УДК 622.75.
622.367.6.
622.273

В.Я. Потапов, В.В. Потапов, П.М. Анохин, Д.Д. Степаненков

ВЫБОР ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ АСБЕСТОВЫХ РУД

Рассмотрены методы разделения и выполнен анализ имеющихся признаков процесса предварительного обогащения асбестосодержащих руд. Использована методика оценки информативных признаков на основе информационных весов бинарных признаков. Проведены исследования на пробе асбестовой руды ряда месторождения. На первом этапе изучалась по кусковая контрастность и оценивалась теоретическая обогатимость асбестовой руды в крупнокусковом виде. Каждый кусок подвергался исследованию с определением содержания магнетита, плотности, добротности контура, коэффициента отражения, коэффициентов трения и восстановления при ударе, скорости витания, а также содержания скрытого асбеста связанного с раскрытием минеральных комплексов при дроблении руды. Для определения выхода хвостов проведено фракционирование по изучаемым признакам разделения (физическим свойствам). Лучшие результаты (по выходу хвостов) дают методы магнитной сепарации и сортировки по оптическим свойствам, а также по фрикционным характеристикам. На основании анализа информативности признаков по разбиению на дискретные интервалы с последующей обработкой результатов выявлено, что самыми информативными признаками являются фрикционные характеристики и скорость витания асбеста и вмещающих пород. Данные признаки могут быть рекомендованы для разработки фрикционных разделительных аппаратов. Радиорезонансный и фотометрический методы по кусковой сортировки можно также использовать для предварительного разделения асбестовых руд только крупно кусковых продуктов из-за низкой их производительности. При магнитном разделении асбестовой руды можно ожидать высоких технологических преимуществ, что делает его наиболее перспективным для вывода обедненных фракций только для класса крупности – 75 + 50 мм.
Ключевые слова: признаки разделения, магнитная, фотометрическая, радиорезонансная сепарации, фрикционные характеристики, бинарные признаки.

В последнее время природное содержание полезных компонентов в исходной руде снижается, в связи, с чем возрастает актуальность проблемы предварительного обогащения, так как оно позволит вывести на первых этапах большую массу пустой породы.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 53–63.
© 2017. В.Я. Потапов, В.В. Потапов, П.М. Анохин, Д.Д. Степаненков.

Используемые операции дробления в процессе обогащения наиболее дорогие и энергоемкие, и поэтому эффективно выделять обедненную фракцию руды в дробильно-сортировочном комплексе в крупнокусковом виде [1–12].

Прогноз предельной радиометрической обогатимости традиционно связывают с показателями и кривыми контрастности [2]. Получение такой информации требует специального отбора, обработки и анализа кусковых или предварительно объединенных во фракции проб. Следовательно, этот подход не является оперативным.

Рассмотрим отбор и ранжирование значимых признаков для решения задач предварительного обогащения асбестовых руд.

В качестве возможных методов предварительного обогащения асбестовых руд, то есть обогащения при неполном раскрытии минералов можно рассматривать магнитную (по наличию магнетита), фотометрическую – по различию коэффициентов отражения и радиорезонансную – по изменению добротности колебательного контура сепарации, как разновидности радиометрической сортировки [3–8].

Представляет интерес рассмотрение плотности как признака предварительной концентрации асбеста.

Различная дробимость минералов и горных пород в руде или избирательность дробления косвенно выражается разной массовой долей компонентов в различных классах крупности. Лучшая дробимость минералов полезных компонентов эквивалентна увеличению массовой доли компонентов в мелких классах и снижению ее в крупных классах по отношению к руде в целом. Это благоприятный случай сочетания различной дробимости минералов и горных пород, поскольку технология предварительного радиометрического обогащения, как правило, предполагает объединение мелкого не сортируемого класса с концентратом радиометрической сепарации. Снижение массовой доли компонента в сортируемых крупных классах обычно положительно сказывается на контрастности руды, поскольку она повышается, и при этом снижаются возможные потери ценных компонентов с хвостами предварительного обогащения [2].

Количественно соотношение дробимости входящих в состав руды рудных минералов и вмещающих пород оценивают по выходу хвостов с минимальным содержанием скрытого волокна.

Особый интерес представляют физические характеристики асбеста и вмещающих пород, связанные с упругостью и трением. Упругие свойства частиц характеризуются коэффициентом

Таблица 1

Показатели контрастности асбестовых руд [1].

Руды	Класс крупности, мм	Стадия дробления, ДСК	Массовая доля асбеста, %	Величина показателя контрастности
Баженовское месторождение, фабрика № 5, к-т «Ураласбест»	– 400 + 150 – 150 + 100 – 100 + 75 – 75 + 50 – 75 + 50 – 50 + 35	I II II II II II	0,94 0,45 0,41 0,40 0,39 0,78	1,22 1,07 1,23 1,57 1,67 1,02
Фабрика № 4, к-т «Ураласбест»	– 75 + 50 – 50 + 35	III III	0,38 0,71	1,38 1,20
Кимбаевское месторождение, к-т «Оренбургасбест»	– 70 + 30	III	1,00	0,94
Авторакское месторождение к-т«Туваасбест»	– 100 + 75 – 50 + 25 – 50 + 25 – 25 + 18	II II III III	0,29 0,95 1,25 1,11	1,42 1,26 1,12 1,27

восстановления k, трение – статическим коэффициентом f, кинематическим $f_{ск}$ и коэффициентом мгновенного трения – λ.

На первом этапе изучалась покусковая контрастность и оценивалась теоретическая обогатимость асбестовой руды ряда месторождений в крупнокусковом виде (табл. 1).

Для различных классов крупности показатель контрастности лежит в пределах 1,0–1,3, теоретический выход хвостов по кривым контрастности составляет 55–85%. Это говорит о потенциально высокой обогатимости асбестовых руд методами предварительной концентрации. Причем высокой обогатимостью обладают как мелкие классы (– 50 + 35 мм), так и крупные (– 300 + 150 мм) [1].

Анализ и последующий выбор признаков разделения можно проводить по различным показателям:

П – эффективность признака;

η – корреляционное отношение между величиной физического признака разделения и содержанием полезного компонента;

$\gamma_{хв}$ – выход хвостов при ограничении содержания в них полезного компонента.

Исследования проведены на пробе асбестовой трубы Баженовского месторождения класса крупности – 75 + 35 мм, со-

стоящей из 300 кусков. Для каждого куска определены содержание магнетита, плотность, добротность контура, коэффициент отражения, коэффициенты трения и восстановления при ударе, а также содержание скрытого асбеста [1].

При оценке соответствия физического признака разделения содержанию полезного компонента, проводимой при выборе метода обогащения, используют показатель признака П [1].

$$\Pi = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| (\alpha_{\Phi i} - \overline{\alpha}) \gamma_{\Phi i} \right|}{\overline{\alpha}} \qquad (1)$$

где $\alpha_{\Phi i}$ – среднее содержание полезного компонента в *i*-й фракции, %; $\overline{\alpha}$ – среднее содержание полезного компонента, в исходной пробе, %; $\gamma_{\Phi i}$ – выход *i*-ой фракции при фракционировании пробы по значению физического признака, д.ед.

Показатель эффективности признака разделения определяется по формуле:

$$Э = \frac{П}{M}, \text{ д.ед.} \qquad (2)$$

где *M* – показатель контрастности, усл. ед

Чем больше показатель эффективности приближается к единице, тем теснее корреляция между физическим признаком и содержанием асбеста (табл. 2). Связь между ними можно оценить методом корреляционного анализа.

Корреляционные отношения и показатели эффективности имеют низкие значения, что говорит о слабой связи между содержанием асбеста и величиной физических признаков разделения. Наибольшим значениям показателя эффективности признака и корреляционного отношения соответствует содержание магнетита (удельная магнитная восприимчивость) и коэффициент отражения, фрикционные характеристики.

Однако показатель эффективности признака и корреляционное отношение обладают общим недостатком – они являются интегральными по отношению ко всему диапазону изменения физических свойств, так как оценивают тесноту связи между значением признака и содержанием полезного компонента на всем интервале изменения величины признака разделения [ξ_{min}, ξ_{max}].

Высокие значения показателя эффективности признака и корреляционного отношения являются достаточными, но не обязательными условиями применения метода (физического признака разделения) для предварительного обогащения.

Выбор фактора с лучшим соответствием мере обогатимости выполним двумя методами – анализа корреляций и ранжирования по алгоритму отбора и упорядочения признаков по информационным весам [2]. Суть второго метода прогноза заключается в том, что диапазон значений каждого исследуемого фактора разбивается на ряд интервалов варьирования, каждый из которых принимается затем как самостоятельный бинарный признак, принимающий только два значения: 0, если в данной технологической ситуации значения исследуемого признака не попадают в рассматриваемый интервал, и *1* – в противоположном случае. Таким образом, исходная таблица значений признаков преобразуется в таблицу бинарных признаков, по которой вычисляются средние значения признака в *j*-м классе:

$$\gamma_{tj} = \sum_{k=1}^{t_j} \frac{x_{ktj}}{l_j} \tag{3}$$

где γ_{tj} – среднее значение *t*-го бинарного признака в *j*-м классе ($j = 1, \overline{U}$); l_j – количество строк бинарной таблицы в *j*-м классе; X_{ktj} – *k*-е текущее значение *t*-го признака в *j*-м классе.

Затем вычисляют общие средние значения каждого признака:

$$\gamma_t = \sum_{j=1}^{u} \frac{\gamma_{tj}}{u} \tag{4}$$

где γ_t – общее среде значение *t*-го по всем классам ($t = 1, \overline{r}$); *r* – общее число бинарных признаков; *u* – количество классов (режимов).

Информационный вес бинарного признака определяется как дисперсия между классами по каждому признаку:

$$D_t = \sum_{j=1}^{u} \frac{\left(\gamma_{tj} - \gamma_t\right)^2}{u} \tag{5}$$

где D_t – дисперсия *t*-го признака.

Также дисперсии принимают за информативные веса – бинарных признаков, т.е. оценка их значимости.

На заключительном этапе по информационным весам бинарных признаков определяются информационные веса непрерывных признаков:

$$I_{xi} = \left(r_i^{-1} - r_{i-1}\right)^{-1} \sum_{k=r_{i-1}+1}^{r_i} D_k^i \tag{6}$$

где *k* – номер столбца по таблице бинарных признаков; *i* – порядковый номер непрерывного признака; r_i – номер столбца,

Таблица 2

Показатели эффективности признаков разделения асбестовой руды [1–12]

Признак разделения	**Массовая доля асбеста, %**	**Показатель эффективности признака**	**Уравнение регрессии $x = \xi$**	**Корреляционное отношение η**	**Ранг признака**	**По алгоритму отбора и упорядоченности признака**	
						информационная значимость признака	**ранг признака**
Массовая доля магнетита	0,74 0,4	0,57 0,64	$y = -1{,}67+1{,}01x - 0{,}04x^2$ $y = -0{,}12+0{,}18x - 0{,}001x^2$	0,57 0,30	4	0,086	6
Плотность	1,04	0,43		связи нет	8	0,052	8
Коэффициент отражения	0,46	0,55	$y = -1{,}26+0{,}16x-0{,}003x^2$	0,69	3	0,128	3
Добротность контура	0,69	0,44	$y = -0{,}27+0{,}24x - 0{,}003x^2$	0,52	6	0,108	4–5
Удельная магнитная восприимчивость	0,40	0,83	$y = -0{,}38+039\cdot105x -$ $- 0{,}047x+0{,}0002x^2$	0,53	5	0,136	2
Избирательное дробление	0,45	0,56	$y =-3{,}02-0{,}047x+0{,}0002x^2$	0,51	7	0,108	4–5
Фрикционная характеристика	0,8	0,96	$y = 44+83{,}2/x$	0,86	2	0,156	1–2
Скорость витания	0,82	0,98	$y = -1{,}26+0{,}16x-0{,}003x^2$	0,99	1	0,158	1–2

на котором заканчиваются бинарные признаки, входящие в состав непрерывного признака $x_i(i = 1, \bar{n})$[2].

Непрерывные признаки $x_i(i = 1, \bar{n})$ располагают в порядке убывания на основе информативных весов. Первый в ряду признак является наиболее значимым, т.е. важным.

Для определения выхода хвостов проведено фракционирование по изучаемым признакам разделения (физическим свойствам). При содержании асбеста в хвостах 0,4% определены теоретические показатели предварительного обогащения асбестовой руды (табл. 2).

Анализируя табл. 2 можно сделать вывод, что при использовании рассматриваемых методов для предварительного обогащения асбестовой руды, можно добиться получения обедненной фракции с отвальным содержанием асбеста.

Лучшие результаты (по выходу хвостов) дают методы магнитной сепарации и сортировки по оптическим свойствам, а также по фрикционным характеристикам.

При выборе метода обогащения иногда решающим фактором может выступать ограничение на вид процесса (мокрый, сухой). Так, тяжелосредную сепарацию и отсадку, предусматривающих мокрую технологию для предварительного обогащения асбестовых руд применять нецелесообразно.

Радиорезонансный и фотометрический методы по кусковой сортировки можно использовать для предварительного обогащения асбестовых руд. Теоретические показатели фотометрической сортировки значительно выше, чем радиорезонансной. Однако отсутствие серийно выпускаемых отечественных сепараторов тормозит их применение [8–9]. Лучшие результаты (по выходу хвостов) дают методы магнитной сепарации и сортировки по оптическим свойствам, а также по фрикционным характеристикам.

При выборе метода обогащения иногда решающим фактором может выступать ограничение на вид процесса (мокрый, сухой). Так, тяжело средную сепарацию и отсадку, предусматривающих мокрую технологию для предварительного обогащения асбестовых руд применять нецелесообразно (табл. 3).

Радиорезонансный и фотометрический методы по кусковой сортировки можно использовать для предварительного обогащения асбестовых руд. Теоретические показатели фотометрической сортировки значительно выше, чем радиорезонансной. Однако отсутствие серийно выпускаемых отечественных сепараторов тормозит их применение [8–9].

Таблица 3

Теоретические показатели предварительного обогащения асбестовой руды [1, 2]

Признак разделения	**Массовая доля асбеста в исходной пробе**	**Хвосты**			**Концентрат**		
		выход	**массовая доля асбеста**	**извлечение асбеста**	**выход**	**массовая доля асбеста**	**извлечение асбеста**
Массовая доля магнетита	0,74	33,33	0,40	18,01	66,67	0,91	81,99
	0,40	70,00	0,20	34,75	30,00	0,87	65,25
Плотность	1,04	28,14	0,40	10,82	71,86	1,29	89,18
Коэффициент отражения	0,46	70,79	0,26	40,31	29,21	0,94	59,69
Добротность контура	0,69	18,73	0,40	10,49	81,27	0,76	89,51
Удельная магнитная восприимчивость	0,40	90,00	0,20	45,00	10,00	2,20	55,00
Избирательное дробление	0,45	95,92	0,32	68,2	4,08	3,58	31,8
Фрикционные характеристики, скорость витания	0,8	93,07	0,3	34,9	6,30	8,24	65,1

При магнитном разделении асбестовой руды можно ожидать высоких технологических преимуществ (высокая производительность аппаратов, их надежность, низкая себестоимость переработки), что делает его наиболее перспективным для вывода обедненных фракций крупностью –75 + 20 мм.

На основании анализа информативности признаков по разбиению на дискретные интервалы с последующей обработкой результатов выявлено, что самыми информативными признаками являются фрикционные характеристики и скорость витания асбеста и вмещающих пород [10–12].

Данные признаки могут быть рекомендованы для разработки фрикционных разделительных аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Цыпин Е.Ф.*, *Пелевин А.Е.*, *Лавник В.Я.*, *Балабаева Л.М.* Выбор признаков разделения для предварительного обогащения асбестовой руды Баженовского месторождения / Совершенствование технологии обогащения асбестовых руд. Сборник научных трудов ВНИИпроектасбест. – Асбест, 1986. – С. 45–58

2. *Цыпин Е.Ф.*, *Потапов В.Я.*, *Троп В.А.* Прогноз радиометрической обогатимости медно-цинковых руд на основе априорной информации // Известия вузов. Горный журнал. – 1990. – № 1. – С. 110–115.

3. *Пелевин А.Е.* Моделирование процесса разделения крупнокусковой асбестовой руды на магнитном сепараторе / Совершенствование и разработка нового технологического оборудования асбестообогатительных фабрик: Сборник научных трудов. – Асбест: ВНИИпроектасбест, 1989. – С. 35–50.

4. *Цыпин Е.Ф.*, *Пелевин А.Е.*, *Лавник В.Н. и др.* Значение предварительной концентрации асбестовых руд // Строительные материалы. – 1988. – № 7. – С. 18–20.

5. *Шварц Е.* Магнитные свойства асбеста. Определение абсолютного содержания магнетита // Canadian Mining and Metallurgical Bulletin. – December. – 1971. – P. 55–59.

6. *Arvidson et al.* Recent advances in dry high-intensity permanent-magnet separator technology / Preprints XIV International Mintral Processing Congres. Toronto (Canada). October. – 1982. – Pp. 71–79.

7. *Martinez E.* Magnetic concentration of Asbestos // Cim Bulletin. 1979. – № 805. – Pp. 100–104.

8. *Цыпин Е.Ф.* Исследования физико-механических свойств руд хризотил-асбеста для разработки способов и устройств для предварительного обогащения в дробильно-сортировочном комплексе: Отчет о НИР (заключительный) / СГИ; № ГР018527675. – Свердловск, 1987. –142 с.

9. *Потапов В.Я.* , *Цыпин Е.Ф.*, *Ляпцев С.А.*, *Афанасьев А.И. и др.* Методика определения упругих и фрикционных характеристик сыпучих материалов // Известия вузов, Горный журнал. – 1998. – № 5–6. – С. 103–108.

10. *Шалюгина В.А.*, *Бергер Г.С.* Исследование скорости витания волокна антофиллит-асбеста в воздушной среде / Новые достижения в технологии обогащения асбестовых руд. Научные труды выпуск 13. – Асбест, 1972. – С. 122–129.

11. *Потапов В.Я.*, *Потапов В.В.*, *Семериков Л.А.*, *Конев Я.И.* Результаты определения эквивалентного коэффициента трения качения кусков горной породы // Горный информационно-аналитический бюллетень СВ1. Труды научного симпозиума «Неделя горняка-2013». – 2013. – С. 295–298.

12. *Потапов В.Я.*, *Афанасьев А.И.*, *Ляпцев С.А.* Аппараты для разделения горных пород по упругим и фрикционным характеристикам / Монография LAP (Lambert Academic Publishing) Германия. – 2013. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Потапов Валентин Яковлевич[1] – доктор технических наук, профессор, доцент, e-mail: 2c1@inbox.ru,
Потапов Владимир Валентинович[1] – кандидат технических наук, доцент,
Анохин Петр Михайлович[1] – доцент,
Степаненков Дмитрий Денисович[1] – магистрант,
[1] Уральский государственный горный университет.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 4, pp. 53–63.

UDC 622.75.
622.367.6.
622.273

V.Ya. Potapov, V.V. Potapov, P.M. Anokhin, D.D. Stepanenkov

SELECTING INFORMATIVE PARAMETERS FOR ASBESTOS ORE SEPARATION

The paper discusses methods of separation and the analysis of the available evidence of prior asbestos ore beneficiation process. Used method of estimating informative features based on the weights of binary information signs. For this study conducted on a sample of a number of asbestos ore deposits. The first phase has been studied for lump contrast and evaluated the theoretical washability asbestos ore in lump form. Each piece was subjected to the determination of the content of magnetite, the density Q of the circuit, the reflection coefficient of friction coefficients and recovery impact, Withania speed, as well as the content of the latent asbestos-related disclosure of mineral complexes in crushing ore. To determine the output tails held fractionation studied traits separation (physical properties). Best results (at output tails) provide methods of magnetic separation and sorting of the optical properties, as well as friction characteristics. Based on the analysis of informative for partitioning into discrete intervals, followed by treatment of the results revealed that the most informative features are frictional characteristics and speed Withania asbestos and host rocks. These symptoms may be recommended for developing friction dividing apparatus. Radiorezonansny and photometric methods for sorting lumps can also be used for pre-separation of asbestos ores only big lump products due to their low productivity. When the magnetic separation of asbestos ore can expect high technological advantages, making it the most promising for the O-depleted fractions only for class size – 75 + 50 mm.

Key words: separating of characteristic, magnetic, photometric, radioresonant separations, frictional characteristics, and binary criterion.

AUTHORS

Potapov V. Ya., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Assistant Professor, e-mail: 2c1@inbox.ru,
Potapov V. V., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Anokhin P. M., Assistant Professor,
Stepanenkov D. D., Master's Degree Student,
[1] Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.

REFERENCES

1. Tsypin E. F., Pelevin A. E., Lavnik V. Ya., Balabaeva L. M. *Sovershenstvovanie tekhnologii obogashcheniya asbestovykh rud*. Sbornik nauchnykh trudov VNIIproektasbest (Improvement of asbestos ore processing technology. Collection of scientific papers of VNIIproektasbest), Asbest, 1986, pp. 45–58

2. Tsypin E. F., Potapov V. Ya., Trop V. A. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 1990, no 1, pp. 110–115.

3. Pelevin A. E. *Sovershenstvovanie i razrabotka novogo tekhnologicheskogo oborudovaniya asbestoobogatitel'nykh fabrik*: Sbornik nauchnykh trudov (Improvement and new design of equipment for asbestos processing plants. Collection of scientific papers), Asbest, VNIIproektasbest, 1989, pp. 35–50.

4. Tsypin E. F., Pelevin A. E., Lavnik V. N. *Stroitel'nye materialy*. 1988, no 7, pp. 18–20.

5. Shvarts E. *Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*. December. 1971, pp. 55–59.

6. Arvidson et al. Recent advances in dry high-intensity permanent-magnet separator technology. *Preprints XIV International Mintral Processing Congres*. Toronto (Canada). October. 1982, pp. 71–79.

7. Martinez E. Magnetic concentration of Asbestos. *Cim Bulletin*. 1979, no 805, pp. 100–104.

8. Tsypin E. F. *Issledovaniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv rud khrizotil-asbesta dlya razrabotki sposobov i ustroystv dlya predvaritel'nogo obogashcheniya v drobil'no-sortirovochnom komplekse*: Otchet o NIR (Analysis of physical properties of crysotile asbestos ore for developing methods and equipment of pre-treatment in crushing-and-screening plants. Research report), Sverdlovsk, 1987, 142 p.

9. Potapov V. Ya. , Tsypin E. F., Lyaptsev S. A., Afanas'ev A. I. *Izvestiya vuzov, Gornyy zhurnal*. 1998, no 5–6, pp. 103–108.

10. Shalyugina V. A., Berger G. S. *Novye dostizheniya v tekhnologii obogashcheniya asbestovykh rud*. Nauchnye trudy, vypusk 13 (Advancement in the technology of processing of asbestos ore. Scientific papers, issue 13), Asbest, 1972, pp. 122–129.

11. Potapov V. Ya., Potapov V. V., Semerikov L. A., Konev Ya. I. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* Special edition 1. 2013, pp. 295–298.

12. Potapov V. Ya., Afanas'ev A. I., Lyaptsev S. A. *Apparaty dlya razdeleniya gornykh porod po uprugim i friktsionnym kharakteristikam* (Separators based on elasticity and friction characteristics of rocks), Monograph LAP (Lambert Academic Publishing), Germany, 2013.

МЫСЛИ О РОЛИ КНИГИ В ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

Критиковать автора книги легко, а попробуйте его оценить по достоинству.