

Научная статья  
УДК 666.9  
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.039

## ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫЕ ОТХОДЫ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА — ПЕРСПЕКТИВНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЯЖУЩИХ ЩЕЛОЧНОЙ АКТИВАЦИИ

**Александр Михайлович Калинин<sup>1</sup>, Елена Владимировна Калинин<sup>2</sup>,  
Екатерина Алексеевна Кругляк<sup>3</sup>, Алла Геннадьевна Иванова<sup>4</sup>**

<sup>1–4</sup>Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева  
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

<sup>1</sup>a.kalinkin@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3668-8578>

<sup>2</sup>e.kalinkina@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4538-0425>

<sup>3</sup>e.krugliak@ksc.ru

<sup>4</sup>a.ivanova@ksc.ru

### Аннотация

Приведен краткий обзор исследований по использованию горнопромышленных отходов Кольского полуострова (шлаков цветной металлургии, золы сжигания угля, хвостов обогащения руд) для получения вяжущих щелочной активации, включая геополимеры. Показана перспективность применения механоактивации и комбинирования различных видов техногенного сырья для повышения физико-механических характеристик вяжущих.

### Ключевые слова:

горнопромышленные отходы, вяжущие, щелочная активация, геополимеры, механоактивация

### Финансирование:

государственное задание по теме НИР № FMEZ-2024-0059.

### Для цитирования:

Горнопромышленные отходы Кольского полуострова — перспективное сырье для получения вяжущих щелочной активации / А. М. Калинин [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 230–234. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.039.

Original article

## MINING WASTE OF THE KOLA PENINSULA—A PROSPECTIVE RAW MATERIAL FOR PRODUCTION OF ALKALI ACTIVATED BINDERS

**Alexander M. Kalinkin<sup>1</sup>, Elena V. Kalinkina<sup>2</sup>, Ekaterina A. Kruglyak<sup>3</sup>, Alla G. Ivanova<sup>4</sup>**

<sup>1–4</sup>Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre  
“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

<sup>1</sup>a.kalinkin@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3668-8578>

<sup>2</sup>e.kalinkina@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4538-0425>

<sup>3</sup>e.krugliak@ksc.ru

<sup>4</sup>a.ivanova@ksc.ru

### Abstract

A brief review of studies on the use of mining and metallurgical waste from the Kola Peninsula (non-ferrous metallurgy slag, coal combustion ash, and ore processing tailings) for the production of alkali activated binders, including geopolymers, is provided. The prospects of using mechanical activation and combining various types of technogenic raw materials to improve the physical and mechanical properties of binders have been demonstrated.

### Keywords:

mining waste, binding materials, alkali activation, geopolymers, mechanical activation

### Funding:

State task on the topic of research No FMEZ-2024-0059.

### For citation:

Mining waste from the Kola Peninsula—a prospective raw material for production of alkali activated binders / A. M. Kalinkin [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 230–234. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.039.

## Введение

Важнейшей задачей современного строительного материаловедения является сокращение использования портландцемента. Перспективным решением этой проблемы выступает создание бесцементных вяжущих, где особое место занимают вяжущие щелочной активации, включая геополимеры. Эти материалы представляют собой композиты на основе тонкодисперсных аморфных или кристаллических силикатов и алюмосиликатов природного либо техногенного происхождения, активируемых щелочными растворами. Понятие «геополимер» изначально относилось к щелочно-активированному метакаолину, производимому путем обжига каолиновой глины [1]. Однако со временем этот термин стал применяться к обширной группе низкокальциевых алюмосиликатных полимеров, которые являются частью более широкого класса щелочеактивированных вяжущих [2]. По своим свойствам вяжущие щелочной активации не уступают, а по некоторым параметрам превосходят традиционный портландцементный бетон. Они отличаются высокой прочностью при сжатии, устойчивостью к высоким температурам, радиационной стабильностью, а также стойкостью к кислотам и морской воде. Благодаря этим качествам такие материалы могут применяться не только в строительной отрасли, они также перспективны для использования в производстве огнеупоров, для очистки сточных вод, фиксации тяжелых металлов и радиоактивных отходов [3–5].

Для Мурманской области, где накоплены значительные объемы отходов горнорудных, металлургических производств, теплоэнергетики, особую актуальность приобретает разработка вяжущих щелочной активации для потребностей строительной отрасли, позволяющих эффективно утилизировать данное техногенное сырье.

В данной работе приведен краткий обзор исследований, выполненных в ИХТРЭМС ФИЦ КНЦ РАН, по использованию горнопромышленных отходов Кольского полуострова для получения вяжущих щелочной активации, в том числе геополимеров.

## Результаты

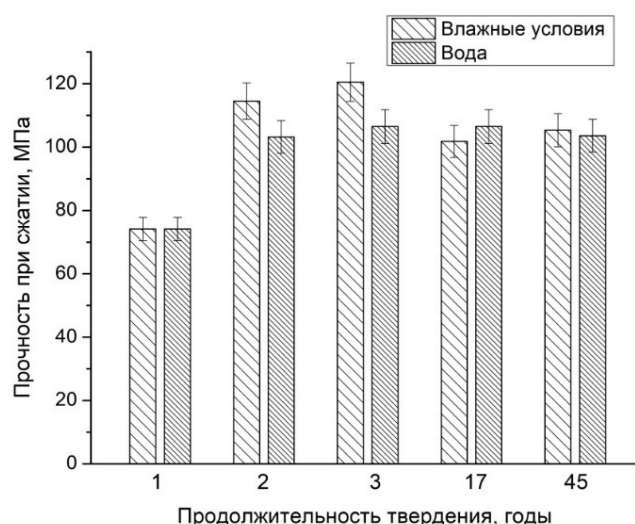
На Кольском полуострове накоплены огромные объемы магнезиально-железистого гранулированного шлака комбината «Печенганикель». Следует отметить, что медно-никелевые шлаки значительно отличаются по химическому составу от доменных, применимость которых для получения щелочеактивированных вяжущих известна давно [6]. Впервые шлакощелочные вяжущие с использованием шлаков цветной металлургии были синтезированы в Отделе технологии силикатных материалов ИХТРЭМС заслуженным строителем РФ к. т. н. Б. И. Гуревич и к. т. н. А. П. Зосиным [7].

Получение шлакощелочного вяжущего включает измельчение гранулированного магнезиально-железистого шлака и затворение его раствором жидкого стекла. Вяжущее способно твердеть в нормальных условиях, а также при пониженной температуре воздуха, что важно для заполярных регионов. В зависимости от состава, вида заполнителя и способа твердения прочность при сжатии колеблется от 50 до 100 МПа, при изгибе — 3–14 МПа. Мелкозернистый бетон на шлакощелочном вяжущем через 28 сут твердения во влажных условиях имеет прочность при сжатии 85 МПа, при изгибе — 9 МПа, при растяжении — 4 МПа. Шлакощелочной мелкозернистый бетон обладает 100 %-й сульфатостойкостью, его водонепроницаемость выше 0,8 МПа [8]. Благодаря экспериментам по получению шлакощелочных бетонов, начатых в 60-х гг. прошлого столетия [7], получены уникальные результаты по долговечности такого материала. Показано, что прочность при сжатии ~100 МПа, набранная бетонами в течение первых двух лет при твердении как во влажных условиях, так и в воде, сохраняется на этом уровне на протяжении полувека (рис. 1).

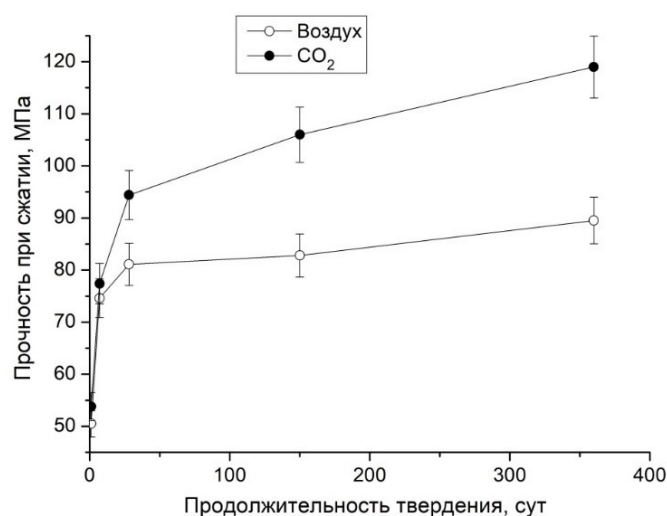
Механоактивация (МА) гранулированного медно-никелевого шлака в атмосфере  $\text{CO}_2$  приводит к поглощению молекул углекислого газа наружными слоями шлаковых частиц в виде  $\text{CO}_3$  ионов в результате действия эффекта механохимической карбонизации силикатов. По сравнению с МА шлака в воздушной среде это заметно повышает его реакционную способность в отношении жидкого стекла и прочность шлакощелочного вяжущего [9] (рис. 2).

Разработаны геополимерные композиции на основе механоактивированных в атмосфере  $\text{CO}_2$  смесей нефелинового концентрата (НК) и магнезиально-железистого шлака, а также нефелинсодержащих хвостов

апатитовой флотации (ХАФ) фабрики АНОФ-2 и этого же шлака, затворенных жидким стеклом (модуль жидкого стекла — 1,59). При влажном твердении без термообработки в течение 360 сут прочность при сжатии композиции «нефелиновый концентрат — шлак» составила 21,9 МПа (состав сырья: 70 % НК + 30 % шлак). Для смеси «ХАФ — шлак» при таких же условиях и сроке твердения максимальная прочность составила 74,9 МПа (состав сырья: 20 % ХАФ + 80 % шлак) [10].



**Рис. 1.** Прочность при сжатии бетона на основе шлакощелочного вяжущего (заполнитель — шлак комбината «Печенганикель», состав 1:1) при твердении во влажных условиях и в воде



**Рис. 2.** Прочность при сжатии шлакощелочного вяжущего, полученного на основе магнезиально-железистого шлака, механоактивированного в воздушной среде и в CO<sub>2</sub> (твердение во влажных условиях)

Доказана возможность получения высокопрочного геополимерного материала на основе механоактивированных в воздушной среде ХАФ и жидкого стекла без добавления шлака. Следует подчеркнуть, что этот материал относится к вяжущим воздушного твердения и демонстрирует прочность при сжатии до 82,7 МПа через 28 сут без применения термообработки. Наилучшие результаты были достигнуты при модуле жидкого стекла 2,77 [10].

Установлено, что хвосты обогащения сульфидных медно-никелевых руд (ХО) Кольской горно-металлургической компании, содержащие антигорит (65–75 %), могут быть использованы в качестве сырья для геополимеров. Для повышения реакционной способности ХО применялась МА в центробежно-планетарной мельнице АГО-2 в воздушной среде. Геополимерные композиции на основе механоактивированных ХО и жидкого стекла демонстрировали прочность при сжатии до 49 МПа после 28 сут воздушно-сухого твердения. Оптимальные результаты были достигнуты при содержании 4 %  $\text{Na}_2\text{O}$  в составе жидкого стекла с модулем 3,18 [11].

Низкокальцевая зола гидроудаления Апатитской ТЭЦ, содержащая стеклофазу, кварц и муллит, также была использована для синтеза геополимеров с использованием жидкого стекла (модуль — 2,05, расход — 5 мас. %  $\text{Na}_2\text{O}$  в стекле по отношению к массе сухой композиции). Для повышения реакционной способности золы применяли МА и добавку природного кальцита. Оптимальное содержание кальцита составило 5 %, что обеспечило ускорение формирования геополимерной матрицы. Прочность при сжатии геополимера на основе механоактивированной в течение 180 с смеси золы и кальцита после 7, 28 и 180 сут твердения во влажных условиях составила 35,9; 59,3 и 76,5 МПа соответственно [12].

## Выводы

Таким образом, проведенные исследования показали, что твердые отходы горно-металлургического сектора Мурманской области, а также отходы сжигания угля Апатитской ТЭЦ обладают большим потенциалом как сырье для получения вяжущих щелочной активации, включая геополимеры. Комбинирование различных видов техногенного сырья в сочетании с применением механоактивации является эффективным способом повышения прочностных показателей композиционных щелочеактивируемых вяжущих.

## Список источников

1. Davidovits J. Geopolymer chemistry and applications, 5th ed.; Institut Géopolymère: Saint-Quentin, France, 2020. P. 23–208.
2. Provis J. L., Duxson P., Kavalerova E. et al. Historical aspects and overview. In alkali-activated materials: state of the art report of RILEM TC 224-AAM; Provis, J. L., van Deventer, J. S. J., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2014. P. 11–58.
3. Kolade A. S., Ikotun B. D., Oyejobi D. O. A Review of the chemistry, waste utilization, mix design and performance evaluation of geopolymer concrete // Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering. 2025. P. 1–34.
4. Nodehi M., Taghvae V. M. Alkali-activated materials and geopolymer: a review of common precursors and activators addressing circular economy // Circ. Econ. Sustain. 2022. Vol. 2. P. 165–196.
5. Rakhimova N. Recent advances in alternative cementitious materials for nuclear waste immobilization: a review // Sustainability 2023. 15. 689.
6. Purdon A.O. The action of alkalis on blast-furnace slag // J. Soc. Chem. Ind. Trans. Commun. 1940. Vol. 59. P. 191–202.
7. Гуревич Б. И., Зосин А. П. Вяжущее на основе никелевого шлака и жидкого стекла. // Metallургические шлаки Мончи и Печенги / под ред. Д. Д. Теннера. Л.: Наука, 1965. С. 147–167.
8. Гуревич Б. И. Вяжущие вещества из техногенного сырья Кольского полуострова. Апатиты: Изд. Кольского НЦ РАН, 1996. 179 с.
9. Kalinkin A. M., Kumar S., Gurevich B. I., Alex T. C., Kalinkina E. V., Tyukavkina V. V., Kalinnikov V. T., Kumar R. Geopolymerisation behavior of Cu-Ni slag mechanically activated in air and in  $\text{CO}_2$  atmosphere // International Journal of Mineral Processing. 2012. Vols. 112–113. P. 101–106.
10. Gurevich B. I., Kalinkina E. V., Kalinkin A. M. Binding properties of mechanically activated nepheline containing mining waste // Minerals. 2020. 10 (1). 48.
11. Kalinkina E. V., Gurevich B. I., Kalinkin A. M. Alkali-activated binder based on milled antigorite // Minerals. 2018. 8 (11). 503.
12. Калинин А. М., Гуревич Б. И., Калинкина Е. В., Залкинд О. А., Иванова А. Г., Кругляк Е. А. Получение геополимеров с использованием механоактивированной смеси золы уноса с кальцитом и жидкого стекла // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. 18. С. 193–197.

## References

1. Davidovits J. *Geopolymer chemistry and applications*, 5th ed.; Institut Géopolymère: Saint-Quentin, France, 2020, pp. 23–208.
2. Provis J. L., Duxson P., Kavalerova E. et al. *Historical aspects and overview*. In alkali-activated materials: state of the art report of RILEM TC 224-AAM; Provis, J. L., van Deventer, J. S. J., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2014, pp. 11–58.
3. Kolade A. S., Ikotun B. D., Oyejobi D. O. A review of the chemistry, waste utilization, mix design and performance evaluation of geopolymer concrete. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2025, pp. 1–34.
4. Nodehi M., Taghvaei V. M. Alkali-activated materials and geopolymer: a review of common precursors and activators addressing circular economy. *Circ. Econ. Sustain.*, 2022, vol. 2, pp. 165–196.
5. Rakhimova N. Recent advances in alternative cementitious materials for nuclear waste immobilization: a review. *Sustainability*, 2023, 15, 689.
6. Purdon A. O. The action of alkalis on blast-furnace slag. *J. Soc. Chem. Ind. Trans. Commun.*, 1940, vol. 59, pp. 191–202.
7. Gurevich B. I., Zosin A. P. Viazhushchee na osnove nikel'evogo shlak i zhidkogo stekla [Binders from man-made raw materials of the Kola Peninsula]. *Metallurgicheskie shlaki Monchi i Pechengi* [Metallurgical slag of Moncha and Pechenga]. Leningrad, Nauka, 1965, pp. 147–167. (In Russ.).
8. Gurevich B. I. *Viazhushchie veshchestva iz tekhnogennogo syria Kolskogo poluostrova* [Binders Produced from Technogeneous Raw Materials of the Kola Peninsula]. Apatity, Kola Science Center of RAS, 1996, 179 p. (In Russ.).
9. Kalinkin A. M., Kumar S., Gurevich B. I., Alex T. C., Kalinkina E. V., Tyukavkina V. V., Kalinnikov V. T., Kumar R. Geopolymerisation behavior of Cu-Ni slag mechanically activated in air and in CO<sub>2</sub> atmosphere. *International Journal of Mineral Processing*, 2012, vols. 112–113, pp. 101–106.
10. Gurevich B. I., Kalinkina E. V., Kalinkin A. M. Binding properties of mechanically activated nepheline containing mining waste. *Minerals*, 2020, 10 (1), 48.
11. Kalinkina E. V., Gurevich B. I., Kalinkin A. M. Alkali-activated binder based on milled antigorite. *Minerals*, 2018, 8 (11), 503.
12. Kalinkin A. M., Gurevich B. I., Kalinkina E. V., Zalkind O. A., Ivanova A. G., Kruglyak E. A. Poluchenie geopolimerov s ispolzovaniem mekhanoaktivirovannoi smesi zoly unosa s kaltsitom i zhidkogo stekla [Production of geopolymers using a mechanically activated mixture of fly ash with calcite and liquid glass]. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi 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], 2021, vol. 18, pp. 193–197. (In Russ.).

## Информация об авторах

**А. М. Калинин** — доктор химических наук, главный научный сотрудник;  
**Е. В. Калинкина** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;  
**Е. А. Кругляк** — аспирант, инженер 1-й категории;  
**А. Г. Иванова** — ведущий инженер.

## Information about the authors

**A. M. Kalinkin** — DSc (Chemistry), Principal Researcher;  
**E. V. Kalinkina** — PhD (Engineering), Senior Researcher;  
**E. A. Kruglyak** — Postgraduate Student, Engineer 1st category;  
**A. G. Ivanova** — Leading Engineer.

Статья поступила в редакцию 24.06.2025; одобрена после рецензирования 15.07.2025; принята к публикации 29.07.2025.  
The article was submitted 24.06.2025; approved after reviewing 15.07.2025; accepted for publication 29.07.2025.