



<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-3-5>
УДК 553.068

Структура, состав, закономерности формирования и сырьевой потенциал хвостов обогащения лопаритовых руд фабрики Ловозерского ГОКа, Россия

А.В. Лаломов^{1,2}, Е.Н. Левченко², А.В. Григорьева¹

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер. 35, г. Москва, 119017, Россия; lalomov@mail.ru

² Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов,
ул. Вересаева 15, г. Москва, 121357, Россия

Статья поступила в редакцию 12.01.2026 г., после доработки 04.08.2026 г., принята к печати 08.09.2026 г

Аннотация. В настоящее время единственным действующим предприятием по добыче и производству концентрата редкоземельных металлов в России является Ловозерский горно-обогатительный комбинат, разрабатывающий Ловозерское месторождение лопарита, содержащего Nb, Ta, редкоземельные металлы и Ti. Дополнительным источником сырья для комбината могут служить техногенные образования – хвосты обогатительной фабрики Карнасурт. Содержание лопарита в хвостах нами рассчитано как на основе такового в перерабатываемых рудах и потерях при обогащении, так и по данным точечного опробования. Эти методы дают хорошую сходимость результатов на уровне 0.58–0.77%. Минералогическое исследование малых технологических проб показало, что лопарит в хвостах обогащения присутствует как в виде крупных зерен, так и мелких обломков. Основная масса лопарита находится в гравитационно-обогащаемых классах крупности 0.071–0.5 мм. Структура хвостохранилища неоднородная: она определяется перераспределением тяжелой фракции за счет природно-техногенных процессов и имеет преимущественно концентрическую форму, что должно учитываться при постановке оценочных работ.

Ключевые слова: техногенные образования, лопарит, ниобий, редкие металлы, Ловозерский массив.

Финансирование. Работы проведены в рамках темы государственного задания Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (г. Москва, Россия).

Благодарности. Авторы благодарны руководству Ловозерского ГОКа за возможность опробования техногенных отложений хвостохранилищ и информацию об их параметрах, а также рецензентам за внимательное прочтение рукописи и сделанные важные замечания.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. Лаломов А.В. – проведение полевых исследований, анализ полученных материалов, написание основного текста статьи; Левченко Е.Н. – анализ технологических свойств техногенных отложений, возможной схемы обогащения и параметров концентрата; Григорьева А.В. – участие в полевых работах, исследование и описание минералов техногенных отложений. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Лаломов А.В., Левченко Е.Н., Григорьева А.В. Структура, состав, закономерности формирования и сырьевой потенциал хвостов обогащения лопаритовых руд фабрики Ловозерского ГОКа, Россия. *Минералогия*, 2026, 12(3), 93–104. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-3-5>

Structure, composition, generation patterns and potential of technogenic dumps at the Lovozero mining and processing plant, Russia

A.V. Lalomov^{1,2}, E.N. Levchenko², A.V. Grigorieva¹

¹ Institute of Ore Deposit Geology, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry RAS, Staromonetny per. 35, Moscow, 119017, Russia; lalomov@mail.ru

² Institute of Mineralogy, Geochemistry, and Crystal Chemistry of Rare Elements, ul. Veresaeva 15, Moscow, 121357, Russia

Received 12.01.2026, revised 04.08.2026, accepted 08.09.2026

Abstract. The Lovozero mining and processing plant is currently the only one operating enterprise in Russia extracting and producing rare earth metal concentrate from the Lovozero loparite deposit, which contains Nb, Ta, rare earth metals, and Ti. Raw materials for the plant could additionally be sourced from technogenic tailings of the Karna-Surt processing plant. The loparite content of tailings are calculated on the basis of (1) the loparite content in processed ores and losses during processing and (2) according to point sampling data. These methods provide good convergence of the results (0.58–0.77%). Mineralogical study of small technological samples showed that loparite in enrichment tailings occurs as large grains and small fragments. Most loparite occurs in the gravity-enriched classes 0.071–0.500 mm in size. The tailings has a heterogeneous mostly concentric structure caused by the redistribution of heavy fraction due to natural and technogenic processes, which should be taken into account during the assessment works.

Keywords: tailing dumps, loparite, niobium, rare metals, Lovozero pluton.

Funding. This work was supported by state contract of the Institute of Geology of Ore Deposits, Mineralogy, Petrography, Geochemistry, and Mineralogy RAS (Moscow, Russia).

Acknowledgments. We are grateful to the management of the Lovozero mining and processing plant for sampling the technogenic tailings and information on their parameters, as well as to the reviewers for careful reading the manuscript and important comments.

Conflict of Interest. The authors declare no conflicts of interest related to the manuscript.

Author Contributions. A.V. Lalomov – field works, analysis, writing the manuscript; E.N. Levchenko – analysis of technological properties of technogenic deposits, a possible enrichment scheme, and concentrate parameters; A.V. Grigorieva – field works, description of minerals in technogenic deposits. All authors approved the final version of the article prior to publication.

For citation: Lalomov A.V., Levchenko E.N., Grigorieva A.V. Structure, composition, generation patterns and potential of technogenic dumps at the Lovozero mining and processing plant, Russia. *Mineralogy*, 2026, 12(3), 93–104. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-3-5>

ВВЕДЕНИЕ

Ловозерский горно-обогатительный комбинат является единственным действующим сырьевым источником редких металлов (в т. ч. редкоземельных (РЗМ)) в России. В Ловозерском щелочном массиве – основном источнике сырья для одноименного комбината – сосредоточено 15.4 % Σ РЗМ, 17.7 % Nb_2O_5 и 22.9 % Ta_2O_5 от общероссийских запасов категорий А+В+С₁. В настоящее время добыча ведется в сложных горно-геологических условиях при низкой рентабельности существующих разрезов, что ставит вопрос о необходимости диверсификации сырьевых источников (Бортников и др., 2023). Ловозерский комбинат – единственный в Российской Федерации, где основным руд-

ным минералом является лопарит $(\text{Na}, \text{Ce}, \text{Ca})_2(\text{Ti}, \text{Nb})_2\text{O}_6$ – комплексное редкометалльное сырье. Состав лопарита в разрезе массива не постоянен: так, в пределах дифференцированного комплекса, к которому приурочено промышленное оруденение, содержание в лопарите Nb_2O_5 (мас. %) изменяется от 6.7 до 9.0; Ta_2O_5 – от 0.5 до 0.6, SrO – от 0.65 до 3.10, ThO_2 – от 0.4 до 0.7, TiO_2 – от 39.2 до 41.0. Суммарное содержание РЗЭ варьирует от 31.3 до 36.5, в т. ч., в среднем, Ce_2O_3 – 16.28 %, La_2O_3 – 8.67 %, Nd_2O_3 – 4.38 %, Pr_2O_3 – 1.62 %, Sm_2O_3 – 0.21 % (Sørensen, 1970; Сук и др., 2013; Zaitsev et al., 2014; Лаломов и др., 2022). В перспективе растущие потребности в редких металлах могут быть удовлетворены за счет дополнительного освоения новых участков Ловозерского массива.

Рис. 1. Обзорная схема района обогатительной фабрики Ловозерского ГОКа и хвостохранилищ на основе космоснимка Google Earth.

Fig. 1. General scheme of the area of the Lovozero mining and processing plant and tailings storage facilities based on a Google Earth satellite image.



Рис. 2. Внешний вид хвостохранилищ Карнасурт-1 и Карнасурт-2.

Fig. 2. General view of the Karnasurt-1 and Karnasurt-2 tailings storage facilities.

Помимо коренного месторождения лопарита, связанного с породами Ловозерского массива, дополнительным потенциально перспективным объектом редкометалльного сырья являются хвосты обогащения Ловозерского ГОКа (Лаломов, Григорьева, 2023) (рис. 1, 2). Только в двух хвостохранилищах Карнасуртской промплощадки накоплено 60–70 тыс. т лопарита. К вопросу освоения хвостохранилищ регулярно обращаются недропользователи, поскольку эти объекты обладают рядом положительных свойств (Быховский и др., 2014):

- как правило, хвостохранилища расположены в освоенных районах в непосредственной близости от действующих (или ранее действовавших)

горнообогатительных предприятий, что существенно сокращает логистические затраты;

- хвосты обогащения руд представлены измельченным промытым материалом, что исключает необходимость дробления – наиболее энергозатратного этапа, потребляющего около 50 % энергии при разработке коренных месторождений;

- хвостохранилища располагаются на поверхности и не требуют вскрышных или подземных работ.

К негативным факторам относятся пониженное (остаточное) содержание полезного компонента, ушедшего в хвосты при его извлечении на основном этапе, и пониженная крупность полезного компонента. В целом, объемы техногенных отложе-

ний в масштабе нашей планеты в настоящее время сопоставимы с некоторыми классами природных образований (Лаломов, 2025), а содержащиеся в них ресурсы минерального сырья в ряде случаев могут обеспечить потребности промышленности в стратегических дефицитных видах полезных ископаемых (Blannin et al., 2023).

Техногенные отложения обладают рядом специфических черт, которые определяются как антропогенным воздействием на породы земной коры, так и наложенными на них природными процессами. Все это определяет уникальность техногенных процессов и сопутствующих им отложений и позволяет выделить отдельный тип «геотехногенного литогенеза» с присущими ему особенностями формирования как геотехногенных осадочных комплексов в целом, так и характерных для них полезных ископаемых. Это указывает на необходимость изучения закономерностей формирования структуры техногенных образований и происходящих в них процессов.

За последнее время к проблеме возможности использования хвостов обогащения ловаритовых руд в качестве вторичного сырья исследователи обращались уже не раз (Хохуля и др., 2015; Krasavtseva et al., 2021; Максимомова и др., 2022). В рамках проводимого исследования помимо дополнительного изучения состава техногенных образований и оценки возможности их обогащения сделана попытка построить модель строения хвостохранилища, выделить техногенные фации и описать процессы природно-техногенной дифференциации материала с образованием повышенных концентраций лопарита для разработки рекомендаций по разведке и оценке запасов техногенных месторождений этого типа.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования структуры и состава хвостохранилищ из них отобраны две минералоготехнологических пробы (МТП) Карнасурт-1 (К-1) и Карнасурт-2 (К-2) весом ~30 кг в местах сброса хвостов и семь рядовых проб (0.1 кг) из разных зон техногенных образований (дамба, «дельта» (зона сброса), пляж, «дюна» (зона эоловой переработки)). Пробы отбирались с поверхности на глубину 0.5 м для МТП и 0.2 м – для рядовых проб. В МТП проанализированы гранулометрический и минеральный составы по разноразмерным классам и магнитным фракциям. Пробы разделены на семь классов круп-

ности, для пяти классов в диапазоне 0.50–0.05 мм после разделения на четыре фракции по магнитной восприимчивости (магнитная, I электромагнитная, II электромагнитная и немагнитная) оптическими методами исследован минеральный состав тяжелой и легкой фракций.

Морфология лопарита изучена оптическим методом (под бинокляром) и с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JSM-5610LV Jeol (Япония) в Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН, г. Москва, Россия) в отраженных электронах, отображающих контраст в зависимости от среднего атомного номера элемента, с ускоряющим напряжением 25 кВ. Изображения и анализ химического состава образцов производились с помощью энергодисперсионного детектора электронов в обратно-рассеянных электронах – ULTIM MAX 100 Oxford Instruments и программного обеспечения для обработки спектров и изображений, полученных на СЭМ – AZtek 5.1 (оператор Л.В. Левицкая).

Химический состав и внутренняя структура лопарита определены методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) в полированных шашках в аналитической лаборатории ИГЕМ РАН (оператор В.И. Таскаев) на приборе JEOL-8200 при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 20 нА и диаметре электронного пучка 1 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика техногенных отложений, морфология и состав лопарита

Хвостохранилище Карнасурт-1 эксплуатировалось с 1951 по 1989 г. В этот период перерабатывались руды с содержанием лопарита 3.5 %, а потери при обогащении составляли 23 %. Объем лежалых хвостов оценивается в 8.1 млн м³. В 1989 г. началась эксплуатация хвостохранилища Карнасурт-2. Содержание лопарита в перерабатываемых рудах в этот период несколько уменьшилось (3.2 %), но в результате модернизации обогатительной линии извлечение лопарита увеличилось до 79.5 % (потери 20.5 %). В соответствии с отчетными материалами Ловозерского ГОКа, потери лопарита связаны с классом –0.2 мм на стадии первичного гравитационного обогащения. На 2025 г. объем хвостохранилища оценивался в 11.2 млн м³

Таблица 1. Гранулометрический состав и распределение лопарита по классам крупности в отложениях хвостохранилищ

Table 1. Granulometric composition and distribution of loparite by size classes in tailings deposits

Класс крупности, мм	Гранулометрический состав, %		Содержание лопарита в классе, %		Распределение лопарита по классам, %	
	К-1	К-2	К-1	К-2	К-1	К-2
>0.5	1.68	0.37	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.
0.5–0.25	43.44	52.01	0.02	0.02	1.70	1.22
0.25–0.16	47.22	37.82	0.50	1.10	39.07	49.93
0.16–0.10	0.83	0.22	3.22	4.04	4.55	1.08
0.10–0.071	4.62	5.01	4.12	5.18	30.77	31.73
0.071–0.05	1.34	1.60	11.35	8.13	23.91	16.04
<0.05	0.85	2.97	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.

Примечание. н.а. – не анализировалось.

Note. n.a. – not analyzed.

Таблица 2. Минеральный состав МТП (% на исходную пробу)

Table 2. Mineral composition of mineralogical and technological samples (MTS) (% of the original sample)

	Класс размерности, мм	Выход класса, %	Лопарит	Гр. пироксенов	Гр. амфиболов	Гр. слюд (флогопит, биотит)	Апатит	Эвдиалит	Лампрофиллит	Нефелин	Кварц	Полевые шпаты	Минералы в сростках
К-1	>0.16	92.8	0.24	14.65	0.96	1.27	0.82	0.51	0.44	52.95	4.13	7.72	8.98
	<0.16	7.64	0.35	1.55	0.05	0.05	0.13	0.02	0.07	3.72	0.04	0.49	0.00
	Всего	100	0.59	16.20	1.01	1.32	0.95	0.53	0.51	56.67	4.17	8.21	8.98
К-2	>0.16	90.38	0.42	18.74	0.24	0.62	1.95	0.47	0.44	51.97	3.40	6.96	7.86
	<0.16	9.80	0.40	1.48	0.08	0.11	0.11	0.01	0.02	4.04	0.00	0.61	0.00
	Всего	100	0.82	20.22	0.32	0.73	2.06	0.48	0.46	56.01	3.40	7.57	7.86

при ежегодном объеме сбрасываемых хвостов 350–400 тыс. м³. Исходя из этих данных, расчетное содержание лопарита в хвостах оценивается в 0.77 % и 0.64 %, а запасы – 125 и 143 тыс. т, соответственно.

Исследование гранулометрического состава МТП показало, что более 90 % отложений находится в классе 0.50–0.16 мм. При этом лопарит концентрируется в классах 0.25–0.16 мм (40–50 %), 0.100–0.071 мм (около 30 %) и 0.071–0.05 мм (16–24 %). Выход классов крупности менее 0.16 мм незначителен (7.6–9.8 %), но именно в них концентрируется значительная часть лопарита (48.9–59.5 %), в результате чего его содержание в этих классах достигает 3.22–11.35 % (табл. 1).

В минеральном составе отложений преобладает нефелин (56–57 %), минералы группы пироксена (в основном, эгирин) (16–20 %), полевые шпаты (7.6–8.2 %), кварц (3.4–4.2 %) и минералы в сростках (7.9–9.0 %). Содержание амфиболов,

слюд, лопарита, апатита, эвдиалита и лампрофиллита составляет не более 1–2 % (табл. 2). Лопарит чаще встречается в мелких классах (–0.16 мм), остальные минералы и минералы в сростках – в крупных (+0.16 мм). По гранулометрическому и минеральному составу отложения хвостохранилищ примерно одинаковы (в пределах точности анализов и представительности проб).

Морфология зерен лопарита отличается в разных классах крупности. В мелких классах (0.16–0.05 мм) лопарит находится, преимущественно, в виде бесформенных обломков. В классе +0.16 мм встречаются sdвойникованные кристаллы (рис. 3). Состав лопарита представлен в табл. 3. По данным предыдущих исследований соотношение Ta₂O₅ : Nb₂O₅ в лопарите Ловозерского массива варьирует от 1:10 до 1:16 (Когарко, 2002). Сумма оксидов РЗМ, в среднем, составляет 29.41 % при стандартном отклонении 0.29 (табл. 3).

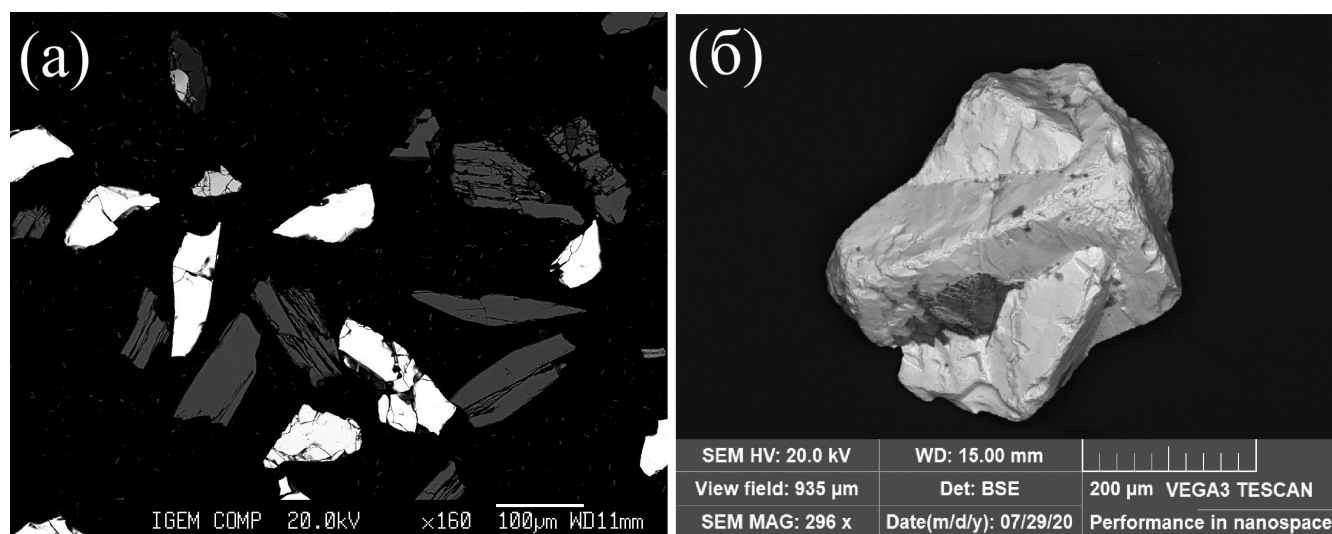


Рис. 3. Морфология минералов МТП К-1: а – обломки лопарита (белые зерна) в классе 0.100–0.071 мм (PCMA); б – идиоморфные кристаллы лопарита в классе 0.16–0.25 мм (BSE фото).

Fig. 3. Morphology of minerals of MTS K-1: a – loparite fragments (white grains) in class 0.1–0.071 mm (EMPA); б – euhedral loparite crystals in class 0.16–0.25 mm (BSE image).

Таблица 3. Состав лопарита МТП по данным PCMA

Table 3. Composition of MTS loparite according to EMPA data

Nb ₂ O ₅ +Ta ₂ O ₅	TiO ₂	Ce ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	SrO	Na ₂ O	CaO	ThO ₂	F	Сумма
9.41	41.66	13.81	9.84	4.62	0.90	0.26	0.00	1.80	10.24	5.09	1.12	0.60	99.36
9.14	42.16	14.06	9.83	4.43	1.00	0.25	0.00	1.82	10.21	4.90	1.16	0.58	99.53
8.93	42.12	14.03	9.85	4.45	0.93	0.21	0.00	1.81	9.93	5.20	0.82	0.56	98.84
9.67	41.34	13.36	9.90	4.59	0.88	0.10	0.00	1.99	10.32	4.99	1.00	0.59	98.74
9.07	41.63	13.72	10.10	4.41	0.86	0.25	0.00	1.86	10.26	5.19	1.14	0.49	98.98
9.75	41.72	13.59	10.26	4.24	0.93	0.14	0.00	1.84	10.54	5.29	1.12	0.60	100.03
9.27	41.76	14.15	9.88	4.57	1.05	0.22	0.00	1.85	10.31	5.19	1.34	0.48	100.09
8.89	41.94	13.74	10.05	4.36	0.98	0.23	0.00	1.94	10.48	5.28	0.79	0.67	99.35
9.53	41.86	13.58	9.93	4.55	1.26	0.28	0.00	1.98	10.17	5.20	1.30	0.59	100.22
9.30	41.80	13.78	9.96	4.47	0.98	0.22	0.00	1.88	10.27	5.15	1.09	0.57	99.46
0.31	0.25	0.26	0.15	0.13	0.12	0.06	0.00	0.07	0.18	0.13	0.19	0.06	

Примечание. Из-за наложения пиков при PCMA содержание Nb₂O₅ и Ta₂O₅ в лопарите определено суммарно.

Note: Due to the overlapping peaks in XMA, the content of Nb₂O₅ and Ta₂O₅ in loparite has been determined in total.

Отличия физических свойств минералов лежат в основе их разделения при технологических процессах, поэтому их часто называют технологическими свойствами (Левченко, Ключарев, 2020). К числу наиболее важных технологических свойств минералов относятся гравитационные (плотность), магнитные (магнитная восприимчивость), электрические (электропроводность, диэлектрическая проницаемость) и механические (твёрдость, хрупкость, пластичность). Основа выбора схемы разделительного процесса – контрастность свойств основных рудных, сопутствующих и породообразующих ми-

нералов. В таблице 4 показаны технологические свойства основных рудных и породообразующих минералов, входящих в состав техногенных образований хвостохранилищ Ловозерского ГОКа.

Разница в плотности рудных и породообразующих минералов позволяет на стадии первичного обогащения выделить в черновой концентрат основные рудные минералы. Разница в магнитной восприимчивости и электрической проводимости минералов руды предполагает возможность успешного применения магнитно-электрической схемы обогащения для разделения рудных и породообра-

Таблица 4. Технологические свойства основных рудных и породообразующих минералов.

Table 4. Technological properties of the main ore and rock-forming minerals

Минерал	Химическая формула	Плотность, г/см ³	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ , мм	Магнитная восприимчивость χ , см ³ /г
Лопарит	(Na,Ce,Sr)(Ce,Th) ₂ (Ti,Nb) ₂ O ₆	4.64–4.89	6.1	Слабомагнитный $\chi = 4.4\text{--}6.3 \cdot 10^{-6}$
Нефелин	(Na,K)AlSiO ₄	2.55–2.66	2.23	Парамагнитный $\chi = 127 \cdot 10^{-6}$
Пироксены (эгирин)	NaFe ³⁺ Si ₂ O ₆	3.7–3.9	2.17	Магнитный $\chi = (48\text{--}65) \cdot 10^{-6}$
Полевые шпаты	K[AlSi ₃ O ₈]-Na[AlSi ₃ O ₈]	2.5–2.7	5.3–6.0	Немагнитный
Кварц	SiO ₂	2.65	4.4–5.8	Немагнитный
Амфиболы	AB ₂ C ₅ T ₈ O ₂₂ W ₂	3.3–3.5	2.33–5.8	Магнитный $\chi = (24\text{--}90) \cdot 10^{-6}$
Слюды (флогопит, биотит)	KMg ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂ K(Mg,Fe)□(AlSi□O□□)(F,OH)□	2.78–2.85 2.5–3.0	7.0–10.3	Магнитный $\chi = (40\text{--}52) \cdot 10^{-6}$
Апатит	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH,F,Cl)	3.7–3.8	4.4–5.8	Немагнитный $\chi = 4.0 \cdot 10^{-6}$
Эвдиалит	Na ₁₅ Ca ₆ (Fe,Mn) ₃ Zr ₃ SiO(O,OH,H ₂ O) ₃ (Si ₃ O ₉) ₂ (Si ₉ O ₂₇) ₂ (OH,Cl) ₂	2.74–3.10	5.1. 6.5–8.1	Слабомагнитный $\chi = (6.3\text{--}11.6) \cdot 10^{-6}$
Кальцит	CaCO ₃	2.71	3.9	Немагнитный $\chi = 3.0 \cdot 10^{-6}$
Лампрофиллит	(Sr,Ba,K,Na) ₂ Na(Na,Fe,Mn) ₂ Ti[Ti ₂ (Si ₂ O ₇) ₂ O ₂ (OH,F,O) ₂	3.44	–	Слабомагнитный $\chi = (6.3\text{--}7.33) \cdot 10^{-6}$

Таблица 5. Содержание основных рудных и породообразующих минералов в продуктах магнитного анализа тяжелой фракции по данным табл. 4

Table 5. Content of major ore and rock-forming minerals in magnetic analysis of heavy fraction according to Table 4

Минерал	Содержание, мас. %		
	I магнитная	II слабомагнитная	III немагнитная
Пироксены (эгирин)	92	50	–
Амфиболы (роговая обманка + базальтоидная роговая обманка, щелочные амфиболы, актинолит)	5	5	–
Лампрофиллит	1	5	–
Эвдиалит	1	1	–
Флогопит	–	1	2
Мурманит	–	2	10
Апатит	–	12	33
Лопарит	–	20	30
Андалузит	–	3	16
Прочие	1	1	9

зующих минералов (табл. 5). Контрастность физических свойств рудных и нерудных минералов может быть осложнена присутствием различных типов рудных сростков с близкими свойствами, в то время как различные рудные минералы одного и того же полезного компонента могут иметь различные свойства. Основываясь на данных табл. 4 и

5, можно оценить прогнозируемое извлечение лопарита 70–75 %.

Структура техногенных отложений

Моделирование структуры техногенных объектов представляет собой актуальную задачу (Blannin et al., 2023). В структуре хвостохранилищ

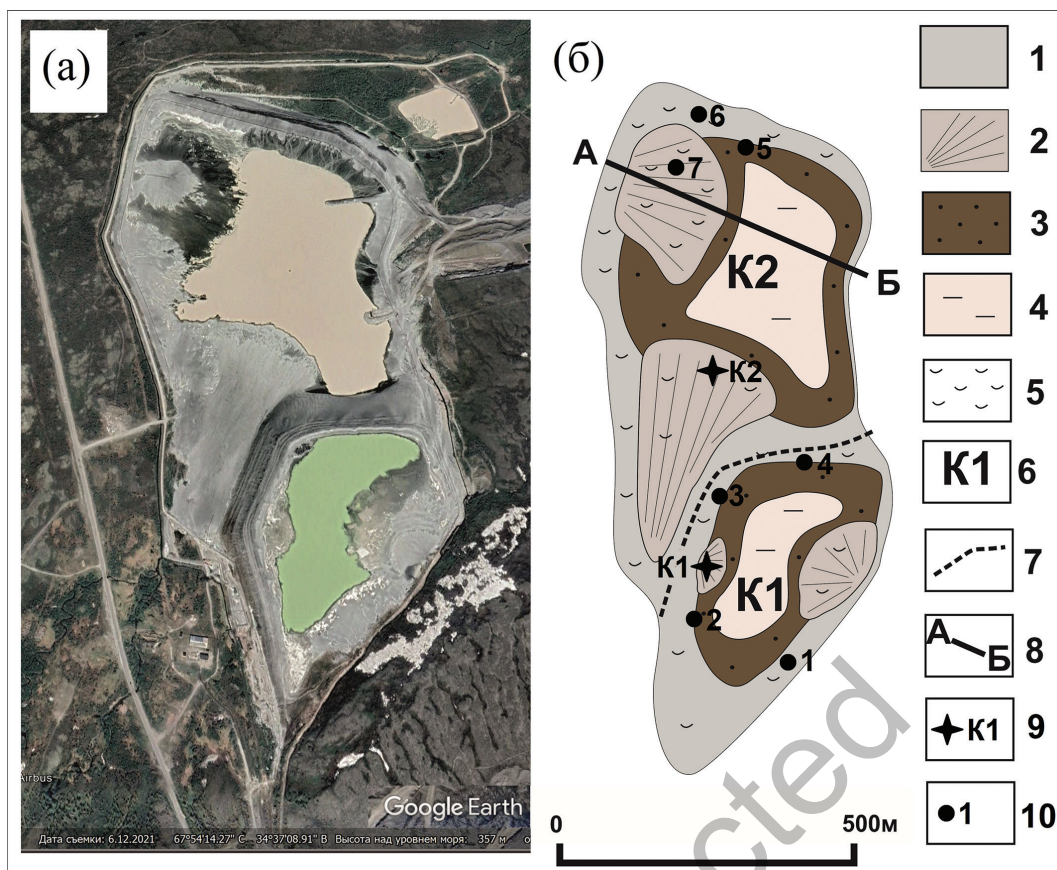


Рис. 4. Структурная схема хвостохранилищ обогащательной фабрики Ловозерского ГОКа (Карнасурт): а – космоснимок Google Earth; б – дешифрованная литолого-фациальная схема хвостохранилищ.

1 – насыпная дамба; 2 – зона сброса хвостов («дельта»); 3 – зона пляжа; 4 – зона внутреннего водоема («прудка»); 5 – зона эолового обогащения; 6 – хвостохранилища (Карнасурт-1 и Карнасурт-2); 7 – граница хвостохранилищ, 8 – линия разреза для рис. 6; 9 – места отбора МТП; 10 – места отбора рядовых проб.

Fig. 4. Structural scheme of the tailings storage facilities of the Lovozero mining and processing plant (Karnasurt). a – Google Earth satellite image; б – deciphered lithofacies scheme of the tailings storage facilities.

1 – embankment dam; 2 – tailings discharge zone (“delta”); 3 – beach zone; 4 – inland water body zone (“pond”); 5 – aeolian enrichment zone; 6 – tailings storage facility (Karnasurt-1 and Karnasurt-2); 7 – boundary of the tailings storage facilities, 8 – section line for Fig. 6; 9 – locations for sampling mineralogical and technological samples; 10 – locations for sampling routine samples.

Ловозерского ГОКа можно выделить следующие техногенно-фациальные зоны (рис. 4): 1) зона дамбы; 2) зона сброса, куда по трубопроводу поступает пульпа с хвостами обогащения лопаритовой руды; 3) пляжевая зона внутреннего водоема («прудка»); 4) прудковая зона в центре водоема; 5) дюнная зона по периферии хвостохранилища.

Дамба построена из материала хвостохранилища, но укреплена крупнообломочным материалом местных пород. Предполагается, что по своему составу и содержанию лопарита материал дамбы соответствует сбрасываемым хвостам. Поступающие с фабрики хвосты обогащения подаются в котловину по пульпопроводу, образуя техногенную дельту или конус выноса. За счет жидкой состав-

ляющей пульпы в центре котловины образуется водоем, в котором происходит дифференциация материала. В результате ветроволновых процессов в краевой (пляжевой) части водоема происходит существенное обогащение отложений минералами тяжелой фракции (табл. 6, рис. 5в) и изменение минерального состава. В отличие от зоны сброса хвостов (табл. 6), основную массу минералов в зоне обогащения пляжа составляют пироксены (49.0 %), нефелин (27.5 %), апатит (9.4 %), амфиболы (3.8 %), лопарит (2.6 %), эвдиалит (2.5 %) и полевые шпаты (2.2 %). Легкие минералы и мелкие фракции отложений выносятся в центральную часть прудковой зоны. В надводной части пляжа происходит ветровая (эоловая) переработка материала, и отложения

Таблица 6. Содержание тяжелой фракции и лопарита в разных техногенно-фациальных зонах по данным рядовых проб, % на исходную пробу.

Table 6. Content of heavy fraction and loparite in different technogenic-facial zones according to routine samples, % of the original sample.

	Тяжелая фракция, %	Лопарит, %
Зона сброса	9.2	0.82
Пляж	42.8	2.62
Дюна	26.4	1.02



Рис. 5. Техногенно-фациальные зоны хвостохранилища Карнасурт-2: а – дамба; б – зона сброса («дельта»); в – пляж; г – зона эоловой переработки («дюна»).

Fig. 5. Technogenic-facies zones of the Karnasurt-2 tailings storage facility: a – dam; b – discharge zone (“delta”); c – beach; d – aeolian processing zone (“dune”).

обогащаются минералами тяжелой фракции по сравнению с осадками зоны сброса (табл. 6), при этом на поверхности образуются характерные эоловые знаки ряби (рис. 5г).

Исходя из проведенных наблюдений и общих закономерностей формирования техногенных отложений, можно построить предполагаемый разрез хвостохранилища (рис. 6). В соответствии с параметрами внутреннего водоема, обогащенная пляжевая зона имеет кольцеобразную форму (рис. 4) на всех этапах существования хвостохранилища. По мере наполнения хвостохранилища ее форма наследует-

ся. Таким образом, в разрезе обогащенное техногенное тело имеет концентрическое чашеобразное строение, нарушаемое мозаично расположенными зонами сброса отходов обогатительной фабрики. По внешнему краю пляжевой технофации располагается обогащенное кольцо дюнных отложений. Центральная часть хвостохранилища наименее перспективна, поскольку в ней концентрируются наиболее легкие и мелкие фракции хвостов.

Для разведки и подсчета запасов хвостохранилищ Ловозерского ГОКа можно рекомендовать равномерную квадратную или ромбическую сеть

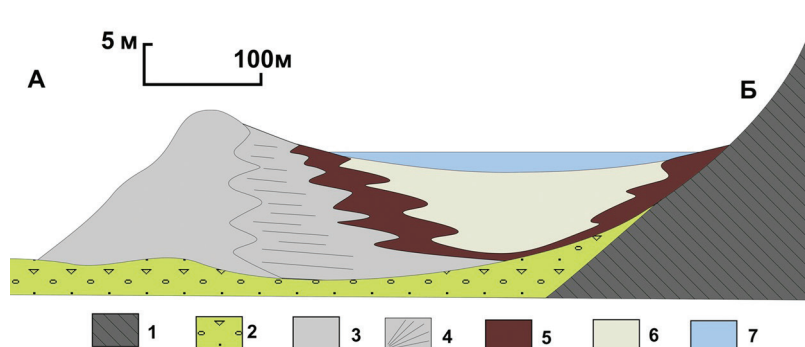


Рис. 6. Схематический предполагаемый разрез хвостохранилища Карнасурт-2 по линии АБ (рис. 4).

1 – нефелиновые сиениты Ловозерского массива; 2 – четвертичные отложения; 3 – насыпная дамба; 4 – отложения конуса сброса хвостов; 5 – отложения пляжа; 6 – отложения внутреннего водоема («прудка»); 7 – водоем.

Fig. 6. Schematic proposed cross-section of the Karnasurt-2 tailings pond along line AB (Fig. 4).

1 – nepheline syenites of the Lovozero pluton; 2 – Quaternary deposits; 3 – embankment dam; 4 – discharge fan deposits of tailings; 5 – beach deposits; 6 – deposits of the internal reservoir («pond»); 7 – reservoir.

буровых скважин колонкового бурения с пересечением техногенных отложений на всю мощность, с шагом 20–10 м и последующим сгущением до 10–5 м в зонах повышенного содержания лопарита.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ состава и структуры техногенных образований Ловозерского ГОКа (хвостохранилища Карнасурт-1 и Карнасурт-2) позволил сделать следующие выводы.

1. В результате взаимодействия техногенных и природных процессов в структуре хвостохранилища образуется концентрически-мозаичная зональность, обусловленная как антропогенной составляющей (возведение дамбы, сброс раздробленного материала хвостов обогащения с фабрики), так и природной дифференциацией материала (образование зон пляжа, центральной части прудка и эолового обогащения). Необходимо учитывать такую структуру геотехногенных образований при постановке поисково-оценочных работ (бурения) на техногенных объектах такого типа.

2. Исследованный тип хвостохранилища отражает условия концентрирования химически инертного тяжелого компонента в условиях единой техногенной площади. Разнообразие техногенных обстановок по своим механическим, химическим и технологическим свойствам (продукты переработки россыпей золота, хвосты обогащения сульфидных руд, хранилища «красных шламов» – отходов производства глинозема и т. д.) делает необходимым создание моделей для каждого типа техногенно-минеральных образований.

3. Хвосты обогащения фабрики Ловозерского ГОКа содержат лопарит в обогатимых классах 0.05–0.50 мм. Учитывая высокую плотность лопарита ($4.64\text{--}4.87\text{ г/см}^3$), на стадии первичного гравитационного обогащения он может быть извлечен вместе с эгирином ($3.7\text{--}3.9\text{ г/см}^3$) и амфиболами ($3.3\text{--}3.5\text{ г/см}^3$) в черновой концентрат. Далее, учитывая отличия в магнитной восприимчивости диэлектрической проницаемости, с использованием магнитной и электрической сепарации будет получен лопаритовый концентрат. Для наиболее полного извлечения лопарита необходима разработка схемы обогащения, ориентированной на более полное извлечение мелких и тонких классов и использованием нового более эффективного оборудования. К аналогичным заключениям приходят и другие исследователи (Хохуля и др., 2015; Максимова и др., 2022).

4. Предлагается двухступенчатая технология обогащения техногенных руд хвостохранилищ Ловозерского ГОКа с выделением на первом этапе в черновой концентрат комплекса тяжелых минералов и последующей магнитной и электрической сепарации, что позволит получить кондиционный промышленный лопаритовый концентрат для редкометалльной промышленности при извлечении лопарита 70–75 %.

ЛИТЕРАТУРА

Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Лаломов А.В., Мурашов К.Ю. (2023) Проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности России. *Геология рудных*

месторождений, 5, 371–386. <https://doi.org/10.31857/S0016777023050039>

Быховский Л.З., Спорыхина Л.В., Ануфриева С.И. (2014) Техногенные месторождения и образования редких металлов России. *Рациональное освоение недр*, 3, 14–22.

Когарко Л.Н. (2002) Проблемы генезиса гигантских редкометалльных месторождений Кольского полуострова / Российская Арктика: геологическая история, минерагения, экология. СПб, ВНИИОкеангеология, 773–787.

Лаломов А.В. Геотехногенный литогенез – есть ли право на существование? (2025) *Экзолит-2025. Сборник научных материалов Собрания (научных чтений), посвященных 220-летию основания Московского общества испытателей природы*. Москва, Геофизический центр РАН, 95–98.

Лаломов А.В., Григорьева А.В. (2023) Техногенно-минеральные образования обогатительной фабрики Карнасурт как возможный редкометалльный сырьевой источник Ловозерского ГОКа. *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*, 20, 597–601. <https://doi.org/10.31241/FNS.2023.20.075>

Лаломов А.В., Григорьева А.В., Зайцев В.А. (2022) Минеральный состав редкометалльных россыпей Ловозерского массива. *Геология рудных месторождений*, 5, 485–497. <https://doi.org/10.31857/S0016777022050069>

Левченко Е.Н. Ключарев Д.С. (2020) Нетрадиционные источники критических редких металлов. *Разведка и охрана недр*, 9, 35–43.

Максимова В.В., Красавцева Е.А., Савченко Е.Э., Икконен П.В., Елизарова И.Р., Маслобоев В.А., Макаров Д.В. (2022) Исследование состава и свойств хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства. *Записки Горного института*, 256, 642–650. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.88>

Сук Н.И., Котельников А.Р., Вирюс А.А. (2013) Кристаллизация лопарита в щелочных флюидно-магматических системах. *Геология и геофизика*, 4, 569–588.

Хохуля М.С., Фомин А.В., Голубцов А.В., Которина Т.А. (2015) Технология получения лопаритового концентрата гравитационно-магнитной переработкой шламов текущего производства. *Труды Кольского научного центра РАН*, 5, 592–595.

Blannin R., Frenzel M., Tolosana-Delgado R., Büttner F., Gutzmer J. (2023) 3D geostatistical modelling of a tailings storage facility: Resource potential and environmental implications. *Ore Geology Reviews*, 154, 105337. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105337>

Krasavtseva E. A., Maksimova V.V., Makarov D.V. (2021) Environmental hazard of loparite ore dressing tailings. *E3S Web of Conferences* 247, 01044 (2021) ICEPP-2021. <https://doi.org/10.1051/e2sconf/202124701044>

Sørensen H. (1970) Internal structures and geological setting of the three apatitic intrusions – Khibina and Lovozero

of the Kola Peninsula and Ilimaussaq, South Greenland. *The Canadian Mineralogist*, 10(3), 299–334.

Zaitsev N.A., Williams T.C., Jeffries T.E., Strekopytov S., Moutte J., Ivashchenkova O.V., Spratt J., Petrov S.V., Wall F., Seltnmann R., Borozdin A.P. (2014) Rare earth elements in phoscorites and carbonatites of the Devonian Kola alkaline province, Russia: Examples from Kovdor, Khibina, Vuoriyarvi and Turij Mys complexes. *Ore Geology Reviews*, 61, 204–225. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.02.002>

REFERENCES

Blannin R., Frenzel M., Tolosana-Delgado R., Büttner F., Gutzmer J. (2023) 3D geostatistical modelling of a tailings storage facility: Resource potential and environmental implications. *Ore Geology Reviews*, 154, 105337. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105337>

Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L., Vikentyev I.V., Lalomov A.V., Murashov K.Yu. (2023) Problems of Development of the mineral resource base of the high-tech industry of Russia. *Geology of Ore Deposits*, 5, 397–411. <https://doi.org/10.1134/S1075701523050033>.

Bykhovsky L.Z., Sporykhina L.V., Anufrieva S.I. (2014) Technogenic deposits and formations of rare metals in Russia. *Ratsionalnoe osvoenie nedr (Rational Development of Subsoil)*, 3, 14–22. (in Russian)

Khokhulya M.S., Fomin A.V., Golubtsov A.V., Kontorina T.A. (2015) Technology of loparite concentrate production by gravitational-magnetic processing of sludge from current production. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN (Transactions of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences)*, 5, 592–595. (in Russian)

Kogarko L.N. (2002) Problems of genesis of giant rare metal deposits of the Kola Peninsula. *Russian Arctic: Geological History, Minerageny, Ecology*. St. Petersburg, VNIIOkeangeologiya, 773–787. (in Russian)

Lalomov A.V. Geotechnogenic lithogenesis – does it have a right to exist? (2025) *Ekzolit-2025. Sbornik nauchnykh materialov Sobraniya (nauchnykh chteniy), posvyashchennykh 220-letiyu osnovaniya Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody (Exolith-2025. Collection of Scientific Materials of the Meeting (Scientific Readings) Dedicated to the 220th Anniversary of the Moscow Society of Naturalists)*. Moscow, Geofizicheskii tsentr RAN, 95–98. (in Russian)

Lalomov A.V., Grigorieva A.V. (2023) Anthropogenic minerals of the Karnasurt processing plant as a possible rare-metal raw material source for the Lovozero mining and processing plant. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTS RAN (Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Geological Institute of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences)*, 20, 597–601. <https://doi.org/10.31241/FNS.2023.20.075/> (in Russian)

Lalomov A.V., Grigorieva A.V., Zaitsev V.A. (2022) Mineral composition of rare-metal placers of the Lovozero

massif. *Geology of Ore Deposits*, 5, 3–14. <https://doi.org/10.1134/S1075701522090045>

Levchenko E.N., Klyucharev D.S. (2020) Unconventional sources of critical rare metals. *Razvedka i okhrana nedr (Subsoil Exploration and Protection)*, 9, 35–43. (in Russian)

Maksimova V.V., Krasavtseva E.A., Savchenko E.E., Ikkonen P.V., Elizarova I.R., Masloboev V.A., Makarov D.V. (2022) Study of the composition and properties of loparite ore beneficiation tailings from current production. *Zapiski Gornogo Instituta*, 256, 642–650. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.88>

Sørensen H. (1970) Internal structures and geological setting of the three apaitic intrusions – Khibina and Lovozero

of the Kola Peninsula and Ilimaussaq, South Greenland. *The Canadian Mineralogist*, 10(3), 299–334.

Suk N.I., Kotelnikov A.R., Viryus A.A. (2013) Crystallization of loparite in alkaline fluid-magmatic systems. *Russian Geology and Geophysics*, 4, 436–453. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.03.006>

Zaitsev N.A., Williams T.C., Jeffries T.E., Strekopytov S., Moutte J., Ivashchenkova O.V., Spratt J., Petrov S.V., Wall F., Selmann R., Borozdin A.P. (2014) Rare earth elements in phosphates and carbonatites of the Devonian Kola alkaline province, Russia: Examples from Kovdor, Khibina, Vuoriyarvi and Turiy Mys complexes. *Ore Geology Reviews*, 61, 204–225. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.02.002>

Информация по авторам будет позже