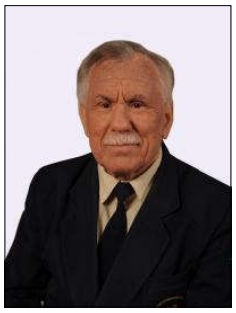
УДК. 625.75
DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-4-43-57

РАЗДЕЛЕНИЕ СУЛЬФИДНЫХ РУД ИНДУКЦИОННЫМ РАДИОРЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ (ИРМ)

SEPARATION OF SULPHIDE ORE BY THE INDUCTION RADIO RESONANT METHOD (IRM)



В. Я. Потапов,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
2c1@inbox.ru

А. И. Афанасьев,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
gmf.tm@ursmu.ru

В. В. Потапов,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
2c1@inbox.ru

Д. С. Стожков,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
gmf.et@m.ursmu.ru

V. Potapov,
Ural State Mining University, Yekaterinburg

A. Afanasyev,
Ural State Mining University, Yekaterinburg

V. Potapov,
Ural State Mining University, Yekaterinburg

D. Stozhkov,
Ural State Mining University, Yekaterinburg

Отмечено, что содержание ценных компонентов в продуктах разделения — один из основных технологических показателей, по которому оценивается эффективность любого метода разделения. Одним из методов разделения является индукционный радиорезонансный метод. Для некоторых типов руды полезных ископаемых причиной нарушения соответствия может явиться присутствие в руде минералов с высокой магнитной восприимчивостью, например, для сульфидных медно-никелевых руд таким минералом является магнетит. С целью увеличения чувствительности и расширения границы разделительного признака сульфидсодержащих минералов от породных исследования проведены на более высоких частотах. Рабочая частота при исследованиях изменялась задающим генератором в диапазоне 1,1...15 МГц.

Оценка эффективности радиорезонансного метода сепарации при решении задачи разделения руд на концентраты и хвосты осуществлялась по максимальному выходу отвальных хвостов. Методика оценки показателей эффективности основана на моделировании разделения путем многократной сортировки кусков исходной пробы при различных значениях границ разделения. Экспериментальные исследования обогатимости индукционным методом проводились на кусковых продуктах окисленной и неокисленной сульфидной руды. Авторами сделаны следующие выводы: при внесении куска в радиорезонансный контур сульфидные минералы значительно изменяют добротность контура, а не частоту. Данные исследования положены в разработку электронно-решающего блока для радиорезонансного метода сепарации. В ходе опытов определены значения параметров разделительного признака. Это позволило, при установке границ разделения на разных уровнях, получить выход отвальных хвостов к сортируемому классу -40...+20 мм. Анализ полученных данных радиорезонансным методом свидетельствует, что значения выходов отвальных хвостов увеличиваются на 16 %, а содержание полезного компонента в концентрате возрастает на 2,4 %, следовательно, значения показателей технологической эффективности указывают на перспективность радиорезонансного метода обогащения

Ключевые слова: *радиометрическое разделение; электропроводность; диапазон частот сигнала; параметры разделительного признака; сульфидные куски; концентрация; индукционный радиорезонансный метод; технологическая эффективность; методика оценки показателей эффективности; перспективность метода обогащения*

© В. Я. Потапов, А. И. Афанасьев, В. В. Потапов, Д. С. Стожков, 2018

It is noted that the content of valuable components in the products of separation is one of the main technological indicators by which the effectiveness of any separation method is evaluated. One of the methods of separation is the induction radio-resonance method. For some types of ore in mineral resources, the presence of minerals with a high magnetic susceptibility in the ore, for example, for sulphide copper-nickel ores such a mineral is magnetite. In order to increase the sensitivity and expand the boundary of the separation feature of sulfide-containing minerals from rock studies, they were conducted at higher frequencies. The operating frequency during the studies was varied by a master oscillator in the range 1,1...15 MHz. Estimation of the efficiency of the radio-resonance separation method in solving the problem of separation of ores into concentrates and tails was carried out at the maximum yield of tailings. The methodology for assessing performance indicators is based on simulating the separation by repeatedly sorting pieces of the original sample for different values of the separation boundaries. Experimental studies of enrichment by induction method were carried out on lump products of oxidized and non-oxidized sulphide ore. The authors made the following conclusions: when introducing a piece into the radio-resonance circuit, the sulphide minerals significantly change the quality factor of the circuit, and not the frequency. The given researches are put in the development of the electron-solving block. In the course of the experiments, the values of the parameters of the separation feature were determined. This allowed, when setting the separation boundaries at different levels, to get the output of the tailings to the sorted class -40...+ 20 mm. Analysis of the obtained data by the radio resonance method indicates that the values of the tailfall tailings are increased by 16 %, and the content of the useful component in the concentrate increases by 2,4 %, hence the values of the technological efficiency indicators indicate the promise of the radioresonant enrichment method

Key words: *radiometric separation; electrical conductivity; frequency range of the signal; parameters of the separation feature; sulfide chunks; concentration; induction radio resonance method; technological efficiency; methodology for assessing performance indicators; promising method of enrichment*

Введение. Содержание ценных компонентов в продуктах разделения — один из основных технологических показателей, по которому оценивается эффективность любого метода разделения. При радиометрическом разделении, как и при других обогатительных процессах, разделение руды на продукты осуществляется не по содержанию полезного компонента, а по какому-либо физическому свойству — с ним связанному признаку разделения [1—11]. Для индукционной радиорезонансной сепарации таким признаком разделения служит электропроводность кусков руды (табл. 1), количественно оцениваемая по влиянию кусков на добротность измерительного контура [3—8; 10].

Эффективность ИРМ во многом зависит от степени соответствия между величиной изменения добротности контура и содержанием в куске ценного компонента, поэтому необходима некоторая корреляция между этими величинами. Однако существуют причины, нарушающие соответствие между ними: колебание массы кусков даже в пределах определенного класса крупности; присутствие в кусках руды других минералов, близких по электропроводности к ценному минералу; характер распределения минералов в кусках руды и др. Для некоторых типов руды полезных ископаемых причиной нарушения соответствия может явиться присутствие в руде минералов с высокой магнитной восприимчивостью, например, для сульфидных медно-никелевых руд таким минералом является магнетит.

Методика и результаты исследования. При исследовании частотных характеристик руд различных типов в диапазоне радиоволн 0,44...27,12 МГц установлено, что наиболее оптимальными для ИРМ сепарации являются частоты 1,75 МГц для руды с высокой электропроводностью и 13,56 МГц для руды с низкой электропроводностью, а также для руд, содержащих попутные минералы с высокой магнитной восприимчивостью [4].

Как показали результаты исследований и практический опыт сепарации, влажность на этих частотах не оказывает влияния на практические показатели сепарации руд. Экспериментальные исследования обогатимости индукционным методом проводились на кусковых продуктах окисленной и неокисленной сульфидной руды.

Таблица 1 / Table 1

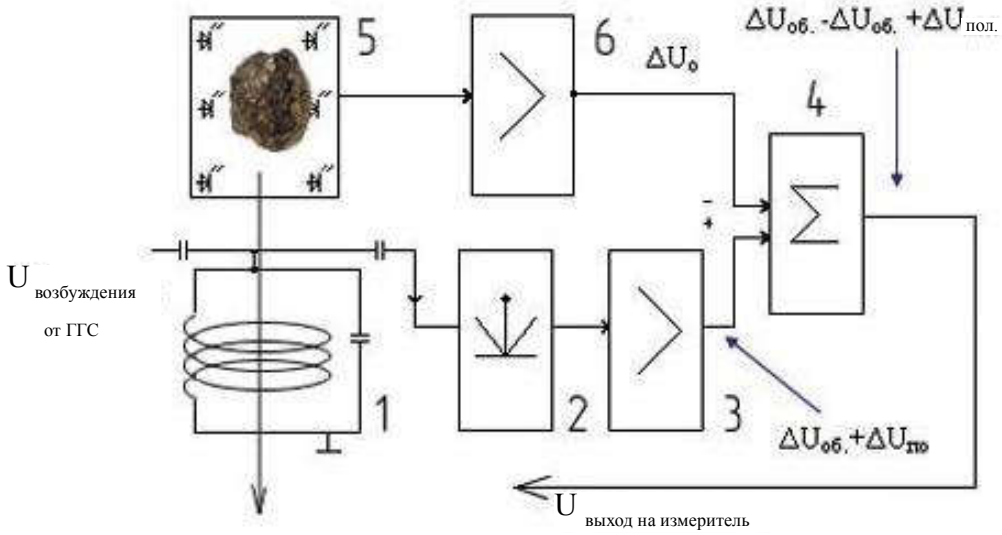
Электромагнитные свойства минералов и пород / Electromagnetic properties of minerals and rocks

Минерал, порода / Mineral, rock	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м / Specific electrical resistance, Ohm · m	Магнитная восприимчивость, м³/кг / Magnetic susceptibility, m³ / kg
Халькопирит / Chalcopyrite	$1{,}2\cdot10^{-5}$ – $6\cdot10^{-2}$	0,7 – $4\cdot10^{-8}$
Пирит / Pyrite	$1{,}4\cdot10^{-5}$ – 10^{-1}	0,1 – $0{,}6\cdot10^{-8}$
Халькозин / Chalcosine	$8\cdot10^{-5}$ – $6\cdot10^{-2}$	0,03 – $0{,}04\cdot10^{-8}$
Сидерит / Siderit	10 – 10^{3}	28 – 1 $20\cdot10^{-8}$
Магнетит / Magnetite	$3\cdot10^{-5}$ – 10^{-4}	0,146 – $1{,}02\cdot10^{-3}$
Аргиллит / Argillite	10 – $4\cdot10^{2}$	немагнитный
Алевролит / Alyurolite	$1{,}5\cdot10$ – $6\cdot10^{2}$	немагнитный
Фрайбергит / Freibergit	$0{,}4\cdot10$	0,4 – $1{,}8\cdot10^{-8}$
Арсенопирит / Arsenopyrite	$2\cdot10^{-5}$ – $2\cdot10^{-2}$	$1{,}3\cdot10^{-8}$
Борнит / Bornitis	$8\cdot10^{-5}$ – $6\cdot10^{-2}$	0,7 – $4\cdot10^{-8}$

Как видно из табл. 1, электропроводность основных минералов, входящих в состав исследуемых руд, различна. Реакция измерительной системы на поведение разных руд по степени окисления также может быть различна.

Установка для исследования приведена на рис. 1. Данная схема разработана в ходе эксперимента. В процессе исследований апробировано несколько конструкций различных датчиков, являющихся нестандартными частями аппаратуры. Проверка этих датчиков осуществлялась в диапазоне 1,1...15 мГц [7].

Конструкции датчиков отличались типом модели (проходные, накладные). В качестве датчика используется колебательный контур, состоящий из индуктивности L и конденсатора C. Колебания в этом контуре возбуждаются с помощью стабильного генератора электрических колебаний с частотой f_1, близкой к резонансной f_0.



1 – измерительный контур (датчик) / 1 – measuring circuit (sensor);
2 – детектор среднего значения / 2 – average detector;
3 – усилитель / 3 – amplifier;
4 – сумматор / 4 – totalizer;
5 – светодиодное устройство определения объема / 5 – LED volume detection device;
6 – преобразователь тока светодиодов (выходное напряжение) / 6 – current converter for LEDs (output voltage)

Рис. 1. Блок-схема прибора / Fig 1. Block diagram of the device

Наилучшая чувствительность и линейность прибора достигается, если частоты колебаний контура f_0 и генератора расположены на резонансной кривой.

Проходные индукционные датчики имели следующую характеристику: диаметр катушки – 65 мм, число витков катушки – 80, измерительных витков – 10, диаметр проволоки – 0,25 мм.

Накладной датчик выполнен намоткой из серебряного провода, диаметр намотки – 100 мм, число витков – 10, диаметр провода – 1 мм, шаг намотки – 5 мм.

Рабочая частота при исследованиях изменялась задающим генератором в диапазоне 1,1...15 МГц.

Результаты исследований следующие: при внесении куска в радиорезонансный контур сульфидные минералы значительно изменяют добротность контура, а не частоту. Минералы с включением серебра целесообразно разделять только на скате частотной характеристики резонанса при частоте f_1 и f_2 (рис. 2). При этом зафиксировано значительное уменьшение амплитуды электрических колебаний в контуре с A_1=150 мВ до A_2=110 мВ, т. е. разбаланс радиорезонансного контура. Наилучшая чувствительность контура наблюдается на правостороннем скате в точке f_2.

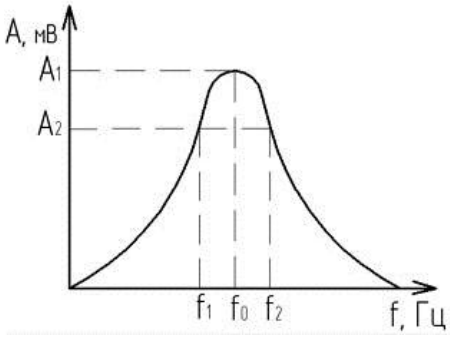


Рис. 2. Резонансная кривая / Fig. 2. Resonance curve

С целью увеличения чувствительности и расширения границы разделительного признака сульфидсодержащих минералов от породных исследования продолжены на более высоких частотах. Проведены исследования по оценке влияния на добротность контура размера и массы куска (табл. 2, 3).

Таблица 2 / Table 2

Влияние размеров и массы куска на показатели добротности резонансного контура при f_0=570 кГц / Influence of the dimensions and mass of a piece on the Q-factors resonant circuit at f_0 = 570 kHz

Окисленная / Oxidized

Номер образца / Sample number	Масса куска, г / Weight, g	Слева / Left	Справа / Right	Минерал / Mineral
		ΔU, В / ΔU, В	ΔU, В / ΔU, В	
1,43	46	-0,18	0,18	Сульфид сплошной / Sulphide solid
1,52	27,5	0	0,1	
1,16	78,1	-0,05	0,32	
1,39	26	1,93	2	Сульфиды (тетраэдрит, халькопирит) / Sulphides (tetrahedrite, chalcopyrite)
1,3	27	0,03	0,07	
1,22	23,5	0,05	0,1	
1,75	41	-0,02	0,16	Тетраэдрит / Tetrahedrite
1,77	10	0	0,07	
1,73	35	-0,07	0,08	
1,51	29	-0,04	0,02	Сидерит / Siderite
1,79	40	-0,1	0,11	
1,09	79	-0,17	0,23	
1,23	13	-0,03	0	Аргиллит / Argillite
1,61	44	-0,05	0,04	
1,25	76	-0,07	0,1	
1,42	29	0,05	0,01	Алевролит / Alyurolite
1,68	34	-0,05	0	
1,63	18	-0,03	0	

Таблица 3/ Table 3

Влияние размеров и массы куска на показатели добротности резонансного контура при f_0 = 570 кГц / Influence of the dimensions and mass of a piece on the Q-factors resonant circuit at $f0$ = 570 kHz

Неокисленная / Unoxidized

Номер образца / Sample number	Масса куска, г / Weight, g	Слева / Left	Справа / Right	Минерал / Mineral
		ΔU, В / ΔU, В	ΔU, В / ΔU, В	
2,12	71,1	-0,1	0,38	Сульфид (халькопирит с вкраплением тетраэдрита) (Ag) / Sulfide (chalcopyrite with impregnation of tetrahedrite) (Ag)
2,10	93	-0,1	0,54	
2,83	140	-0,31	0,39	
2,39	77	-0,21	0,28	Сульфиды (тетраэдрит с вкраплением халькопирита) (Ag) / Sulphides (tetrahedrite with inclusions of chalcopyrite) (Ag)
2,58	39,5	-0,1	0,1	
2,64	46,4	-0,26	0,22	
2,34	22,5	-0,12	0,05	
2,41	55,5	0,09	0,4	Сульфид с плёнкой / Sulphide with film
2,67	42,5	1,81	1,47	
2,23	20	1,14	0,94	
2,56	28,9	-0,06	0,1	Сидерит / Siderite
2,92	87	-0,21	0,15	
2,43	119	-0,37	0,38	
2,42	98	-0,17	0,13	Алевролит / Alyurolite
2,30	118	-0,16	0,14	
2,94	23	-0,1	0,09	
2,68	72	-0,06	0,1	
2,54	35	-0,06	0,04	
2,76	42,5	-0,1	0,09	Аргиллит / Argillite
2,16	78	-0,18	0,08	
2,89	54	-0,4	-0,06	
2,38	17	0,02	-0,03	

В результате исследований разработана схема коррекции этих параметров (рис. 1).

Данные исследования положены в разработку электронно-решающего блока для радиорезонансного метода сепарации.

Оценка эффективности радиорезонансного метода сепарации при решении задачи разделения руд на концентраты и хвосты осуществлялась по максимальному выходу отвальных хвостов. Методика оценки показателей эффективности основана на моделировании разделения путем многократной сортировки кусков исходной пробы при различных значениях границ разделения.

Принятие решения об отнесении куска к хвостам или концентрату проводилось по правилу: если значение критерия разделения куска больше (или равно) заданного при данном прогоне граничного значения критерия разделения, то он поступает в концентрат, в противном случае — в хвосты.

При этом в методике учитывалось распределение в продуктах (концентрат, хвосты) количества породных, сростков и чисто сульфидных кусков. Результаты разделения по минеральным группам представлены на рис. 3—10.

На основе анализа данных гистограмм проводилось формирование продуктов согласно границе разделения (абсцисса распределения) на концентрат и хвосты. Для сформированных продуктов по исходной информации рассчитывались технологические показатели предварительной концентрации (табл. 4—13).

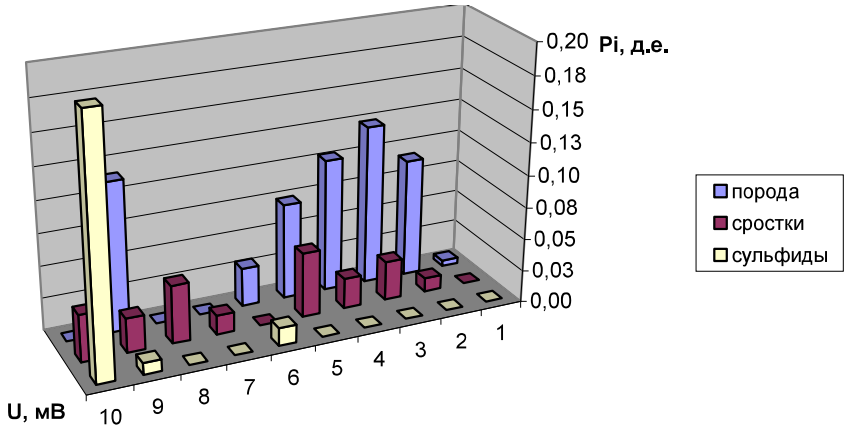


Рис. 3. Гистограммы распределения признака разделения U окисленной руды на левом скате радиорезонансной характеристики проходного датчика / Fig. 3. Histograms of distribution of the separation feature of U oxidized ore on the left slope of the radio-resonance characteristic of the pass-through sensor

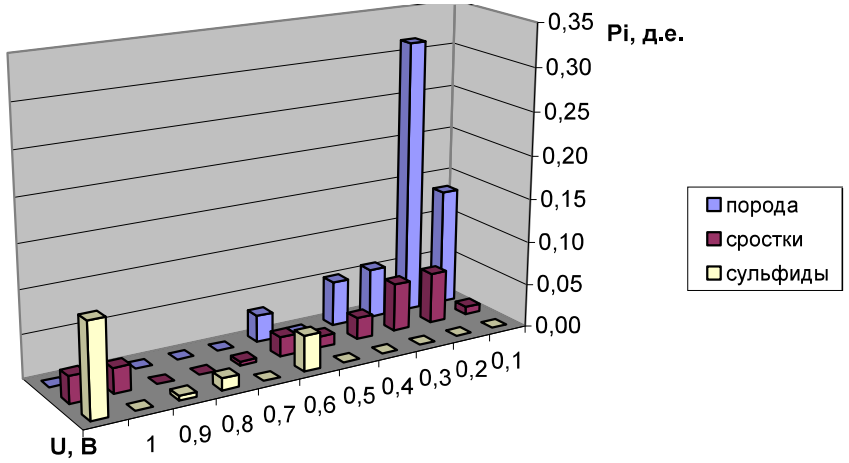


Рис. 4. Гистограммы распределения признака разделения U окисленной руды на радиорезонансе характеристики проходного датчика / Fig. 4. Histograms of distribution of the separation feature of U oxidized ore on the radioresonance of the characteristics of the sensor

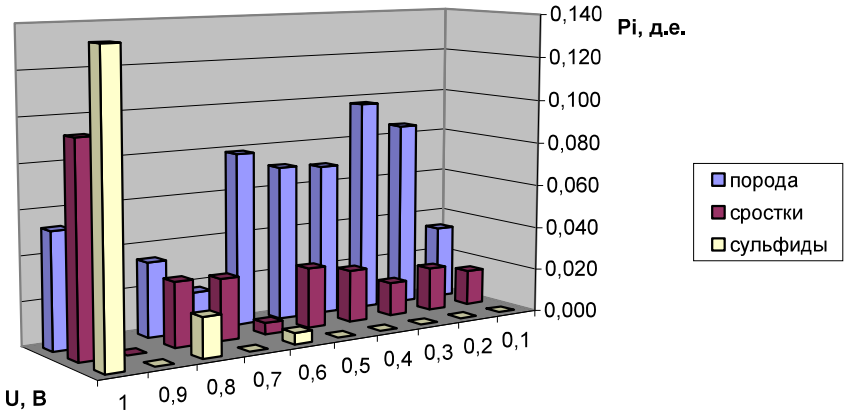


Рис. 5. Гистограммы распределения признака разделения U окисленной руды на правом скате радиорезонансной характеристики проходного датчика / Fig. 5. Histograms of distribution of the separation feature of U oxidized ore on the right slope of the radio-resonance characteristic of the pass-through sensor

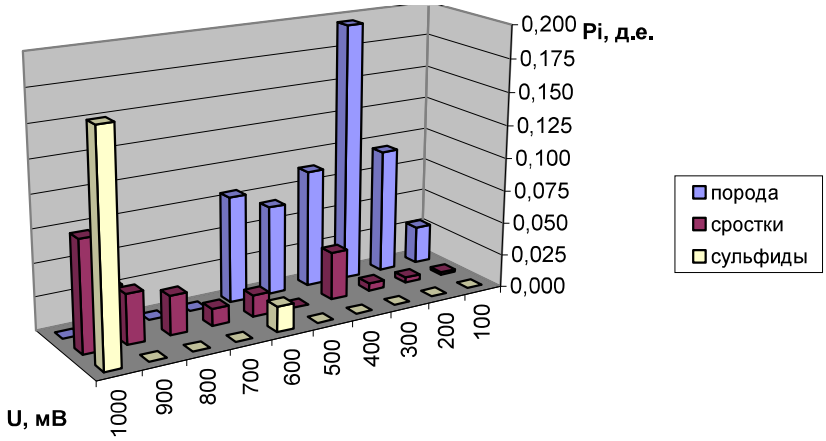


Рис. 6. Гистограммы распределения признака разделения U окисленной руды на пике радиорезонансной характеристики плоскостного датчика / Fig. 6. Histograms of distribution of the separation feature of U oxidized ore at the peak of the radioresonance characteristic of a planar sensor

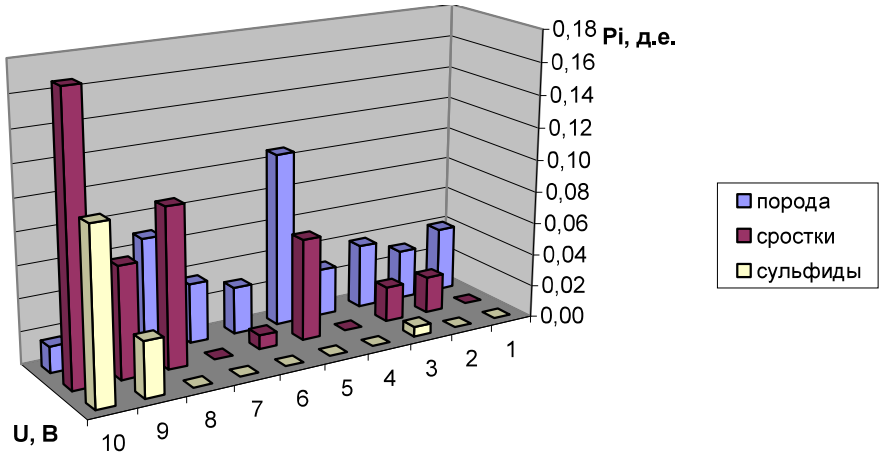


Рис. 7. Гистограммы распределения признака разделения U неокисленной руды на левом скате радиорезонансной характеристики проходного датчика / Fig. 7. Histograms of distribution of the separation feature of U unoxidized ore on the left slope of the radio-resonance characteristic of the pass-through sensor

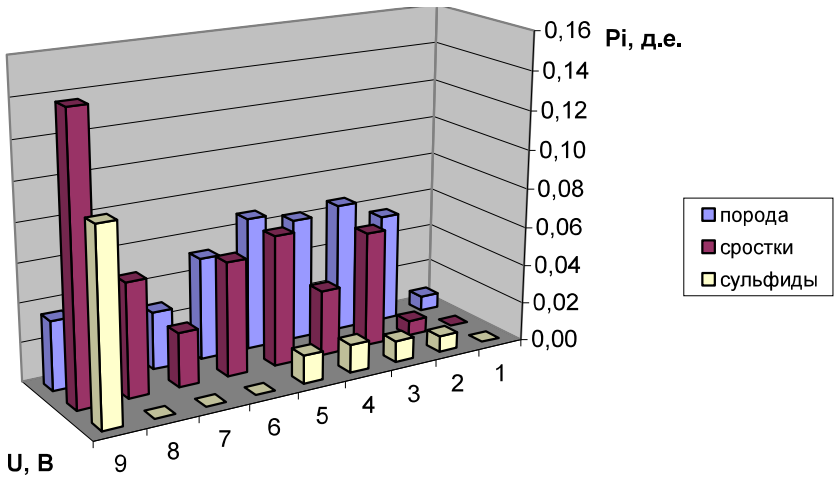


Рис. 8. Гистограммы распределения признака разделения U неокисленной руды на правом скате радиорезонансной характеристики проходного датчика / Fig. 8. Histograms of distribution of the separation feature of U unoxidized ore on the right slope of the radio-resonance characteristic of the pass-through sensor

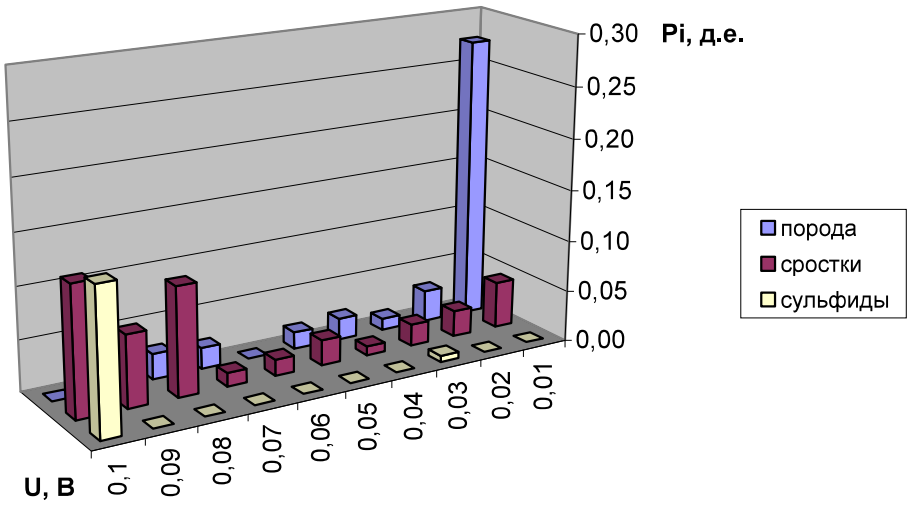


Рис. 9. Гистограммы распределения признака разделения U неокисленной руды на радиорезонансе характеристики проходного датчика / Fig. 9. Histograms of distribution of the separation feature of U unoxidized ore on the radioresonance of the characteristics of the sensor

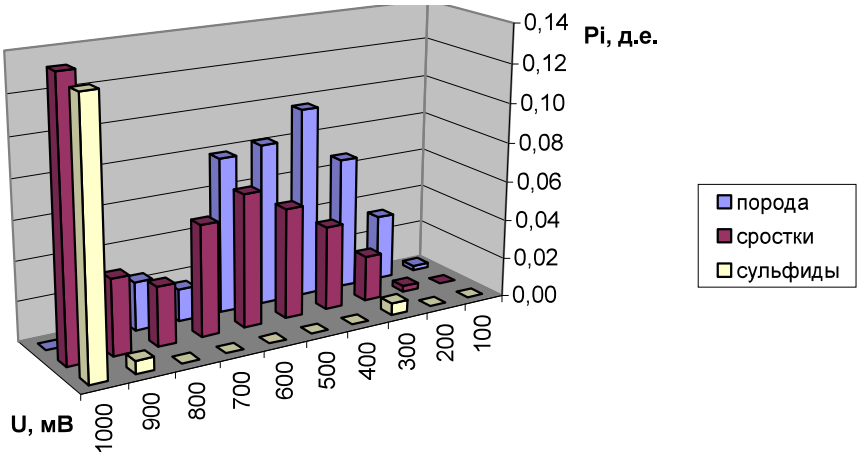


Рис. 10. Гистограммы распределения признака разделения U неокисленной руды на пике радиорезонансной характеристики плоскостного датчика / Fig. 10. Histograms of distribution of the separation feature of U unoxidized ore at the peak of the radioresonance characteristic of a planar sensor

В ходе опытов определены значения параметров разделительного признака. Это позволило, при установке границ разделения на разных уровнях, получить выход отвальных хвостов к сортируемому классу -40...+20 мм. Для окисленной руды 50...70 % при содержании меди 0,17...0,7 % (табл. 4–7, рис. 3–6) и для неокисленной руды 40...56 % при содержании меди 0,19...1,36 % (табл. 8–13, рис. 7–10).

Таким образом, анализ полученных данных радиорезонансным методом свидетельствует, что значения выходов отвальных хвостов и значения показателей технологической эффективности указывают на перспективность радиорезонансного метода обогащения.

Установлено, что идентификацию кусков окисленной руды целесообразно проводить на пике резонансной кривой. При этом выход хвостов при прочих равных условиях увеличивается на 16 %, а содержание полезного компонента в концентрате возрастает на 2,4 %.

Таблица 4 / Table 4

Результаты разделения окисленной руды (проходной датчик) на левом скате радиорезонансной характеристики ($f_{рез}$=1,2 мГц, по границе 6) / The results of the separation of the oxidized ore (through the sensor) on the left slope of the radio resonance characteristic (fres = 1,2 mHz, along boundary 6)

Продукт / Product		Выход / Exit		Содер-жание / Content	Извлечение / Extraction	Показатели в объединенных продуктах / Indicators in the combined products		
						выход / exit	содержание / content	извлечение / retrieval
		г / g	%	%	%	%	%	%
Концентрат / Concentrate	порода / breed	604,20	11,54	0,114767	0,49	44,33	5,44	88,66
	сростки / splices	642,90	12,27	1,636	7,39			
	сульфиды / sulphides	1074,90	20,52	10,702	80,79			
Хвосты / Tails	порода / breed	2242,20	42,81	0,114	1,79	55,67	0,55	11,34
	сростки / splices	601,30	11,48	0,72	3,06			
	сульфиды / sulphides	72,20	1,38	12,800	6,49			
Итого / Total		5237,70	100,00	2,719	100,00	100,00	2,719	100,00

Таблица 5/ Table 5

Результаты разделения окисленной руды (проходной датчик) на радиорезонансе характеристики ($f_{рез}$=1,2 мГц, граница 4) / The results of separation of oxidized ore (a through-flow sensor) on the radio resonance characteristics (fres = 1,2 mHz, boundary 4)

Продукт / Product		Выход / Exit		Содержание / Content	Извлечение/ Extraction	Показатели в объединенных продуктах / Indicators in the combined products		
						выход / exit	содержание / content	извлечение / retrieval
		г / g	%	%	%	%	%	%
Концентрат / Concentrate	порода / breed	159,00	3,04	0,16	0,18	29,49	7,82	85,72
	сростки / splices	514,900	9,831	1,598	5,84			
	сульфиды / sulphides	870,900	16,628	12,901	79,70			
Хвосты / Tails	порода / breed	2920,100	55,752	0,125	2,59	70,51	0,55	14,28
	сростки/ splices	772,800	14,755	2,13	11,69			
	сульфиды / sulphides	0,000	0,000	0,000	0,00			
Итого / Total		5237,70	100,00	2,691	100,00	100,00	2,691	100,00

Таблица 6 / Table 6

Результаты разделения окисленной руды (проходной датчик) на правом скате радиорезонансной характеристики ($f_{рез}$=1,2 мГц, граница 6) / The results of the separation of the oxidized ore (pass-through sensor) on the right slope of the radio-resonant characteristic (fres = 1,2 mHz, boundary 6)

Продукт / Product		Выход / Exit		Содержание / Content	Извлечение / Extraction	Показатели в объединенных продуктах / Indicators in the combined products		
						выход / exit	Содержание / content	извлечение / retrieval
		г / g	%	%	%	%	%	%
Концентрат/ Concentrate	порода / breed	545,2	10,41	0,136	0,50	45,81	5,41	87,14
	сростки / splices	1054,6	20,13	1,69	11,92			
	сульфиды / sulphides	800,81	15,27	13,92	74,68			
Хвосты / Tails	порода/ breed	2277,7	43,47	0,46	7,02	54,19	0,68	12,91
	сростки / splices	534,3	10,2	1,17	4,20			
	сульфиды / sulphides	27	0,52	9,23	1,68			
Итого / Total		5239,61	100,00	2,85	100,00	100,00	2,85	100,04

Таблица 7 / Table 7

Результаты разделения окисленной руды (плоскостной датчик) на пике радиорезонансной характеристики ($f_{рез}$=8,8 мГц, граница 6) / The results of the separation of the oxidized ore (planar sensor) at the peak of the radio-resonance characteristic (fres = 8,8 MHz, boundary 6)

Продукт / Product		Выход / Exit		Содержание / Content	Извлечение / Extraction	Показатели в объединенных продуктах / Indicators in the combined products		
						выход / exit	содержание / content	извлечение / retrieval
		г / g	%	%	%	%	%	%
Концентрат/ Concentrate	порода / breed	159,00	3,08	0,16	0,18	36,20	7,25	96,08
	сростки / splices	837,40	16,22	1,49	8,87			
	сульфиды / sulphides	871,9	16,89	14,07	87,03			
Хвосты / Tails	порода / breed	2863,20	55,47	0,12	2,45	63,80	0,17	3,92
	сростки / splices	331,90	6,43	0,48	1,14			
	сульфиды / sulphides	98	1,90	0,48	0,33			
Итого / Total		5161,40	100,00	2,731	100,00	100,00	2,731	100,00

Таблица 8 / Table 8

Результаты разделения неокисленной руды (проходной датчик) на левом скате радиорезонансной характеристики ($f_{рез}$=1,2 мГц, по границе 6) / The results of the separation of the unoxidized ore (pass-through sensor) on the left slope of the radio-resonant characteristic (fres = 1,2 mHz, along boundary 6)

Продукт / Product		Выход / Exit		Содержание / Content	Извлечение / Extraction	Показатели в объединенных продуктах / Indicators in the combined products		
						выход / exit	содержание / content	извлечение / retrieval
		г / g	%	%	%	%	%	%
Концентрат / Concentrate	порода / breed	590,50	12,29	0,00885	0,03			
	сростки / splices	1631,20	33,94	1,902	20,56	60,23	5,00	95,81
	сульфиды / sulphides	672,70	14,00	16,873	75,21			
Хвосты / Tails	порода / breed	1327,20	27,62	0,017	0,15			
	сростки / splices	555,30	11,55	1,10	4,04	39,77	0,33	4,19
	сульфиды / sulphides	29,00	0,60	0,010	0,00			
Итого / Total		4805,90	100,00	3,140	100,00	100,00	3,140	100,00

Таблица 9 / Table 9

Результаты разделения неокисленной руды (проходной датчик) на левом скате радиорезонансной характеристики (fрез=1,2 мГц, по границе 7) / The results of the separation of the unoxidized ore (pass-through sensor) on the left slope of the radio-resonance characteristic (fres = 1,2 mHz, along boundary 7)

Продукт / Product		Выход / Exit		Содержание / Content	Извлечение / Extraction	Показатели в объединенных продуктах / Indicators in the combined products		
						выход / exit	содержание / content	извлечение / retrieval
		г / g	%	%	%	%	%	%
Концентрат / Concentrate	порода / breed	414,20	8,62	0,009672	0,03			
	сростки / splices	1631,20	33,94	1,902	20,56	56,56	5,32	95,80
	сульфиды / sulphides	672,70	14,00	16,873	75,21			
Хвосты / Tails	порода / breed	1503,50	31,28	0,016	0,16			
	сростки / splices	555,30	11,55	1,10	4,04	43,44	0,30	4,20
	сульфиды / sulphides	29,00	0,60	0,010	0,00			
Итого / Total		4805,90	100,00	3,140	100,00	100,00	3,140	100,00

Таблица 10/ Table 10

Результаты разделения неокисленной руды (проходной датчик) на правом скате радиорезонансной характеристики ($f_{рез}$=1,2 мГц, граница 6) / The results of the separation of the unoxidized ore (through-flow sensor) on the right slope radio-resonant characteristics (fres = 1,2 mHz, boundary 6)

Продукт / Product		Выход / Exit		Содержание / Content	Извлечение / Extraction	Показатели в объединенных продуктах / Indicators in the combined products		
						выход / exit	содержание / content	извлечение / retrieval
		г / g	%	%	%	%	%	%
Концентрат / Concentrate	порода / breed	408,90	8,51	0,011399	0,03	41,24	5,68	74,57
	сростки / splices	1103,00	22,95	2,038	14,89			
	Сульфиды / sulphides	469,90	9,78	19,156	59,64			
Хвосты / Tails	порода / breed	1508,80	31,39	0,016	0,16	58,76	1,36	25,43
	сростки / splices	1083,50	22,55	1,35	9,71			
	сульфиды / sulphides	231,80	4,82	10,136	15,57			
Итого / Total		4805,90	100,00	3,140	100,00	100,00	3,140	100,00

Таблица 11 / Table 11

Результаты разделения неокисленной руды (проходной датчик) на правом скате радиорезонансной характеристики ($f_{рез}$=1,2 мГц, граница 5) / The results of the separation of the unoxidized ore (through-flow sensor) on the right slope radio-resonant characteristics (fres = 1,2 mHz, boundary 5)

Продукт / Product		Выход / Exit		Содержание / Content	Извлечение / Extraction	Показатели в объединенных продуктах / Indicators in the combined products		
						выход / exit	содержание / content	извлечение / retrieval
		г / g	%	%	%	%	%	%
Концентрат / Concentrate	порода / breed	659,30	13,72	0,01786	0,08			
	сростки / splices	1382,70	28,77	1,868	17,12	52,27	4,62	76,84
	сульфиды / sulphides	469,90	9,78	19,156	59,64			
Хвосты / Tails	порода / breed	1258,40	26,18	0,013	0,11		1,52	
	сростки / splices	803,80	16,73	1,41	7,49	47,73		23,16
	сульфиды / sulphides	231,80	4,82	10,136	15,57			
Итого / Total		4805,90	100,00	3,140	100,00	100,00	3,140	100,00

Таблица 12/ Table 12

Результаты разделения неокисленной руды (проходной датчик) на радиорезонансе характеристики (fрез=1,2 мГц, граница 7) / The results of separation of unoxidized ore (pass-through sensor) on radio resonance characteristics (fres = 1,2 mHz, boundary 7)

Продукт / Product		Выход / Exit		Содер-жание / Content	Извлечение / Extraction	Показатели в объединенных продуктах / Indicators in the combined products		
						выход / exit	содержание / content	извлечение / retrieval
		г / g	%	%	%	%	%	%
Концентрат / Concentrate	порода/ breed	118,00	2,46	0,01	0,01			
	сростки / splices	1442,80	30,02	2,250	21,51	46,47	6,54	96,73
	сульфиды / sulphides	672,70	14,00	16,873	75,21			
Хвосты / Tails	порода / breed	1800,80	37,47	0,012	0,15			
	сростки / splices	742,60	15,45	0,63	3,12	53,53	0,19	3,27
	сульфиды / sulphides	29,00	0,60	0,010	0,00			
Итого / Total		4805,90	100,00	3,140	100,00	100,00	3,140	100,00

Таблица 13 / Table 13

Результаты разделения неокисленной руды (плоскостной датчик) на пике радиорезонансной характеристики ($f_{рез}$=8,8 мГц, граница 6) / The results of the separation of unoxidized ore (a planar sensor) at the peak of the radio-resonance characteristic (fres = 8,8 MHz, boundary 6)

Продукт/ Product		Выход / Exit		Содержание / Content	Извлечение/ Extraction	Показатели в объединенных про-дуктах / Indicators in the combined products		
						выход / exit	содержание / content	извлечение / retrieval
		г / g	%	%	%	%	%	%
Концентрат / Concentrate	порода / breed	195,70	4,07	0,017941	0,02			
	сростки / splices	1257,20	26,16	2,103	17,52	44,23	6,59	92,75
	сульфиды / sulphides	672,70	14,00	16,873	75,21			
Хвосты / Tails	порода / breed	1730,40	36,01	0,014	0,16			
	сростки / splices	920,90	19,16	1,16	7,09	55,77	0,41	7,25
	сульфиды / sulphides	29,00	0,60	0,010	0,00			
Итого / Total		4805,90	100,00	3,140	100,00	100,00	3,140	100,00

Наиболее эффективными являются датчики, имеющие резонансную частоту в пределах 1,2...8 мГц. Для этого диапазона частот сигнал, по которому идентифицируется кусок, является максимальным, что существенно упрощает электронную схему прибора и уменьшает вероятность ошибки при идентификации.

Выход хвостов, концентрата и величину извлечения можно регулировать границей разделения. Это позволяет оперативно приспосабливать сепаратор к изменяющимся характеристикам исходного продукта.

Радиорезонансный метод сепарации позволяет достичь 87...96 % извлечения и сбросить в хвосты 70 % пустой породы, что значительно уменьшит затраты на дальнейшую переработку руды.

Неокисленная руда по сравнению с окисленной при прочих равных условиях имеет меньшее извлечение на 11 % и на 12 % – выход хвостов. Разделение неокисленной руды целесообразно производить на правом скате резонансной кривой.

Величина идентификационного сигнала у неокисленного куска руды, содержащего сульфиды, на 20 % больше, чем у аналогичного куска окисленной руды. Причем идентификация кусков более эффективна на правом скате резонансной кривой.

Установлено, что для некоторых признаков разделения, в частности, величины добротности измерительного контура при радиорезонансном методе, теснота связей для компонентов в руде различна, поэтому из-за указанной неоднозначности корреляционное отношение не может служить надежной оценкой эффективности признака.

Согласно результатам, приведенным в табл. 2, 3, в электронной схеме необходимо предусмотреть коррекцию массы куска разделяемой руды.

Список литературы

1. Бубырь Е. В., Горбунова Е. В., Коротаев В. В., Левитин А. И., Тимофеев А. И., Четров А. Н. Об использовании оптико-электронных методов в системах регистрации радиометрических сепараторов алмазосодержащего сырья // Обогащение руд. 2007. № 5. С. 41–44.

2. Гулин Е. Н. Особенности фотоабсорбционной сепарации кварцевого сырья // Лабораторные и технологические исследования и обогащение минерального сырья. М., 1984. Вып. 4. С. 10–12.

3. Дмитриев А. П., Зильбершмидт М. Г. Физические принципы управления технологическими параметрами горных пород. М.: МГГУ, 1989. 94 с.

4. Мокроусов В. А., Лилеев В. А. Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. М.: Недра, 1979. 192 с.

5. Новик Г. Я., Зильбершмидт М. Г. Управление свойствами горных пород в процессах горного производства. М.: Недра, 1994. 224 с.

6. Потапов В. Я, Потапов В. В., Федоров Ю. О., Носков И. Г., Тимкевич О. П. Использование рентгенорадиометрической сепарации для разделения высокозольных углей // Известия УГГУ. Сер. Горная электромеханика. 2005. Вып. 20. С. 82–87.

7. Потапов В. Я, Кравец Б. Н., Потапов В. В., Скобцов С. Н., Кашапов Р. А. Разработка датчиков для обогащения руд индукционным радиорезонансным методом (ИРМ) // Известия УГГУ. Сер. Горная электромеханика. 2005. Вып. 20. С. 124–134.

8. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. М.: Недра, 1978. 359 с.

9. Цыпин Е. Ф., Овчинникова Т. Ю. Разновидности фотометрических методов обогащения // Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья: материалы науч.-техн. конф. Екатеринбург: УГГУ, 2015. С. 104–110.

10. Collier D., Dwyer F. B., Thompson R. L., Wulff E. Ore sorters for asbestos and scheelite // 10-th Int. Miner Process. Congr. London, 1974. P. 1007–1022.

11. Walriewicz J. W., Clark A. E., McGill S. L. Microwave-assisted grinding. IEEE Nrans. on Industry Appl. 1991. Vol. 27. No. 2. P. 239–243.

References

1. Bubyr E. V., Gorbunova E. V., Korotaev V. V., Levitin A. I., Timofeev A. I., Chetrov A. N. *Obogashchenie rud* (Enrichment of ores), 2007, no. 5, pp. 41–44.

2. Gulin, Ye. N. *Laboratornye i tehnologicheskie issledovaniya i obogashchenie mineralnogo syriya* (Laboratory and Technological Studies and the Enrichment of Mineral Raw Materials). Moscow, 1984. Vol. 4. P. 10–12.

3. Dmitriev A. P., Zilbershmidt M. G. *Fizicheskie printsipy upravleniya tehnologicheskimi parametrami gornyh porod* (Physical principles of management of technological parameters of rocks). Moscow: MGGU, 1989. 94 p.

4. Mokrousov V. A., Lileev V. A. *Radiometricheskoe obogashchenie neradioaktivnyh rud* (Radiometric enrichment of non-radioactive ores). Moscow: Nedra, 1979. 192 p.

5. Novik G. Ya., Zilbershmidt M. G. *Upravlenie svoystvami gornyh porod v processah gornogo proizvodstva* (Management of rocks properties in the processes of mining). Moscow: Nedra, 1994. 224 p.

6. Potapov V. Ya., Potapov V. V., Fedorov Yu. O., Noskov I. G., Timkevich O. P. *Izvestiya UGGU. Ser. Gornaya elektromekhanika* (Izvestiya USGU. Ser. Mining electromechanics), 2005, vol. 20, pp. 82—87.

7. Potapov V. Ya., Kravets B. N., Potapov V. V., Skobtsov S. N., Kashapov R. A. *Izvestiya UGGU. Ser. Gornaya elektromekhanika* (News of the USGU. Ser. Mining electromechanics), 2005, vol. 20, pp. 124—134.

8. Rzhevsky V. V., Novik G. Ya. *Osnovy fiziki gornyh porod* (Fundamentals of rock physics). Moscow: Nedra, 1978. 359 p.

9. Tsypin E. F., Ovchinnikova T. Yu. *Innovatsionnye tehnologii obogashcheniya mineralnogo i tehnogennogo syriya: materialy nauch.-tehn. konf.* (Innovative technologies of mineral and technogenic raw materials enrichment: materials of scientific and technical. conf.) Yekaterinburg: USMU, 2015. P. 104—110.

10. Collier D., Dwyer F. B., Thompson R. L., Wulff E. *10-th Int. Miner Process. Congr.* [10-th Int. Miner Process. Congr.]. London, 1974. P. 1007—1022.

11. Walriewicz J. W., Clark A. E., McGill S. L. *Microwave-assisted grinding. IEEE Nrans. on Industry Appl* [Microwave-assisted grinding. IEEE Nrans. on Industry Appl], 1991, vol. 27, no. 2, pp. 239—243.

Коротко об авторах

Потапов Валентин Яковлевич, д-р техн. наук, профессор кафедры горной механики, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: науки о Земле, математическое моделирование
2c1@inbox.ru

Афанасьев Анатолий Ильич, д-р техн. наук, профессор кафедры технической механики, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: науки о Земле, математическое моделирование
gmf.tm@ursmu.ru

Потапов Владимир Валентинович, канд. техн. наук, доцент кафедры горного дела, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: науки о Земле, математическое моделирование
2c1@inbox.ru

Стожков Дмитрий Сергеевич, ст. преподаватель кафедры электротехники, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: науки о Земле, математическое моделирование
gmf.et@m.ursmu.ru

Briefly about the authors

Valentin Potapov, doctor of technical sciences, professor, Mining Mechanics department, Ural State Mining University, Russia, Yekaterinburg. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

Anatoly Afanasyev, doctor of technical sciences, professor, Theoretical Mechanics department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling
e-mail: gmf.tm@ursmu.ru

Vladimir Potapov, candidate of technical sciences, associate professor, Mining Department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling
e-mail: 2c1@inbox.ru

Dmitry Stozhkov, senior teacher, Electrical Engineering department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling
gmf.et@m.ursmu.ru

Образец цитирования

Потапов В. Я., Афанасьев А. И., Потапов В. В., Стожков Д. С. Разделение сульфидных руд индукционным радиорезонансным методом (ИРМ) // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2018. Т. 24. № 4. С. 43–57. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-4-43-57.

Potapov V., Afanasyev A., Potapov V., Stozhkov D. Separation of sulphide ore by the induction radio resonance method (IRM) // Transbaikal State University Journal, 2018, vol. 24, no. 4, pp. 43–57. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-4-43-57.

Статья поступила в редакцию: 06.04.2018 г.
Статья принята к публикации: 14.04.2018 г.