(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

**УДК:** 666.965.4

10.70769/3030-3214.SRT.4.3-1.2026.14

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

# ТЕХНОГЕННЫЕ РЕСУРСЫ ПРИАРАЛЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ВИДОВ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ ВЯЖУЩИХ



***Якубов Юсуфбой Хасанович***

*Базовый докторант 2-го курса (PhD), Ургенчский государственный университет имени Абу Райхана Беруни, Ургенч, Узбекистан.*
*E-mail: yyoqubov97@gmail.com*
*ORCID ID: 0000-0003-3852-3141*
*Science ID: FXR-0425-0006*



***Рузметова Аида Шоназаровна***

*Доктор философии (PhD) по техническим наукам, доцент, Ургенчский государственный университет имени Абу Райхана Беруни, Ургенч, Узбекистан*
*E-mail: aida0330@list.ru*
*ORCID ID: 0009-0004-1008-4057*
*Science ID: FXR-0925-0005*



***Матчанов Шерзад Камилович***

*Кандидат технических наук, доцент, Ургенчский государственный университет имени Абу Райхана Беруни, Ургенч, Узбекистан*
*E-mail: sherzadkamilovich@gmail.com*
*ORCID ID: 0000-0003-0539-3045*
*Science ID: FXR-0126-0003*

***Аннотация.*** *В данной статье рассмотрены научно-практические основы переработки твердых промышленных и строительных отходов, образующихся в Приаральском регионе, а также получения из них геополимерных вяжущих материалов. В ходе исследования был проведен комплексный анализ твёрдых отходов АО «Тахиаташская ТЭС» и строительных остатков (бетона, кирпича, стекла), скопившихся на полигонах региона. В ходе исследования изучены статистические данные, по которым выявлено, что в регионе ежегодно образуется 697–920 тыс. тонн твердых отходов, из которых 70–75% захоранивается на полигонах. В результате сравнительного изучения сырьевых материалов было доказано, что бетонные отходы являются наиболее оптимальным и стабильным доминирующим сырьем для синтеза геополимеров. Также был проведен анализ кодов ТН ВЭД (HS 2523, HS 681099) импортируемых в нашу страну специальных цементов и изделий из искусственного камня, что позволило обосновать экономическую эффективность организации местного производства геополимеров.*

***Ключевые слова:*** *геополимер, Тахиаташская ТЭС, твердые отходы, бетонные отходы, сырьевая база, импорт.*

Received: 20.09.2026 | Accepted: 06.10.2026 | Issue publication: 10.10.2026

# YANGI TURDAGI GEOPOLIMER BOG‘LOVCHILARNI OLISH UCHUN OROLBO‘YI TEXNOGEN RESURSLARI

***Yakubov Yusufboy Xasan o‘g‘li***

*2-bosqich tayanch doktoranti (PhD), Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti, Urganch, O‘zbekiston*

***Ruzmetova Aida Shonazarovna***

*Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), dotsent, Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti, Urganch, O‘zbekiston*

***Matchanov Sherzad Kamilovich***

*Texnika fanlari nomzodi, dotsent, Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti, Urganch, O‘zbekiston*

***Annotatsiya.*** *Ushbu maqolada Orolbo‘yi mintaqasida hosil bo‘ladigan qattiq sanoat va qurilish chiqindilarini qayta ishlash, shuningdek, ulardan geopolimer bog‘lovchi materiallar olishning ilmiy-amaliy asoslari ko‘rib chiqilgan. Tadqiqot davomida “Taxiatosh IES” AJning qattiq chiqindilari hamda mintaqa poligonlarida to‘plangan qurilish qoldiqlari (beton, g‘isht, shisha) kompleks tahlil qilindi. Tadqiqot jarayonida statistik ma'lumotlar o‘rganilib, mintaqada har yili 697–920 ming tonna qattiq chiqindi hosil bo‘lishi va ularning 70–75 foizi poligonlarga ko‘milishi aniqlandi. Xomashyo materiallarini qiyosiy o‘rganish natijasida beton chiqindilari geopolimerlar sintezi uchun eng maqbul va barqaror asosiy xomashyo ekanligi isbotlandi. Shuningdek, mamlakatimizga import qilinadigan maxsus sementlar va sun’iy toshdan yasalgan buyumlarning TIF TN kodlari (HS 2523, HS 681099) tahlil qilindi, bu esa geopolimerlarni mahalliy ishlab chiqarishni tashkil etishning iqtisodiy samaradorligini asoslash imkonini berdi.*
***Kalit so‘zlar:*** *geopolimer, Taxiatosh IES, qattiq chiqindilar, beton chiqindilari, xomashyo bazasi, import.*

# TECHNOGENIC RESOURCES OF THE ARAL SEA REGION FOR OBTAINING NEW TYPES OF GEOPOLYMER BINDERS

***Yakubov Yusufboy Khasanovich***
*2nd-year basic doctoral student (PhD), Urgench State University named after Abu Rayhan Beruni, Urgench, Uzbekistan*

***Ruzmetova Aida Shonazarovna***
*Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, Associate Professor, Urgench State University named after Abu Rayhan Beruni, Urgench, Uzbekistan*

***Matchanov Sherzad Kamilovich***
*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Urgench State University named after Abu Rayhan Beruni, Urgench, Uzbekistan*

***Abstract.*** *This article discusses the scientific and practical foundations for recycling solid industrial and construction waste generated in the Aral Sea region, as well as the production of geopolymer binders from them. During the research, a comprehensive analysis of solid waste from JSC “Takhiatash TPP” and construction residues (concrete, brick, glass) accumulated in the region's landfills was conducted. The study examined statistical data revealing that 697,000–920,000 tons of solid waste are generated annually in the region, of which 70–75% is disposed of in landfills. As a result of a comparative study of raw materials, it was proven that concrete waste is the most optimal and stable predominant raw material for the synthesis of geopolymers. Additionally, an analysis of the HS codes (HS 2523, HS 681099) for special cements and artificial stone products imported into our country was carried out, which made it possible to justify the economic efficiency of establishing local geopolymer production.*
***Keywords:*** *geopolymer, Takhiatash TPP, solid waste, concrete waste, raw material base, import.*

**Введение.** Современная индустрия строительных материалов переживает беспрецедентные экологические и технологические изменения. Традиционный процесс производства портландцемента обуславливает около 7–9% глобальных выбросов $CO_2$ в мире, а процесс обжига клинкера требует сверхвысоких температур до 1450 °C, в связи с чем расходуется огромное количество тепловой энергии [1]. В целях снижения этой экологической нагрузки исследователями изучаются способы и методы получения экологически чистых вяжущих материалов, одним из которых являются геополимеры, так как их производство резко сокращает углеродный след до 80% и более [2].

Для Республики Узбекистан, в частности для Хорезмской области и Республики Каракалпакстан, крайне уязвимых в экологическом отношении из-за кризиса Аральского моря, переход экономики на модель замкнутого цикла и переработка отходов являются жизненной необходимостью [3]. В настоящее время отходы стекла, кирпича и бетона, имеющие огромные запасы в регионе, но характеризующиеся крайне низким уровнем переработки, сбрасываются напрямую на полигоны [4]. Между тем, поскольку отходы строительства и сноса содержат большое количество оксидов кремния $SiO_2$ и алюминия

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

$Al_2O_3$, они служат идеальным сырьем для синтеза геополимеров [2].

Основной целью данной статьи является анализ статистики отходов региона Приаралья, а также оценка степени пригодности данных местных твердых отходов для синтеза геополимерных материалов.

**Литературный анализ и методы.** В ходе исследования были собраны данные статистики твердых промышленных и строительных отходов, образовавшихся в Приаральском регионе в 2020–2025 годах, из баз данных Агентства статистики при Президенте Республики Узбекистан и Министерства экологии [5–7].

В ходе исследования изучены физико-химические свойства четырёх видов твёрдых отходов: золы-уноса Тахиаташской ТЭС, стеклобоя, обломков цементного строительного бетона и обожжённого кирпича. Зола-унос Тахиаташской ТЭС была исследована в качестве дополнительного источника алюмосиликатов благодаря своей высокой пуццолановой активности [2, 8]. Для стеклобоя (источника аморфного кремнезема), обожжённого кирпича (кальцинированного алюмосиликата) и обломков строительного бетона [9] растворимость в щелочной среде, в частности в смеси гидроксида натрия (NaOH) и жидкого стекла (силиката натрия), пористость и особенности структурообразования были изучены сравнительным методом с опорой на аналогичные исследования в мировой практике, а также на современные методы структурного анализа, такие как рентгенофлуоресцентный (XRF), рентгенофазовый (XRD) и растровый электронный микроскоп (SEM) [10]. Соответствие активированных композиционных материалов стандартам оценивалось на основе международных стандартов ASTM [11, 12].

**Результаты.** В процессе деятельности Тахиаташской тепловой электростанции (ТЭС) и демонтажа старых энергоблоков наблюдается выброс в атмосферу различных газообразных эмиссий и образование разнообразных промышленных отходов (рис. 1). Как видно из графических данных, отходы заметно различаются по своему составу и количеству. Наряду с газами, выбрасываемыми в атмосферу, они включают минеральные, металлические, нефтепродукты и другие виды отходов, образующиеся в результате строительно-демонтажных работ.

Среди данных отходов особую значимость для синтеза геополимерных материалов имеет зольный остаток. Однако основным топливом Тахиаташской ТЭС является природный газ, а угольное топливо не применяется. По этой причине образования традиционных золо-шлаковых отходов, образующихся при сжигании угля, не ожидается. В результате использования мазута в качестве резервного топлива на станции в ограниченном количестве образуется зола в виде остатка от сгорания мазута. Количество данной золы наглядно показано на графике и составляет 0,35 тонны (350 кг) в год (рис. 1).

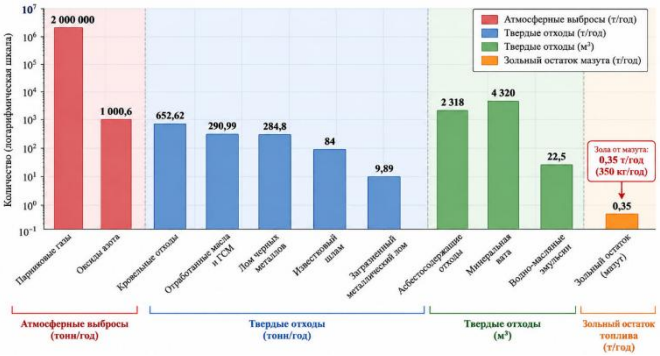



***Рис.1. Количество выбросов и отходов, образующихся в результате деятельности Тахиаташской ТЭС и демонтажа старых энергоблоков.***

Исходя из этого, несмотря на большой общий объем отходов Тахиаташской ТЭС, в качестве сырья для получения геополимерного вяжущего целесообразно целенаправленно выделять и изучать ту фракцию золы, минеральный состав и реакционная способность которой подтверждены соответствующими исследованиями.

С другой стороны, значительную часть твердых отходов, образующихся в Приаральском регионе, составляют строительные и промышленные остатки — отходы бетона, кирпича и стекла. Ежегодно в регионе формируется от 697 тысяч до 920 тысяч тонн твердых отходов, из которых 70–75% отправляются напрямую на полигоны без какой-

либо переработки. Именно этот огромный объем остатков бетона, стекла и кирпича, скапливающийся на полигонах, служит альтернативной и стабильной сырьевой базой для производства геополимеров в регионе. Годовая динамика общего объема твердых отходов, образовавшихся в Приаральском регионе в период 2020–2025 годов, а также распределение их переработанной и захороненной на полигонах частей наглядно показаны на рис. 2.

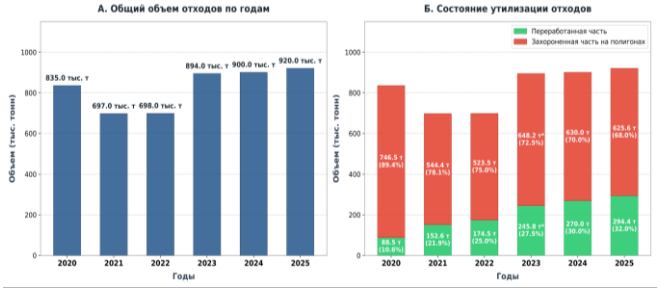



***Рис. 2. Годовая динамика и состояние утилизации твердых отходов в Приаральском регионе:***

*А — Общий объем отходов; В — Соотношение переработанной и захороненной на полигонах частей.*

Среди отходов Приаральского региона и Тахиаташской ТЭС были выделены 4 оптимальных материала, способных вступать в реакцию геополимеризации: отходы бетона, отходы кирпича, отходы стекла и зола Тахиаташской ТЭС.

Для их детального изучения было проведено комплексное исследование отходов, включающее анализ химического состава (табл. 1) и рентгенофазовый анализ (XRD) (рис. 3).

Таблица 1.

***Химический состав техногенных отходов Приаральского региона (мас. %)***

| Сырьевой материал | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | $Fe_2O_3$ | MgO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $SO_3$ | $TiO_2$ | ППП |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Бетонные отходы | 53.35 | 10.00 | 23.90 | 4.53 | 3.04 | 1.79 | 1.99 | 0.56 | 0.31 | 0.530 |
| Отходы кирпича | 48.47 | 32.18 | 4.57 | 2.93 | 4.19 | 3.79 | 3.63 | — | — | 0.240 |
| Стекло (содово-изв.) | 68.29 | 2.05 | 11.18 | — | 1.95 | 16.41 | — | — | — | 0.120 |
| Зола ТЭС «Тахиташ» | 54.99 | 24.94 | 4.41 | 8.01 | 2.10 | 1.70 | 0.03 | 0.04 | 0.03 | 3.750 |

Химический состав четырех исследуемых видов сырья (отходов бетона, кирпича, стекла и золы Тахиаташской ТЭС), определенный методом XRF, обобщен в таблице 1.

Анализ полученных данных показывает, что исследуемые отходы характеризуются различным соотношением основных породообразующих и технологически активных оксидов, что обусловлено их происхождением и исходным составом. Вместе с тем для большинства образцов характерно значительное содержание $SiO_2$, $Al_2O_3$ и CaO, благодаря чему данные материалы представляют интерес в качестве компонентов минеральных вяжущих и композиционных строительных материалов.

В исследованных бетонных отходах содержание $SiO_2$ составляет 53.35 мас. %, $Al_2O_3$ — 10.00 мас. %, а CaO — 23.90 мас. %. Значительное количество CaO обусловлено присутствием продуктов гидратации цемента, прежде всего кальциевых силикатных и кальциевых алюминатных фаз, а также карбонизированных соединений кальция. Содержание $Fe_2O_3$ составляет 4.53 мас. %, MgO — 3.04 мас. %, $Na_2O$ — 1.79 мас. %, $K_2O$ — 1.99 мас. %. Наличие щелочных оксидов и сернистых соединений ($SO_3$ — 0.56 мас. %) необходимо учитывать при разработке составов вяжущих, поскольку они могут влиять на процессы фазообразования и гидратации.

Как видно из дифрактограмм, зола ТЭС (а), бетонные (б) и кирпичные (в) отходы имеют ярко выраженную кристаллическую структуру с преобладанием интенсивных пиков кварца. В отличие от них, отходы стекла (г) характеризуются типичным широким аморфным гало в диапазоне 2θ=20–30°, что свидетельствует об отсутствии кристаллической решетки и подтверждает их высокую реакционную способность в щелочной среде.

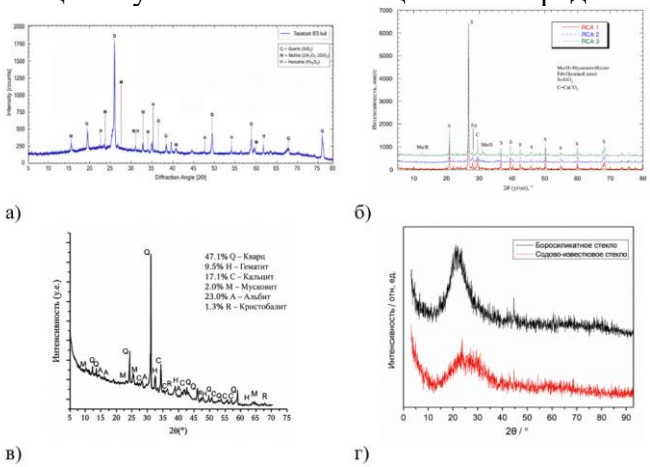



***Рис.3. Рентгенограммы (XRD) исследуемых твердых отходов:***

*а) зола Тахиаташской ТЭС; б) бетонные отходы; в) отходы кирпича; г) отходы стекла.*

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

В ходе исследования также изучен потенциал завоза в Узбекистан геополимерных вяжущих материалов (рис.4).

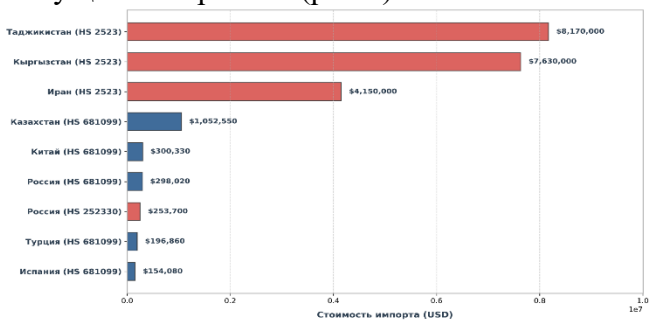



***Рис.4. Распределение стоимости импорта Республики Узбекистан по искусственному камню и специальным цементам в разрезе стран (2025 год).***

Как видно из графика, специальные цементы и изделия из искусственного камня, близкие к геополимерам, импортируются в Узбекистан под двумя различными кодами ТН ВЭД (рис. 4): HS 681099 («Изделия из цемента, бетона или искусственного камня») и HS 2523 («Цементы, включая специальные и глиноземистые цементы»). По итогам 2025 года на импорт продукции по коду HS 681099 было потрачено более 2 миллионов долларов, а на импорт цементов по коду HS 2523 — 25,8 миллиона долларов валютных средств, что свидетельствует о чрезвычайной экономической актуальности налаживания импортозамещающего местного производства геополимеров [13].

**Заключения.** Таким образом, установлено, что значительная часть твёрдых отходов Приаральского региона захоранивается, создавая экологическую нагрузку и приводя к потере ценного вторичного сырья. Ограниченное образование золы Тахиаташской ТЭС обусловливает необходимость акцентировать внимание на переработке строительных отходов. По результатам сравнительного анализа бетонные отходы определены как перспективное сырьё для получения геополимерных вяжущих благодаря высокому содержанию кальций- и кремнийсодержащих компонентов. Комплексное использование местных техногенных отходов позволит получать строительные материалы с заданными свойствами, снизить объёмы захоронения отходов и сократить зависимость от импортируемых специальных цементов и изделий.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] da Silva, L. C., de Azevedo, A. R. G., Marvila, M. T., & Vieira, C. M. F. (2026). Sugarcane bagasse ash as an alkali activator: Production and characterization of geopolymer mortars with partial sodium silicate replacement. Materials and Structures, 59, Article 318. https://doi.org/10.1617/s11527-026-03210-5

[2] Mollaei, S., Fahmi, A., Jahani, D., Babaei Golsefidi, Z., Babaei, R., & Hanafi, M. R. (2023). A predictive model for the strength of a novel geopolymer construction material produced by autoclaved aerated concrete waste. International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology, 14(1), 148–167. https://doi.org/10.30880/ijscet.2023.14.01.015

[3] Kamola, M. (2026). Circular economy in Uzbekistan: Transitioning from linear extraction to regenerative growth. American Journal of Economics and Business Management, 9(5), 55–62. https://doi.org/10.31150/ajebm.v9i5.4899

[4] Madraximova, Sh. B. (2025). Ensuring innovative economic security in the Khorezm region: Waste recycling and circular economy. Yashil Iqtisodiyot Va Taraqqiyot Jurnali, 3(12), 16–20. https://doi.org/10.5281/zenodo.17999458

[5] O‘zbekiston Respublikasi Milliy Statistika qo‘mitasi. (2026). Yil davomida chiqarilgan qurilish chiqindilari. SIAT. https://siat.stat.uz/data/3750/?lang=uz

[6] National Statistics Committee of the Republic of Uzbekistan. (2026, June 30). Removed in a year, solid household waste [Statistical dataset]. SIAT—Statistical Data Portal of the Republic of Uzbekistan. https://siat.stat.uz/data/3748/?lang=en

[7] Proreforms. (2023). O‘zbekistonda chiqindilarni boshqarish va tizimni rivojlantirish uchun nima qilish kerak? Public Policy Reforms Platform. https://surl.li/nsdpku
[8] Asian Development Bank. (n.d.). Takhiatash Power Plant Efficiency Improvement Project (Project No. 45306-001). Retrieved September 15, 2026, from https://www.adb.org/projects/45306-001/main
[9] Tahwia, A. M., Abdellatief, M., Salah, A., et al. (2025). Valorization of recycled concrete powder, clay brick powder, and volcanic pumice powder in sustainable geopolymer concrete. Scientific Reports, 15, Article 11049. https://doi.org/10.1038/s41598-025-93598-x
[10] Rahimpour, H., Amini, A. B., Sharifi, F., et al. (2024). Facile fabrication of next-generation sustainable brick and mortar through geopolymerization of construction debris. Scientific Reports, 14, Article 10914. https://doi.org/10.1038/s41598-024-61688-x
[11] Bachirat, Y., Elouafi, A., & Tizliouine, A. (2024). Structural, morphological, thermal and mechanical study of a geopolymer based on metakaolin mixed with Oujda clay. Engineering Proceedings, 67(1), Article 43. https://doi.org/10.3390/engproc2024067043
[12] Dai, S., Wang, H., An, S., & Yuan, L. (2022). Mechanical properties and microstructural characterization of metakaolin geopolymers based on orthogonal tests. Materials, 15(8), Article 2957. https://doi.org/10.3390/ma15082957
[13] World Bank. (2024). Uzbekistan imports of articles of cement, of concrete or of artificial (HS code 681099) by country in 2024. World Integrated Trade Solution (WITS). https://surl.li/tfpgpy

**Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article**

Якubов, Ю. Х., Рузметова, А. Ш., & Матчанов, Ш. К. (2026). Техногенные ресурсы Приаралья для получения новых видов геополимерных вяжущих. Цифровые технологии в промышленности, 4(3–1). https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3-1.2026.14