

УДК 622.7

**ПОЛУЧЕНИЕ ФОСФАТА РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ИЗ ЦИРКОНИЙСОДЕРЖАЩИХ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ
МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ**

**И. Триснавати^{1,2}, Г. Прамешвара³, Э. П. Сари², А. Прасетъя¹,
П. Мульоно¹, Х. Т. М. Б. Петрус¹**

¹Университет Гаджа Мада,

E-mail: pmulyono@ugm.ac.id, bayupetrus@ugm.ac.id, 55281, г. Джокьякарта, Индонезия

²Центр научно-технических исследований ускорителей,

Национальное агентство по атомной энергии,

Бабарсари Котак Пос 610/УКВВ, 55281, г. Джокьякарта, Индонезия

³Макассарский политехнический колледж АТИ, Суну, 220, г. Макаassar, Индонезия

Рассмотрено извлечение фосфата методом водного выщелачивания из термически обработанных цирконийсодержащих хвостов обогащения в присутствии карбоната натрия. Для оценки эффективности метода термического разложения и извлечения фосфата из цирконийсодержащих хвостов, в состав которых входят монацит, ксенотим, циркон, анатаз, рутил и церианит, изучена технология обогащения, позволяющая облегчить получение редкоземельных элементов. Подобраны оптимальные условия, при которых максимальный выход фосфата составил 93.27%. В продукте, полученном после обжига в присутствии карбоната натрия, обнаружены циркон и ксенотим.

Обжиг, хвосты магнитного обогащения, циркон, сепарация

DOI: 10.15372/FTPRPI20220514

Циркон ($ZrSiO_4$) — известный источник циркония — широко используется в промышленных процессах, включая фосфат циркония, основной сульфат циркония, оксихлорид циркония, нитрит циркония и оксид циркония [1]. В последние годы спрос на цирконий и его сплавы возрос в результате разнообразия его применения [2–4]. В природе циркон встречается вместе с такими ценными минералами, как монацит, ксенотим и ильменит [5].

Остров Калимантан — крупнейшее месторождение циркона в Индонезии. В его центральной части запасы циркониевой руды оцениваются в ~5.4 млрд т, благодаря чему Индонезия занимает четвертое место в мире по производству циркона после Австралии, Южной Африки и Китая [5, 6]. Также циркон в изобилии встречается в Бангга-Белитунге на месторождениях олова [7].

Работа финансировалась в рамках программы по поддержке исследований мирового уровня (грант № 1785/UN1/DITLIT/DIT-LIT/Dit-Lit/PT.01.03/2022).

Горнодобывающий сектор — важная область, поддерживающая экономический рост и социальное развитие многих стран, включая улучшение качества жизни граждан. Рост горнодобывающей отрасли связан с рядом проблем [8]. В частности, непрерывная добыча способствует образованию значительного количества хвостов, являющихся остаточным материалом [9]. Такие материалы ассоциируются с опасными токсичными отходами, приводящими к загрязнению окружающей среды [10]. При традиционной переработке полезных ископаемых образуется большое количество хвостов, что влечет за собой необходимость осторожного обращения с такими материалами [11, 12]. Только 80–90 % драгоценного металла может извлекаться из месторождения полезных ископаемых [13].

Несмотря на неблагоприятное воздействие на окружающую среду, хвосты имеют коммерческую ценность, поскольку в них присутствуют ценные металлы [9, 14]. Обычно отходы производства хранятся в хвостохранилищах [8]. Оптимальное решение по утилизации хвостов — их переработка с целью извлечения ценных металлов. Разработаны различные методы извлечения ценных металлов из продуктов переработки [8, 9, 15–20]. В [8] описано получение железа и титана из первоначальных хвостов. В [9] предложено использовать биологическое выщелачивание с участием окисляющих микроорганизмов и железа для переработки пиритсодержащих хвостов и извлечения кобальта наряду с другими ценными металлами. В [15] методом флотации изучено извлечение сфалерита и пирита путем переработки старых хвостов с высоким содержанием цинка. В [17, 18] минералы редкоземельных элементов извлекаются из хвостов, богатых оксидами железа и силикатами, получаемых на горнодобывающих предприятиях Южной Австралии, с использованием магнитного сепаратора и методов флотации.

В продуктах переработки циркониевой руды содержатся ценные металлы, включая редкоземельные, титан и цирконий [21–26]. Минеральный состав циркониевых хвостов представляют монацит, ксенотим, циркон, анатаз, рутил и церианит [21]. Монацит и ксенотим — основные источники фосфатных минералов в Индонезии — являются высокостабильными фосфатными минералами [27]. Первый этап при извлечении редкоземельных элементов связан с разложением фосфата [28]. Некоторые исследователи пытались отделить фосфат от минералов термическим разложением с помощью разных реагентов [29]. Во время дифференциального термического анализа, проведенного для изучения влияния $\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ на термическое разложение REPO_4 (фосфатов редкоземельных элементов) с CaO для 10 % смеси $\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ при температуре 750 °C в течение 1 ч, степень разложения составила 79 % [30]. При использовании угля и температуре 1400 °C из монацитового концентрата можно извлечь 98 % фосфата [31].

Для извлечения редкоземельных элементов из цирконийсодержащих хвостов применены методы обжига с использованием Na_2CO_3 с последующей промывкой для осуществления разложения фосфата. Установлено влияние таких условий обжига на извлечение, как температура, время и соотношение щелочи Na_2CO_3 и хвостов. Полученные результаты наблюдений должны способствовать проведению последующей магнитной сепарации хвостов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В эксперименте использовались хвосты магнитного обогащения циркона, которые применялись для извлечения редкоземельных элементов [21, 22, 24, 32, 33]. Размер их частиц варьировал от 17 до 1000 мкм. Хвосты подвергались обработке без предварительного измельчения.

Гранулометрический состав исходного образца представлен на рис. 1. В качестве химического реагента использовали ч.д.а. Na_2CO_3 (производитель Merck). Для всех экспериментов по выщелачиванию применяли деионизированную воду.

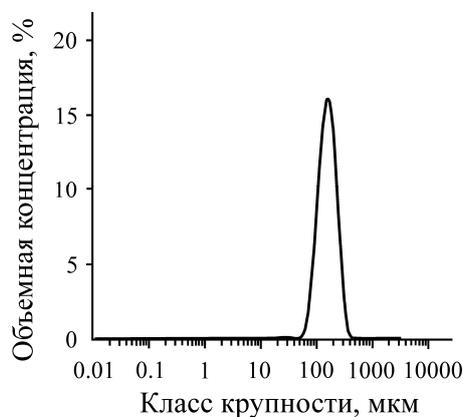


Рис. 1. Гранулометрический состав цирконийсодержащих хвостов

Перед обжигом изучена характеристика образцов и проведены химические анализы. Рассмотрен химический состав образца цирконийсодержащих хвостов, описанный в [21]. Образец исследовался инфракрасной спектроскопией с преобразованием Фурье (FT-IR) для определения функциональных групп на разных этапах эксперимента. С помощью спектрометра Bruker ALPNA II с разрешением 4 см^{-1} за 16 циклов сканирования получены FT-IR-спектры в диапазоне от 4000 до 400 см^{-1} . Обжиг проводился с применением муфельной печи (Nabertherm). Порции образцов цирконийсодержащих хвостов с постоянной массой 7.5 г смешивали с разным количеством Na_2CO_3 и нагревали в никелевом тигле при разной продолжительности и температурных режимах. Продукт плавления оставляли до остывания, промывали в 500 мл горячей деионизированной воды. Далее образец отфильтровывали, остаток высушивали для анализа с использованием метода рентгенфлуоресцентной спектроскопии на приборе Epsilon 4. Промытые продукты обжига анализировали методами рентгеновской дифракции (XDR) и FT-IR на пяти образцах при следующих условиях: $T=300 \text{ }^\circ\text{C}$, $t=60 \text{ мин}$; $T=800 \text{ }^\circ\text{C}$, $t=60 \text{ мин}$; $T=800 \text{ }^\circ\text{C}$, $t=120 \text{ мин}$; $T=800 \text{ }^\circ\text{C}$, $t=240 \text{ мин}$; $T=1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $t=60 \text{ мин}$. Установлено массовое соотношение щелочи и хвостов, равное 2, за исключением эксперимента, в котором оно варьировалось. Рентгеновский анализ проводился с помощью дифрактометра Malvern Panalitycal, Aeris Research DY 844 с источником излучения $\text{CoK}\alpha$. В таблице приведены параметры и стадии эксперимента.

План эксперимента и соответствующие стадии

Параметр	Стадия				
	1	2	3	4	5
Температура, $^\circ\text{C}$	300	400	600	800*	1000
Время, ч	0.5	1.0*	2.0	3.0	4.0
Соотношение щелочь / хвосты	0.5	1.0	1.5	2.0*	2.5

*Фиксированные данные испытания

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика образца проведена с использованием FT-IR, что подтвердило наличие фосфатных групп. Спектр FT-IR образца цирконийсодержащих хвостов показан на рис. 2. Пять спектральных полос зафиксированы при 3440, 1643, 1032, 945, 622 и 532 см^{-1} . Полосы в диапазонах 1643 и 3100–3500 см^{-1} свидетельствуют о наличии воды, полосы при 532 и 622 см^{-1} соответствуют деформационным колебаниям PO_4 ($\delta_{as}\text{PO}_4$), что указывает на присутствие минералов ксенотима и монацита в хвостах циркониевого песка [34]. Полоса ортофосфата при 945 см^{-1} подтверждает присутствие минералов монацита в образце. Полоса при 1032 см^{-1} связана с асимметричным участком группы PO_4 ($\nu_{as}\text{PO}_4$), образующей связи в полифосфате [35, 36].

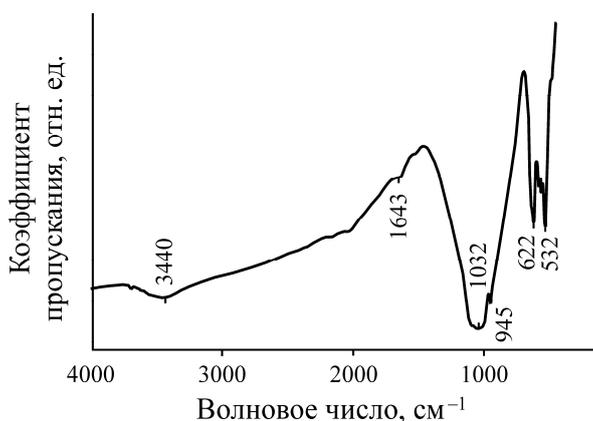


Рис. 2. ИК-спектр магнитных хвостов циркониевого песка (4000–400 см^{-1})

Обжиг с использованием Na_2CO_3 проводился для разделения минералов в цирконийсодержащих хвостах. Предпринята попытка оптимизировать факторы, влияющие на процесс, включая продолжительность обжига, его температуру и соотношение щелочи к хвостам. Количество растворенного фосфата после промывки рассматривалось как показатель распада минерала.

Известно, что температура влияет на химические реакции. Ее влияние на обжиг цирконийсодержащих хвостов в присутствии Na_2CO_3 исследовали при температурах 300–1000 $^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч и соотношении щелочи к хвостам, равном 2. На рис. 3 показано, что количество разложившегося фосфата увеличивается с повышением температуры обжига.

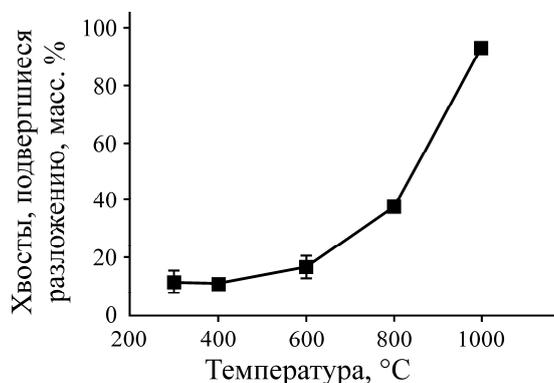


Рис. 3. Влияние температуры обжига на количество разложившегося фосфата

Выход фосфата при прокаливании цирконийсодержащих хвостов при 1000 °С составил 93.27%. С повышением температуры обжига с 300 до 1000 °С извлечение фосфатов увеличилось на 81.88% (рис. 3). В [37] выявлено, что при одной и той же концентрации в течение определенного времени количество растворенного фосфата не увеличивается сверх определенной температуры в процессе обжига для удаления фосфата, поскольку повышение температуры образует фосфатный комплекс, который трудно растворить. Это также соответствует исследованиям [38, 39], в которых показано, что повышение температуры обжига приводит к образованию труднорастворимого фосфатного комплекса.

Помимо потребления энергии, ключевой фактор в химическом процессе — продолжительность реакции. Время считается критическим кинетическим параметром в процессе обжига минералов, поскольку оно — основа для оценки баланса реакции. Для определения влияния времени на расщепление фосфата в процессе обжига проведены эксперименты при продолжительности 0.5–4.0 ч, температуре 800 °С и соотношении щелочи к хвостам, равном 2.

На рис. 4 показано, что процент извлечения фосфата с увеличением продолжительности обжига с 0.5 до 4.0 ч повысился с 33.55 до 47.42%. Большая часть фосфата разложилась в первые 2 ч. Впоследствии эффективность извлечения фосфатов стала незначительной, свидетельствуя о том, что увеличение времени обжига не приводит к заметному повышению эффективности разложения фосфатов в цирконийсодержащих хвостах.

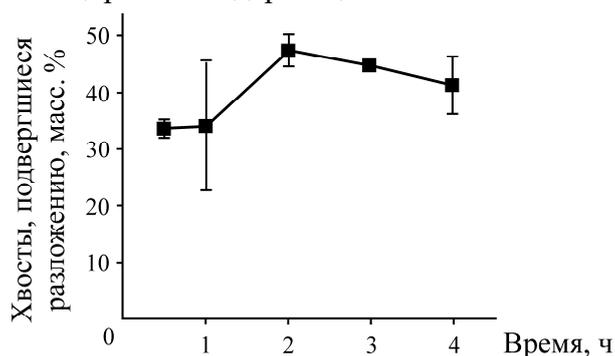


Рис. 4. Влияние времени на процесс обжига

Влияние соотношения щелочи к хвостам на разложение фосфатов исследовано с учетом массовых соотношений 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 и 2.5. Температурный режим поддерживался постоянным (800 °С), продолжительность составляла 1 ч. На рис. 5 представлены результаты извлечения фосфата при разных соотношениях щелочи к хвостам (Щ/Х).

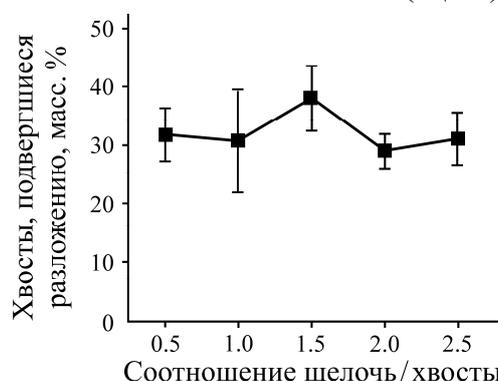


Рис. 5. Влияние соотношения щелочи и хвостов на извлечение фосфата

По мере увеличения $\text{Щ}/\text{X}$ извлечение фосфатов увеличивалось с 31.37 до 38.03 %. Таким образом, фосфаты не полностью переходят в растворимый фосфат натрия в процессе промывки. Они образуют комплекс с редкоземельными элементами, который не разлагается при обжиге [36]. Эффективность растворения цирконийсодержащих хвостов оптимальна при $\text{Щ}/\text{X} = 1.5$.

Инфракрасный спектр образцов после прокаливания с использованием карбоната натрия в диапазоне температур 300 – 1000 °С и последующей промывки представлен на рис. 6. Полосы ортофосфата при 945 см^{-1} наблюдались для образцов, прокаленных при 300 °С. Та же полоса присутствовала в спектре промытого остатка, прокаленного при 1000 °С, что соответствует образованию монацита, прокаленного при температуре свыше 800 °С [40]. Полоса в диапазоне 532 см^{-1} соответствовала деформационным колебаниям, характерным для групп PO_2 и PO_3 , но она не обнаружена в остатке после обжига при 1000 °С [41]. Полосы, наблюдаемые при 1032 см^{-1} , связаны с симметричным колебанием группы POP , соединяющей полифосфат [35, 36]. Полоса при 1384 см^{-1} относилась к колебаниям NaO , указывая на то, что ионы натрия внедрились в структуру остатка выщелачивания [42, 43]. Полоса при 1499 см^{-1} соответствовала валентному колебанию групп $\text{O}-\text{C}-\text{O}$ из непрореагировавшего остатка Na_2CO_3 [44]. Полосы в диапазонах 1643 и 3100 – 3500 см^{-1} свидетельствовали о наличии воды.

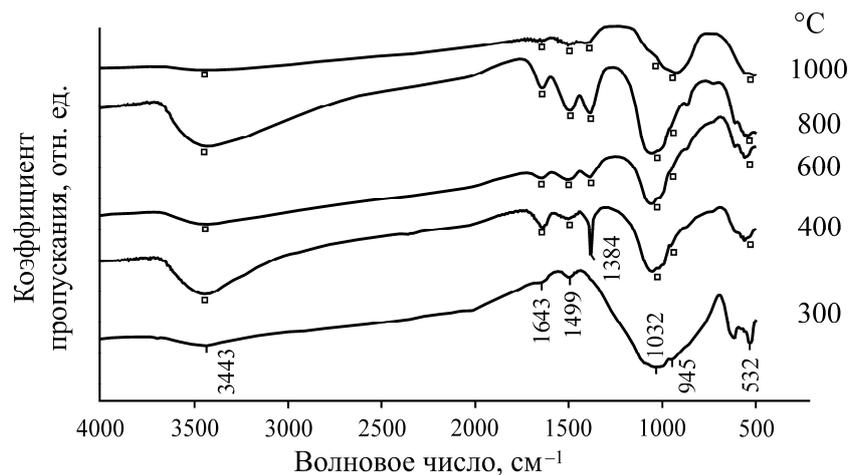


Рис. 6. FT – ИК-спектры прокаленной массы после водного выщелачивания

На рис. 7 показаны результаты XDR-анализа концентраций соединений редкоземельных элементов, полученных после обжига с использованием Na_2CO_3 . В образце хвостов обогащения цирконового песка в качестве основных минералов обнаружены ксенотим (YPO_4) и монацит (CePO_4), в качестве второстепенных — циркон (ZrSiO_4), анатаз (TiO_2), рутил (TiO_2) и церианит ($\text{Ce, Th}-\text{O}_2$). Видно, что пиковые характеристики монацита, ксенотима и циркона постепенно ослабевают и исчезают с повышением температуры. При 300 °С хорошо прослеживаются пики трех минералов. Это указывает на то, что минералы монацита, ксенотима и циркона подвергаются разложению в незначительной степени, что отражается в низком количестве растворенного фосфата. При 800 °С часть минералов монацита и ксенотима, видимо, вступила в реакцию с Na_2CO_3 . При 800 °С выделяются новые фазы (RE_2O и NaPO_3). С увеличением пиковой температуры пик NaPO_3 исчезает, так как инфракрасный спектр не указывает на наличие каких-либо связей NaO . При 1000 °С пики минералов монацита, ксенотима и циркона в остатке после обжига не наблюдаются.

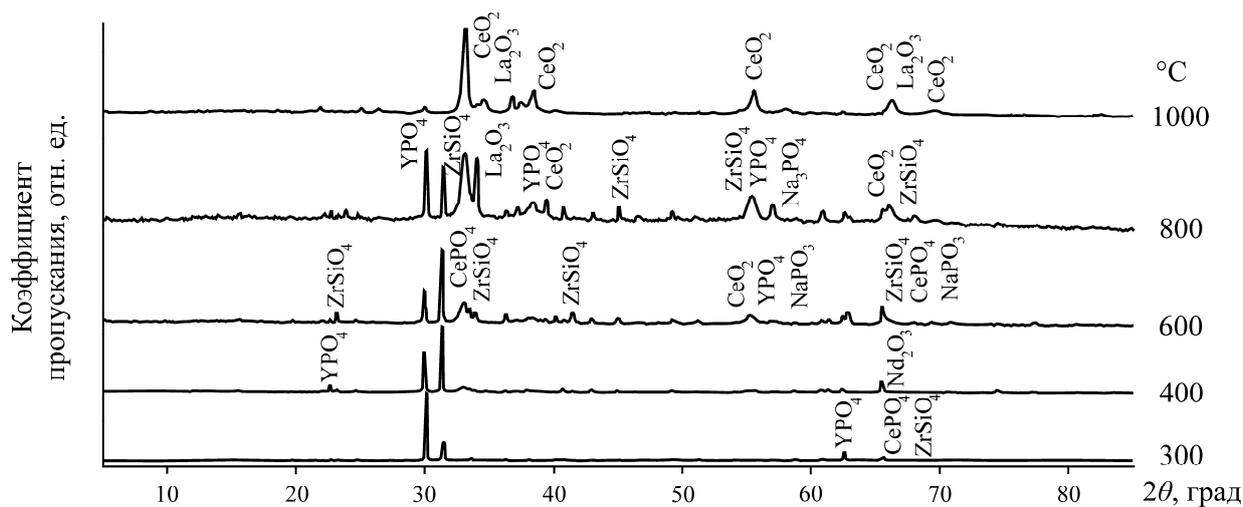


Рис. 7. Рентгенограмма прокаленного образца после водного выщелачивания

ВЫВОДЫ

В процессе обжига цирконийсодержащих хвостов в присутствии Na_2CO_3 большую часть фосфата можно получить путем промывки образца в дистиллированной воде. Цирконийсодержащие хвосты разлагаются при температуре $800\text{ }^\circ\text{C}$. Увеличение времени обжига сверх определенного значения уменьшает количество растворенного фосфата. При температуре обжига $\sim 1000\text{ }^\circ\text{C}$ и его продолжительности 1 ч с соотношением щелочи к хвостам, равном 2, более 90 % фосфата можно извлечь после промывки при температуре $80\text{ }^\circ\text{C}$.

Авторы выражают благодарность Нуру Деви Пуспорини, Рахматике Альфия Амилиане, Мейлане Двинта Нуграхани и Майлиане Арияни Сафитри за их поддержку в исследовании. Ига Триснавати благодарит за стипендиальную программу, предоставленную Министерством науки и технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abdelkade A. M., Daher A., and El-Kashef E. Novel decomposition method for zircon, *J. Alloy Compd.*, 2008, Vol. 460, No. 1–2. — P. 577–580.
2. Murty V. G., Upadhyay R., and Asokan S. Recovery of zircon from Sattankulam deposit in India—problems and prospects, 6th Int. Heavy Miner. Conf. “Back to Basics”, the South African Institute of Mining and Metallurgy, South Africa, 2007. — P. 69–74.
3. Biswas R. K., Habib M. A., Karmakar A. K., and Islam M. R. A novel method for processing of Bangladeshi zircon. Part I: Baking, and fusion with NaOH, *Hydrometallurgy*, 2010, Vol. 103, No. 1–4. — P. 124–129.
4. Srikanth S., Devi V. L., and Kumar R. Unfolding the complexities of mechanical activation assisted alkali leaching of zircon (ZrSiO_4), *Hydrometallurgy*, 2016, Vol. 165. — P. 125–136.
5. Poernomo H., Biyantoro D., and Purwani M. Kajian konsep teknologi pengolahan pasir zirkon lokal yang mengandung monasit, senotim dan ilmenite, *Eksplorium*, 2016, Vol. 37, No. 2. — P. 73–88.
6. Alfiyan M. Pengawasan zirkon di Indonesia, *Pros. Semin. Nas. Teknol. PengelolaanLimbah XIV*, 2013. — P. 145–150.
7. Suseno T. Analisis prospek pasir zirkon Indonesia di pasar dunia, *J. Teknol. Miner. Batubara*, 2015, Vol. 11, No. 1. — P. 61–77.

8. **Zhai J., Wang H., Chen P., Hu Y., and Sun W.** Recycling of iron and titanium resources from early tailings, From fundamental work to industrial application, *Chemosphere*, 2020, Vol. 242. — 125178.
9. **Mäkinen J., Salo M., Khoshkhou M., Sundkvist J. E., and Kinnunen P.** Bioleaching of cobalt from sulfide mining tailings, a mini-pilot study, *Hydrometallurgy*, 2020, Vol. 196. — 105418.
10. **Kinnunen P., Ismailov A., Solismaa S., Sreenivasan H., Räisänen M. L., Levänen E. et al.** Recycling mine tailings in chemically bonded ceramics — a review, *J. Clean. Prod.*, 2018, Vol. 174. — P. 634–649.
11. **Bian Z., Miao X., Lei S., Chen S. E., Wang W., and Struthers S.** The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes, *Science*, 2012, Vol. 337, No. 6095. — P. 702–703.
12. **Wang L., Ji B., Hu Y., Liu R., and Sun W.** A review on in situ phytoremediation of mine tailings, *Chemosphere*, 2017, Vol. 184. — P. 594–600.
13. **Suprpto S. J.** Tinjauan tentang unsur tanah jarang, *Bul. Sumber Daya. Geol.*, 2009, Vol. 4, No. 1. — P. 36–47.
14. **Lindsay M. B., Moncur M. C., Bain J. G., Jambor J. L., Ptacek C. J., and Blowes D. W.** Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings, *Appl. Geochem.*, 2015, Vol. 57. — P. 157–177.
15. **Bagheri B., Mehrabani J. V., and Farrokhpay S.** Recovery of sphalerite from a high zinc grade tailing, *J. Hazard. Mater.*, 2020, Vol. 381. — 120946.
16. **Lyu X., Yao G., Wang Z., Wang Q., and Li L.** Hydration kinetics and properties of cement blended with mechanically activated gold mine tailings, *Thermochim. Acta.*, 2020, Vol. 683. — 178457.
17. **Abaka-Wood G. B., Zanin M., Addai-Mensah J., and Skinner W.** Recovery of rare earth elements minerals from iron oxide–silicate rich tailings. Part 2: Froth flotation separation, *Miner. Eng.*, 2019, Vol. 142. — 105888.
18. **Abaka-Wood G. B., Zanin M., Addai-Mensah J., and Skinner W.** Recovery of rare earth elements minerals from iron oxide–silicate rich tailings. Part 1: Magnetic separation, *Miner. Eng.*, 2019, Vol. 136. — P. 50–61.
19. **Munive G. T., Encinas M. A., Campoy M. M., Álvarez V. E., Vazquez V. M., and Choque D. C.** Leaching gold and silver with an alternative system, *Glycine Thiosulfate Mineral. Tailings J.*, 2020, Vol. 72, No. 2. — P. 918–924.
20. **Wang P., Sun Z., Hu Y., and Cheng H.** Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact, *Sci. Total Environ.*, 2019, Vol. 695. — 133893.
21. **Prameswara G., Trisnawati I., Poernomo H., Mulyono P., Prasetya A., and Petrus H. T. B. M.** Kinetics of yttrium dissolution from alkaline fusion on zircon tailings, *Mining, Metall. Explor.*, 2020, Vol. 37, No. 4. — P. 1297–1305.
22. **Trisnawati I., Prameswara G., Mulyono P., Prasetya A., and Petrus H. T. B. M.** Sulfuric acid leaching of heavy rare earth elements (HREEs) from Indonesian zircon tailing, *Int. J. Technol.*, 2020, Vol. 11, No. 4. — P. 804.
23. **Trisnawati I.** Pelindian zirkonium dari tailing magnetik pasir zirkon hasil roasting menggunakan NaOH, *Metalurgi*, 2020, Vol. 35, No. 3. — P. 83.
24. **Yulandra A., Trisnawati I., Bendiyasa I. M., Rachmipusparini W., and Petrus H. T. B. M.** Optimasi presipitasi logam tanah jarang dari campuran konsentrat logam tanah jarang dengan metode “Response Surface Methodology”, *Met. Indones.*, 2020, Vol. 42, No. 1. — P. 28.
25. **Prameswara G., Mulyono P., Prasetya A., Purnomo H., and Trisnawati I.** Ekstraksi logam tanah jarang (LTJ) dan logam berharga hasil fusi alkali tailing zircon, In *Seminar Nasional. Teknik. Kimia Kejuangan*, 2019. — 1–7 p.
26. **Trisnawati I., Winmoko B. A., Poernomo H., Bendiyasa I. M., Murti H. T., Petrus B. et al.** Desain Taguchi untuk optimasi pengambilan logam tanah jarang dari tailing pasir zirkon menggunakan metode presipitasi asam oksalat: Pengaruh pH dan Suhu Taguchi, *Seminar Geologi. Nuklir. Sumber. Daya Tambang. Tahun.*, 2019. — P. 341–348.

27. **Purwanti T., Setyadji M., Astuti W., Perdana I., and Petrus H. T. B. M.** Phosphate decomposition by alkaline roasting to concentrate rare earth elements from monazite of bangka Island, Indonesia, *J. Min. Sci.*, 2020, Vol. 56, No. 3. — P. 477–485.
28. **Panda R. et al.** Leaching of rare earth metals (REMs) from Korean monazite concentrate, *J. Ind. Eng. Chem.*, 2014, Vol. 20, No. 4. — P. 2035–2042.
29. **Kumari A., Panda R., Jha M. K., Lee J. Y., Kumar J. R., and Kumar V.** Thermal treatment for the separation of phosphate and recovery of rare earth metals (REMs) from Korean monazite, *J. Ind. Eng. Chem.*, 2015, Vol. 21. — P. 696–703.
30. **Shuchen S., Zhiying W., Xue B., Bo G., Wenyuan W., and Ganfeng T.** Influence of NaCl–CaCl₂ on decomposing REPO₄ with CaO, *J. Rare Earth*, 2007, Vol. 25, No. 6. — P. 779–782.
31. **Peng-fei X., Yan-xin Z., Gan-feng T. U., and Jing G. U. O.** High temperature dephosphorization behaviour of monazite concentrate with charred coal, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2010, Vol. 20, No. 12. — P. 2392–2396.
32. **Trisnawati I. et al.** Optimization of multistage precipitation processes for rare earth element purification from indonesian zircon tailings, *J. Sustain. Metall.*, 2021, Vol. 7, No. 2. — P. 537–546.
33. **Prameswara G., Trisnawati I., Mulyono P., Prasetya A., and Petrus H. T. B. M.** Leaching behaviour and kinetic of light and heavy rare earth elements (REE) from zircon tailings in Indonesia, *JOM*, 2021, Vol. 73, No. 4. — P. 988–998.
34. **Clavier N., Mesbah A., Szenknect S., and Dacheux N.** Monazite, rhabdophane, xenotime and churchite: vibrational spectroscopy of gadolinium phosphate polymorphs, *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, 2018, Vol. 205. — P. 85–94.
35. **Ilieva D. et al.** FT–IR and Raman spectra of Gd phosphate crystals and glasses, *J. Non. Cryst. Solids*, 2001, Vol. 293–295, No. 1. — P. 562–568.
36. **Ilieva D., Kovacheva D., Petkov C., and Bogachev G.** Vibrational spectra of R(PO₃)₃ metaphosphates (R = Ga, In, Y, Sm, Gd, Dy), *J. Raman Spectrosc.*, 2001, Vol. 32, No. 11. — P. 893–899.
37. **El Hady S. M., Bakry A. R., Al Shami A. A. S., and Fawzy M. M.** Processing of the xenotime concentrate of Southwestern Sinai via alkali fusion and solvent extraction, *Hydrometallurgy*, 2016, Vol. 163. — P. 115–119.
38. **Galvin J. and Safarzadeh M. S.** Decomposition of monazite concentrate in potassium hydroxide solution, *J. Environ. Chem. Eng.*, 2018, Vol. 6, No. 1. — P. 1353–1363.
39. **Berry L., Galvin J., Agarwal V., and Safarzadeh M. S.** Alkali pug bake process for the decomposition of monazite concentrates, *Miner. Eng.*, 2017, Vol. 109. — P. 32–41.
40. **Demol J., Ho E., and Senanayake G.** Sulfuric acid baking and leaching of rare earth elements, thorium and phosphate from a monazite concentrate: Effect of bake temperature from 200 to 800 °C, *Hydrometallurgy*, 2018, Vol. 179. — P. 254–267.
41. **Hirai H., Masui T., Imanaka N., and Adachi G. Y.** Characterization and thermal behavior of amorphous rare earth phosphates, *J. Alloy Compd.*, 2004, Vol. 374, No. 1–2. — P. 84–88.
42. **Zhang L., Wang X., Chen H., and Jiang F.** Adsorption of Pb (II) using magnetic titanate nanotubes prepared via two-step hydrothermal method, *CLEAN–Soil, Air, Water*, 2014, Vol. 42, No. 7. — P. 947–955.
43. **Martínez-Klimov M. E., Ramírez-Vidal P., Tejada P. R., and Klimova T. E.** Synergy between sodium carbonate and sodium titanate nanotubes in the transesterification of soybean oil with methanol, *Catal. Today*, 2019, Vol. 353. — P. 119–125.
44. **Mutawali M. A. and Sudaryadi S.** Ftir untuk control reaksi stoikiometri peleburan zirkon dengan NaOH, *GANENDRA Maj. IPTEK Nukl.*, 2020, Vol. 23, No. 1. — P. 19–27.

Поступила в редакцию 05/II 2021

После доработки 25/VIII 2022

Принята к публикации 21/IX 2022