

УДК 622.7

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИЗ ПРИБРЕЖНЫХ ПЕСКОВ РОССЫПНЫХ МИНЕРАЛОВ,  
СОДЕРЖАЩИХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Р. Б. Рао<sup>1</sup>, Б. Мийшра<sup>2</sup>, Д. Сингх<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт технологии минералов и материалов,

E-mail: bhimaraoscientist1978@gmail.com, г. Бхубанешвар, Индия

<sup>2</sup>Компания Indian Rare Earths (India) Limited,

E-mail: brmirel3662@gmail.com, г. Чатрапур, Индия

Рассмотрен технологический процесс извлечения монацита и циркона. Установлено, что из прибрежного песка с содержанием 0.0096 % монацита и 0.028 % циркона можно получить концентрат монацита с содержанием 97.90 % и извлечением 61.20 % и концентрат циркона с содержанием 98.70 % и извлечением 21.50 %.

*Редкоземельные элементы, монацит, циркон, обогащение минералов, винтовой сепаратор, россыпные минералы, электростатический сепаратор, магнитный сепаратор*

DOI: 10.15372/FTPRPI20240118

EDN: SZRQGQ

Редкоземельные элементы (РЗЭ) часто используются в повседневной жизни и весьма значимы для промышленности. Они применяются во многих секторах экономики для производства смартфонов, электродвигателей с постоянными магнитами, микродвигателей, датчиков, акустических систем и др. В будущем потребность в РЗЭ будет только увеличиваться из-за глобального роста объемов преобразования энергии. Технологии поиска и извлечения РЗЭ из первичных и вторичных источников важны для промышленности Индии.

К первичным источникам РЗЭ относят монацит, циркон, бастнезит, морские раковины, к вторичным — бокситы, красный шлам, золу-унос, кимберлит. В Индии основные минералы с содержанием РЗЭ — монацит и циркон. Монацит содержит ~70 % оксидов РЗЭ (Ce, La, Pr, Nd), 4–12 % тория, ~14 % урана и извлекается из прибрежного песка с последующей высокообъемной гравитационной, магнитной, электростатической сепарацией и при необходимости флотацией.

В состав циркона обычно входят радиоактивные элементы U, Th, Ti, Sc, Y, P, что делает его метамиктным минералом (циртолит). Циркон характеризуется округленными куполообразными кристаллами с матовым смолистым блеском. Содержащийся в цирконе иттрий связан с изоструктурной природой ксенотима. Некоторые метамиктные цирконы являются смесями кремния, кубического и моноклинического оксида циркония.

Извлечение монацита и циркона — сопутствующая процедура при получении других тяжелых минералов, таких как ильменит, рутил, гранат, силлиманин и др. [1–8]. В [9–15] при разработке технологического процесса извлечения монацита и циркона использовались методы из области минералогии для количественной оценки их свойств. Отметим, что для железных руд и руд цветных металлов важен технологический процесс их обогащения, который проектируется на основе химического анализа, позволяющего оценить руду качественным образом. Значимость минералогического анализа проявляется в качественной и количественной оценке содержания минералов на каждом этапе обогащения. При этом разрабатывается технологический процесс извлечения минералов из россыпных месторождений, для которых химический анализ неэффективен ввиду сложного вещественного состава. Минералогический анализ ограничен при оценке извлечения отдельных минералов из россыпных месторождений, кроме случаев, описанных в [16].

Цель настоящей работы — исследование извлечения монацита и циркона из прибрежного песка месторождения Bramhagiri (штат Одисса, Индия) с применением минералогических методов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На месторождении Bramhagiri собрано ~15 т прибрежного песка, образцы из которого использовались для фракционного (в соответствии со стандартами) и минералогического (с помощью бинокулярного микроскопа) анализа. Винтовая сепарация имела две стадии: черновую и чистовую, которая также делилась на два этапа. Черновая сепарация проводилась на установке СТ, чистовая сепарация концентрата и промпродукта — на HG8. На рис. 1 приведен план испытаний. Полученные продукты винтовой сепарации и хвосты подвергались сепарации в тяжелой среде (органическая жидкость с удельным весом 2.89 г/см<sup>3</sup>). Легкая фракция состояла из кварца, тяжелая — из ильменита, рутила, циркона, монацита, силлиманиита и др. Затем осуществлялась электростатическая сепарация, которая в свою очередь делилась на черновую и чистовую. Магнитная сепарация выполнялась для отделения монацита, флотация — для отделения силлиманиита от циркона. Все продукты обогащения и хвостов изучались с помощью минералогического анализа для оценки и улучшения методов извлечения циркона и монацита, а также устанавливалось качество полученного монацита и циркона для пригодности в промышленном применении.



Рис. 1. План извлечения монацита и циркона из прибрежного песка: 1 — концентрат черновой сепарации; 2 — тяжелые минералы; 3 — непроводящие минералы; 4 — магнитные минералы (монацит); 5 — немагнитные минералы; 6 — флотационные хвосты (циркон)

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены химические формулы, физические свойства и содержание РЗЭ, количество ThO<sub>2</sub> и UO<sub>2</sub> в монаците и цирконе. Видно, что монацит имеет разные формулы, при этом схожие магнитные и химические свойства. Различия в плотности монацитов и циркона, размер и форма их частиц существенно влияют на результаты винтовой сепарации.

ТАБЛИЦА 1. Физические и химические свойства минералов

Минерал	Химическая формула	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Магнитные свойства	РЗЭ, %	ThO <sub>2</sub> , %	UO <sub>2</sub> , %
Монацит Ce	(Ce, La, Nd, Th) PO <sub>4</sub>	4.98 – 5.43	Парамагнетик	0.0035 – 0.0071	0.20 – 11.34	0 – 16
Монацит La	(La, Ce, Nd, Th) PO <sub>4</sub>	5.17 – 5.27	Парамагнетик	0.0035 – 0.0071	0.20 – 11.34	0 – 16
Монацит Nd	(Nd, Ce, La, Th) PO <sub>4</sub>	5.43	Парамагнетик	0.0035 – 0.0071	0.20 – 11.34	0 – 16
Циркон	(Zr, REE) SiO <sub>4</sub>	4.60 – 4.70	Диамагнетик	0.0020 – 0.2300	0.10 – 0.80	0.1 – 0.5

На рис. 2 представлено совокупное извлечение тяжелых минералов с весовым распределением по стадиям винтовой сепарации. В результате черновой винтовой сепарации получен концентрат 18.9 %, промпродукт — 5.1, хвосты — 76.0 %.

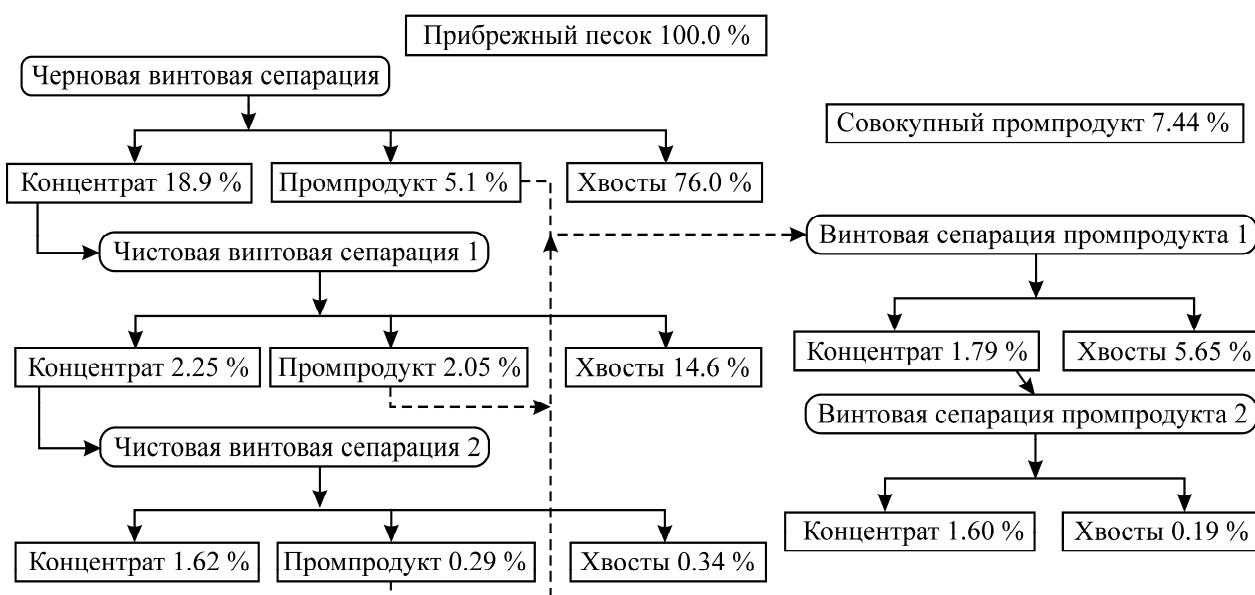


Рис. 2. Распределение массы материала на стадиях винтовой сепарации

Ниже приведены физические и минералогические свойства компонентов в образце песка, %:

Совокупная доля тяжелых (ильменит, рутил, гранат, циркон, монацит, силлиманит) и пустых (кварц) минералов	4.72 / 95.28
Тяжелые минералы, содержащие РЗЭ (циркон, монацит)	0.04
Оgneупорные минералы (циркон, силлиманит)	1.56
Абразивные тяжелые минералы (гранат)	1.39
Тяжелые (ильменит, рутил, гранат, циркон, монацит) и средней плотности (силлиманит) минералы	3.18 / 1.54
Магнитные тяжелые (ильменит, монацит, гранат) и немагнитные тяжелые (рутил, циркон, силлиманит) минералы	2.96 / 1.62
Электропроводящие тяжелые (ильменит, рутил) и неэлектропроводящие тяжелые (циркон, монацит, силлиманит, гранат) минералы	1.61 / 2.97
Класс крупности $d_{80}$ циркона и монацита, мкм	212 / 132

Общая весовая доля составила, %: ильменита, рутила, граната, циркона, монацита и силлиманита — 4.72, при этом циркона и монацита — 0.04, силлиманита — 1.54, крайне тяжелых минералов — 3.18. Определено содержание магнитных минералов — 2.96 %, немагнитных — 1.76. Основной пустой минерал — кварц (95.28 %). Класс крупности  $d_{80}$  циркона равен 212 мкм, монацита — 132 мкм (рис. 3).

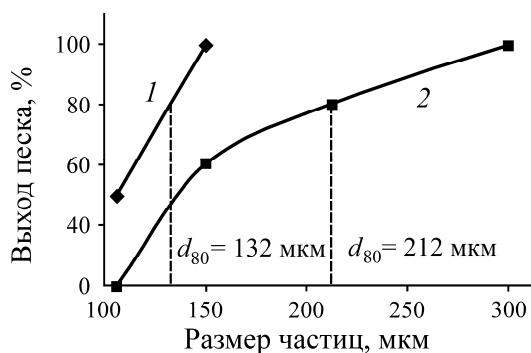
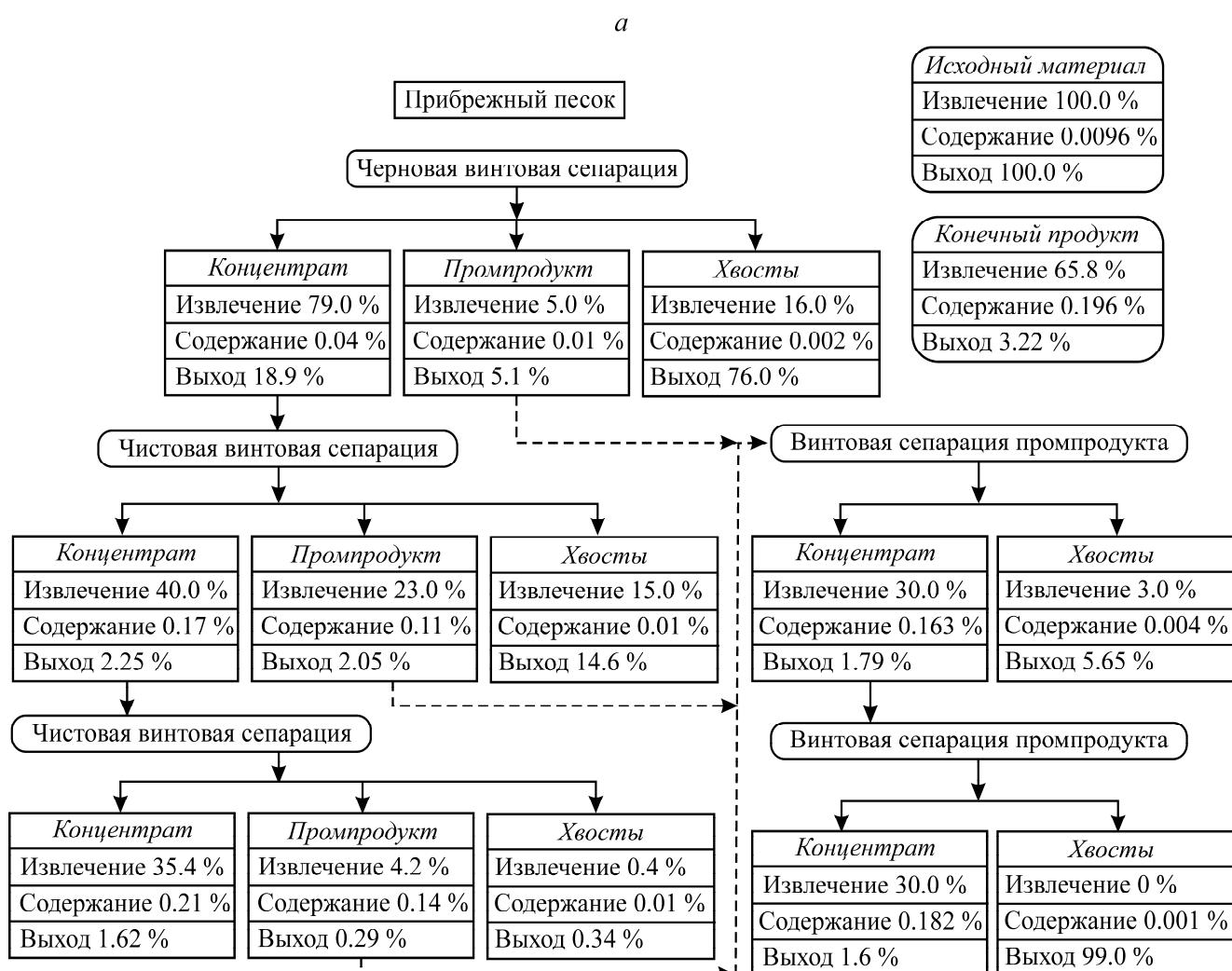


Рис. 3. Фракционный анализ монацита (1) и циркона (2)

Извлечение монацита и циркона из прибрежного песка изучалось физическими методами обогащения (гравитационной, электростатической, магнитной сепарацией и флотацией). Полученные продукты оценивались с помощью методов минералогии. Технологический процесс винтовой сепарации для предварительного извлечения монацита и циркона и количественные результаты приведены на рис. 4 и в табл. 2.

Начало рис. 4



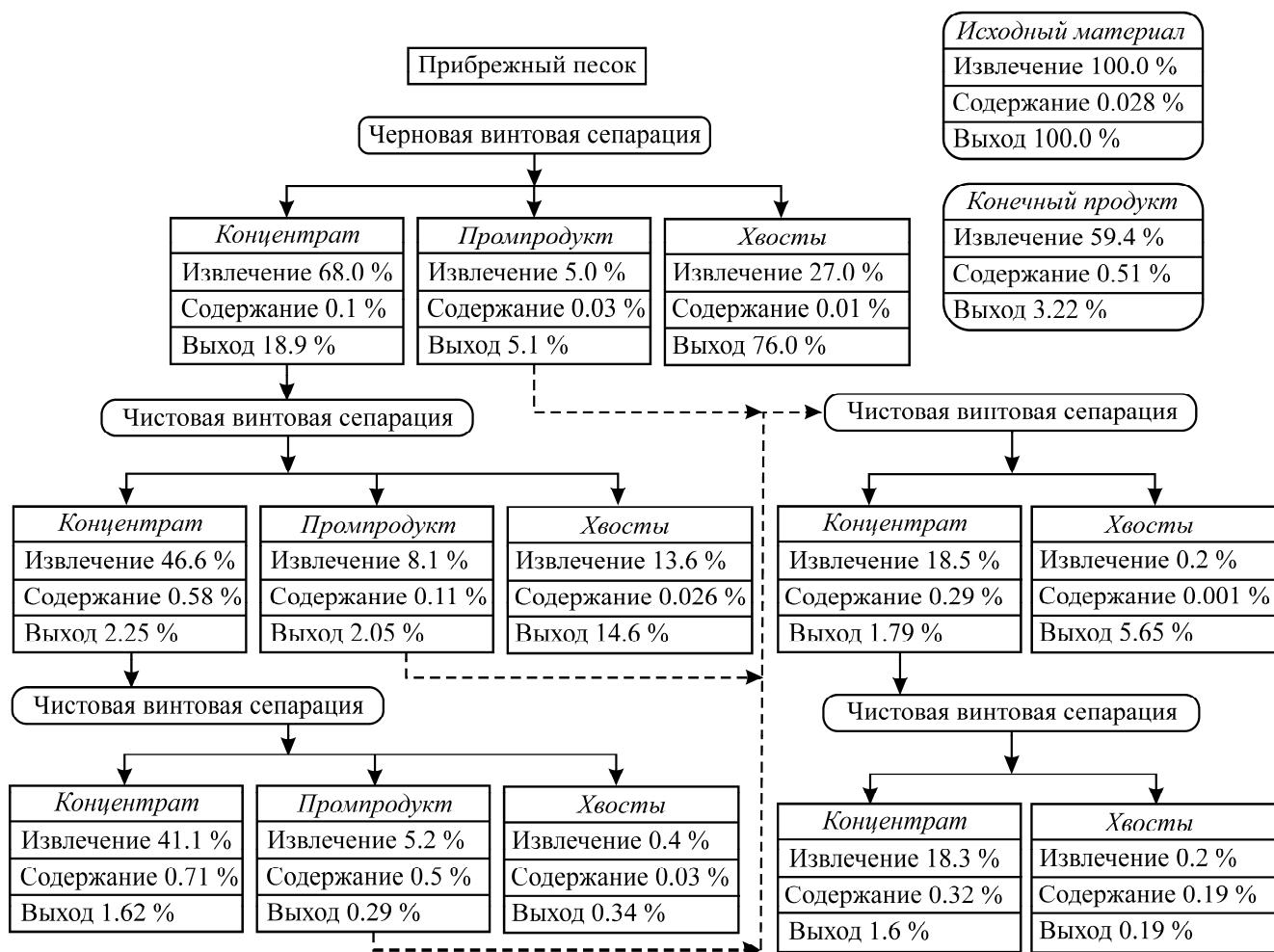


Рис. 4. Минералогический анализ извлечения монацита (а) и циркона (б) в рамках винтовой сепарации

Для получения концентрата с необходимым содержанием монацита нужно выполнить одну черновую винтовую сепарацию и две чистовых, а также две стадии сепарации промпродуктов. На каждой стадии процесс извлечения монацита можно проанализировать минералогическими методами. Содержание монацита в образце прибрежного песка до черновой винтовой сепарации составляло 0.0096 %. После нее получен концентрат с выходом 18.90 % и содержанием монацита 0.04 %. (рис. 4а). В результате первой чистовой сепарации выделен концентрат с выходом 2.25 % и содержанием 0.17 %, в результате второй — концентрат с содержанием 0.21 % монацита. Выход и содержание монацита в общем промпродукте после одной стадии черновой сепарации и двух стадий чистовой сепарации составили 7.44 и 0.04 % соответственно. В результате двух стадий чистовой сепарации промпродукта получен концентрат с выходом 1.60 % и содержанием монацита 0.182 %, вследствие винтовой сепарации — окончательный концентрат с содержанием монацита 0.196, выходом 3.22 и извлечением 65.80 %.

ТАБЛИЦА 2. Результаты минералогического анализа монацита и циркона на стадиях винтовой сепарации, %

Винтовая сепарация	Продукт	Выход по весу	Монацит		Циркон	
			Содержание	Извлечение	Содержание	Извлечение
Концентрат						
Черновая	Черновой концентрат	18.90	0.040	79.0	0.100	68.0
Чистовая 1	Чистовой концентрат 1	2.25	0.170	40.0	0.580	46.6
Чистовая 2	Чистовой концентрат 2	1.62	0.210	35.4	0.710	41.1
Совокупный промпродукт		7.44	0.040	33.0	0.070	18.7
Чистовая 1	Промпродукт 1	1.79	0.163	30.0	0.280	18.5
Чистовая 2	Промпродукт 2	1.60	0.182	30.0	0.320	18.3
Итоговый концентрат		3.22	0.196	65.8	0.510	59.4
Промпродукт						
Черновая	Черновой концентрат	5.10	0.010	5.0	0.030	5.0
Чистовая 1	Чистовой концентрат 1	2.05	0.110	23.0	0.110	8.1
Чистовая 2	Чистовой концентрат 2	0.29	0.140	4.2	0.500	5.2
Совокупный промпродукт		—	—	—	—	—
Чистовая 1	Промпродукт 1	—	—	—	—	—
Чистовая 2	Промпродукт 2	—	—	—	—	—
Итоговый концентрат		—	—	—	—	—
Хвосты						
Черновая	Черновой концентрат	76.0	0.002	16.0	0.010	27.0
Чистовая 1	Чистовой концентрат 1	14.60	0.010	15.0	0.026	13.6
Чистовая 2	Чистовой концентрат 2	0.34	0.010	0.4	0.030	0.4
Совокупный промпродукт		—	—	—	—	—
Чистовая 1	Промпродукт 1	5.65	0.004	0.3	0.001	0.2
Чистовая 2	Промпродукт 2	0.19	0.001	—	0.001	0.2
Итоговый концентрат		0.53	—	—	—	—

Электростатическая сепарация выполнялась в две стадии (табл. 3). На первой получен концентрат с выходом 1.24 % и содержанием монацита 0.49 %, на второй — концентрат с выходом 1.04 %, содержанием монацита 0.58 % и извлечением 62.80 %. Результат магнитной сепарации — магнитная фракция с содержанием монацита 29.40 %, выходом 0.02 % и извлечением 61.30 %, флотации — тяжелая фракция с содержанием 97.90 %, выходом 0.006 % и извлечением 61.20 %. Данный концентрат соответствует требованиям для промышленного применения. Ввиду того, что совокупное содержание монацита в легкой и немагнитной фракциях составило 0.019 %, предлагалось повторить процесс для дополнительного извлечения монацита.

ТАБЛИЦА 3. Извлечение монацита и циркона посредством разных сепараций, %

Сепарация	Продукт	Выход по весу	Монацит		Циркон	
			Содержание	Извлечение	Содержание	Извлечение
Электростатическая черновая	Проводящий	1.240	0.490	63.33	1.310	58.00
	Непроводящий	1.980	0.012	2.50	0.019	1.40
	Итого	3.220	0.196	65.80	0.510	59.40
Электростатическая чистовая	Проводящий	1.040	0.580	62.80	1.560	57.90
	Непроводящий	0.200	0.020	0.50	0.002	0.10
	Итого	1.240	0.490	63.30	1.310	58.00
Магнитная	Магнитный	0.020	29.400	61.30	80.200	57.30
	Немагнитный	1.020	0.019	2.00	0.018	0.60
	Итого	1.040	0.580	63.30	1.560	57.90
Флотация	Легкий	0.014	0.019	0.10	72.300	36.15
	Тяжелый	0.006	97.900	61.20	98.700	21.15
	Итого	0.020	29.400	61.30	80.200	57.30

Извлечение циркона в рамках винтовой сепарации показано на рис. 4б. Оно состоит из тех же стадий, что и извлечение монацита. После винтовой сепарации для получения концентрата с необходимым содержанием требуется выполнить одну стадию черновой, две стадии чистовой сепарации и две стадии чистовой сепарации промпродукта. Извлечение циркона анализировалось минералогическими методами на каждой стадии (табл. 3).

Содержание циркона в образце прибрежного песка составляло 0.028 %. Результат черновой винтовой сепарации — концентрат с содержанием 0.10 % и выходом 18.90 %, первой чистовой винтовой сепарации — концентрат циркона с содержанием 0.58 % и выходом 2.25 % и второй — с содержанием 0.91 %. Совокупное содержание циркона и выход в промпродукте после черновой сепарации и двух стадий чистовой составили 0.07 и 7.44 % соответственно. В рамках двухстадийной сепарации промпродукта получен концентрат с содержанием 0.32 % и выходом 1.60 %. Окончательный концентрат имел содержание 0.51 %, выход 3.22 % и извлечение 59.40 %.

Электростатическая сепарация осуществлялась в две стадии. Результат первой стадии — концентрат циркона с содержанием 1.56 % и выходом 1.24 %, второй — концентрат с содержанием 1.56 % и выходом 1.04 %. Затем проводилась магнитная сепарация (получена немагнитная фракция с содержанием 80.20 % циркона при выходе 0.02 %) и флотация (получен концентрат с содержанием циркона 98.70 %). Из-за значительных потерь циркона (72.30 %), приходящихся на легкую фракцию, предлагалось повторить процесс для его дополнительного извлечения.

На рис. 5 показаны морфологические изображения монацита и циркона, имеющие округлую форму с гладкими краями.

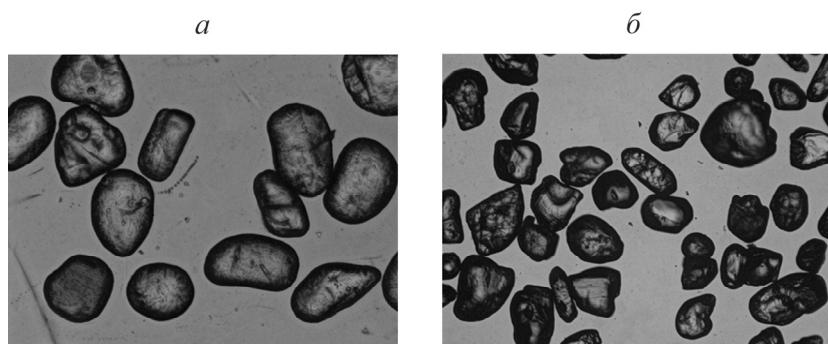


Рис. 5. Морфологическое изображение монацита (а) и циркона (б)

## ВЫВОДЫ

В результате экспериментальных исследований по извлечению монацита и циркона из прибрежного песка с использованием комплекса обогатительных методов удалось получить необходимый для промышленного применения монацитовый концентрат. Для получения цирконового концентрата требуется доработка предложенной технологической схемы.

Авторы работы выражают благодарность компании IREL (Индия) за предоставленную возможность проведения экспериментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Twaiq O., Bhatti T. M., Zaza R., and Al-Awah H. Beneficiation of light rare earth elements from dubeydib heavy mineral sands deposits, South Jordan, The Nucleus, 2023, Vol. 20, No. 2.
2. Routray S. and Rao R. B. Beneficiation and characterization of detrital zircons from beach sand and red sediments in India, J. Miner. Mater. Characterization Eng., 2011, Vol. 15, No. 11. — P. 1409–1428.

3. **Kim K. and Jeong S.** Separation of monazite from placer deposit by magnetic separation, Minerals, 2019, Vol. 9. — 149.
4. **Cui H. and Anderson C. G.** Alternative flowsheet for rare earth beneficiation of bear lodge ore, Minerals Eng., 2017, Vol. 110. — P. 166–178.
5. **Dieye M., Thiam M. M., Geneyton A., and Gueye M.** Monazite recovery by magnetic and gravity separation of medium grade zircon concentrate from Senegalese heavy mineral sands deposit, J. Miner. Mater. Characterization Eng., 2021, Vol. 9. — P. 590–608.
6. **Jordens A., Ying Ping Cheng, Waters K. E.** A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals, Miner. Eng., 2013, Vol. 41. — P. 97–11.
7. **Jordens A., Sheridan R. S., Rowson N. A., and Waters K. E.** Processing a rare earth mineral deposit using gravity and magnetic separation, Miner. Eng., 2014, Vol. 62. — P. 9–18.
8. **Abeidu A. M.** The separation of monazite from zircon by flotation, J. Less-Common Metals, 1972, Vol. 29, No. 2. — P. 113–119.
9. **Fuxing Zhu, Zhanshan Ma, Guanjin Gao, Kehui Qiu, and Weixing Peng.** Process mineralogy of vanadium titanomagnetite ore in panzhihua, China, Separations, 2023, Vol. 10, No. 3. — 147.
10. **Nie Wen-Lin, Zhang Qian, Yang Xiao-Yong, Feng Qi-Cheng, Wen Shu-Ming, Zhou Yao-Wen, Liu Jun-Bo, and Yang Xiu-Zhu.** A study of the process mineralogy of vanadium-titanium magnetite electric furnace slag, Acta Petrologica Mineralogica, 2021, Vol. 40, No. 3. — P. 542–550.
11. **Lu Xianzhi, Lu Peiyao, Chen Yingjie, Ding Zhan, Yu Pan, and Bai Shaojun.** Study on process mineralogy of ilmenite in Yunnan province, J. Multipurpose Utilizat. Miner. Res., 2022, Vol. 2. — P. 206–210.
12. **Jiang Ying, Li Bo, Liang Dongyun, and Zhang Lili.** Study on process mineralogy for a weathered clay type titanium ore, Multipurpose Utilizat. Miner. Res., 2020, Vol. 6. — P. 31–36.
13. **Philander C. and Rozendaal A.** A process mineralogy approach to geometallurgical model refinement for the Namakwa Sands heavy minerals operations, west coast of South Africa, Miner. Eng., 2014, Vol. 65. — P. 9–16.
14. **Li Xiaoyu and Zhou Mangeng.** Process mineralogy research on the titanium concentrate from a mining field Panxi region, Multipurpose Utilizat. Miner. Res., 2009, Vol. 1. — P. 24–24.
15. **Unchui Zhang, Chengxiu Li, and Lingxi Zeng.** Study on process mineralogy and titanium separation of Ti-bearing EAF slag, Advanced Mater. Res., 2013, Vol. 734–737. — P. 1097–1103.
16. **Singh D., Mishra B. R., Basu S., and Rao R. B.** Process mineralogy for the development of a flowsheet to recover monazite from offshore placer deposit, J. Inst. Eng. India, 2023, Ser. D. — P. 1–11.

Поступила в редакцию 18/X 2023

После доработки 18/XII 2023

Принята к публикации 24/I 2024