

УДК 666.189.3

© Н. К. Манакова, канд. техн. наук, научн. сотрудник  
© О. В. Суворова, канд. техн. наук, с. н. с.  
(Институт химии и технологии редких элементов  
и минерального сырья им. И. В. Тананаева —  
обособленное подразделение Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки  
Федерального исследовательского центра «Кольский  
научный центр Российской академии наук»,  
Апатиты, Россия)  
E-mail: n.manakova@ksc.ru, ov.suvorova@ksc.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-6-149-155

© N. K. Manakova, PhD in Sci. Tech., research worker  
© O. V. Suvorova, PhD in Sci. Tech., senior research worker  
(Tananaev Institute of Chemistry —  
Subdivision of the Federal Research Centre  
“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”  
Science Centre of Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia)  
E-mail: n.manakova@ksc.ru, ov.suvorova@ksc.ru

## ПОЛУЧЕНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ С ДОБАВЛЕНИЕМ ДОЛОМИТА

### OBTAINING OF HEAT-INSULATING MATERIALS BASED ON SILICA-CONTAINING WASTE WITH THE ADDITION OF DOLOMITE

Представлены результаты исследования возможности получения качественных вспененных теплоизоляционных материалов на основе силикатной матрицы с добавкой доломита. Установлено, что предварительная активация суспензии на основе кремнеземсодержащего компонента при температуре 90 °С в течение 5–7 мин позволяет ускорить коагуляцию микрокремнезема и реакцию синтеза силикатов натрия. Оптимальные условия вспенивания шихты — 650–700 °С в течение 25 мин. Получены пеносиликаты с относительно равномерной мелкопористой структурой и стабильными физико-техническими свойствами: плотность 0,38–0,48 г/см<sup>3</sup>, прочность до 3 МПа, теплопроводность 0,048–0,054 Вт/(м · К).

*Ключевые слова:* кремнеземсодержащие отходы, доломит, теплоизоляционные материалы, стекловидные материалы, теплопроводность.

The paper presents the results of the study of feasibility of obtaining high-quality foamed thermal insulation materials based on a silicate matrix with addition of dolomite. It has been found out that the preliminary activation of a suspension based on a silica-containing component at a temperature of 90°C for 5–7 minutes allows accelerating the coagulation of silica fume and the synthesis of sodium silicates. Optimal foaming conditions for the charge frothing are 650–700°C for 25 minutes. There have been obtained foam silicates with a relatively uniform finely porous structure and stable physical and technical properties with density 0.38–0.48 g/cm<sup>3</sup>, strength up to 3 MPa, thermal conductivity 0.048–0.054 W/(m·K).

*Keywords:* silica-containing waste, dolomite, heat-insulating materials, vitreous materials, thermal conductivity.

Экологические трудности горнодобывающих и перерабатывающих регионов заключаются прежде всего в накоплении отходов, служащих основной причиной возникновения неблагоприятной в экологическом отношении обстановки. По мнению многих исследователей, проблема обращения с отходами горного производства является важнейшей в регионах Севера и, в частности, Кольского полуострова. Актуальность проведенных исследований заключается в том, что переработка техногенных отходов обе-

спечивает снижение негативного воздействия на природную среду северных территорий России. Согласно исследованиям О. Е. Чуркина и А. А. Гиляровой, по причине интенсивного недропользования на протяжении более 80 лет на Кольском полуострове накоплено более 8 млрд т горнопромышленных отходов в хвостохранилищах и отвалах горных пород высотой до 60 м и длиной до нескольких километров [1].

В сложившихся условиях важную роль играет утилизация техногенных отходов горнорудного

производства, прежде всего отходов обогащения, которые можно использовать в качестве сырья для получения строительных и технических материалов.

Наряду с этим, в настоящее время актуальной технологической и экономической задачей является создание новых теплоизоляционных строительных материалов с усовершенствованными эксплуатационными характеристиками. Современная теплоизоляция должна иметь высокую прочность при сохранении низкой плотности, стабильную низкую теплопроводность, быть пожаробезопасной, долговечной, химически и биологически устойчивой.

Для успешного развития промышленности теплоизоляционных вспененных материалов особое значение в наше время имеет расширение минерально-сырьевой базы. По данным авторов [2–17], в этом отношении весьма перспективно использование в качестве сырья высококремнистых аморфных горных пород и техногенных отходов.

Изготовление пеносиликатов основано на общеизвестном процессе растворения аморфного кремнезема в щелочах с образованием жидкого стекла, модифицировании жидкого стекла путем введения добавок, формовании и вспучивании сырьевых образцов при относительно низких температурах 350–850 °С. Полученные изделия экологичны, негорючи, с относительно низкой себестоимостью. Эти достаточно несложные в изготовлении вспененные силикаты проигрывают классическому пеностеклу разве что из-за высокого показателя водопоглощения, который можно снизить различными технологическими приемами, например обработкой гидрофобизатором или с помощью дополнительного обжига.

В процессе переработки апатито-нефелиновых руд на глинозем и другие материалы образуется немало попутного продукта — микрокремнезема, на 70–85 % состоящего из  $\text{SiO}_2$ . Постановка исследований, проводимых в данной работе, в том числе вызвана необходимостью его утилизации.

На основе анализа литературных данных и собственных исследований в рамках изучения низкотемпературного синтеза стеклофазы разработана силикатная матрица из техногенного кремнеземсодержащего сырья для получения

блочных пеносиликатов, которые характеризуются низкой плотностью и теплопроводностью при наличии высокопористой структуры [3, 4].

Цель данной работы — физико-химическое и экспериментальное обоснование получения блочных пеносиликатов с равномерной пористой структурой, заданными геометрическими размерами и улучшенными техническими характеристиками, в том числе пониженной теплопроводностью, на основе силикатной матрицы с использованием в качестве добавки доломита.

Сырьевыми источниками для получения теплоизоляционных пеносиликатных материалов послужили:

1) кремнеземсодержащий компонент (микрокремнезем), получаемый при кислотной переработке нефелинового концентрата (удельная поверхность 213,52 м<sup>2</sup>/г, насыпная плотность 255 кг/м<sup>3</sup>);

2) отработанный на водозаборе сорбент из опоки Сухоложского месторождения (удельная поверхность 117,60 м<sup>2</sup>/г, насыпная плотность 471,01 кг/м<sup>3</sup>);

3) отходы обогащения апатито-нефелиновых руд Хибинских месторождений (удельная поверхность 0,80 м<sup>2</sup>/г, насыпная плотность 1500 кг/м<sup>3</sup>);

4) доломит Сопчеозерского месторождения (Мурманская обл.) (удельная поверхность 0,40 м<sup>2</sup>/г, насыпная плотность 1449 кг/м<sup>3</sup>).

Химический состав используемых сырьевых материалов представлен в табл. 1.

Измерение удельной поверхности сырьевых материалов проводили по методу БЭТ. Физико-химические и теплофизические свойства пеносиликатных материалов на основе кремнеземсодержащего сырья определялись и оценивались с учетом требований ГОСТ 17177–94 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний», ГОСТ 16381–77 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Классификация и общие технические требования». Микроскопические исследования проводились на сканирующем микроскопе SEM LEO 420. Для определения коэффициента теплопроводности — одной из важнейших характеристик материалов [18], получаемых для тепловой изоляции зданий, привлекался электронный измеритель теплопроводности ИТП-МГ 4.

## Химический состав сырья

Компоненты	Содержание оксидов, %масс.									
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.
Мкр.1	78,30	0,13	1,67	0,94	0,12	–	0,10	–	0,66	16,40
Мкр.2	73,79	0,95	11,07	4,40	0,71	0,87	–	0,37	1,54	5,77
АНХ	35,98	4,43	16,60	12,22	9,13	1,25	4,11	10,77	4,59	1,00
Доломит	–	–	–	0,27	28,12	18,57	–	–	–	46,00

Примечание. Мкр.1 — микрокремнезем, получаемый при кислотной переработке нефелинового концентрата; Мкр.2 — кремнеземсодержащий отход из опоки; АНХ — апатито-нефелиновые хвосты; п. п. п. — прочие побочные примеси.

Для получения пеносиликатов использовалась шихта состава, %масс.: кремнеземсодержащий продукт 65–68, гидроксид натрия (в пересчете на Na<sub>2</sub>O) 17–20, апатито-нефелиновые отходы (фракция 1 мм) 15, доломит 5–15 (сверх 100 %).

Блочные вспененные материалы получали, используя следующую методику: готовилась жидкостекольная смесь из кремнеземсодержащих продуктов, апатито-нефелиновых хвостов и добавки (доломита). После перемешивания к компонентам шихты добавляли водный раствор гидроксида натрия. Для ускорения процесса коагуляции микрокремнезема смесь подвергали гидротермальной обработке при температуре 90 °С в течение 5–7 мин. Методом уплотнения шихты готовили образцы-цилиндры в керамических разъемных формах диаметром 30 мм. Отформованные сырцовые образцы после сушки в воздушно-тепловых условиях вспенивали при температурах от 650 до 750 °С с интервалом в 25 °С и изотермической выдержкой 20–35 мин. Для стабилизации пены осуществляли резкое снижение температуры на 100–150 °С в течение 5–7 мин с постепенным охлаждением до температуры 25–30 °С со скоростью 0,4–0,6 °С/мин.

Для определения оптимального состава жидкостекольной композиции и условий синтеза пеносиликатов изучали зависимости плотности, прочности, водопоглощения, теплопроводности образцов от содержания модифицирующих добавок и технологических параметров их получения.

Как известно, при обработке микрокремнезема раствором гидроксида натрия образуются гидросиликаты натрия, которые после предварительной сушки частично дегидратируются, а при нагреве выше температуры 300 °С начинается

вспенивание и формируется пористая структура материала. Важными факторами, влияющими на микро- и макроструктуру щелочно-силикатного материала, являются параметры времени образования пор и стеклование межпоровой системы высокопористой структуры. С. Н. Леонович и др. отмечают, что при медленном нагреве сырьевой смеси возможно получение вспученной массы с маленькими порами, а при ускоренном нагреве происходит ее вскипание с запаздыванием структурообразования высокопористой системы, что приводит к образованию крупных пор [12]. В связи с этим в работе использовали метод постепенного нагрева до температуры начала стеклообразования и вспучивания.

Экспериментальные исследования взаимосвязи состава шихты, температурно-временного режима, макроструктуры и свойств образцов пеносиликатных материалов для жидкостекольной композиции без использования добавок позволили подобрать оптимальные условия их получения: гидротермальная обработка при 90 °С в течение 6 мин и вспенивание при 650–700 °С в течение 25 мин.

Улучшение технических характеристик возможно при использовании специальных добавок, которые способствуют формированию высокопористой структуры пеносиликатов. В работах С. Н. Леоновича и др. показано, что практически любая добавка, вводимая в состав жидкого стекла, воздействует на формирование пиропластической массы щелочно-силикатной сырьевой смеси и изменяет свойства готового материала [19, 20]. Доломит — широко известный материал, который используется в качестве вспенивающего агента стекломассы и позволяет получить строительные изделия высокого

качества [13, 21–24]. С целью улучшения технических характеристик щелочно-силикатного вспененного материала в состав шихты вводили измельченный доломит в количестве 5–15% масс.

В табл. 2 представлены результаты исследований некоторых технических свойств пеносиликатного материала на основе кремнеземсодержащего сырья с добавкой доломита.

Полученные результаты исследования влияния доломита на эксплуатационные характеристики пеносиликата показали, что добавка измельченного доломита выполняет функцию и модифицирующей добавки, и наполнителя, способствуя формированию высокопористой структуры и, как следствие, снижению теплопроводности. Введение в состав шихты доломита в количестве 5–15 % позволяет получить пеносиликаты с низкой теплопроводностью 0,048–0,054 Вт/(м · К), что характеризует их как качественные теплоизоляторы. Однако согласно проведенным нами исследованиям, рекомендуемое количество добавки в виде доломита не должно превышать 10 % масс. из-за интенсивного порообразования, приводящего к формированию крупных пор в объеме пеносиликата, что приводит к снижению прочностных свойств и увеличению водопоглощения. Регулирование состава шихты и оптимального температурного режима синтеза пеносиликатов дает возможность получать материалы с широким диапазоном свойств.

Из приведенных данных следует, что показатель теплопроводности в таких системах имеет

низкие значения для теплоизоляционных материалов. Очевидно, это связано с формированием высокопористой структуры пеносиликата. Можно отметить незначительное изменение этого показателя при различном соотношении компонентов шихты в достаточно широком интервале их сочетания.

Методом сканирующей электронной микроскопии исследована структура образцов. На рисунке представлены микрофотографии пеносиликатов, полученных при различном увеличении. Из фотографий видно, что структура вспененных материалов характеризуется хаотично распределенными, различными по форме и размеру порами. Межпоровая перегородка покрыта множественными отверстиями различной формы. Толщина перегородок 12,45–51,20 мкм. Внутрпоровая поверхность вся испещрена включениями различного характера. В образцах, полученных с добавлением доломита, визуализируется значительное количество минеральной составляющей нитевидной и игольчатой конфигурации, которая, возможно, оказывает армирующее действие.

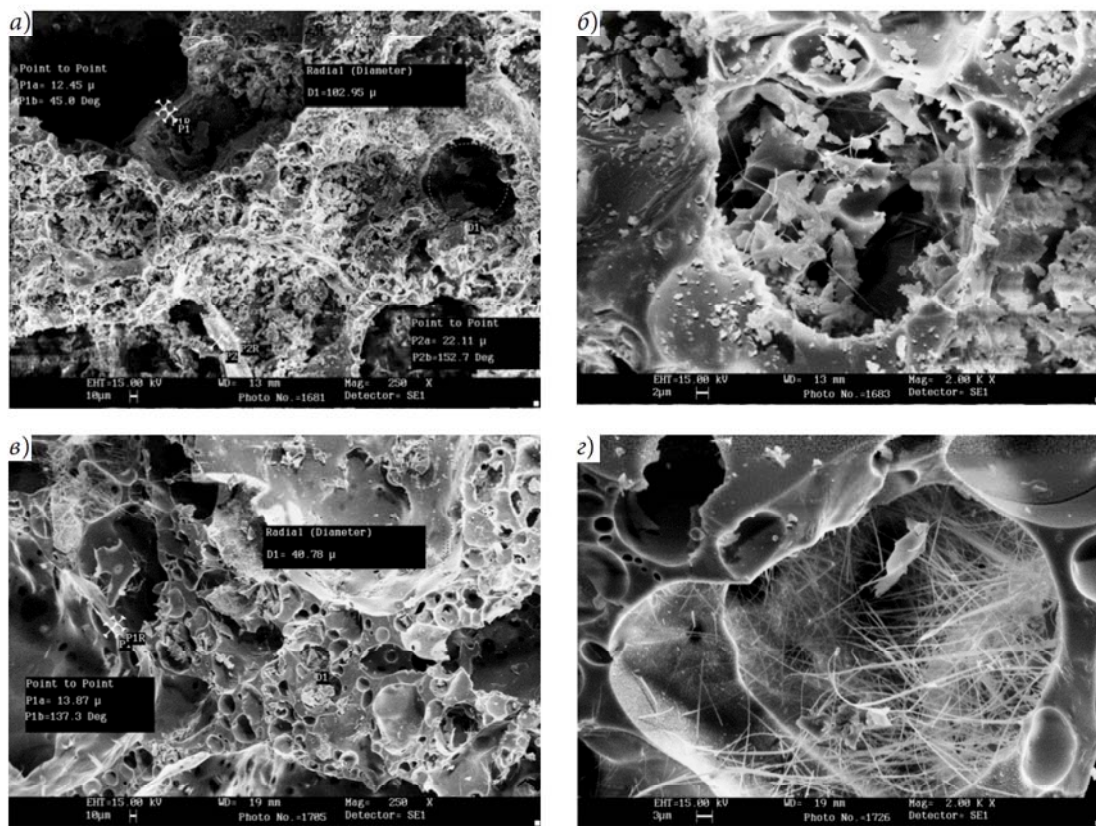
Таким образом, проведенные исследования показали возможность получения вспененных материалов с улучшенными физико-техническими свойствами на основе кремнеземсодержащих отходов с добавлением доломита. Изучено влияние доломита и технологических режимов на основные технические свойства пеносиликатов. Показано, что наиболее эффективным

Таблица 2

Состав и свойства пеносиликатов с добавлением доломита

№	Содержание компонентов, % масс.					Температура вспенивания, °С	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/(м · К)
	Мкр.1	Мкр.2	Na <sub>2</sub> O	АНХ	Доломит*			
1	–	67	18	15	5	700	0,41	0,050
2	–	67	18	15	7,5	700	0,42	0,049
3	–	67	18	15	10	700	0,44	0,048
4	–	67	18	15	12,5	700	0,46	0,048
5	–	67	18	15	15	700	0,48	0,048
6	65	–	20	15	5	650	0,38	0,049
7	65	–	20	15	7,5	650	0,40	0,050
8	65	–	20	15	10	650	0,42	0,048
9	65	–	20	15	12,5	650	0,42	0,054
10	65	–	20	15	15	650	0,43	0,052

\* Примечание. Обозначения те же, что и в табл. 1. Содержание доломита дано сверх 100 %.



Микроструктура пеносиликатов без активных добавок (а, б) и с добавкой доломита (в, г)

по комплексу свойств получаемых пеноматериалов является введение в состав шихты доломита в количестве 5–10 %. По своим теплофизическим свойствам полученные материалы полностью соответствуют нормативным требованиям на материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Применение разрабатываемых теплоизоляционных материалов должно обеспечить повышенное энергосбережение зданий и построек в суровом климате регионов Арктической зоны РФ и снизить толщину и массу стен и других ограждающих конструкций.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность ведущему научному сотруднику В. В. Семущину за проведение микроисследований.

#### Библиографический список

1. Чуркин О. Е., Гилярова А. А. Освоение отходов горного производства как инвестиционное направление развития горнорудной промышленности Кольского полуострова // Экономика, предпринимательство и право. 2020. Т. 10, № 3. С. 905–916.

2. Казанцева Л. К., Стороженко Г. И. Особые свойства пеностекла из природного сырья // Строительные материалы. 2014. № 9. С. 34–39.

3. Пат. 2246457 Российская Федерация, МПК7 C03C 11/00, C03C 1/00. Шихта для получения пеностекляного облицовочного материала / В. Т. Калинин, В. Н. Макаров, О. В. Суворова, Д. В. Макаров, Н. М. Кулькова; Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева Кольского научного центра РАН. № 2003118339/03; заявл. 17.06.2003; опубл. 20.02.2005.

4. Манакова Н. К., Суворова О. В. Теплоизоляционные материалы на основе кремнеземсодержащего сырья // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. № 5 (31). С. 562–564.

5. Манакова Н. К., Суворова О. В. Теплоизоляционный материал на основе кремнеземсодержащих отходов переработки рудного сырья Кольского полуострова // Журнал прикладной химии. Т. 85, № 11. 2012. С. 1741–1745.

6. Кутугин В. А., Лотов В. А., Ревенко В. В. Пеностекло на основе природного и техногенного аморфного кремнезема // Техника и технология силикатов. 2016. Т. 23, № 3. С. 24–29.

7. Кутугин В. А., Лотов В. А., Губанов А. В., Курсилев К. В. Пористые изделия с жесткой структурой на основе природного аморфного кремнезема // Стекло и керамика. 2018. № 1. С. 13–18.

8. Мелконян Р. Г., Макаров Д. В., Суворова О. В. Экологические проблемы использования техногенного сырья в производстве стекла и керамики. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2016. 224 с.

9. Мелконян Р. Г., Казьмина О. В. Использование отходов горной промышленности для изготовления пеностекла и пеноматериалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № S1. С. 547–571.

10. Мелконян Р. Г. Экологические проблемы использования техногенного сырья в производстве силикатных материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № S1. С. 499–510.

11. Мелконян Р. Г., Суворова О. В., Макаров Д. В., Мананова Н. К. Производство стеклообразных пеноматериалов: проблемы и решения // Вестник Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 10. № 1. С. 133–156.

12. Леонович С. Н., Шукин Г. Л., Беланович А. Л., Савенко В. П., Карпушенков С. А. Особенности получения щелочно-силикатных теплоизоляционных материалов // Наука и техника. 2012. № 6. С. 45–50.

13. Пат. 2655499 Российская Федерация, МПК С03С 11/00. Состав шихты для получения вспененного теплоизоляционного материала / В. А. Кутугин, В. А. Лотов, К. В. Курсилев. № 2017121975; заявл. 22.06.2017; опубл. 28.05.2018.

14. Маневич В. Е., Никифоров Е. А., Мешков А. В., Сенник Н. А., Субботин Р. К. Подготовка пенообразующей смеси для получения пеностекла на основе диатомита // Строительные материалы. 2012. № 7. С. 100–102.

15. Жималов А. А., Никишонкова О. А., Спиридонов Ю. А., Кособудский И. Д., Викулова М. А. Физико-химические исследования альтернативных сырьевых материалов — опок для производства пеностекла и пеноматериалов // Стекло и керамика. 2018. № 10. С. 15–18.

16. Гольцман Б. М., Яценко Е. А., Комунжиева Н. Ю., Геращенко В. С. Синтез пеностекла на основе природного кремнеземистого сырья — опоки // Техника и технология силикатов. 2019. Т. 26, № 4. С. 102–106.

17. Жакипбаев Б. Е., Спиридонов Ю. А., Сигаев В. Н. Использование горных пород для получения пеностекла // Стекло и керамика. 2013. № 4. С. 47–50.

18. Абдрахимов В. З., Петрова Т. М., Колпаков А. В. Исследование теплопроводности теплоизоляционных изделий из отходов производства без применения традиционных природных материалов // Огнеупоры и техническая керамика. 2012. № 1–2. С. 49–52.

19. Леонович С. Н., Шукин Г. Л., Беланович А. Л., Савенко В. П., Карпушенков С. А. Формирование пористой структуры силикатных теплоизоляционных материалов // Строительные материалы. 2012. № 4. С. 84–87.

20. Лотов В. А., Кутугин В. А. Формирование пористой структуры пеносиликатов на основе жидкостекольных композиций // Стекло и керамика. 2008. № 1. С. 6–10.

21. Пат. 2361829 Российская Федерация, МПК С03С 11/00. Шихта для изготовления стеклогранулята для пеностекла / В. И. Верещагин, О. В. Казьмина, А. Н. Абияка; ГОУ ВПО Томский политехнический университет. № 2007118823/03; заявл. 21.05.2007; опубл. 20.07.2009.

22. Пат. 2484029 Российская Федерация, МПК С03С 11/00. Сырьевая смесь для изготовления пеностекла / В. И. Верещагин, О. В. Казьмина, А. Н. Абияка, А. В. Аверкова, Н. А. Кузнецова; ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет. № 201114066503; заявл. 06.10.2011; опубл. 10.06.2013.

23. Пат. 2563861 Российская Федерация, МПК С03В 19/08, С03С 11/00. Способ получения мелкогранулированного пеностеклокерамического материала / А. В. Благов, Л. Г. Федяева, А. В. Федосеев; ООО «НПО „Диатомит“». № 2014127187/03; заявл. 03.07.2014; опубл. 20.09.2015.

24. Мусафирова Г. Я., Мусафиров Э. В., Лыщик М. В. Блочное пеностекло на основе стеклобоя, доломитовой муки и жидкого стекла // Техника и технология силикатов. 2017. Т. 24. № 1. С. 7–11.

## References

1. Churkin O. E., Gilyarova A. A. *Osvoenie otkhodov gornogo proizvodstva kak investitsionnoe napravlenie razvitiya gornorudnoy promyshlennosti Kol'skogo poluostrova* [Development of mining waste as an investment direction for the development of the mining industry of the Kola Peninsula]. *Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo – Economics, entrepreneurship and law*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 905–916.

2. Kazantseva L. K., Storozhenko G. I. *Osobyie svoystva penostekla iz prirodnogo syr'ya* [Special properties of foam glass from natural raw materials]. *Stroitel'nye materialy – Building materials*, 2014, no. 9, pp. 34–39.

3. Kalinnikov V. T., et al. *Shikhta dlya polucheniya penostekol'nogo oblitsovochnogo materiala* [Furnace charge or the production of foam glass facing material]. Patent RF no. 2246457, 2005.

4. Manakova N. K., Suvorova O. V. *Teploizolyatsionnyie materialy na osnove kremnezemsoderzhashchego syr'ya* [Heat-Insulating materials based on silica-containing raw materials]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN – Proceedings of the Kola scientific center of the Russian Academy of Sciences*, 2015, no. 5 (31), pp. 562–564.

5. Manakova N. K., Suvorova O. V. *Teploizolyatsionniy material na osnove kremnezemsoderzhashchikh otkhodov pererabotki rudnogo syr'ya Kol'skogo poluostrova* [Heat-

Insulating material based on silica-containing waste from processing of ore raw materials of the Kola Peninsula]. *Zhurnal prikladnoy khimii – Journal of Applied Chemistry*, 2012, vol. 85, no. 11, pp. 1741–1745.

6. Kutugin V. A., Lotov V. A., Revenko V. V. *Penosteklo na osnove prirodnogo i tekhnogenogo amorfnogo kremnezema* [Foam glass based on natural and technogenic amorphous silica]. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov – Engineering and Technology of Silicates*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 24–29.

7. Kutugin V. A., Lotov V. A., Gubanov A. V., Kursilev K. V. *Poristye izdeliya s zhestkoy strukturoy na osnove prirodnogo amorfnogo kremnezema* [Porous products with a rigid structure based on natural amorphous silica]. *Steklo i keramika – Glass and Ceramics*, 2018, no. 1, pp. 13–18.

8. Melkonyan R. G., Makarov D. V., Suvorova O. V. *Ekologicheskie problemy ispol'zovaniya tekhnogenogo syr'ya v proizvodstve stekla i keramiki* [Ecological problems of using technogenic raw materials in the production of glass and ceramics]. *Apatity, Kol'skiy nauchnyy tsentr RAN Publ.*, 2016, 224 p.

9. Melkonyan R. G., Kaz'mina O. V. *Ispol'zovanie otkhodov gornoy promyshlennosti dlya izgotovleniya penostekla i penomaterialov* [Use of mining industry waste for the manufacture of foam glass and foam materials]. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten' – Mining Information and Analytical Bulletin*, 2014, no. 1, pp. 547–571.

10. Melkonyan R. G. *Ekologicheskie problemy ispol'zovaniya tekhnogenogo syr'ya v proizvodstve silikatnykh materialov* [Ecological problems of using technogenic raw materials in the production of silicate materials]. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten' – Mining Information and Analytical Bulletin*, 2016, no. 1, pp. 499–510.

11. Melkonyan R. G., Suvorova O. V., Makarov D. V., Manakova N. K. *Proizvodstvo stekloobraznykh penomaterialov: problemy i resheniya* [Production of glassy foams: problems and solutions]. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN – Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 133–156.

12. Leonovich S. N., et al. *Osobennosti polucheniya shchelochno-silikatnykh teploizolyatsionnykh materialov* [Features of obtaining alkali-silicate heat-insulating materials]. *Nauka i tekhnika – Science and Engineering*, 2012, no. 6, pp. 45–50.

13. Kutugin V. A., Lotov V. A., Kursilev K. V. *Sostav shikhty dlya polucheniya vspennogo teploizolyatsionnogo materiala* [Furnace charge composition to obtain a foamed heat insulation material]. Patent RF, no. 2655499, 2018.

14. Manevich V. E., et al. *Podgotovka penoobrazuyushchey smesi dlya polucheniya penostekla na osnove diatomita* [Preparation of a foaming mixture for obtaining foam glass based on diatomite]. *Stroitel'nye materialy – Building materials*, 2012, no. 7, pp. 100–102.

15. Zhimalov A. A., et al. *Fiziko-khimicheskie issledovaniya al'ternativnykh syr'evykh materialov – opok dlya proizvodstva penostekla i penomaterialov* [Physico-chemical studies of flask (alternative raw material) for production of foam glass and foam materials]. *Steklo i keramika – Glass and Ceramics*, 2018, no. 10, pp. 15–18.

16. Gol'tsman B. M., Yatsenko E. A., Komunzhieva N. Yu., Gerashchenko V. S. *Sintez penostekla na osnove prirodnogo kremnezemistogo syr'ya – opoki* [Synthesis of foam glass based on flask, natural silica raw material]. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov – Engineering and Technology of Silicates*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 102–106.

17. Zhakipbaev B. E., Spiridonov Yu. A., Sigaev V. N. *Ispol'zovanie gornykh porod dlya polucheniya penostekla* [The use of rocks to obtain foam glass]. *Steklo i keramika – Glass and Ceramics*, 2013, no. 4, pp. 47–50.

18. Abdrakhimov V. Z., Petrova T. M., Kolpakov A. V. *Issledovanie teploprovodnosti teploizolyatsionnykh izdeliy iz otkhodov proizvodstva bez primeneniya traditsionnykh prirodnnykh materialov* [Investigation of thermal conductivity of heat-insulating products from production waste without using traditional natural materials]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika – Refractories and Technical Ceramics*, 2012, no. 1–2, pp. 49–52.

19. Leonovich S. N., Shchukin G. L., Belanovich A. L., Savenko V. P., Karpushenkov S. A. *Formirovanie poristoy struktury silikatnykh teploizolyatsionnykh materialov* [Formation of the porous structure of silicate heat-insulating materials]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2012, no. 4, pp. 84–87.

20. Lotov V. A., Kutugin V. A. *Formirovanie poristoy struktury penosilikatov na osnove zhidkostekol'nykh kompozitsiy* [Formation of the porous structure of foam silicates based on liquid-glass compositions]. *Steklo i keramika – Glass and Ceramics*, 2008, no. 1, pp. 6–10.

21. Vereshchagin V. I., Kaz'mina O. V., Abiyaka A. N. *Shikhta dlya izgotovleniya steklogranulyata dlya penostekla* [Furnace charge for the manufacture of glass granulate for foam glass]. Patent RF, no. 2361829, 2009.

22. Vereshchagin V. I., et al. *Syr'evaya smes' dlya izgotovleniya penostekla* [Raw material mixture for the manufacture of foam glass]. Patent RF, no. 2484029, 2013.

23. Blagov A. V., Fedyaeva L. G., Fedoseev A. V. *Sposob polucheniya melkogradulirovannogo penosteklokera-micheskogo materiala* [Method for obtaining finely granulated foam glass-ceramic material]. Patent RF, no. 2563861, 2015.

24. Musafirova G. Ya., Musafirov E. V., Lyshchik M. V. *Blochnoe penosteklo na osnove stekloboya, dolomitovoy muki i zhidkogo stekla* [Block foam glass based on cullet, dolomite flour and liquid glass]. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov – Engineering and Technology of Silicates*, 2017, vol. 24, no. 1, pp. 7–11.