № 1, 2, 3) в щековой дробилке с максимальным размером куска в дробленой руде 300 мм (табл. 1).

По данным табл. 1, в различных сопоставляемых вариантах гранулометрических характеристик руды выход сортируемого класса (+30 мм) меняется в преде-

лах от 38,26 до 88,00 %. Качество продуктов рентгенофлуоресцентной сепарации (РФС) и потери основных ценных компонентов с хвостами РСК всех трех проб различаются незначительно (табл. 2).

Для оценки влияния гранулометрического состава на экономический эффект выполнены расчеты по данным табл. 2 – выходам хвостов относительно питания РРС, но для гранулометрического состава, полученного по типовой гранулометрической характеристике, что соответствует типовому гранулометрическому составу горной массы после первой стадии дробления.

Таблица 3. Выбор и определение стоимости основного оборудования для различных вариантов гранулометрических характеристик

Table 3. Selection and evaluation of the main equipment for different variants of granulometric characteristics

Наименование оборудования	Количество, шт.				Цена ед. оборудования, млн р.	Общая стоимость, млн р.			
	проба № 1	проба № 2	проба № 3	по типовой ГХ		проба № 1	проба № 2	проба № 3	по типовой ГХ
Сепаратор СРФ	17	13	13	18	15,50	263,50	201,50	201,50	279,00
Прочее основное оборудование (грохот ГИТ-43, конвейеры, питатель пластинчатый)	12	12	12	12	—	35,01	35,01	35,01	35,01
Аспирационно-вентиляционное оборудование	—	—	—	—	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15
<i>Итого основное оборудование</i>	29	25	25	30	—	301,66	239,66	239,66	317,16

Экономическая эффективность оценена исходя из ожидаемого снижения затрат на транспортировку руды и снижения затрат на переработку руды на обогащательной фабрике благодаря уменьшению объема перерабатываемой руды, вызванному удалением отвальных кусковых хвостов в РСК. По данным фабрики, себестоимость глубокого обогащения одной тонны руды, связанная с затратами на энергоемкие процессы дробления, измельчения, обогащения, обезвоживания, а также на реагенты и материалы, составляет 1222,5 р.

Ожидаемые капитальные затраты оценены на основании выбранного основного оборудования (табл. 3).

Затраты на строительно-монтажные и проектно-изыскательские работы, непредвиденные расходы, затраты на текущий расход и обслуживание взяты в процентном соотношении от стоимости основного оборудования. Учтены также амортизационные расходы, затраты на электроэнергию, на охрану труда, рассчитан годовой фонд заработной платы сотрудников рудосортировочного комплекса.

Далее представлены данные по расчету экономического эффекта от применения РРС для пробы № 1 полиметаллической руды с исходной (реальной) гранулометрической характеристикой. В расчетах принято, что годовой фонд рабочего времени – 6600 ч при добыче 1500 000 т/год (ВМТ) и 1440 000 т/год (СМТ), выход сортируемых классов крупности – 51,74 %. При этом выход хвостов сепарации РСК относительно исходной руды составляет 11,52 %, что по ВМТ составляет 172 800 т/год и используется далее при расчете снижения затрат на перевозку рудной массы на обогащательную фабрику, а по СМТ – 165 888 т/год, что далее используется при расчете снижения объема руды, перерабатываемой на обогащательной фабрике.

Снижение затрат на перевозку рудной массы на расстояние 70 км за счет выделения кусковых хвостов в РСК при цене 210 р./т составит 36,29 млн р./год,

а снижение объема перерабатываемой рудной массы на обогатительной фабрике по той же причине при затратах на переработку 1222,5 р./т приведет к снижению затрат на переработку на обогатительной фабрике на 202,8 млн р./год. При этом суммарное снижение затрат составит 239,09 млн р./год.

При условии, что дополнительные суммарные капитальные затраты при использовании РСК на основное оборудование, строительно-монтажные работы, проектно-изыскательские работы, непредвиденные расходы составят 597,30 млн р., а дополнительные эксплуатационные расходы с учетом затрат на оплату труда с отчислениями, амортизационных расходов, затрат на обслуживание и текущий ремонт, электроэнергию, охрану труда и вывоз кусковых хвостов сепарации в отвал (12 р./т) составят 136,22 млн р./год, годовой экономический эффект от применения РФС для предварительной концентрации руды при обогащении полиметаллической руды, аналогичной руде пробы № 1, равен 102,87 млн р.

Таблица 4. Сравнение основных показателей
Table 4. Comparison of key indicators

Показатель	Проба № 1		Проба № 2		Проба № 3	
	ИГХ	ТГХ	ИГХ	ТГХ	ИГХ	ТГХ
Выход машинных классов крупности, %	51,74	88,00	46,13	88,00	38,26	88,00
Выход хвостов сепарации относительно машинных классов, %	22,27		38,69		50,58	
Выход хвостов сепарации относительно исходной руды, %	11,52	19,60	17,85	34,05	19,35	44,51
Ожидаемое снижение затрат, млн р.	239,09	406,78	370,46	706,68	401,59	923,76
Капитальные затраты, млн р.	597,30	627,99	474,54	627,99	474,54	627,99
Общие эксплуатационные затраты, млн р.	136,22	143,66	114,15	146,26	114,42	148,15
Экономический эффект на производительность участка РРС 1500 тыс. т/год, млн р.	102,87	263,12	256,31	560,42	287,17	775,61
Себестоимость переработки исходной полиметаллической руды в РСК в количестве 1500 тыс. т в год в пересчете на одну тонну, р.	90,81	95,78	76,10	97,51	76,28	98,76
Себестоимость переработки на одну тонну обогащенного продукта в РСК, р.	102,63	119,12	92,64	147,85	94,58	177,99

По аналогии рассчитаны основные показатели для двух других проб, как для исходных гранулометрических характеристик, так и для типовых (при условии переработки руды, аналогичной по составу пробам № 1, 2, 3).

В табл. 4 представлены основные экономические показатели применения РРС трех проб полиметаллической руды, рассчитанные по исходным (ИГХ) и типовой (ТГХ) гранулометрическим характеристикам.

Анализ результатов. Себестоимость переработки одной тонны исходной полиметаллической руды при рентгенорадиометрической сепарации составит примерно 76–99 р./т.

При этом экономический эффект от внедрения РРС руды с реальным гранулометрическим составом составит 103–288 млн р./год в зависимости от состава руды, что иллюстрируется рассчитанными показателями для изученных проб.

Увеличение выхода машинных (сортируемых) классов до 88 % в предположении, что гранулометрическая характеристика дробленной руды совпадает с типо-

вой гранулометрической характеристикой дробленной руды средней крепости в щековой дробилке, позволяет при прочих равных условиях увеличить экономический эффект в 2,1–2,7 раза.

Выводы. Таким образом, применение предварительной концентрации с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации для обогащения полиметаллической руды является экономически оправданным. Оптимизация гранулометрического состава взорванной горной массы и должной организации схемы и режимов подготовки руды к последующей сепарации приведет к значительному повышению экономического эффекта от применения РРС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бочаров В. А., Игнаткина В. А. Технология обогащения полезных ископаемых. Т. 1. М.: Руда и металлы, 2007. 472 с.
2. Абрамов А. А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. Т. II. Технология обогащения полезных ископаемых. М.: МГУ, 2004. 510 с.
3. Максимов И. И. XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых (часть 1) // Обогащение руд. 2015. № 3. С. 3–11.
4. Максимов И. И. XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых (часть 2) // Обогащение руд. 2015. № 6. С. 50–58.
5. Gleeson D. Preceding processing // International Mining. March, 2019. P. 82–87.
6. Härkki K. Overcoming sustainability challenges of future concentrator plants. Proceedings of the XXVII International Mineral Congress. Santiago, Chile, 2014. Chapter 1. Plenary Presentations. P. 2–22.
7. 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.
8. 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.
9. King H. G., Balint A. The mechanized optical separation of minerals // Quarry Managers Journal. 1969. Vol. 53. No. 10. P. 383–388.
10. Shekwonyadu Iyakwari, Hylke J. Glass, Gavyn K. Rollinson, Przemyslaw B. Kowalczyk. Application of near infrared sensors to preconcentration of hydrothermally-formed copper ore // Minerals Engineering. 2016. Vol. 85. January 2016. P. 148–167.
11. Вальщиков А. В., Литвиненко А. П., Делер М. Проект освоения Усинского месторождения марганца. Технология обогащения руды // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2011. № 3. С. 80–83.
12. Алушкин И. В., Щипчин В. Б., Корнеев И. Г. Рентген-радиометрическая сепарация от TOMRA Sorting для предварительного обогащения угля // Уголь. 2014. № 5. С. 100–103.
13. Федоров Ю. О., Канер И. У., Корнев О. В., Короткевич В. А., Цой В. П., Ковалев П. И., Федоров М. Ю., Поповский Н. С. Опыт и практика рентгенорадиометрической сепарации руд // Известия вузов. Горный журнал. 2005. № 5. С. 21–37.
14. Колесаев В. Б., Литвиненко В. Г., Култышев В. И. Комбинированная технология переработки бедных урановых руд // Горный журнал. 2008. № 8. С. 50–53.
15. Petr Mikysek, Tomáš Trojek, Noemi Mészárosová, Jiří Adamovič, Marek Slobodník. X-ray fluorescence mapping as a first-hand tool in disseminated ore assessment: sandstone-hosted U–Zr mineralization // Minerals Engineering. 2019. Vol. 141. September 2019. Article 105840.
16. Санакулов К. С., Руднев С. В. Комплекс рентгенорадиометрического обогащения сульфидных руд месторождения «Кокпатас» // Горный вестник Узбекистана. 2010. № 1(40). С. 3–7.
17. Санакулов К. С., Руднев С. В., Канцель А. В. О возможности отработки месторождения «Учкулач» с использованием технологии рентгенорадиометрического обогащения свинцово-цинковых руд // Горный вестник Узбекистана. 2011. № 1(44). С. 17–20.
18. Lixia Lia, Genzhuang Lib, Huaizhe Lic, Guoqing Lib, Ding Zhangc, Bern Klein. Bench-scale insight into the amenability of case barren copper ores towards XRF-based bulk sorting // Minerals Engineering. Vol. 121. 1 June 2018. P. 129–136.
19. Цыпин Е. Ф., Овчинникова Т. Ю., Ефремова Т. А. Эффективность применения рентгенофлуоресцентной сепарации для предварительной концентрации руд // ГИАБ. 2020. № 3-1. С. 431–442.
20. Tsy-pin E. F., Ovchinnikova T. Iu., Efremova T. A., Elizarov D. B. Technological aspects of ore preconcentration with x-ray fluorescence separation // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal. 2019. No. 7. P. 101–112.
21. Цыпин Е. Ф., Ефремова Т. А., Овчинникова Т. Ю., Елизаров Д. Б. Влияние фракционирования по крупности на эффективность рентгенорадиометрической сепарации полиметаллической руды // Обогащение руд. 2018. № 3. С. 14–19.
22. Латышев О. Г. Методы и средства изучения быстропотекающих процессов. Екатеринбург: УГТУ, 2007. 232 с.

Сведения об авторах:

Цыпин Евгений Федорович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: tsipin.e@mail.ru

Ефремова Татьяна Александровна – научный сотрудник отдела обогащения лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья Научно-исследовательского и проектного института «Уралмеханобр». E-mail: efremova_ta@umbr.ru

Овчинникова Татьяна Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-6-66-74

Economic efficiency of preconcentration with X-ray fluorescence separation**Evgenii F. Tsypin¹, Tatiana A. Efremova², Tatiana Iu. Ovchinnikova¹**¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.² Scientific-Research and Design Institute JSC Uralmexhanobr, Ekaterinburg, Russia.**Abstract**

Introduction. A promising direction in mineral processing development is the combination of preconcentration and deep processing. For that purpose, X-ray fluorescence separation (XFS) is highly effectively used. A feature of the technology is the availability of the procedures of crushing and screening of the initial rock into machine and unsortable classes, and separation in machine classes. The efficiency of preconcentration complex depends on the quality of granulometric composition forming procedures.

Methodology. X-ray radiometric washability of polymetallic ore samples has been assessed, schemes and equipment for preconcentration with the use of X-ray fluorescence separation of the rock mass with various granulometric composition have been selected, and technical and economic assessment has been made.

Results. Economic indicators of X-ray fluorescence separation application for preconcentration have been determined for polymetallic ore of various granulometric composition. The possibilities for significant improvement of the economic effect by means of forming the granulometric composition of the processed rock mass have been revealed.

Summary. X-ray fluorescence separation in polymetallic ore preconcentration is highly effective. Optimization of blasted rock mass granulometric composition by means of specific organization of drilling and blasting operations and selecting specific modes of crushing and screening results in the growth of the economic effect from XFS by 2.1–2.7 times.

Key words: preconcentration; X-ray fluorescence separation; ore sorting equipment; polymetallic ore; granulometric composition; economic effect.

REFERENCES

1. Bocharov V. A., Ignatkina V. A. *Technology of mineral processing. Vol. 1.* Moscow: Ruda i metall Publishing; 2007. (In Russ.)
2. Abramov A. A. *Processing, dressing and comprehensive use of solid minerals. Vol. 2. The technology of mineral dressing.* Moscow: MSMU Publishing; 2004. (In Russ.)
3. Maksimov I. I. 27th international congress on mineral processing (part 1). *Obogashchenie rud = Mineral Processing.* 2015; 3: 3–11. (In Russ.)
4. Maksimov I. I. 27th international congress on mineral processing (part 2). *Obogashchenie rud = Mineral Processing.* 2015; 6: 50–58. (In Russ.)
5. Gleeson D. Preceding processing. *International Mining.* March, 2019. P. 82–87.
6. Härkki K. Overcoming sustainability challenges of future concentrator plants. *Proceedings of the XXVII International Mineral Congress. Santiago, Chile, 2014. Chapter 1. Plenary Presentations.* P. 2–22.
7. Tatarnikov A. P., Asonova N. I., Balakina I. G., Naumov M. E., Konovalov G. N., Voevodin I. V. Current technologies and equipment for X-ray radiometric processing of uranium ore. *Gornyi zhurnal = Mining Journal.* 2007; 2: 85–87. (In Russ.)
8. Riabkin V. K., Litvinsev E. G., Tikhvinskii A. V., Korpenko I. A., Pichugin A. N., Kobzev A. S. Polychrome photometric separation of gold ore. *Gornyi zhurnal = Mining Journal.* 2007; 12: 88–92. (In Russ.)
9. King H. G., Balint A. The mechanized optical separation of minerals. *Quarry Managers Journal.* 1969; 53(10): 383–388.
10. Shekwonyadu Iyakwari, Hylke J. Glass, Gavyn K. Rollinson, Przemyslaw B. Kowalczyk. Application of near infrared sensors to preconcentration of hydrothermally-formed copper ore. *Minerals Engineering.* 2016; 85 (January): 2016. P. 148–167.
11. Valschchikov A. V., Litvinenko A. P., Deler M. The Usinskoye manganese ore deposit project. Ore beneficiation process. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie = Russian mineral resources. Economics and management.* 2011; 3: 80–83. (In Russ.)

12. Alushkin I. V., Shchipchin V. B., Korneev I. G. X-ray radiometric separation from TOMRA Sorting for coal preconcentration. *Ugol = Coal*. 2014; 5: 100–103. (In Russ.)
13. Fedorov Iu. O., Katser I. U., Korenev O. V., Korotkevich V. A., Tsoi V. P., Kovalev P. I., Fedorov M. Iu., Popovskii N. S. Experience and practice of X-ray radiometric separation of ore. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2005; 5: 21–37. (In Russ.)
14. Kolesaev V. B., Litvinenko V. G., Kultyshev V. I. Combined technology for processing of poor uranium ores. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2008; 8: 50–53. (In Russ.)
15. Petr Mikysek, Tomáš Trojek, Noemi Mészárosová, Jiří Adamovič, Marek Slobodník. X-ray fluorescence mapping as a first-hand tool in disseminated ore assessment: sandstone-hosted U–Zr mineralization. *Minerals Engineering*. 2019; 141; September 2019; Article 105840.
16. Sanakulov K. S., Rudnev S. V. The complex of X-ray radiometric processing of sulphide ore at Koktapas deposit. *Gornyi vestnik Uzbekistana = Mining News of Uzbekistan*. 2010; 1(40): 3–7. (In Russ.)
17. Sanakulov K. S., Rudnev S. V., Kantsel A. V. On the possibility to develop the deposit Uchquloch with the use of the X-ray radiometric processing of lead-zinc ore. *Gornyi vestnik Uzbekistana = Mining News of Uzbekistan*. 2011; 1(44): 17–20. (In Russ.)
18. Lixia Lia, Genzhuang Lib, Huaizhe Lic, Guoqing Lib, Ding Zhangc, Bern Klein. Bench-scale insight into the amenability of case barren copper ores towards XRF-based bulk sorting. *Minerals Engineering*. Vol. 121. 1 June 2018. P. 129–136.
19. Tsypin E. F., Ovchinnikova T. Iu., Efremova T. A. Efficiency of X-ray radiometric separation in preliminary concentration of ore. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 3-1: 431–442. (In Russ.)
20. Tsypin E. F., Ovchinnikova T. Iu., Efremova T. A., Elizarov D. B. Technological aspects of ore preconcentration with X-ray fluorescence separation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 7: 101–112. (In Russ.)
21. Tsypin E. F., Efremova T. A., Ovchinnikova T. Iu., Elizarov D. B. Effect of size fractionation on the efficiency of X-ray radiometric separation of polymetallic ore. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2018, 3: 14–19. (In Russ.)
22. Latyshev O. G. *Methods and means of studying high-speed processes*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2007. (In Russ.)

Received 23 July 2020

Information about authors:

Evgenii F. Tsypin – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: tsypin.e@mail.ru

Tatiana A. Efremova – researcher, processing section of the Laboratory of nonferrous metal ore and technogenic raw material processing, Scientific-Research and Design Institute JSC Uralmekhanobr. E-mail: efremova.ta@umbr.ru

Tatiana Iu. Ovchinnikova – PhD (Engineering), Associate professor, associate professor of the Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru

Для цитирования: Цыпин Е. Ф., Ефремова Т. А., Овчинникова Т. Ю. Экономическая эффективность предварительной концентрации с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 6. С. 66–74. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-6-66-74

For citation: Tsypin E. F., Efremova T. A., Ovchinnikova T. Iu. Economic efficiency of preconcentration with X-ray fluorescence separation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 6: 66–74 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-6-66-74