

УДК 553.613

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ОТВАЛОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЕГМАТИТОВ ЧУПИНО-ЛОУХСКОГО ПОЛЯ

Т. П. Бубнова*, В. П. Ильина

Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910),
*bubnova@krc.karelia.ru

Приведен краткий обзор состояния карьеров и отвалов, оставшихся после разработки месторождений керамических пегматитов Хетоламбина и им. Чкалова – ранее являвшихся основными поставщиками высокосортного полевошпатового сырья. Проведена оценка вещественного состава отвалов, сложенных минеральными фракциями (кварц, слюда, полевые шпаты), являющимися сырьем, некондиционным по крупности и качеству. Значительную часть отвалов занимают вскрышные и вмещающие породы – амфиболиты, гнейсы, габбро, габбронориты. Показано, что химический состав полевошпатовых фракций, состоящих из чистого микроклина, микроклинового и плагиомикроклинового пегматита, обуславливает их потенциальную пригодность для использования при производстве тонкой и строительной керамики, стекла электровакуумного, высокосортного технического, листового. Отвалы рудосортировочных цехов и Чупинской помольно-обогащительной фабрики представляют собой измельченную массу кварц-полевошпатового состава. В результате изучения возможности использования мелкозернистых отходов обогащения в качестве составной части сырьевой массы установлено их положительное влияние на технологические особенности при производстве облицовочных керамических плиток. Горные породы, промышленные минералы и отвалы горнопромышленных предприятий Лоухского района Республики Карелия, приравненного к арктическим районам РФ, представляют интерес не только как перспективное минеральное сырье, но и как объекты горно-индустриального наследия.

Ключевые слова: полевошпатовое сырье; микроклин; отходы обогащения; керамика; Карелия

Для цитирования: Т. П. Бубнова, В. П. Ильина. Оценка перспектив применения отвалов месторождений керамических пегматитов Чупино-Лоухского поля // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 2. С. 99–111. doi: 10.17076/geo1493

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР 210 Института геологии КарНЦ РАН 121040600173-1.

T. P. Bubnova*, V. P. Ilyina. ESTIMATING THE PROSPECTS FOR THE USE OF THE CHUPA-LOUHI FIELD CERAMIC PEGMATITE DEPOSIT WASTE DUMPS

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *bubnova@krc.karelia.ru*

Karelia ranks first in Russia in terms of explored reserves of traditional feldspar rocks – ceramic and mica pegmatites. A significant part of the pegmatite deposits have been worked out; some objects with estimated reserves remain in the reserve. The article provides a brief overview of the state of the quarries and dumps left after the mining of the Hetolambina and Chkalovskoe ceramic pegmatite deposits – the main sources of high-grade feldspar raw materials. The material composition of the dumps, composed of mineral fractions (quartz, mica, feldspars), which are raw materials of substandard size and quality, was assessed. A substantial part of the dumps is overburden and host rocks – amphibolites, gneisses, gabbros, gabbro-norites. We show that the chemical composition of feldspar fractions, consisting of pure microcline, microcline and plagiomicrocline pegmatite, makes them potentially suitable for the production of fine and construction ceramics, vacuum glass, high-grade technical glass, and sheet glass. The wastes from ore separation plants and the Chupa grinding and processing plant are represented by crushed material with quartz-feldspar composition. Analysis of the possibility of integrating fine-grained concentration wastes into the feedstock showed they can have a positive effect on the technological characteristics of the facing ceramic tiles production process. Rocks, industrial minerals, and waste dumps of mining enterprises of the Louhi District of the Republic of Karelia, which was included in the Russian Arctic Zone, are of interest not only as promising mineral raw materials, but also as mining and industrial heritage destinations.

Keywords: feldspar raw materials; microcline; concentration waste; ceramics; Karelia

For citation: Bubnova T. P., Ilyina V. P. Estimating the prospects for the use of the Chupa-Louhi field ceramic pegmatite deposits waste dumps. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;2:99–111. doi: 10.17076/geo1493

Funding. The study was funded within the regular research area 210 of the Institute of Geology KarRC RAS #121040600173-1.

Введение

По разведанным запасам традиционных полевошпатовых пород – керамических и слюдяных пегматитов Карелия является одним из важнейших регионов России. Отдельные месторождения с подсчитанными запасами являются резервной базой, но значительная часть пегматитового сырья отработана [Голованов и др., 2006; Государственный..., 2015; Щипцов, Иващенко, 2018]. После отработки месторождений, как правило, накапливаются значительные массы твердых отходов недропользования, не находящих применения в данном производстве. Это вскрышные породы в отвалах, некондиционное сырье, хвосты обогащения и пр. Их состав зависит от характера горных работ, минералого-петрографических особенностей полезных ископаемых, технологий их переработки и многих других факторов. Неизменно это менее качественный материал по сравнению с исходным сырьем. Однако в связи

со значительными объемами их последующее освоение открывает перспективы самостоятельного горного производства [Мельников и др., 2010; Еромасов и др., 2012; Саламанова и др., 2015; Малышев и др., 2016; Кузьмина, 2017; Левченко и др., 2018; Местников и др., 2019; Raszewski et al., 2020]. Проблема вовлечения в промышленную разработку отходов добычи и переработки полезных ископаемых объясняется не только ценными потребительскими свойствами содержащихся в них полезных компонентов, но и возможной высокой степенью их экологической опасности для окружающей среды [Murguía et al., 2016; Prokopenko et al., 2017; Romanova, Sirotin, 2019]. Необходимость утилизации отходов является одним из самых главных экологических вопросов. Согласно Федеральному закону «Об отходах производства и потребления» [2020], наряду с мерами по безопасному обращению с ними проблема повторного вовлечения отходов в промышленное производство является одной из приоритетных.

Национальный стандарт РФ «Обращение с отходами» (ГОСТ Р 52108-2003) устанавливает общие правила обращения с отходами и состав технической, экономической, отчетной и другой документации, направленной на определение основных опасных и ресурсных (инертных) характеристик отходов с целью снижения их реальной или потенциальной опасности для людей и окружающей среды и повторного вовлечения в промышленное производство (утилизацию). В 2011 году издан Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации «Об утверждении Порядка ведения государственного кадастра отходов» [2011]. Следует отметить, что реестр объектов размещения отходов включает сведения только об эксплуатируемых объектах. Объекты размещения отходов, выведенные из эксплуатации (в том числе рекультивированные или законсервированные), не подлежат учету в кадастре.

Полевошпатовым сырьем керамических пегматитов Северной Карелии является микроклин и микроклиновый пегматит, содержание которых колеблется в пределах 30–75 % от общей пегматитовой массы. В Лоухском районе существует около 200 горных выработок, которые интенсивно разрабатывались с начала 20-х годов прошлого века. Большая их часть расположена в районе побережья Чупинского залива Белого моря [Пекки, Разоренова, 1977; Голованов и др., 2006]. Они разрабатывались ГОКом «Карелслюда», который на пике своего развития включал 10 рудников, действующих на базе полевошпатовых месторождений Чупино-Лоухского пегматитового узла. ГОК был крупнейшим в СССР поставщиком полевошпатового сырья и мусковита на десятки предприятий страны. В 90-е годы XX в. предприятие, работающее по старым технологиям и на изношенном оборудовании, постоянно сокращало свое производство, что в результате привело к банкротству. Несмотря на отдельные попытки по возобновлению горнодобычных работ, так или иначе производство пришло в упадок, отработка большинства месторождений прекратилась. Карьеры остались в заброшенном состоянии. По инициативе геологов ГОКа и Северной экспедиции в эти годы были начаты работы по оценке ресурсного потенциала отвалов слюдяных и керамических пегматитов месторождений Лоухского района с целью возобновления добычи слюды – мусковита [Родионов, 2007]. В данной работе исследованы химический, минеральный и гранулометрический состав проб из отвалов карьерной разработки керамических пегматитов, некондиционного материала рудосортировочных цехов и отсевов Чупинской

помольно-обогащительной фабрики (ПОФ). Определены возможности комплексного использования полевошпатового сырья.

Объекты и методы исследований

Объектами исследования послужили отвалы керамических пегматитов месторождений Хетоламбина (рис. 1) и им. Чкалова – ранее являвшихся основными поставщиками высококачественного полевошпатового сырья. В пределах месторождений известно более 400 пегматитовых жил различной мощности и строения, разработка которых велась по локальным участкам.

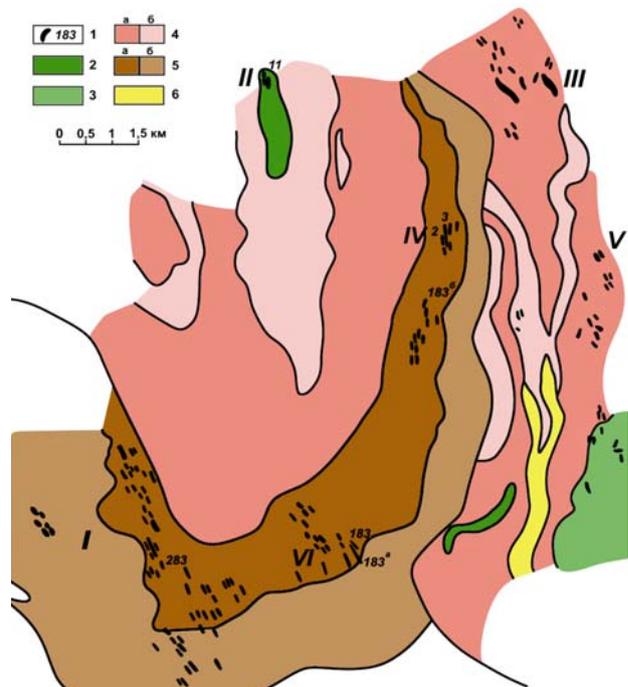


Рис. 1. Чупино-Лоухское пегматитовое поле: геологическая схематическая карта района Хетоламбинского месторождения [по: Чуйкина и др., 1971]:

1 – пегматитовые жилы и их количество; 2 – амфиболиты; 3 – амфиболовые, амфибол-биотитовые и биотитовые гнейсовидные диориты; 4 – микроклинсодержащие биотитовые гнейсы керетской свиты: а) мелкозернистые, б) среднезернистые; 5 – биотит- и амфибол-биотитовые гнейсы хетоламбинской свиты: а) тонкозернистые, б) среднезернистые; 6 – биотитовые гнейсы светло-серые хетоламбинской свиты. Участки: I – Хетоламбина; II – озеро Белое; III – озеро Воробьево; IV – озеро Уракка; V – Кивгуба; VI – Узкая Хетоламбина

Fig. 1. Chupino-Loukhskoe pegmatite field: a – geological sketch map of the Hetolambina pegmatite deposit area [after: Chuikina et al., 1971]:

1 – pegmatite veins and their number; 2 – amphibolites; 3 – amphibole, amphibole-biotite and biotite gneissoid diorites; 4 – microcline-bearing biotite gneisses of the Keret suite: a) fine-grained, b) medium-grained; 5 – biotite- and amphibole-biotite gneisses of the Hetolambina suite: a) fine-grained, b) medium-grained; 6 – light-grey biotite gneisses of the Hetolambina suite. Areas: I – Hetolambina; II – Lake Beloye; III – Lake Vorobyovo; IV – Lake Urakka; V – Kiv Bay; VI – Uzkaya Hetolambina

Для ревизионного обследования и технологического опробования выбраны отвалы четырех карьеров в границах рудного поля Чкаловского месторождения и двух горнодобычных участков на месторождении Хетоламбина. При выборе учитывались наиболее выгодное расположение в транспортном отношении, размеры и экономическая освоенность территории. Пробы отбирались с поверхности, максимальная крупность ограничивалась размером 200 мм.

Аналитические исследования проведены на базе комплекса оборудования Центра коллективного пользования КарНЦ РАН. Содержание петрогенных элементов в пробах анализировалось по данным рентгенофлуоресцентного спектрального анализа, выполненного на спектрометре ARL ADVANT'X-2331. Вариации химического состава отдельных минералов изучались на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments). Минеральный состав сырья изучался по данным рентгенофазового анализа (РФА), выполненного на дифрактометре ARL X'TRA Powder X-ray Diffraction System (Thermo Fisher Scientific) при $\text{Cu K}\alpha$ -излучении в геометрии Брегга-Брентано. Гранулометри-

ческий анализ выполнялся рассевом на стандартном наборе сит с квадратными ячейками. Материал крупностью менее 1 мм анализировался на приборе серии LS 13 320 (Laser Diffraction Particle Size Analyzer, жидкостной модуль фирмы Beckman Coulter). Для оценки петрографического состава отвалов проводилась ручная рудоразборка на минеральные и породные составляющие с последующим взвешиванием и подсчетом содержания.

Результаты и обсуждение

Изучение возможных областей использования отвалов карьерной разработки керамических пегматитов

Карельское полевошпатовое сырье апробировано на практике при разработке традиционных керамических пегматитов северной Карелии (Хетоламбина, Чкаловское, Блинковые Варакки и др.) [Каменева, Скамницкая, 2003; Бубнова, Скамницкая, 2020]. Пегматитовые жилы обрабатывались открытым способом. Часть их были выработаны, некоторые – законсервированы ввиду уменьшения содержания микроклиновых разностей. От разработки остались заброшенные карьеры и техногенные отвалы (рис. 2).

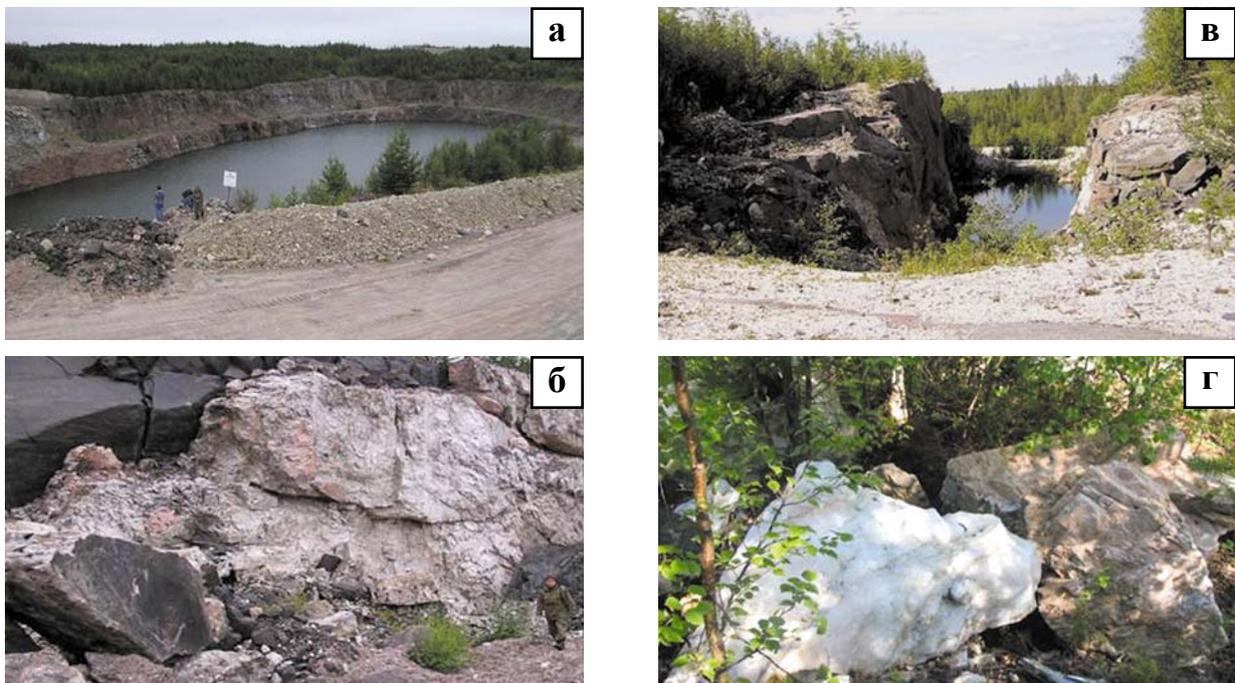


Рис. 2. Участки карьерной разработки керамических пегматитов на месторождениях Хетоламбина (а – карьер по разработке жилы № 183; б – стенка уступа карьера) и им. Чкалова (в – заброшенный карьер, г – отвальная масса, сложенная блоковыми кварцем и пегматитом микроклинового состава)

Fig. 2. Areas of open pit mining of ceramic pegmatites at the Hetolambina deposits (a – open pit for the development of vein No. 183; б – wall of the open pit bench) and Chkalov mine (в – abandoned quarry, г – dump mass, composed of block quartz and pegmatite of micro-wedge composition)

Отвальное хозяйство, как правило, располагалось в пределах границ карьеров, куда складировались вскрышные и вмещающие породы (амфиболиты, гнейсы, габбро, габбронориты), а также некондиционное по крупности и качеству полевошпатовое сырье. Компоненты отвалов распределены неравномерно, что связано с особенностями отработки каждого участка. Иногда наблюдается относительная дифференциация, когда в обособленные части отвалов вывозился или крупноглыбовый материал из вскрышных пород, или преимущественно

пегматитовые породы, или смесь пород различного состава.

Обобщение данных, полученных в результате изучения ресурсного потенциала отвалов геологами Северной поисково-разведочной экспедиции [Родионов, 2007] и их ревизионного обследования сотрудниками Института геологии, показало, что содержание горных пород и минеральной составляющей на отвалах варьирует в широких пределах (табл. 1). Микроклин и слюды содержатся в минимальных количествах.

Таблица 1. Петрографический состав отвалов

Table 1. Petrographic composition of dumps

Месторождение Deposit	Содержание, мас. % Content, wt. %					
	микроклин microcline	пегматит микроклиновый microcline pegmatites	пегматит смешанного состава mixed pegmatite	кварц quartz	биотит, мусковит biotite, muscovite	вскрышные и вмещающие породы overburden and enclosing rocks
Хетоламина Hetolambina	0–10	30–50	40–60	2–10	0–2	17–80
им. Чкалова Chkalov mine	1–7	1–4	20–45	1–35	0–8	5–46

Анализ одной из самых крупных производственных площадок на месторождении Хетоламина в районе жилы 183 (рис. 1 и 2, а) наглядно демонстрирует преобладание вмещающих пород – габбро, амфиболитов и гнейсов (до 80 %). Полевошпатовая часть распределена не-

равномерно и представлена пегматитом смешанного состава (рис. 3, а, б) или микроклинпертитом (рис. 3, в, г). Микроклиновые чистые разности отмечаются лишь в мелких фракциях, которыми отсыпались технологические дороги на карьерах.

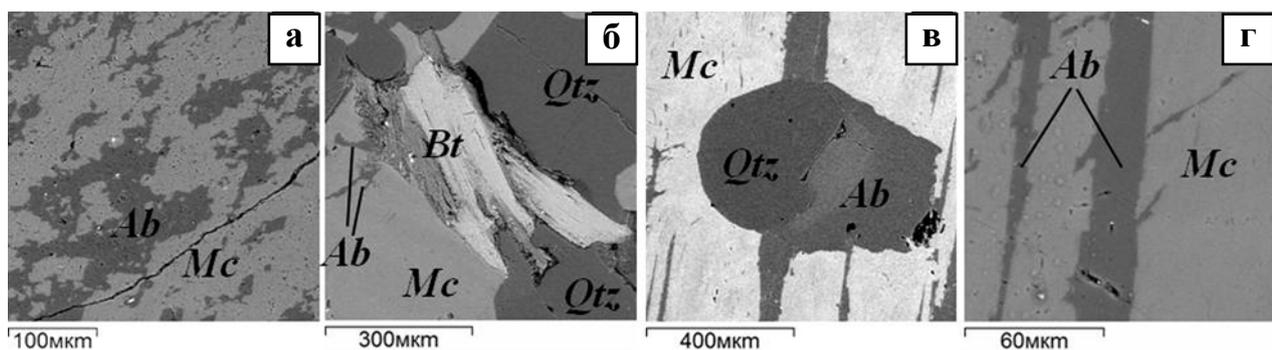


Рис. 3. Микроструктурные особенности пегматита месторождения Хетоламина:

а, б – пегматит смешанного состава; в, г – микроклин-пертит. Изображение СЭМ VEGA II LMU: Mc – микроклин, Ab – альбит, Bt – биотит, Qtz – кварц

Fig. 3. Microstructural features of the Hetolambina pegmatite deposit:

а, б – mixed pegmatite; в, г – microcline with perthite ingrowths. Image of SEM VEGA II LMU: Mc – microcline, Ab – albite, Bt – biotite, Qtz – quartz

На отвалах месторождения им. Чкалова (табл. 1; рис. 2, в, г) основными породообразующими компонентами являются кварц, пегматит смешанного состава и породы скальной

вскрыши (рассланцованные амфиболсодержащие гнейсы, плагиоамфиболиты).

С целью детально установить распределение материала отвалов по крупности проведен

рассев проб на стандартном наборе сит и подсчет выхода каждого класса крупности (рис. 4). Гранулометрический состав отвалов в пределах каждого месторождения характеризуется значительными вариациями – от песчаных фракций до крупных обломков размером 1,5×1×1 м (рис. 2, 4). Характерной особенностью отвалов, расположенных в непо-

средственной близости к поселкам, является наличие в достаточном количестве песчаных фракций, так как крупные куски микроклина и кварца выбирались вручную местными жителями для кустарного производства. В целом можно сказать, что крупные, средние и мелкие фракции находятся примерно в равных пропорциях.

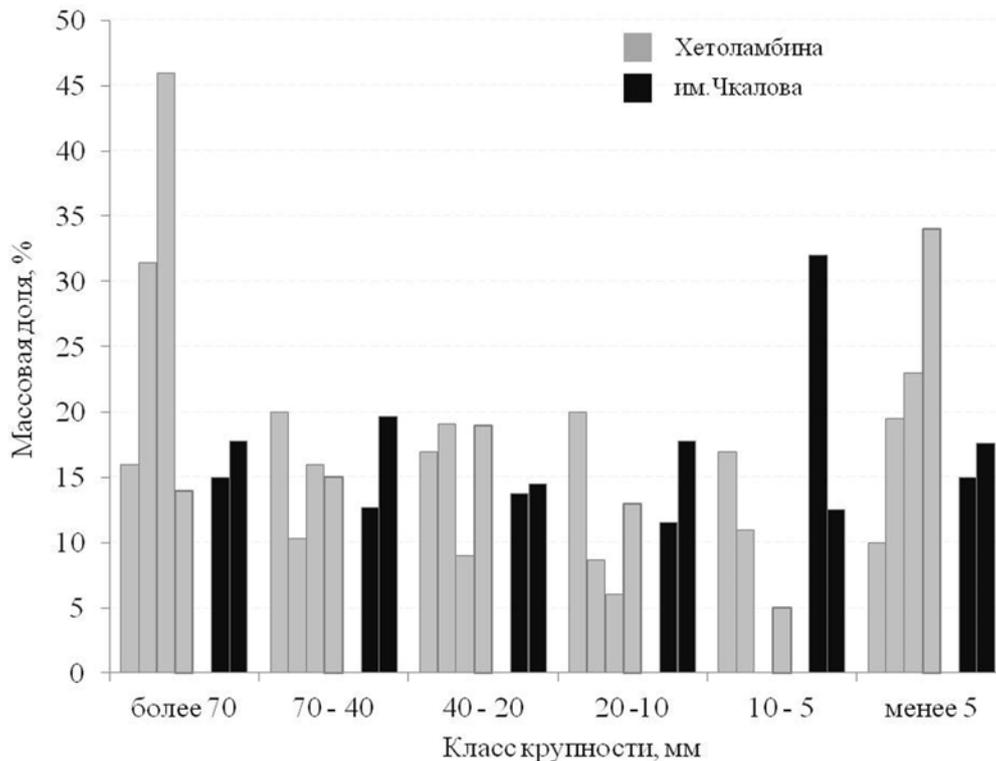


Рис. 4. Фракционный состав отвалов рудников Хетоламбина и им. Чкалова

Fig. 4. Fractional composition of the quarry dumps of the Hetolambina and Chkalov mines

До ввода в строй Чупинской ПОФ технология переработки керамического сырья заключалась в ручной рудоразборке на транспортной ленте. В виде кускового сырья чистые микроклин, микроклиновый пегматит, кварц отправлялись потребителям. После начала действия ПОФ весь микроклиновый пегматит поступал на обогащение для снижения содержания железа в конечном продукте. На Чупинской ПОФ выпускалось три вида продукции: материал кварц-полевошпатовый для производства тонкой керамики (марка КПШМ-0,2-2), материал полевошпатовый для фарфоровой глазури (марка ПШК-0,15-2,5) и для электротехнической, абразивной и электродной отраслей (марки ПШК-0,18-3, ПШМ-0,3-3 и др.).

Для анализа химического состава полевошпатовых проб отвалов использованы материалы Северной поисково-разведочной экспедиции [Родионов, 2007] и авторские данные.

Пробы набирались из чистого кускового микроклина, пегматита микроклинового и смешанного (плаггиоклаз-микроклинового) состава. Результаты, приведенные в таблице 2, показывают потенциальную пригодность для использования полевошпатового сырья при производстве:

- тонкой керамики ($Fe_2O_3 \leq 0,15-0,30$ %; $CaO+MgO \leq 1,5-2,0$ %; $K_2O+Na_2O - 8-12$ %; $K_2O/Na_2O - 2-3$) – полевошпатовые и кварц-полевошпатовые материалы, ГОСТ 7030-75;
- строительной керамики ($Fe_2O_3 \leq 0,20-0,30$ %; $CaO+MgO \leq 1,5-2,5$ %; $K_2O+Na_2O - 7-9$ %; $K_2O/Na_2O - 0,7-0,9$) – кварц-полевошпатовые материалы, ГОСТ 15045-78;
- стекла электровакуумного, высоко-сортного технического, листового ($Fe_2O_3 \leq 0,20-0,70$ %; $Al_2O_3 - 11,5-20$ %; $K_2O+Na_2O - 7-12$ %; $SiO_2 \leq 65-80$ %) – полевошпатовые и кварц-полевошпатовые материалы, ГОСТ 13451-77.

Таблица 2. Средний химический состав полевошпатовых проб из отвалов месторождений Хетолампина и им. Чкалова

Table 2. Average chemical composition of feldspar samples from dumps of the Hetolambina and Chkalov deposits

Отвалы месторождений Dumps of the deposits	Содержание, вес. % Content, wt. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ + FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	K ₂ O/Na ₂ O
Хетолампина Hetolambina								
Микроклин Microcline	66,98	17,91	0,17	0,04	0,69	3,51	10,86	2,53–3,16
Микроклиновый пегматит Microcline pegmatite	67,77	18,17	0,26	0,07	1,06	4,02	8,13	1,16–3,44
Пегматит смешанного состава Mixed pegmatite	72,33	15,37	1,89	0,81	1,92	4,07	2,87	0,67–0,70
им. Чкалова Chkalov mine								
Микроклин Microcline	65,12	19,22	0,09	0,05	0,44	3,68	11,69	1,90–7,05
Микроклиновый пегматит Microcline pegmatite	71,27	15,56	0,12	0,06	0,38	3,04	8,97	2,54–5,85
Пегматит смешанного состава Mixed pegmatite	74,13	13,04	1,59	0,78	0,88	3,44	4,99	0,88–2,39

В соответствии с ГОСТ 23034-78 полевошпатовые и кварц-полевошпатовые материалы по крупности делятся на тонкомолотые (размер частиц менее 0,063 мм), молотые (0,063–1,25 мм) и кусковые (20–200 мм). При необходимости доизмельчение и обогащение с использованием электромагнитной сепарации позволит повысить качество получаемой полевошпатовой продукции [Каменева, Скамницкая, 2003; Бубнова и др., 2020].

Изучение применения отходов обогащения пегматитов в производстве керамической плитки

За десятилетия работы ГОКа «Карел-слюда» на участках переработки пегматитов также скопились значительные массы измельченного материала, сложенные некондиционным кусковым материалом рудосортировочных цехов, хвостами обогащения, отсевами, отходами обеспыливания ПОФ (рис. 5). Для изучения возможности использования полевошпатовых отходов обеспыливания в производстве керамической плитки выполнены исследования минерального и гранулометрического состава отходов и изучено влияние их на усадку, водопоглощение и прочность изделий.

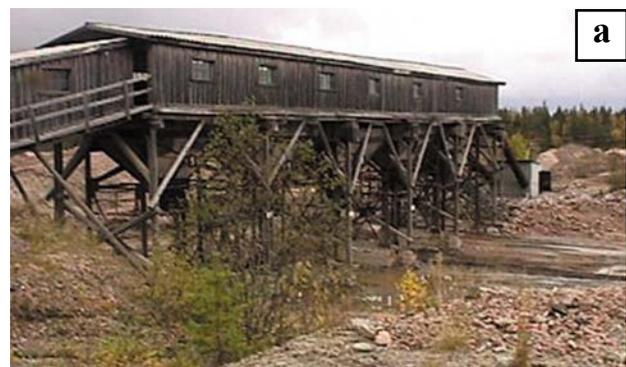


Рис. 5. Отвалы рудосортировочного цеха (а) на месторождении Хетолампина и ПОФ (б)

Fig. 5. Dumps of the ore sorting shop (a) at the Hetolambina deposit and the Grinding and enrichment factory (b)

Полевые шпаты применяют в качестве плавня, уменьшая пористость обожженных изделий, облегчая процесс спекания и придавая материалу прочность, компактность и стойкость. В настоящей работе при получении облицовочной плитки полевой шпат был заменен на мелкофракционные отходы обеспыливания пегматитов Чупинской ПОФ. В качестве пластифицирующей добавки выбрана кем-

брийская глина Чкаловского месторождения (Ленинградская область), применяющаяся в производстве отделочной строительной керамики на ОАО «Нефрит-Керамика». В качестве отощающей добавки использовали кварцевый песок Сулажгорского месторождения (Карелия). Химический состав сырьевых компонентов облицовочной плитки приведен в таблице 3.

Таблица 3. Химический состав сырьевых компонентов облицовочной плитки
Table 3. Chemical composition of raw materials for facing tiles

Сырье Raw material	Содержание, вес. % Content, wt. %									
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	п.п.п.
Кварц-полевошпатовый концентрат Quartz-feldspar concentrate	73,99	0,01	14,05	0,11	0,01	0,29	3,25	7,74	2,38	-
Отходы обеспыливания Dust removal waste	70,00	0,06	15,58	1,26	0,41	1,30	3,19	7,63	0,13	0,44
Глина чкаловская Chkalovskaya clay	62,70	0,85	15,45	6,21	2,50	0,97	0,56	5,19	1,11	4,46
Каолин просьяновский Prosyanovsky kaolin	47,20	0,61	36,49	0,94	0,1	0,88	0,10	0,92	-	12,76
Песок кварцевый Quartz sand	98,62	0,04	0,73	0,15	-	-	0,12	0,06	0,06	0,22

По химическому составу (см. табл. 3) отходы обеспыливания отличаются от полевошпатового или кварц-полевошпатового концентрата повышенным содержанием оксидов железа. Это отличие в сочетании с тонкой фракцией должно способствовать улучшению спекания керамики [Августиник, 1975].

Чкаловская глина характеризуется пелитовой и алевро-пелитовой структурой, слоистой и массивной текстурой. По минеральному составу она относится к типу полиминеральных, преимущественно гидрослюдистых глин, а по гранулометрическому – к среднедисперсным с низким содержанием крупнозернистых включений (более 0,5 мм). По данным РФА, глинистая фракция глины состоит в основном из минералов группы гидрослюд: d (Å) 9,7–9,9; 4,92–4,95; 4,48 с примесью хлорита: d 13,81–14,03; 6,97–7,08; 4,69–4,71. В глине также присутствует каолинит: d (Å) 7,23; 3,59; 2,51; 1,53.

Гранулометрическая характеристика пегматитовых отходов обеспыливания по результатам анализа размера частиц и расчета содержания отдельных классов крупности представлена на рис. 6 (а). Результаты гранулометрического анализа отходов обеспыливания свидетельствуют о высоком содержании тонкодисперсных частиц (фракции < 0,01 мм), что является благоприятным фактором при подготовке керами-

ческой массы в шаровой мельнице, а также при получении керамики методом шликерного литья [Давыдов и др., 2016]. Высокое содержание частиц фракции 0,001–0,02 мм должно способствовать образованию стеклообразующего компонента – плавня, обеспечивающего спекание и прочность опытных изделий [Августиник, 1975].

Результаты СЭМ-исследований отходов обеспыливания показали их размеры, морфологию и состав (рис. 6, б). Основная масса мелкофракционных отходов состоит из угловатых зерен кварца и полевого шпата (микроклин, плагиоклаз) как изометрической, так и удлиненной формы. Электронно-микроскопическое изображение демонстрирует преобладание частиц крупностью менее 0,01 мм, с единичными минералами крупностью около 0,2–0,4 мм. Некоторые зерна окрашены в бурый цвет оксидами железа. Кроме того, присутствуют единичные зерна рудного минерала и слюды.

Составы опытных изделий обрабатывали в лабораторных условиях по общепринятой в керамическом производстве технологии. Подготовка шихты включала сушку сырьевых компонентов, измельчение, просеивание, взвешивание, а также перемешивание в лабораторной шаровой мельнице до получения 1,5 % остатка на сите с размером ячейки 0,063 мм. После 1-сут. вылеживания рабочая влажность масс составляла

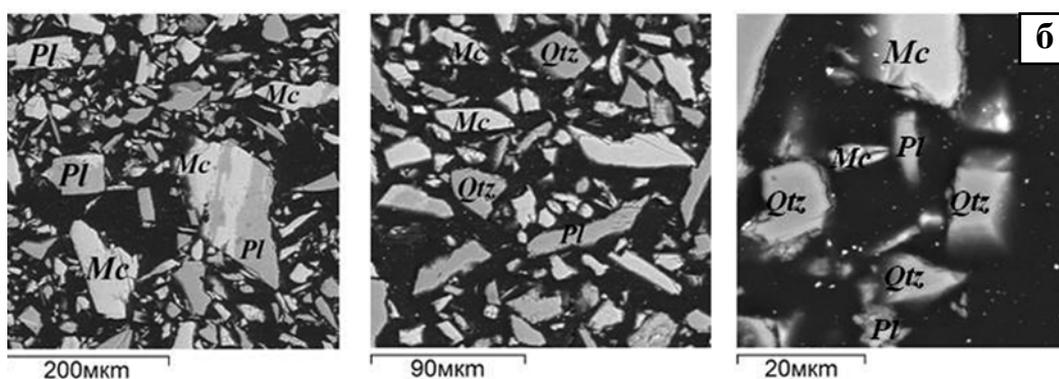
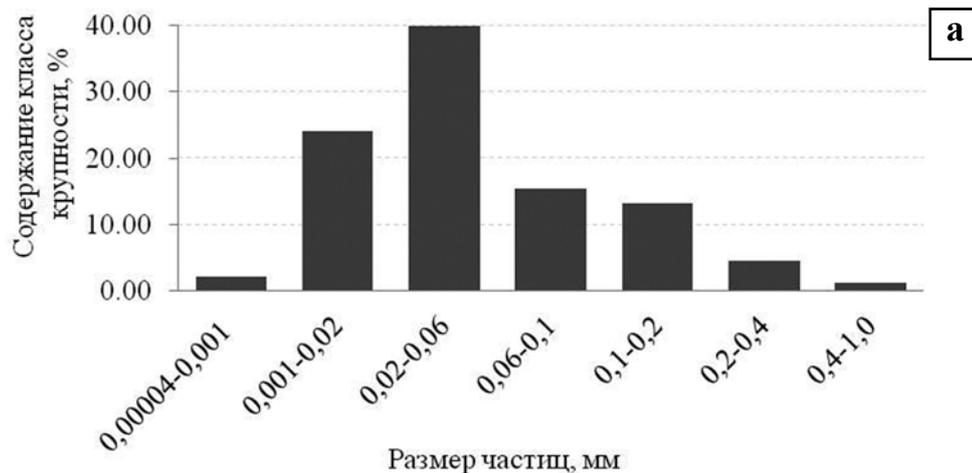


Рис. 6. Характеристика отходов обеспыливания ПОФ:
 а – гранулометрический состав; б – морфология и минеральный состав зерен (СЭМ-изображение, Qtz – кварц, Mc – микроклин, Pl – плагиоклаз)

Fig. 6. Characteristics of the concentration screenings at the Grinding and enrichment factory:
 a – particle size distribution (laser analyzer of particles Laser Diffraction Particle Size Analyzer LS 13 320);
 b – morphological and mineralogical features (SEM image, Qtz – quartz, Mc – microcline, Pl – plagioclase)

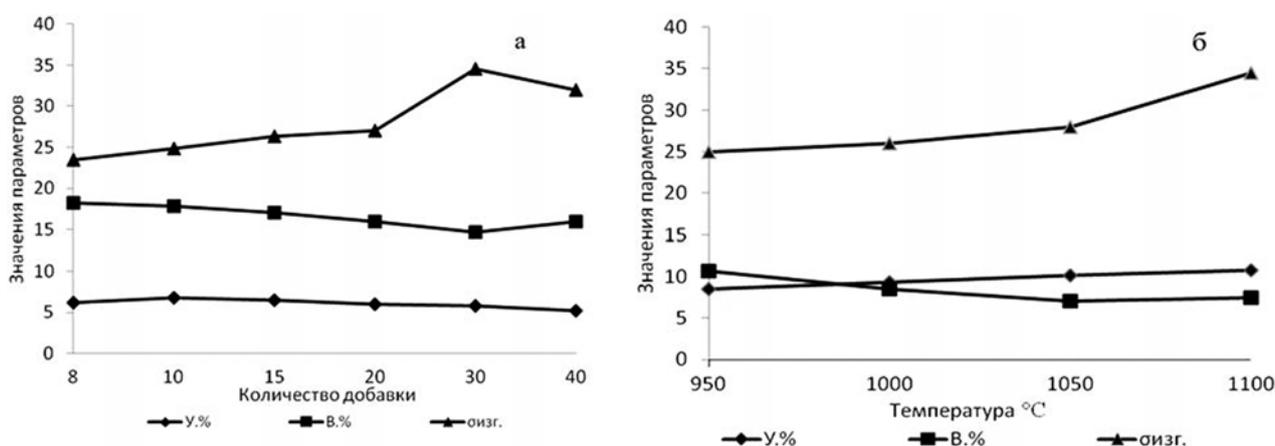


Рис. 7. Физико-механические свойства опытных изделий:
 а – зависимость изменения свойств от содержания отходов обеспыливания в опытных изделиях; б – зависимость изменения свойств от температуры обжига опытных изделий

Fig. 7. Physical and mechanical properties of the experimental products:
 a – dependence of the changes in properties on the content of dedusting waste in the experimental products; б – dependence of the change in properties on the firing temperature of the experimental products

18–20 %. Из масс формовали изделия размером 50×50×8 мм, сушили при 105 °С, а затем обжигали в лабораторной печи КО-14 при температуре от 950 до 1100 °С с интервалом 50 °С. Средняя скорость подъема температуры 2–3 град/мин, выдержка при достижении необходимой температуры 40 мин. Образцы охлаждались вместе с печью.

Экспериментально изучены физико-механические свойства опытных изделий: общая усадка при обжиге $У$, водопоглощение $В$ и прочность при изгибе $\sigma_{изг}$. По значениям параметров физико-механических свойств установлен оптимальный состав массы. На рис. 7 (а) показана зависимость изменения этих свойств от содержания кварц-полевошпатовой добавки к чкаловской глине. Общая усадка и водопоглощение снижаются незначительно от увеличения количества полевошпатовых отходов.

Наибольшую прочность при изгибе имеют составы с содержанием отходов обеспыливания 30–35 % и кварцевого песка 5 %. Увеличение количества полевошпатового сырья до 40 %, не содержащего кварцевого песка, приводит к некоторому снижению прочности, аналогично показателям водопоглощения. Массы

с добавкой к глине отходов обеспыливания в количестве 30–35 мас. % по водопоглощению и механической прочности соответствуют требованиям ГОСТ 6141-91.

Плитки обжигались до 1100 °С, так как эта температура является максимальной при обжиге облицовочных изделий на ОАО «Нефрит-Керамика». На рис. 7 (б) показаны зависимости изменения этих свойств от температуры обжига изделий. С повышением температуры до 1100 °С общая усадка равномерно растет. Водопоглощение изделий существенно снижается при 1050 °С, что свидетельствует о начале активного спекания, а при конечной температуре равно 7,46 %. Показатели прочности коррелируются с данными водопоглощения: спекание масс при конечной температуре (1100 °С) обжига обеспечивает высокую прочность разработанных изделий.

В таблице 4 представлены физико-механические свойства опытных, содержащих отходы обеспыливания и производственных изделий (от ОАО «Нефрит-Керамика», Ленинградская обл.) на основе кембрийской глины Чкаловского месторождения, каолина, полевого шпата, кварцевого песка и извести.

Таблица 4. Свойства опытных и производственных изделий

Table 4. Properties of the experimental and production products

Сырьевой материал Raw material	Свойства изделий, обожженных при температуре Properties of the products fired at the temperature of					
	950 °С			1100 °С		
	$\sigma_{изг}$, МПа	У, %	В, %	$\sigma_{изг}$, МПа	У, %	В, %
Отходы обеспыливания + чкаловская глина Dust removal waste + Chkalovskaya clay	26,6	8,5	10,7	34,5	10,8	6,7
Образец – аналог производственного (полевого шпата, глина, кварцевый песок, известь) Production sample (feldspar, clay, quartz sand, lime)	24,3	9,0	14,1	26,4	12,1	7,2

Установлено (см. табл. 4), что при температуре обжига 1100 °С усадка опытных изделий близка к усадке производственных, несмотря на отсутствие в опытных изделиях кварцевого песка и извести. Существенных различий в водопоглощении опытных и производственных образцов, обожженных при 950 °С, не наблюдается. Водопоглощение опытных образцов, обожженных при 1100 °С (6,7 %), близко к водопоглощению производственных образцов, что свидетельствует об активном спекании. С данными по водопоглощению коррелируют показатели $\sigma_{изг}$. Наибольший $\sigma_{изг}$ (34,5 МПа) имеют опытные образцы; $\sigma_{изг}$ производственных образцов ниже (26,4 МПа). Увеличению $\sigma_{изг}$ опытных образцов, вероятно, способствуют

мелкофракционные отходы, в которых зерна кварца и полевого шпата имеют изометрическую и удлиненную форму, повышающие сцепление зерен и образование стеклофазы при обжиге. Применение мелкофракционных отходов обеспыливания в качестве добавки к чкаловской глине позволяет исключить из состава массы известь и значительно уменьшить (или полностью исключить) количество кварцевого песка, требующих помола. Результаты показывают возможность использования отходов обеспыливания пегматитов Чупинской ПОФ вместо полевошпатового концентрата на предприятиях, выпускающих облицовочную керамическую плитку [Ильина и др., 2006].

Заключение

Отвалы горнодобывающих производств являются перспективными объектами комплексного использования и многоцелевого назначения. Техногенное сырье пегматитовых месторождений Чупино-Лоухского промышленного района хорошо обогащается методом сухой магнитной сепарации с получением микроклиновых и кварц-полевошпатовых концентратов различного качества в соответствии с ГОСТ 23034-78. Актуальность такого производства обусловлена ростом спроса на полевой шпат для производства керамической плитки, керамики, стекловолокна, стекла. Это связано с увеличением строительства нового жилья, коммерческой и жилищной реконструкции и модернизации. Использование новых технологий позволяет разрабатывать относительно доступную керамическую плитку с реалистичным внешним видом (например, древесины), что может быть еще одним новым направлением использования полевошпатового сырья.

Попутное извлечение щебня из крупнокускового материала позволяет снизить удельные энергетические затраты, так как отвалы сложены кусковым материалом различной крупности. Таким образом, минеральный продукт, полученный из отвалов пегматитовых месторождений, может быть успешно реализован на рынке при условии минимальной переработки отходов и эффективного маркетинга.

Новые площади, освобожденные от отвалов и рекультивированные, производственные комплексы, карьеры пригодны для использования и развития геотуризма. Минерально-сырьевые ресурсы являются неотъемлемой частью истории развития современного общества. Опыт использования горноиндустриального наследия показывает высокую рентабельность такого направления работ. Примером могут служить Горный парк «Рускеала» в Карелии, музей-рудник «Оутокумпу» в Финляндии, соляная шахта «Величка» в Польше и др. Карелия упоминается как «слядяная провинция» России в книгах по геологии еще XVII–XX века. Поэтому на базе рудников ГОКа «Карелслюда» с сохранившимися строениями и горным оборудованием можно организовать музей слюдяного промысла Северо-Запада России и туристический маршрут, посвященные богатству недр, что сделает этот район новым брендом в туристической отрасли.

Литература

Августиник А. И. Керамика. Л.: Стройиздат, 1975. 592 с.

Бубнова Т. П., Скамницкая Л. С., Ильина В. П. Полевошпатовое сырье Республики Карелия и его технологическая оценка // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 6. С. 58–74. doi: 10.17076/them1253

Голованов Ю. Б., Михайлов В. П., Щипцов В. В., Родионов В. С. Полевошпатовое сырье // Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 2. Петрозаводск: Карелия, 2006. С. 85–104.

Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Полевошпатовое сырье / Министерство природных ресурсов Российской Федерации. Вып. 52. М., 2015.

Давыдов С. Я., Валиев Н. Г., Суслев Н. М., Семин А. Н., Ермолаев А. И., Черемисина Т. Н., Филатов М. С. Пылеобразование и использование пыли горных пород на промышленных объектах // Известия УГГУ. 2016. № 3(43). С. 87–89. doi: 10.21440/2307-2091-2016-3-87-90

Еромасов Р. Г., Никифорова Э. М., Кравцова Е. Д., Спектор Ю. Е. Строительные композиты на основе минеральных техногенных заполнителей // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2012. № 7. Т. 5. С. 766–770.

Ильина В. П., Лебедева Г. А., Озерова Г. П., Инина И. С. Использование техногенного минерального сырья Карелии для получения керамической плитки // Строительные материалы. 2006. № 2. С. 47–49.

Каменова Е. Е., Скамницкая Л. С. Обогащение минерального сырья Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. 230 с.

Кузьмина В. Л. Наполнители для сухих строительных смесей // Сухие строительные смеси. 2017. № 3. С. 8–15.

Левченко Е. Н., Веремеева Л. И., Горлова О. И. Техногенное минеральное сырье: особенности вещественного состава и технологических свойств, геолого-технологическое картирование // Руды и металлы. 2018. № 1. С. 64–75.

Малышев Ю. Н., Ряховский В. М., Банников В. Ф., Ряховская С. К. Минералого-геохимические исследования – действенный инструмент совершенствования технологии переработки техногенных отходов // Горный журнал. 2016. № 1. С. 73–76.

Местников А. Е., Кудряков А. И., Рожин В. Н. Портландцемент с природными активными минеральными добавками // Вестник ТГАСУ. 2019. № 2. С. 192–201. doi: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-192-201

Мельников Н. Н., Ганза Н. А., Митрофанова Г. В., Петров А. А. Сохранение и освоение техногенных месторождений Кольского горно-промышленного комплекса для расширения минерально-сырьевой базы региона // Горный журнал. 2010. № 9. С. 88–92.

Пекки А. С., Разоренова В. И. Месторождения полевошпатового сырья Карелии. Л.: Наука, 1977. 152 с.

Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 30 сентября 2011 года № 792 «Об утверждении Поряд-

ка ведения государственного кадастра отходов» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902305590> (дата обращения: 20.09.2021).

Родионов В. С. Отчет «Оценка ресурсного потенциала нераспределенного фонда недр месторождений Чупино-Лоухской группы с целью оценки целесообразности возобновления добычи слюды мусковита и оценки возможности многоцелевого использования пород, слагающих горные отвалы этих месторождений». Чупа, 2007. 130 с.

Саламанова М. Ш., Сайдумов М. С., Муртазаева Т. С., Хубаев М. С. Высококачественные модифицированные бетоны на основе минеральных добавок и суперпластификаторов различной природы // Инновации и инвестиции. 2015. № 8. С. 163–166.

Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ (ред. от 07.04.2020) «Об отходах производства и потребления» (с изм. и доп., вступ. в силу с 14.06.2020). URL: https://rpn.gov.ru/upload/iblock/c89/Федеральный_закон_от_24_06_1998_N_89-ФЗ.pdf (дата обращения: 20.09.2021).

Чуйкина Е. П., Арутюнов Г. М., Едовин В. И. и др. Отчет Центрально-Чупинской поисково-съёмочной партии о геологосъёмочных и поисковых работах масштаба 1:10 000, проведенных в 1963–1970 гг. в Чупино-Лоухском слюдоносном районе (Лоухский район Карельской АССР). 1971. (Фонды СЗТГФ).

Щипцов В. В., Иващенко В. И. Минерально-сырьевой потенциал арктических районов Республики Карелия // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 2. С. 3–33. doi: 10.17076/geo775

Murguía D. I., Bringezu S., Schaldach R. Global direct pressures on biodiversity by large-scale metal mining: Spatial distribution and implications for conservation // J. Environ. Manage. 2016. Vol. 180. P. 409–420. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.05.040

Prokopenko S., Sushko A., Filatov Yu., Kislyakov M., Kislyakov I. Environmental improvement of opencast mining // Ecology and safety in the technosphere: current problems and solutions. IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci. 2017. Vol. 50. P. 012012. doi: 10.1088/1755-1315/50/1/012012

Raszewski Z., Nowakowska-Toporowska A., Wezgowiec J., Nowakowska D., Wie W. Influence of silanized silica and silanized feldspar addition on the mechanical behavior of polymethyl methacrylate resin denture teeth // J. Prosthetic Dentistry. 2020. Vol. 123(4). doi: 10.1016/j.prosdent.2019.12.007

Romanova O. A., Sirotin D. V. The methodological approach to determining the environmental and economic efficiency of processing of man-made mineral formations // Известия УГГУ. 2019. Вып. 3(55). С. 141–149. doi: 10.21440/2307-2091-2019-3-141-149.

References

Avustinik A. I. Ceramics. Leningrad: Stroiizdat, 1975. 592 p. (In Russ.)

Bubnova T. P., Skamnitskaya L. S., Il'ina V. P. Feldspar raw materials of the Republic of Karelia and its technological assessment. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research*

Centre of RAS. 2020;6:58–74. (In Russ.) doi: 10.17076/them1253

Chuikina E. P., Arutyunov G. M., Edovin V. I. et al. Report of the Central Chupa prospecting and survey party on geological survey and prospecting works at a scale of 1: 10 000, carried out in 1963–70 in the Chupino-Loukhsky mica region (Loukhsky District of the Karelian Autonomous Soviet Socialist Republic). 1971. (SZTGF funds). (In Russ.)

Davydov S. Ya., Valiev N. G., Suslov N. M., Semin A. N., Ermolaev A. I., Cheremisina T. N., Filatov M. S. Dust formation and use of rock dust at industrial sites. *News of the Ural State Mining University.* 2016;3(43):87–89. (In Russ.)

Eromasov R. G., Nikiforova E. M., Kravtsova E. D., Spektor Yu. E. Building composites based on mineral technogenic fillers. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.* 2012;7(5):766–770. (In Russ.)

Federal Law No. 89-FZ On production and consumption waste (with the amendments and additions of June 14, 2020). URL: https://rpn.gov.ru/upload/iblock/c89/Федеральный_закон_от_24_06_1998_N_89-ФЗ.pdf (accessed: 20.09.2021). (In Russ.)

Golovanov Yu. B., Mikhailov V. P., Shchiptsov V. V., Rodionov V. S. Feldspar raw materials. *Mineral'nosyr'evaya baza Respubliki Kareliya = Mineral resource base of the Republic of Karelia.* Vol. 2. Petrozavodsk: Kareliya Publ.; 2006. P. 85–104. (In Russ.)

Il'ina V. P., Lebedeva G. A., Ozerova G. P., Inina I. S. The use of technogenic mineral raw materials of Karelia for the production of ceramic tiles. *Stroitel'nye materialy = Construction Materials.* 2006;2:47–49. (In Russ.)

Kameneva E. E., Skamnitskaya L. S. Enrichment of mineral raw materials of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2003. 230 p. (In Russ.)

Kuz'mina V. L. Fillers for dry building mixtures. *Sukhie stroitel'nye smesi = Dry Mixes.* 2017;3:8–15. (In Russ.)

Levchenko E. N., Veremeeva L. I., Gorlova O. I. Technogenic mineral raw materials: features of material composition and technological properties, geological and technological mapping. *Rudy i metally = Ores and Metals.* 2018;1:64–75. (In Russ.)

Malyshev Yu. N., Ryakhovskii V. M., Bannikov V. F., Ryakhovskaya S. K. Mineralogy and geochemistry research – An efficient tool of improvement of mining waste processing technology. *Gornyi Zhurn.* 2016;1:73–76. (In Russ.)

Mestnikov A. E., Kudiyakov A. I., Rozhin V. N. Portland cement with natural active mineral additives. *Vestnik of Tomsk St. Univ. of Architecture and Building.* 2019;2(21):192–201. (In Russ.) doi: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-192-201

Mel'nikov N. N., Ganza N. A., Mitrofanova G. V., Petrov A. A. Preservation and exploration of technogenic deposits of the Kola mining and industrial complex for widening of regional mineral raw materials base. *Gornyi Zhurn.* 2010;9:88–92. (In Russ.)

Murguía D. I., Bringezu S., Schaldach R. Global direct pressures on biodiversity by large-scale metal mining: Spatial distribution and implications for conservation. *J. Environ. Manage.* 2016;180:409–420. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.05.040

Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation dated September 30, 2011 No. 792 On approval of the Procedure for maintaining the state cadastre of waste. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902305590> (accessed: 20.09.2021). (In Russ.)

Pekki A. S., Razorenova V. I. Deposits of feldspar raw materials of Karelia. Leningrad: Nauka Publ.; 1977. 152 p. (In Russ.)

Prokopenko S., Sushko A., Filatov Yu., Kislyakov M., Kislyakov I. Environmental Improvement Of Opencast Mining. *Ecology and safety in the technosphere: current problems and solutions. IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci.* 2017;50:012012. doi: 10.1088/1755-1315/50/1/012012

Raszewski Z., Nowakowska-Toporowska A., Wezgowiec J., Nowakowska D., Wie W. Influence of silanized silica and silanized feldspar addition on the mechanical behavior of polymethyl methacrylate resin denture teeth. *J. Prosthetic Dentistry.* 2020;123(4). doi: 10.1016/j.prosdent.2019.12.007

Rodionov V. S. Assessment of the resource potential of the Unallocated subsoil fund of the Chupino-Loukh

group deposits in order to assess the feasibility of resuming production of Muscovite mica and assess the possibility of multi-purpose use of the rocks composing the mountain dumps of these deposits: Report. Chupa; 2007. 130 p. (In Russ.)

Romanova O. A., Sirotin D. V. The methodological approach to determining the environmental and economic efficiency of processing of man-made mineral formations. *News of the Ural State Mining University.* 2019;3(55):141–149. doi: 10.21440/2307-2091-2019-3-141-149

Salamanova M. Sh., Saidumov M. S., Murtazaeva T. S., Khubaev M. S. High-quality modified concretes for mineral additives and superplasticizers of various nature. *Innovatsii i investitsii = Innovation and Investment.* 2015;8:163–166. (In Russ.)

Shchiptsov V. V., Ivashchenko V. I. Mineral potential of Arctic Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre of RAS.* 2018;2:3–33. (In Russ.). doi: 10.17076/geo775

State balance of mineral reserves of the Russian Federation. *Feldspar raw materials.* Iss. 52. Moscow; 2015. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 30.09.2021; принята к публикации / accepted: 26.01.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Бубнова Татьяна Петровна

научный сотрудник

e-mail: bubnova@krc.karelia.ru

Ильина Вера Петровна

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

e-mail: ilyina@igkrc.ru

CONTRIBUTORS:

Bubnova, Tatyana

Researcher

Ilyina, Vera

Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher