

УДК 622.7

**О ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ
НОВОСИБИРСКОГО ОЛОВОКОМБИНАТА**

С. А. Кондратьев, В. И. Ростовцев, И. И. Бакшеева

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: kondr@misd.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Приведены результаты экспериментальных исследований магнитных свойств железосодержащего техногенного минерального сырья при радиационно-термической обработке. Установлено, что объемная магнитная восприимчивость пирит и арсенопирит содержащего оловянного техногенного сырья возросла в среднем в 5 раз. Показано, что при радиационно-термической магнетизации и магнитной сепарации из оловянного техногенного сырья Новосибирского оловокомбината возможно получение оловянного концентрата марки КОС-3, отвечающего требованиям фьюминг-процесса.

Техногенное минеральное сырье, оловянные продукты, обработка ускоренными электронами, сухая магнитная сепарация

Горная промышленность оказывает значительное влияние на развитие мировой экономики и во многом определяет эффективность экономического развития отдельных государств [1]. Ее дальнейшее развитие невозможно без своевременного воспроизводства минерально-сырьевой базы. Учитывая рост потребности в сырье для металлургии и других перерабатывающих отраслей промышленности, тенденцию ухудшения качества добываемого сырья, а также сырьевую зависимость отечественной экономики от импорта, все более актуальной становится проблема освоения и ввода в эксплуатацию техногенных месторождений.

Следует отметить, что отечественные горные предприятия ежегодно складывают на поверхности около 5 млрд т вскрышных и отвальных пород и примерно 700 млн т направляют в отвалы обогатительные фабрики. Общий объем накопленных в Российской Федерации отходов составляет около 80 млрд т, в том числе более 2 млрд т представлены золами ТЭС, ТЭЦ, ГРЭС и шлаками черной и цветной металлургии. По экспертным оценкам, вовлечение в хозяйственный оборот полезных компонентов техногенного сырья может дать ежегодный прирост ВВП порядка 2 трлн руб.

Необходимость разработки техногенных месторождений (ТМ) важна как с позиций поддержания требуемого уровня производства металлов даже при значительном снижении объемов добычи руд, так и с позиций экологии.

В работе [2] указывается, что ресурсы ТМ нельзя определять привычными категориями содержания в них полезных компонентов, так как выделение последних затруднено. Показатели обогащения такого сырья невысоки даже при значительных затратах на технологию. Рассматривать вопрос о целесообразности переработки техногенного сырья необходимо комплексно с учетом его экологической опасности и выгоды от рекультивации земель и восстановления среды обитания человека и животного мира.

В последние годы для направленного изменения свойств минералов широко применяются радиационные, ультразвуковые, электрохимические, механохимические, плазменные воздействия на них. Если раньше эти методы рассматривались как экзотические, то в связи с началом выпуска промышленных электрохимических кондиционеров пульпы, плазмотронов, линейных ускорителей, ультразвуковых генераторов можно говорить о реальном внедрении новых экологически безопасных технологий в процессах первичной переработки труднообогатимых руд и угля сложного вещественного состава [3].

Сложилась благоприятная ситуация для практического внедрения новой технологии по использованию энергии мощных энергетических воздействий при обогащении различных видов минерального сырья. Как показано в [4, 5], предварительная обработка минеральных комплексов позволяет не только снизить затраты на измельчение, но и значительно повысить извлечение и качество концентратов. Высокая эффективность энергетических методов в процессах обогащения подтверждается исследованиями ученых Канады, Германии, Японии, ЮАР [4].

По ориентировочной оценке, в отходах медной, свинцово-цинковой, никель-кобальтовой, вольфрамо-молибденовой, оловянной, алюминиевой подотраслей промышленности содержится, млн т: более 8.0 меди, 9.0 цинка, 1.0 свинца, 2.5 никеля, 33.5 Al_2O_3 , 0.6 олова, 0.2 молибдена, а также около 1 тыс. т золота и 12 тыс. т серебра. Резервы полезных компонентов в накопленных отходах равноценны открытию многих новых месторождений [6, 7].

По данным [8], на Новосибирском оловокомбинате (НОК) за период работы предприятия с 1942 г. накопилось 180–190 тыс. т техногенного касситерит-сульфидного сырья со средней массовой долей олова 1.42 %, мышьяка 10–13 % и серы 22–30 %. Ориентировочными расчетами показано, что из лежалых хвостов можно получать концентраты с массовой долей олова 5–10 % при извлечении 26–30 % [9].

Цель настоящих исследований — изучение возможности применения радиационно-термических воздействий для модификации железосодержащего сульфидного техногенного минерального сырья НОКа и перспектив их использования в процессах сухого магнитного обогащения.

Как указывалось в [10], в сравнении с другими методами себестоимость магнитной сепарации для кусковых сильномагнитных материалов самая низкая, для мелкодисперсных — вторая после самого дешевого метода винтовой сепарации.

В лабораторных экспериментах изучалось техногенное сырье Новосибирского оловянного комбината, содержащее железо преимущественно в сульфидной форме. Исследования проводились с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (спектрометр ARL.OPTIM'X) и рентгеновской дифрактометрии (ДРОН-4). Радиационно-термическая обработка осуществлялась пучком ускоренных электронов с энергией 2.4 МэВ на промышленном ускорителе ИЛУ-6 в Институте ядерной физики СО РАН. При этом переменными параметрами были ток пучка и его частота, изменением которых достигались требуемые режимы обработки материала. Нагрев минеральных объектов при обработке на ускорителе ИЛУ-6 выполнялся со скоростью 25 °С/мин. Для определения температуры и величины поглощенной дозы использовались стандартные физические методы. Для измерения магнитной восприимчивости исходных и обработанных образцов техногенного сырья применялся измеритель магнитной восприимчивости (ИМВ), для сухого магнитного разделения — сепаратор 138СБЭ, обеспечивающий напряженность магнитного поля до $7.96 \cdot 10^5$ А/м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований по изучению влияния радиационно-термической модификации на свойства рассматриваемых минеральных образцов в процессе их обработки и переработки, включая магнитную сепарацию, приведены в табл. 1–6 и на рис. 1–3.

Гранулометрическая характеристика техногенного сырья НОКа и распределение основных элементов по классам крупности +3 и –3 мм представлены в табл. 1. Видно, что материал класса +3 мм характеризуется повышенным содержанием олова, железа, серы и мышьяка по сравнению с их содержанием в исходной пробе.

ТАБЛИЦА 1. Гранулометрический состав техногенного сырья Новосибирского оловянного комбината, %

Класс, мм	Выход	Содержание				Извлечение			
		Sn	Fe	S	As	Sn	Fe	S	As
+3	39.90	0.800	36.80	24.09	14.27	49.40	43.32	44.33	45.89
–3	60.10	0.544	31.60	20.08	11.17	50.60	56.68	55.67	54.11
Итого	100.00	0.646	33.51	21.68	12.41	100.00	100.00	100.00	100.00

Рентгенофазовый анализ исходной пробы техногенного сырья НОКа (рис. 1) и данные работы [8] показали, что основными минералами, входящими в его состав, являются, %: касситерит SnO_2 — 1–1.5, пирит FeS_2 — 15–35, арсенопирит FeAsS — 15–35, марказит FeS_2 — 15–35, кварц SiO_2 — 3–7, плагиоклаз — 1–1.5, амфибол — 1–1.5, слюда — 1–1.5. К вторичным минералам, близким по составу и свойствам к гипергенным образованиям, относятся, %: ярозит $(\text{KFe}_3)[\text{SiO}_4]_2(\text{OH})_6$ — 15–30, кальцит CaCO_3 — 3–7, гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — 1–1.5, хлорит — 0.5–1.5.

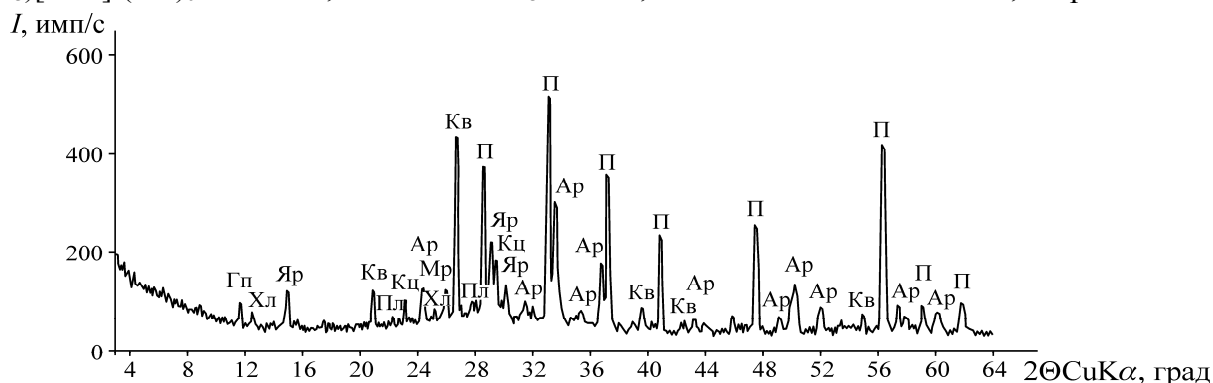


Рис. 1. Рентгенограмма исходной пробы оловозаводских хвостов: П — пирит; Ар — арсенопирит; Кв — кварц; Яр — ярозит; Кц — кальцит; Пл — плагиоклаз; Мр — марказит; Хл — хлорит; Гп — гипс [8]

Учитывая сложный химический и минеральный состав техногенного сырья НОКа и наличие в нем сульфидов железа, в том числе пирита и арсенопирита, а также данные работ [10–13], исследовано влияние радиационно-термической обработки на магнитные свойства техногенного сырья комбината (табл. 2).

Анализ экспериментальных данных, приведенных в табл. 2, показывает, что объемная магнитная восприимчивость материала техногенного сырья, содержащего сульфиды железа, под действием радиационно-термической обработки на ускорителе ИЛУ-6 существенно возрастает. Если магнитная восприимчивость исходного материала класса +3 мм техногенного сырья составляет $968.28 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, то после обработки до температуры 600°C она увеличивается до $3103.78 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Магнитная восприимчивость исходного материала класса –3 мм техногенного сырья, равная $398.40 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, после обработки до температуры 600°C составляет $2535.69 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

ТАБЛИЦА 2. Влияние радиационно-термической обработки техногенного сырья на его магнитную восприимчивость

Условия обработки	Магнитная восприимчивость	
	Объемная, 10^{-5} ед. СИ	Удельная, 10^{-5} см ³ /г
Материал класса + 3 мм, плотность 3.47 г/см ³		
Без обработки	968.28	279.04
Обработка на ИЛУ-6		
300	1184.67	341.40
450	1878.44	541.34
600	3103.78	894.46
Материал класса – 3 мм, плотность 2.95 г/см ³		
Без обработки	398.40	135.05
Обработка на ИЛУ-6		
300	541.33	183.50
450	1490.73	505.33
600	2535.69	859.56

С целью определения фазового состава проб техногенного оловосодержащего сырья после радиационно-термической обработки на ускорителе ИЛУ-6 выполнен рентгенофазовый анализ. Рентгенограммы на рис. 2 показывают, что при температуре 450 °С образуются новые фазы: пирротин (Пр), магнетит (Мг), количество которых возрастает при температуре 600 °С. При этом количество арсенопирита и пирита уменьшается и на рентгенограммах материала при 600 °С они не обнаруживаются. Следует отметить появление на рентгенограмме при 600 °С новых фаз — феррокестерита $Cu_4FeZnSn_2S_8$ (Фе) и гематита (Гм).

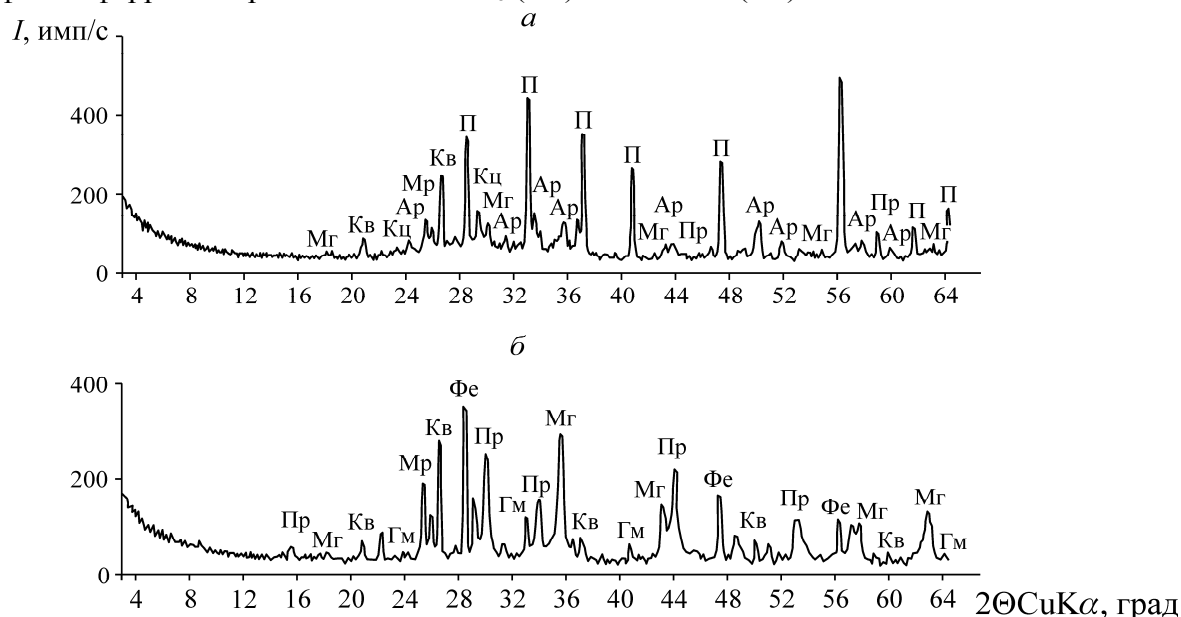


Рис. 2. Рентгенограммы оловосодержащих техногенных хвостов после радиационно-термической обработки при температурах, °С: а — 450; б — 600

При дальнейшем повышении температуры до 750 °С (рис. 3а) количество магнетита (Мг) и гематита (Гм) возрастает. Количество указанных фаз увеличивается при повышении температуры радиационно-термической обработки до 900 °С (рис. 3б). Количество феррокестерита (Фе) и пирротина (Пр) уменьшается.

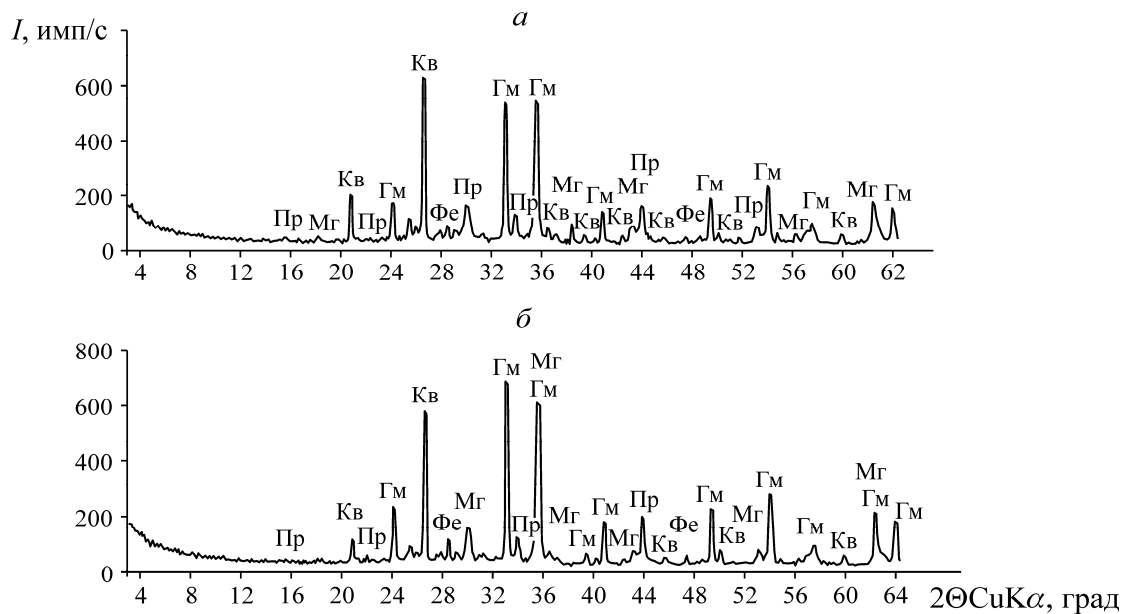


Рис. 3. Рентгенограммы оловосодержащих техногенных хвостов после радиационно-термической обработки при температурах, °С: а — 750; б — 900

В табл. 3 приведены результаты определения химического состава обработанного в радиационно-термическом режиме оловянного техногенного сырья различной крупности. Анализ данных показывает, что в результате обработки на ускорителе ИЛУ-6 изменяется химический состав техногенного оловянного сырья. Установлена закономерность снижения содержания мышьяка в продуктах обогащения при увеличении температуры обработки. Так, в материале крупностью +3 мм содержание мышьяка составляет 14.27%, после обработки до температуры 600 °С — 2.91%. Аналогичная зависимость характерна и для материала крупностью –3 мм: в исходном материале содержание мышьяка 11.17%, в обработанном до температуры 600 °С — 3.50%, а в обработанном до температуры 750 °С — 1.24%.

ТАБЛИЦА 3. Влияние радиационно-термической обработки оловянного техногенного сырья на его химический состав

Температура, °С	Содержание, %			
	Sn	Fe	S	As
Техногенное сырье крупностью +3 мм				
Без обработки	0.800	36.80	24.90	14.27
Обработка на ИЛУ-6				
300	0.836	38.31	23.46	14.88
450	0.923	42.41	19.26	13.29
600	0.955	52.06	16.71	2.91
Техногенное сырье крупностью –3 мм				
Без обработки	0.544	31.60	20.08	11.17
Обработка на ИЛУ-6				
300	0.619	31.80	18.66	11.21
450	0.738	36.53	14.62	10.71
600	0.829	47.29	14.07	3.50
750	0.980	38.65	7.52	1.24
900	1.040	38.48	5.37	1.47

В табл. 4 и 5 представлены результаты сухой магнитной сепарации обработанного в радиационно-термическом режиме при различных температурах оловянного техногенного сырья различной крупности: в табл. 4 — материала класса + 3 мм, доизмельченного до крупности – 3 мм, а в табл. 5 — минерального сырья класса – 3 мм.

ТАБЛИЦА 4. Влияние напряженности магнитного поля и температуры обработки ускоренными электронами пробы оловянного техногенного сырья крупностью + 3 мм на результаты сухой магнитной сепарации, %

Обработка	Продукт	Выход	Содержание				Извлечение			
			Sn	Fe	S	As	Sn	Fe	S	As
Напряженность 81.96 кА/м										
Без обработки	Магнитный	4.82	0.592	40.03	28.28	13.98	3.20	5.20	5.70	4.40
	Немагнитный	95.18	0.894	37.19	23.59	15.27	96.80	94.80	94.30	95.60
	Итого	100	0.880	37.33	23.81	16.20	100	100	100	100
До 300 °С ИЛУ-6	Магнитный	13.58	0.588	40.58	27.18	13.16	8.97	14.39	16.22	11.99
	Немагнитный	96.42	0.938	37.93	22.06	15.18	91.03	85.61	83.78	88.01
	Итого	100	0.890	38.29	22.76	14.91	100	100	100	100
До 450 °С ИЛУ-6	Магнитный	82.55	0.992	46.97	16.71	12.67	83.11	86.02	79.67	81.32
	Немагнитный	17.45	0.954	36.10	20.17	13.77	16.89	13.98	20.33	18.68
	Итого	100	0.985	45.07	17.31	12.86	100	100	100	100
До 600 °С ИЛУ-6	Магнитный	97.02	0.967	52.64	16.48	2.66	98.19	98.10	95.66	88.80
	Немагнитный	2.98	0.580	33.27	24.34	10.92	1.81	1.90	4.34	11.20
	Итого	100	0.955	52.06	16.71	2.91	100	100	100	100
Напряженность 155.18 кА/м										
Без обработки	Магнитный	29.20	0.660	38.41	25.86	14.79	26.40	30.00	30.70	28.40
	Немагнитный	70.80	0.760	36.90	24.13	15.40	73.60	70.00	69.30	71.60
	Итого	100	0.730	37.34	24.63	15.22	100	100	100	100
До 300 °С ИЛУ-6	Магнитный	27.28	0.750	39.80	24.88	14.71	26.43	28.26	28.45	26.87
	Немагнитный	72.72	0.783	37.90	23.47	15.06	73.57	71.74	71.55	73.18
	Итого	100	0.774	38.42	23.85	14.96	100	100	100	100
До 450 °С ИЛУ-6	Магнитный	79.06	0.933	42.18	19.59	13.36	79.63	81.32	78.74	77.30
	Немагнитный	20.94	0.901	36.59	19.97	14.81	20.37	18.68	21.26	22.70
	Итого	100	0.926	41.01	19.67	13.66	100	100	100	100
Напряженность 322.29 кА/м										
Без обработки	Магнитный	82.19	0.774	37.45	24.67	15.20	84.60	83.30	82.70	82.90
	Немагнитный	17.81	0.650	34.70	23.82	14.45	15.40	16.70	17.30	17.10
	Итого	100	0.750	36.96	24.52	15.07	100	100	100	100
До 300 °С ИЛУ-6	Магнитный	74.55	0.829	38.87	24.29	14.77	73.18	75.83	76.18	74.54
	Немагнитный	25.45	0.890	36.29	22.25	14.78	26.82	24.17	23.82	25.46
	Итого	100	0.844	38.21	23.77	14.77	100	100	100	100
До 450 °С ИЛУ-6	Магнитный	96.62	0.869	41.58	20.88	13.47	97.78	97.66	97.06	97.43
	Немагнитный	3.38	0.564	28.53	18.09	10.17	2.22	2.34	2.94	2.57
	Итого	100	0.859	41.14	20.79	13.36	100	100	100	100

Установлено, что при повышении температуры и напряженности магнитного поля выход магнитной фракции возрастает, что соответствует повышению магнитной восприимчивости техногенного оловянного сырья под действием радиационно-термической обработки на ускорителе ИЛУ-6 (см. табл. 2). Поскольку при крупности – 3 мм селективного разделения минералов при сухой магнитной сепарации не произошло, материал подвергли доизмельчению с целью раскрытия сростков и последующего магнитного обогащения. Результаты сухой магнитной сепарации приведены в табл. 6.

ТАБЛИЦА 5. Влияние напряженности магнитного поля и температуры обработки ускоренными электронами пробы крупностью – 3 мм на результаты сухой магнитной сепарации, %

Обработка	Продукт	Выход	Содержание				Извлечение			
			Sn	Fe	S	As	Sn	Fe	S	As
Напряженность 81.96 кА/м										
Без обработки	Магнитный	6.27	0.625	38.21	26.73	12.70	5.60	7.40	8.40	6.50
	Немагнитный	93.73	0.701	32.17	19.42	12.26	94.40	92.60	91.60	93.50
	Итого	100	0.696	32.54	19.87	12.28	100	100	100	100
До 300 °С ИЛУ-6	Магнитный	8.41	0.678	39.38	24.21	12.89	10.07	10.61	10.37	10.14
	Немагнитный	91.59	0.556	30.45	19.21	10.49	89.93	89.39	89.63	89.86
	Итого	100	0.566	31.20	19.63	10.69	100	100	100	100
До 450 °С ИЛУ-6	Магнитный	67.05	0.805	40.95	15.33	10.91	75.07	75.46	69.69	69.38
	Немагнитный	32.95	0.544	27.10	13.57	9.80	24.93	24.54	30.31	30.62
	Итого	100	0.719	36.39	14.75	10.54	100	100	100	100
До 600 °С ИЛУ-6	Магнитный	93.80	0.912	47.59	14.05	3.45	94.21	96.15	93.01	85.17
	Немагнитный	6.20	0.848	28.82	15.97	9.09	5.79	3.85	3.99	14.83
	Итого	100	0.908	46.42	14.17	3.80	100	100	100	100
Напряженность 155.18 кА/м										
Без обработки	Магнитный	30.00	0.754	36.83	23.86	13.74	34.60	34.40	32.80	36.10
	Немагнитный	70.00	0.612	30.09	20.97	10.44	65.40	65.60	67.20	63.90
	Итого	100	0.655	32.11	21.83	11.43	100	100	100	100
До 300 °С ИЛУ-6	Магнитный	32.49	0.746	38.47	22.77	13.65	38.19	38.99	38.78	39.39
	Немагнитный	67.51	0.581	28.97	17.30	10.11	61.81	61.01	61.22	60.61
	Итого	100	0.634	32.06	19.08	11.26	100	100	100	100
До 450 °С ИЛУ-6	Магнитный	77.50	0.779	40.54	15.47	11.78	83.09	85.16	81.66	81.94
	Немагнитный	22.50	0.546	24.33	11.97	8.94	16.91	14.84	18.34	18.06
	Итого	100	0.727	36.89	14.68	11.14	100	100	100	100
До 600 °С ИЛУ-6	Магнитный	96.40	0.752	49.03	14.03	2.67	96.64	97.98	96.08	91.44
	Немагнитный	3.60	0.700	27.06	15.33	6.69	3.36	2.02	3.92	8.56
	Итого	100	0.750	48.24	14.08	2.81	100	100	100	100
Напряженность 322.29 кА/м										
Без обработки	Магнитный	77.95	0.760	34.46	20.91	12.89	80.80	81.60	80.60	82.30
	Немагнитный	22.05	0.640	27.42	17.77	9.82	19.20	18.40	19.40	17.70
	Итого	100	0.733	32.90	22.21	12.21	100	100	100	100
До 300 °С ИЛУ-6	Магнитный	73.65	0.742	34.17	17.66	12.54	83.09	78.27	75.27	79.12
	Немагнитный	26.35	0.422	26.51	16.22	9.25	16.91	21.73	24.73	20.88
	Итого	100	0.658	32.15	17.28	11.67	100	100	100	100
До 450 °С ИЛУ-6	Магнитный	92.20	0.804	37.72	14.73	10.74	96.50	95.77	94.17	95.04
	Немагнитный	7.80	0.345	19.68	10.77	6.63	3.50	4.23	5.83	4.96
	Итого	100	0.768	36.31	14.42	10.42	100	100	100	100
До 600 °С ИЛУ-6	Магнитный	95.72	0.837	48.00	13.91	3.80	96.64	97.34	95.44	93.61
	Немагнитный	4.28	0.650	29.36	14.86	5.80	3.36	2.66	4.56	6.39
	Итого	100	0.829	47.20	13.95	3.89	100	100	100	100

Из табл. 6 следует, что из оловянного техногенного сырья, обработанного на ускорителе ИЛУ-6 при температуре 600 °С и доведенного до крупности – 0.25 мм, можно получить продукт с содержанием около 5 % олова (Sn) и 0.48 % мышьяка (As). Такой концентрат соответствует марке КОС-3 и отвечает требованиям фьюминг-процесса.

ТАБЛИЦА 6. Влияние напряженности магнитного поля на результаты сухой магнитной сепарации оловянного техногенного сырья, обработанного на ускорителе ИЛУ-6 при температуре 600 °С и доизмельченного до крупности – 0.25 мм

Напряженность H, кА/м	Продукт	Выход, %	Содержание, %	
			Sn	As
Без обработки H = 155.18	Магнитный	29.60	0.723	14.05
	Немагнитный	70.40	0.875	17.10
	Итого	100	0.830	16.20
Без обработки H = 81.96	Магнитный	25.30	0.613	13.07
	Немагнитный	74.70	0.953	16.59
	Итого	100	0.867	15.70
600 °С H = 155.18	Магнитный	82.40	0.297	3.33
	Немагнитный	17.60	3.896	0.95
	Итого	100	0.960	2.91
600 °С H = 81.96	Магнитный	81.70	0.296	3.34
	Немагнитный	18.30	3.915	0.84
	Итого	100	0.958	2.88
600 °С H = 43.78	Магнитный	80.90	0.017	3.53
	Немагнитный	19.10	4.987	0.48
	Итого	100	0.966	2.95

Следовательно, радиационно-термическая обработка железосодержащего техногенного сырья сложного состава позволяет селективно направленно изменять его магнитные свойства за счет интенсивно протекающих под действием ускоренных электронов фазовых переходов минералов железа. Высокая температура, достигаемая во время облучения, и наличие озона способствуют более быстрому и значительному усилению магнитных свойств. Это связано с образованием ферромагнитных фаз, таких как пирротин, магнетит, гематит в оловосодержащих хвостах, подвергшихся радиационно-термической обработке [13 – 15].

Для исследованного оловянного техногенного сырья важным фактором является установленная возможность снижения в 4–6 раз содержания мышьяка в продуктах обогащения при увеличении температуры обработки под воздействием ускоренных электронов. Выявлено, что с помощью сухой магнитной сепарации возможно получение оловянного концентрата, который соответствует марке КОС-3 и может быть переработан с использованием фьюминг-процесса.

ВЫВОДЫ

Установлено, что радиационно-термическая обработка железосодержащего сульфидного техногенного сырья позволяет изменять его магнитные свойства за счет протекающих под действием ускоренных электронов фазовых превращений минералов железа с образованием ферромагнитных фаз различных минералов.

Экспериментально показано, что после радиационного нагрева техногенного сырья Новосибирского оловянного комбината до 600 °С его объемная магнитная восприимчивость возрастает в среднем в 5 раз, что позволяет при помощи сухой магнитной сепарации получать оловянный концентрат с содержанием около 5 % олова и 0.48 % мышьяка.

Использование радиационно-термической модификации и последующей сухой магнитной сепарации открывает возможности для создания технологий переработки техногенного железосодержащего сырья сложного состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Новый виток** в истории освоения техногенных россыпей // Золотодобыча. — 2016. — № 209. — С. 3–7.
2. **Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е.** Инновационные технологии переработки техногенного минерального сырья // Горн. журн. — 2008. — № 6. — С. 71–74.
3. **Чантурия В. А.** Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения // Горн. журн. — 2015. — № 7. — С. 29–37.
4. **Чантурия В. А., Бунин И. Ж.** Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов // ФТПРПИ. — 2007. — № 3. — С. 107–128.
5. **Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Бочкарев Г. Р. и др.** Научное обоснование и разработка инновационных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 187–202.
6. **Глотов В. В., Постникова О. В.** Систематизация техногенных минеральных образований как основа их эколого-экономической оценки // Вестн. ЗГУ. — 2015. — № 4. — С. 13–18.
7. **Михайлов Б. К., Киперман Ю. А., Комаров М. А. и др.** Техногенные минерально-сырьевые ресурсы. — М.: Науч. мир, 2012. — 234 с.
8. **Юсупов Т. С., Кондратьев С. А., Бакшеева И. И.** Структурно-химические и технологические свойства минералов касситерит-сульфидного техногенного сырья // Обогащение руд. — 2016. — № 5. — С. 26–31.
9. **Иванков С. И.** Современное состояние проблемы разделения минеральных комплексов оловянно-полиметаллических руд и техногенных образований благородных и цветных металлов // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды: обзор. информ. — М., 1998. — Вып. 6. — С. 47–69.
10. **Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Бакшеева И. И.** Особенности радиационно-термической магнетизации минерального сырья и перспективы ее использования при обогащении // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 149–156.
11. **Korobeinikov M. V., Bryazgin A. A., Bezuglov V. V. et al.** Radiation-thermal treatment in ore dressing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2015, Vol. 81. — P. 1–6.
12. **Ростовцев В. И.** Радиационно-термический метод изменения магнитных свойств минералов в обогащении минерального сырья // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015, Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология: сб. материалов XI Междунар. науч. конгр. — Т. 3. — Новосибирск, 2015. — С. 206–210.
13. **Wang H., Lu Sh.** Modifying effect of electron beam irradiation on magnetic property of iron-bearing minerals, Journal Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2014, No. 50 (1). — P. 79–86.
14. **Юсупов Т. С.** Теория и практика направленного изменения структуры и свойств минералов в процессах тонкого измельчения с целью интенсификации химической переработки и флотационного обогащения руд: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Новосибирск, 1988. — 392 с.
15. **Копылов Н. И., Каминский Ю. Д.** Мышьяк / под ред. Г. А. Толстикова. — Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2004. — 367 с.

Поступила в редакцию 14/II 2017