

УДК 622.7 + 621.926.47 + 553.87 + 542.22-162.25

**ВОЗМОЖНОСТИ СТАДИЙНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ  
В ПРОЦЕССАХ ОБОГАЩЕНИЯ ТЕХНОГЕННОГО ОЛОВСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ**

**Ф. Х. Уракаев<sup>1</sup>, Л. Г. Шумская<sup>1</sup>, Е. А. Кириллова<sup>1</sup>, С. А. Кондратьев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН,  
E-mail: urakaev@igm.nsc.ru, просп. Академика Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
E-mail: kondr@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Исследовано измельчение техногенных объектов до заданного гранулометрического состава на основе ступенчатого повышения разрушающих нагрузок при снижении процессов шламообразования. Определены оптимальные режимы дезинтеграторного разрушения минеральных сростков техногенного оловосодержащего сырья с целью минимизации образования микронных частиц шламов. Показана возможность улучшения качества выделяемых концентратов путем механоактивационного измельчения промежуточных продуктов стадии обжига.

*Техногенное сырьё, касситерит, сростки, дезинтеграция, механоактивация, обжиг, обогащение*

DOI: 10.15372/FTPRPI20210315

Развитие мировой экономики сопровождается ростом потребления природного минерального сырья, доступные запасы которого неуклонно уменьшаются, а резерв многих видов полезных ископаемых на эксплуатируемых месторождениях недостаточен [1, 2].

Вместе с тем вековое развитие горной промышленности привело к накоплению гигантских объемов (только в России около 80 млрд т) отходов горнорудного производства — так называемых хвостов [3]. Хвостохранилища являются техногенными месторождениями [4–8] с существенными запасами широкого спектра полезных компонентов — Sn, Cu, Pb, Zn и др. (десятки тысяч тонн каждого). С этих позиций они рассматриваются как дополнительный и относительно дешевый источник минерального легкодоступного сырья для извлечения многих ценных компонентов. С другой стороны — это источник реальной угрозы химического загрязнения окружающей среды многими токсичными элементами (Pb, Zn, Cd, Hg, As, Bi и др.) [9].

Так, в результате процессов гипергенеза (окисление, растворение, гидролиз и др.) весь спектр химических элементов минеральных групп в хвостохранилищах (например, для оловянно-полиметаллических руд), представленных сульфидами, теллуридами, селенидами, сульфосолями различных металлов, преобразуется в другие минеральные формы и водные растворы, которые самопроизвольно мигрируют в окружающую среду [10–12].

---

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН и поддержана РФФИ (проект № 19-45-540003р\_а).

Экологические проблемы важны еще потому, что складирование отходов горнодобывающих и обогатительных предприятий исключает из хозяйственного оборота большие площади земель, качество которых снижается вследствие пылевых заносов с отвалов и хвостохранилищ, превышающих фоновые значения и предельно допустимые нормы. В настоящее время в России использование вторичных минеральных ресурсов не превышает 1–2% от накопленного объема [13]. Проблема переработки материала хвостохранилищ — одна из актуальнейших на ближайшую перспективу. Однако из-за низкого содержания полезных компонентов для рентабельной переработки техногенного сырья необходимо применение прогрессивных технологий, обеспечивающих наиболее полную его утилизацию с минимальным ущербом для окружающей среды.

К весьма перспективным относятся техногенные месторождения олова, расположенные в Читинской и Магаданской областях, в Якутии [14]. Одним из дополнительных источников минерального сырья стали техногенные руды Новосибирского оловокомбината (НОК). Эти оловянно-полиметаллические руды сложного состава, представленные из геоматериалов 26 месторождений и в составе которых накоплено около 190 тыс. т касситерит-сульфидного сырья, послужили объектом настоящего исследования. Изучаемые материалы относятся к долголежалым хвостам обогащения, которые за время складирования претерпели специфические, близкие к гипергенным преобразования. Минеральный состав представлен такими сульфидами, как пирит, арсенопирит, марказит, силикатная часть состоит из кварца, полевого шпата, слюды и в количественном отношении не превышает 10–15%.

При исследовании процесса селективного раскрытия минеральных ассоциаций техногенного сырья важна разработка таких режимов механических воздействий, которые позволили бы минимизировать потери целевого минерала за счет сокращения процесса шламообразования. В ряде случаев суммарный выход шламов излишне большой — до 20% и выше, а именно малый размер частиц является главной проблемой при обогащении техногенных хвостов, не дающей селективно выделять полезные минералы.

Селективное раскрытие минеральных агрегатов техногенных хвостов НОК, позволяющее обеспечить повышение качества выделяемых концентратов и извлечение касситерита при последующем флотационном обогащении, достигается в дезинтеграторах [2, 15] с высокоскоростным свободным ударом [16, 17]. Основное их преимущество — повышенная сохранность кристаллической структуры и пониженное переизмельчение. Причиной переизмельчения техногенных отходов служат неконтролируемые разрушающие воздействия, приводящие к потере ценных компонентов при рудоподготовке хвостов обогащения. Переход к высокоэнергетическому измельчению — одно из прогрессивных направлений в раскрытии тонковкрапленных рудных объектов и минеральных сростков [18–21].

Цель настоящей работы — изыскание возможностей селективного шламоудаления в процессе вариации параметров разработанной схемы стадийной дезинтеграции [2] оловосодержащего техногенного сырья Новосибирского оловокомбината [22]. Исследуемая проба НОК имела следующий химический состав, вес. %: Sn — 0.95; S — 22.31; As — 10.73; SiO<sub>2</sub> — 7.85; Zn — 1.33; Pb — 1.10 [23].

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Ранее при изучении минерального состава и структурных преобразований минералов проб использовался рентгенофазовый анализ, химические анализы выполнялись на атомно-эмиссионном спектрометре JRIS (фирма Thermo Elemental, США), а эффективность раскрытия минералов после обработки проб на дезинтеграторной установке DESI-11 (Tootmise OÜ / Tallinn, Эстония) в интервале относительных частот вращения роторов 2400–4800 об/мин и в центробежно-планетарной мельнице М-3 (ЦПМ-3) при ускоряющем факторе 40 g оценивалась по результатам флотационного обогащения при рН 4.5 в сернокислой среде [2, 22, 23].

В качестве коллектора применялся бутиловый ксантогенат калия (200 г/т), в качестве вспенивателя — оксид пропилен спирта бутиловый (ОПСБ) из расчета 100 г/т; для оловосодержащего зарубежного сырья смотрите [7, 8, 24–27].

В данном исследовании исходных и измененных проб НОК акцент сделан на результатах сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, прибор JEOL JSM 6380LA, Япония) и сопутствующих этому методу возможностях получения следующих дополнительных данных с помощью:

- энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС [28–32]), включая элементный состав [30, 31] и элементное картирование материалов [32];
- электронно-зондового микроанализа [33], позволяющего проводить фазовое картирование минералов;
- энергодисперсионного рентгеновского излучения (X-ray), автоматизирующего анализ высвобождения минералов (MLA [34, 35]);
- BSE — фоторегистрации отраженных электронов [36].

Наиболее близко и полно нашим методическим возможностям соответствовали подходы и способы в работе [36]. Согласно результатам химического анализа, фракция – 0.02 мм содержит 0.80 % оксида олова, что по сравнению с данным показателем в исходной пробе составляет значительную величину, поэтому в процессе дозированного измельчения необходимо минимизировать образование частиц шламовых размеров.

Например, продукт однократного и самого мягкого дезинтеграторного измельчения при 2400 об/мин (принят за исходный образец НОК) характеризуется повышенным содержанием класса + 0.071 мм. Фракция – 0.02 мм содержит 0.90 % оксида олова. Размеры обломков зерен, по данным СЭМ, следующие: арсенопирит — от  $5 \times 5$  до  $25 \times 35$  мкм; пирит — от  $5 \times 5$  до  $10 \times 25$  мкм; касситерит — единичные обломки до  $20 \times 25$  мкм; вюрцит — от  $15 \times 15$  до  $30 \times 30$  мкм; галенит —  $10 \times 10$  мкм. Из анализа этих данных следует, что во фракции – 0.02 мм присутствуют очень тонкие минеральные частицы (5, 10, 15 мкм), в некоторой степени сопоставимые с таковыми в исходном техногенном сырье, размеры обломков зерен которого составляют: у арсенопирита и пирита — от  $5 \times 5$  до  $150 \times 150$  мкм; касситерита — от  $20 \times 20$  до  $100 \times 50$  мкм; вюрцита — от  $25 \times 25$  до  $70 \times 250$  мкм; у галенита — от  $10 \times 10$  до  $50 \times 100$  мкм.

В этом случае актуальной является проблема разработки таких режимов механических воздействий, которые на фоне разрушения цементирующего матрикса и раскрытия сростков рудных осколков позволили бы минимизировать потери целевого минерала за счет сокращения процесса шламообразования (рис. 1).

В [2, 23] показано, что с повышением скорости свободного удара в дезинтеграторе повышается дисперсность образцов, но соотношение узких классов крупности в них различное. Увеличение интенсивности измельчения сопровождается получением продукта флотационной крупности, однако повышается выход трудно поддающейся флотационному обогащению фракции – 0.02 мм [37].

Установлено, что наиболее отвечающим поставленным целям является режим с увеличенным числом стадий измельчения и классификации при небольших энергиях измельчения, соответствующих 2400 об/мин, что дало возможность уменьшить число стадий при более высоких энергиях разрушения и за счет этого сократить выход фракции – 0.02 мм до 10–15%. Измененная схема стадийной дезинтеграции техногенного продукта [2] с целью раскрытия сростков минералов и получения продукта флотационной крупности –  $0.1 + 0.02$  мм включала следующее число стадий измельчения и классификации: при 2400 об/мин — 5; 3600 об/мин — 2; 4800 об/мин — 1. Результаты показаны на примере ряда образцов целевого минерала — касситерита (рис. 2).

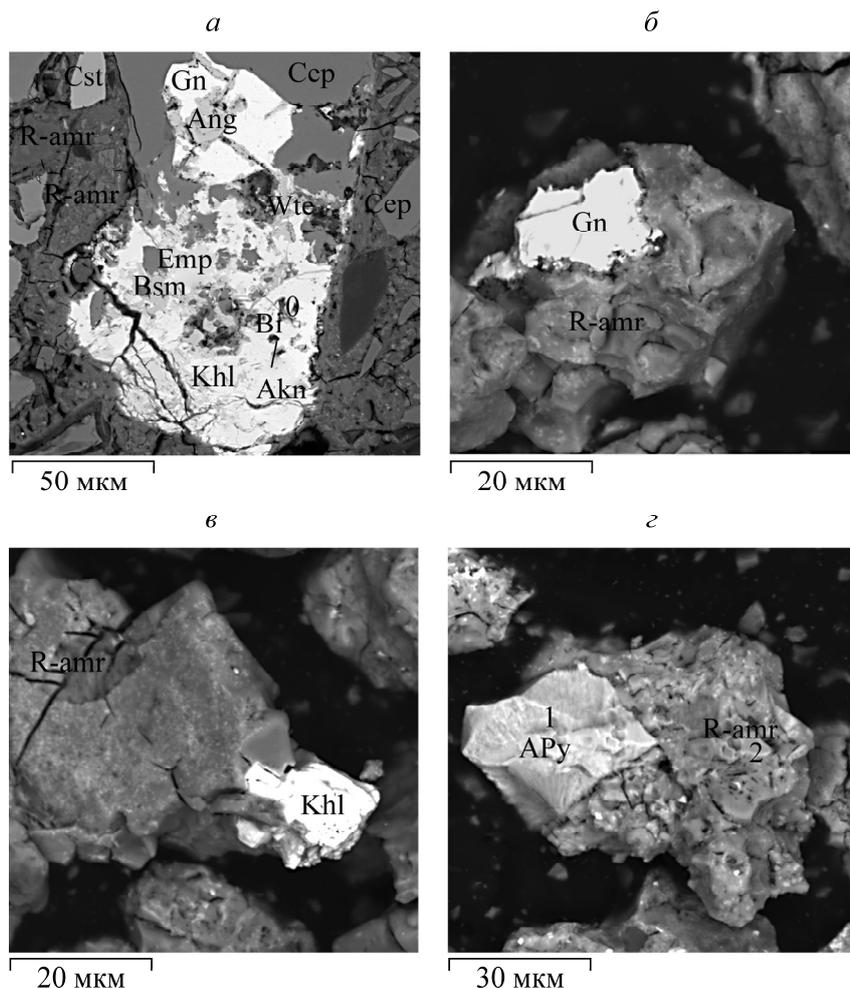


Рис. 1. BSE-фото различных участков исходного образца 201 техногенной пробы НОК, где все фазы заключены в матрикс, состоящий из рентгеноаморфных продуктов гипергенного преобразования Fe-сульфидов (R-amr): а — сростания минералов в образце; б–г — морфология продуктов изменения Fe-сульфидов; Ang — англезит, Akn — айкинит, Bi<sup>0</sup> — самородный висмут, Bsm — висмутин, Ccp — халькопирит, Cst — касситерит, Emp — эмплектит, Gn — галенит, Khl — кехлинит, Wtc — виттихенит; APy — арсенопирит

Продукты преобразования Fe-сульфидов представляют собой неоднородный матрикс, который цементирует обломки минеральных фаз (рис. 1). Иногда они образуют псевдоморфозы по обломкам исходных сульфидов. Аморфный матрикс регулярно содержит, вес. %: CuO (0.66–3.68), ZnO (0.60–1.66, в единичных случаях до 8.33); реже Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.32–2.68), SiO<sub>2</sub> (0.26–3.85), PbO (1.25–4.49); в единичных случаях K<sub>2</sub>O (0.16–0.29), Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.75–1.20), SnO<sub>2</sub> (0.7–2.7). Содержание олова в шламовой фракции близко к этому показателю в исходной пробе. Из сравнительного анализа данных табл. 1 следует, что во фракциях флотационной крупности и продукте – 0.02 мм преобладают продукты гипергенного преобразования Fe-сульфидов, представленных смесью рентгеноаморфных сульфоарсенатов железа, сульфатов железа гидратированных в различной степени, и, вероятно, гидроксидов металлов (в первую очередь железа).

Отмечено происходящее в процессе измельчения перераспределение минеральных составляющих техногенного сырья (табл. 1). Так, в тонкой фракции – 0.02 мм фиксируется существенно большее количество пирита, арсенопирит преимущественно концентрируется во фракции – 0.071 мм, обломки зерен касситерита присутствуют в обоих продуктах.

ТАБЛИЦА 1. Минералогический состав фракций проб НОК, полученных по схеме стадийного повышения энергии разрушения согласно данным СЭМ

Класс крупности, мм	Содержание минеральных компонентов во фракциях, об. %						
	R-amr — продукты Fe-сульфидов	Арсенопирит	Пирит	Касситерит	Кварц	Вюрцит	Галенит
–0.02	≈ 70	3–5	≈ 10	≈ 1	1–3	1–3	< 1
–0.071+0.02	≈ 80	≈ 15	< 3	≈ 1	≈ 1	< 1	< 1

Использование разработанной схемы стадийной дезинтеграции техногенного сырья позволило отделить крупные обломки зерен рудных фаз от вмещающего матрикса и обеспечило возможность последующей дифференциации минералов (рис. 1, 2).

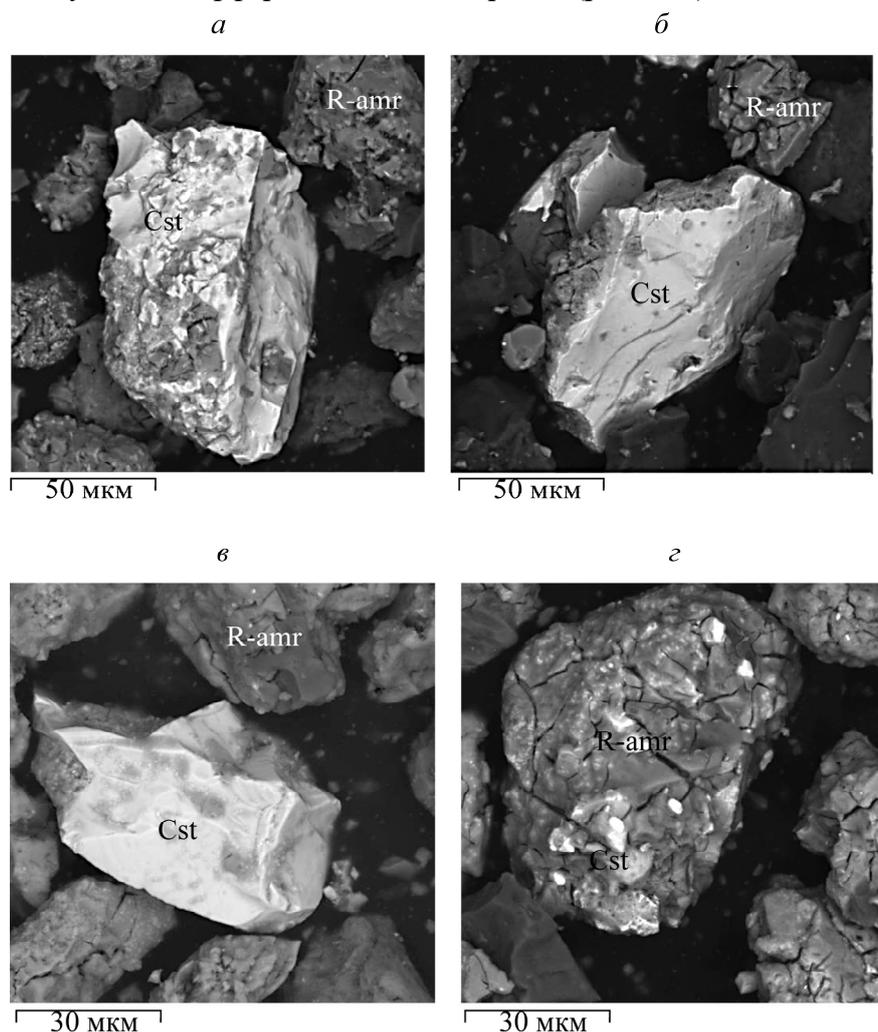


Рис. 2. Морфология касситерита для фракций, полученных в результате стадийной дезинтеграции проб: *a* — образец 208; *б* — образец 209; *в*, *з* — образец 211

Химический состав рентгеноаморфных продуктов различается для разных фракций, полученных в процессе измельчения и последующего обогащения, особенно это касается содержания S, As, Fe (табл. 2), что определяется минеральным составом продуктов, подвергнутых гипергенным изменениям в процессе последующего хранения [36].

ТАБЛИЦА 2. Представительные ЭДС-анализы продуктов изменения Fe-сульфидов, вес. %

ЭДС-спектр	O	Al	Si	S	Fe	Cu	Zn	As	Sn	Pb	Bi	Общее
19	35.55	Нпо	0.46	0.44	56.40	Нпо	0.78	0.46	Нпо	2.08	Нпо	96.16
26	16.52	Нпо	0.25	27.74	35.38	0.63	2.26	7.98	Нпо	Нпо	1.12	91.88
3	29.79	Нпо	Нпо	5.30	24.54	1.37	Нпо	18.24	Нпо	4.17	Нпо	83.41
5	33.74	0.32	0.83	6.24	26.89	0.54	0.81	18.86	Нпо	2.76	0.77	91.75
9	37.18	Нпо	0.25	9.71	28.21	0.67	0.68	22.04	Нпо	1.83	0.00	100.56
6	29.36	Нпо	0.52	12.64	23.51	2.45	6.69	15.14	2.13	5.14	1.01	98.60

Примечание. Нпо — ниже предела обнаружения.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Техногенное сырье после стадийной дезинтеграции по разработанной схеме и отделения рентгеноаморфных шламовых частиц обогащалось флотацией с использованием контрольной и перечистной операций, направленных на возможно полное выделение сульфидно-сульфатных продуктов с концентрацией в камерной фракции касситерита. В результате получен концентрат с содержанием Sn 4.05 % и извлечением 70.1 % (рис. 3). Дальнейшее улучшение качества выделяемых продуктов традиционными методами не представлялось возможным, поэтому дополнительно был применен механотермический способ.

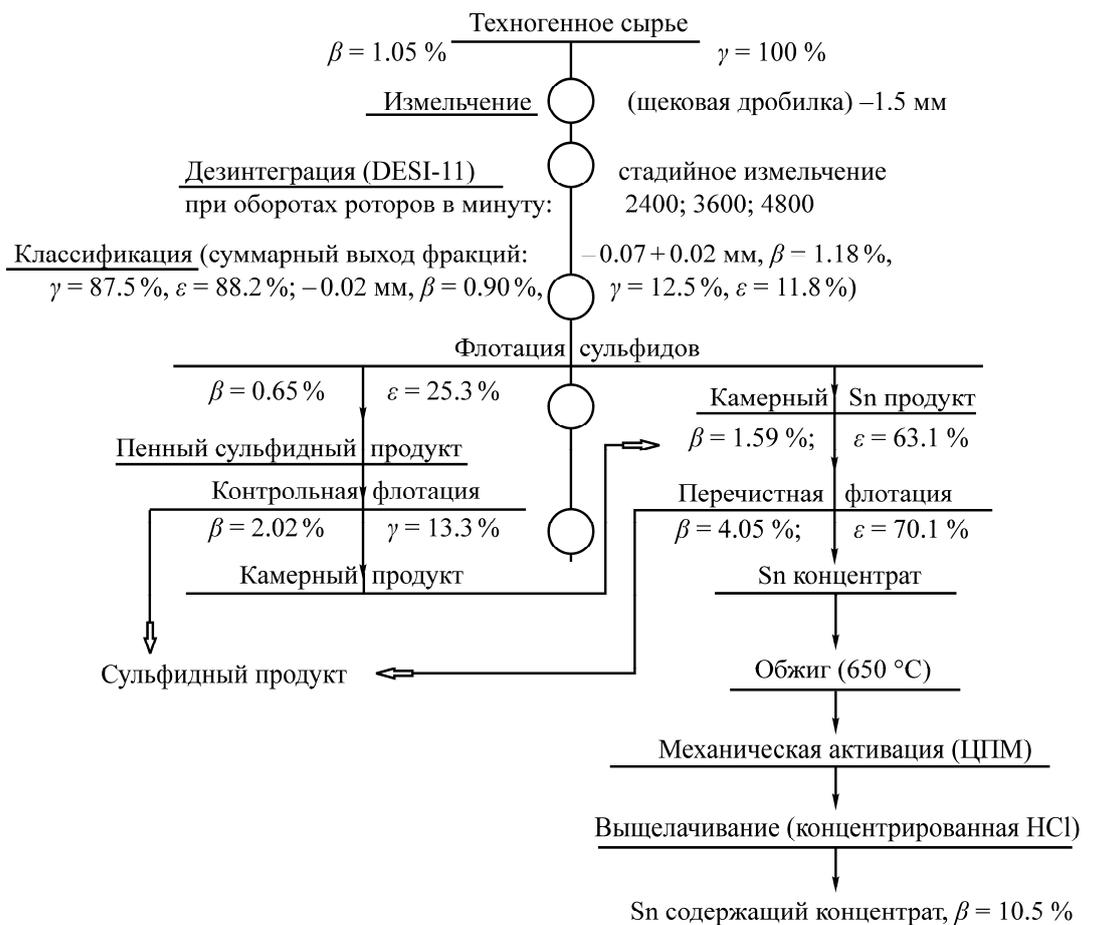


Рис. 3. Схема получения концентрата SnO<sub>2</sub> из техногенного сырья (β — содержание Sn; γ — выход продукта; ε — извлечение Sn)

Известно, что при переработке труднообогатимых первичных оловянных концентратов, из которых невозможно получить высокосортные концентраты методами механического обогащения, применяют окислительный обжиг и выщелачивание [38]. В [22, 23] с целью повышения содержания олова в концентратах использована механоактивационная обработка продуктов обжига в кратковременных условиях высокоэнергонапряженного ЦПМ-измельчения при соотношении масс образца и мелющих тел 1 : 30 в течение 1 мин. Окислительный обжиг материала выполнен в муфельной электропечи при 650°C [5, 39, 40].

Механоактивационная обработка продуктов обжига, повышая химическую активность оксидов вследствие структурных нарушений в условиях интенсивных механических воздействий, способствует более полному их растворению в процессах выщелачивания и получению продукта с высоким содержанием олова.

Механотермохимический способ переработки включал следующие этапы:

- окислительный обжиг концентрата с целью удаления серы и мышьяка, протекающий по реакциям:  $2\text{MeS} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{MeO} + 2\text{SO}_2$  и  $n\text{MeO} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{Me}_n\text{O}_{n+1}$ ;
- механическая активация (центробежно-планетарная мельница) продуктов обжига с целью повышения реакционной способности оксидов;
- выщелачивание полученного огарка концентрированной соляной кислотой при температуре близкой к 100°C с получением обогащенного по олову нерастворимого остатка вследствие исключительной стойкости касситерита к действию растворов кислот.

Выщелачивание огарка соляной кислотой при 100°C протекает по реакциям:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl} = 2\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{FeO} + 2\text{HCl} = \text{FeCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{FeO} \times \text{As}_2\text{O}_5 + 2\text{HCl} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{FeCl}_2 + 2\text{H}_3\text{AsO}_4$ ;  $\text{CuO} + 2\text{HCl} = \text{CuCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{PbO} + 2\text{HCl} = \text{PbCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{ZnO} + 2\text{HCl} = \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{CaO} + 2\text{HCl} = \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ . Содержание олова в полученном кеке в зависимости от содержания в исходном концентрате увеличивается в 3–4 раза. В качестве концентрата могут быть использованы как камерные продукты флотационного обогащения, так и исходное техногенное сырье.

## ВЫВОДЫ

Исследованы процессы разрушения минеральных ассоциаций оловосодержащих техногенных хвостов при возрастающей энергии разрушения, реализуемые в дезинтеграторе с целью изыскания возможностей селективного шламоудаления. Установлено, что поставленным целям отвечает режим с увеличенным числом стадий измельчения и классификации при небольших энергиях измельчения, соответствующих 2400 об/мин. Это дает возможность уменьшить число стадий при более высоких энергиях разрушения и сократить выход фракции – 0.02 мм. Предложена комбинированная схема обогащения техногенного сырья, включающая флотационное отделение сульфидов и механоактивационное измельчение в процессе их гидрохимической доводки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spooren J., Binnemans K., Björkmalm J., Breemers K., Dams Y., Folens K., González-Moya M., Horckmans L., Komnitsas K., Kurylak W., Lopez M., Mäkinen J., Onisei S., Oorts K., Peys A., Pietek G., Pontikes Y., Snellings R., Tripiana M., Varia J., Willquist K., Yurramendi L., and Kinnunen P. Near-zero-waste processing of low-grade, complex primary ores and secondary raw materials in Europe: Technology development trends (Review), Resources, Conservation and Recycling, 2020, Vol. 160 (September). — 18 p. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104919>.

2. **Уракаев Ф. Х., Шумская Л. Г., Кириллова Е. А., Кондратьев С. А.** Совершенствование технологии тонкого измельчения техногенного сырья на основе его дозированного стадийного разрушения // ФТПРПИ. — 2020. — № 5. — С. 165–174. DOI: 10.15372/FTPRPI20200519.
3. **Калинин Е. П.** Минерально-сырьевые ресурсы в мировой экономике // Вестник. — 2008. — № 4. — С. 13–29. <https://cyberleninka.ru/article/n/v-mirovoy-ekonomike/viewer>.
4. **Макаров А. Б.** Техногенные месторождения минерального сырья // Соросовский образовательный журнал: Науки о Земле / Геологическая деятельность человека. — 2000. — Т. 6. — № 8. — С. 76–80.
5. **Zhou Y., Tong X., Song S., Deng Z., Wang X., Xie X., and Xie F.** Beneficiation of cassiterite and iron minerals from a tin tailing with magnetizing roasting-magnetic separation process, Separation Sci. and Technol., 2013, Vol. 48, Iss. 9, — P. 1426–1432. DOI: 10.1080/01496395.2012. 726310.
6. **Li X., Liu S., Zhao Y, and Li T.** Tin recovery from a cassiterite-bearing magnetite refractory ore, Applied Mechanics and Materials, 2014, Vol. 543–547. — P. 3721–3724. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.543-547.3721.
7. **Zhou Y., Tong X., Song S., Wang X., Deng Z., and Xie X.** Beneficiation of cassiterite fines from a tin tailing slime by froth flotation, Separation Sci. and Technol., 2014, Vol. 49, Iss. 3. — P. 458–463. DOI: 10.1080/01496395.2013.818036.
8. **Leistner T., Embrechts M., Leibner T., Chelgani S. C., Osbahr I., Möckel R., Peuker U. A., and Rudolph M.** A study of the reprocessing of fine and ultrafine cassiterite from gravity tailing residues by using various flotation techniques, Miner. Eng., 2016, Vols. 96–97 (October). — P. 94–98. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.06.020>.
9. **Habib A., Bhatti H. N., and Iqbal M.** Metallurgical processing strategies for metals recovery from industrial slags, De Gruyter | 2020: Zeitschrift für Physikalische Chemie, 2020, Vol. 234, Iss. 2. — P. 201–223. DOI: <http://doi.org/10.1515/zpch-2019-0001>.
10. **Зверева В. П.** Гипергенные и техногенные минералы как показатель экологического состояния оловорудных районов Дальнего Востока // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2005. — № 6. — С. 533–538. <https://journals.eco-vector.com/0869-7809/index>.
11. **Комаров М. А., Алискеров В. А., Кусевич В. И., Заверткин В. Л.** Горнопромышленные отходы — дополнительный источник минерального сырья // Минеральные ресурсы России: экономика и управление. — 2007. — № 4. — С. 3–9. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11713684>.
12. **Крупская Л. Т., Мелконян Р. Г., Зверева В. П., Растанина Н. К., Голубев Д. А., Филатова М. Ю.** Опасность отходов, накопленных горными предприятиями в Дальневосточном федеральном округе, для окружающей среды и рекомендации по снижению риска экологических катастроф // ГИАБ. — 2018. — № 12 — С. 102–112. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-102-112.
13. **Чайников В. В., Гольдман Е. Л.** Оценка инвестиций в освоение техногенных месторождений. — М.: ООО “Недра–Бизнесцентр”, 2000. — 220 с. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20287856>.
14. **Дерягин А. А., Котова В. М., Никольский А. Л.** Оценка перспектив вовлечения в эксплуатацию техногенных месторождений // Маркшейдерия и недропользование. — 2001 (июль-сентябрь). — №1 (1). — С. 15–19.
15. **Уракаев Ф. Х., Юсупов Т. С.** Численная оценка кинематических и динамических характеристик обработки минералов в дезинтеграторе // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 135–142.
16. **Юсупов Т. С., Уракаев Ф. Х., Исупов В. П.** Прогноз структурно-химических изменений минералов при механических воздействиях в процессах измельчения // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 161–168.
17. **Юсупов Т. С., Кондратьев С. А., Халимова С. Р., Новикова С. А.** Минералого-технологическая оценка обогатимости оловосульфидного техногенного сырья // ФТПРПИ. — 2018. — № 4. — С. 145–151.

18. **Bru K. and Parvaz D. B.** Improvement of the selective comminution of a low-grade schist ore containing cassiterite using a high voltage pulse technology (Conference Paper), IMPC 2018 — 29<sup>th</sup> Int. Miner. Proc. Congress, 2019. — P. 500–507. <https://www.researchgate.net/publication/331952637>.
19. **Feng J., Feng X., Ma S., Liu J., Mo W., Yang J., and Su X.** Study on grinding kinetics of a unique double-sphere grinding media for cassiterite-polymetallic sulphide ores, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, Vol. 457–458. — P. 236–239. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.457-458.236.
20. **Feng J., Feng X., Ma S., Liu J., Mo W., Yang J., and Su X.** The effect of ball media with different diameters on grinding kinetics of cassiterite-polymetallic sulphides, *Appl. Mechanics and Materials*, 2014, Vol. 470. — P. 154–157. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.470.154.
21. **Юсупов Т. С., Бакшеева И. И., Ростовцев В. И.** Исследование влияния различных видов механических воздействий на селективность разрушения минеральных ассоциаций // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 182–188.
22. **Юсупов Т. С., Шумская Л. Г., Кондратьев С. А., Кириллова Е. А., Уракаев Ф. Х.** Использование механоактивационного измельчения в процессах обогащения техногенного оловосодержащего сырья // ФТПРПИ. — 2019. — № 5. — С. 121–127.
23. **Уракаев Ф. Х., Шумская Л. Г., Кириллова Л. А., Кондратьев С. А., Юсупов Т. С.** Влияние условий предварительной механической обработки на обогащение отходов Новосибирского оловокомбината и извлечение касситерита из техногенного сырья // Проблемы геологии и расширение минерально-сырьевой базы стран Евразии: Материалы Междунар. науч. конф. — Алматы: ТОО ИГН, 2019. — С. 288–298.
24. **Sun L., Hu Y.-h., and Sun W.** Effect and mechanism of octanol in cassiterite flotation using benzohydroxamic acid as collector, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, Vol. 26, No. 12. — P. 3253–3257. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64458-8.
25. **Tian M., Gao Z., Sun W., Han H., Sun L., and Hu Y.** Activation role of lead ions in benzohydroxamic acid flotation of oxide minerals: New perspective and new practice, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, Vol. 529 (1 November). — P. 150–160. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.05.113>.
26. **Wang P.-p., Qin W.-q., Ren L.-y., Wei Q., Liu R.-z., Yang C.-r., and Zhong S.-p.** Solution chemistry and utilization of alkyl hydroxamic acid in flotation of fine cassiterite, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, Vol. 23, No. 6. — P. 1789–1796. DOI: 10.1016/S1003-6326(13)62662-X.
27. **Yang W., Dai H., and Wang H.** Progress of cassiterite sulfide ore beneficiation, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, Vols. 644–650. — P. 5439–5442. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.5439.
28. **Ribeiro A., Hajjaji W., Seabra M. P., and Labrincha J. A.** Malayaite ceramic pigments prepared from industrial wastes: Formulation and characterization (Conference Paper), *Mater. Sci. Forum*, 2010, Vols. 636–637. — P. 1371–1376. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.636-637.1371.
29. **Lin H., Yu M.-L., Dong Y.-B., Liu Q.-L., Liu S.-Y., and Liu Y.** The heavy metal leaching rules and influence mechanism of different particle size of tin mining waste rock, *Zhongguo Huanjing Kexue, China Environmental Sci.*, 2014, Vol. 34, Iss. 3. — P. 664–671.
30. **Yousef S., Tatariants M., Bendikiene R., Kriūkienė R., and Denafas G.** A new industrial technology for closing the loop of full-size waste motherboards using chemical-ultrasonic-mechanical treatment, *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, Vol. 140 (August). — P. 367–379. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.002>.
31. **Caggiani M.C., Barone G., de Ferri L., Laviano R., Mangone A., and Mazzoleni P.** Raman and SEM–EDS insights into technological aspects of Medieval and Renaissance ceramics from Southern Italy, *J. of Raman Spectroscopy*, 2021, Vol. 52, Iss. 1. — P. 186–198. DOI: 10.1002/jrs.5884.

32. **Kokulnathan T., Kumar J. V., Chen, S.-M., Karthik R., Elangovan A., and Muthuraj V.** One-step sonochemical synthesis of 1D  $\beta$ -stannous tungstate nanorods: An efficient and excellent electrocatalyst for the selective electrochemical detection of antipsychotic drug chlorpromazine, *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, Vol. 44 (June). — P. 231–239. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.02.025.
33. **Lanari P., Vho A., Bovay T., Laura Airaghi L., and Centrella S.** Quantitative compositional mapping of mineral phases by electron probe micro-analyser, <https://doi.org/10.1144/SP478.4>, April 17, 2019, 25 p., Published as Book Chapter: Ferrero S., Lanari P., Goncalves P., and Grosch E. G. (eds), *Metamorphic Geology: Microscale to Mountain Belts*. — Geol. Soc., London, Special Publications, Vol. 478. <https://doi.org/10.1144/SP478>.
34. **Schulz B., Merker G., and Gutzmer J.** Automated SEM mineral liberation analysis (MLA) with generically labelled EDX spectra in the mineral processing of rare earth element ores, *Minerals*, 2019, Vol. 9, Iss. 9. — Art. no. 527 (18 p). <https://doi.org/10.3390/min9090527>.
35. **Ren H., Li J., Tang Z., Zhao Z., Chen X., Liu X., and He L.** Sustainable and efficient extracting of tin and tungsten from wolframite — scheelite mixed ore with high tin content, *J. of Cleaner Production*, 2020, Vol. 269 (1 October). — Art. no. 122282 — 27 p. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122282>.
36. **Zglinicki K., Szamalek K., and Konopka G.** Monazite-bearing post processing wastes and their potential economic significance, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi — Mineral Resources Management*, 2020, Vol. 36, Iss. 1. — P. 37–58. DOI: 10.24425/gsm.2020.132549.
37. **Gong D., Nadolski S., Sun C., Klein B., and Kou J.** The effect of strain rate on particle breakage characteristics, *Powder Technology*, 2018, Vol. 339 (November). — P. 595–605. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.08.020.
38. **Лебедев И. С., Дьяков В. Е., Терехин А. Н.** Комплексная металлургия олова. — Новосибирск: М.: Новосибирский писатель, 2004. — 548 с. [https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00936694\\_0.html](https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00936694_0.html).
39. **Хасанов А. С., Вохидов Б. Р., Мамараимов Г. Ф.** Разработка технологии получения пятиоксида ванадия из минерального и техногенного сырья // *Universum: технические науки-12. Металлургия и материаловедение*. — 2020. — № 3 (72). — 5 с. <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/9085>.
40. **Liu B., Zhang Y., Su Z., Li G., and Jiang T.** Formation kinetics of  $\text{Na}_2\text{SnO}_3$  from  $\text{SnO}_2$  and  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  roasted under  $\text{CO-CO}_2$  atmosphere, *Int. J. of Miner. Proc*, 2017, Vol. 165. — P. 34–40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2017.06.002>.

*Поступила в редакцию 26/III 2021*

*После доработки 28/III 2021*

*Принята к публикации 24/V 2021*