



**Б.Т. Фылымханов<sup>1</sup>, А.Ж. Кожанова<sup>1</sup>, А.А. Амитова<sup>1</sup>, М.А. Елубай<sup>2</sup>, Г.С. Айткалиева<sup>\*</sup>**

<sup>1</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева, 050012, Республика Казахстан, г.Алматы, ул. Сатпаева 22

<sup>2</sup>Торайгыров университет,  
140000, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова 64  
e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university

## **ГЕОПОЛИМЕРЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ: МЕХАНИЗМЫ, СЫРЬЕВЫЕ ИСТОЧНИКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ**

**Аннотация:** В работе рассмотрены современные направления развития геополимерных композитов как экологически устойчивой альтернативы портландцементу. Приведён анализ сырьевых источников для геополимеризации, включая природные алюмосиликатные материалы и техногенные отходы промышленности – золы-уноса, доменные и ферросплавные шлаки, красный шлам и другие побочные продукты энергетического и металлургического производства. Описаны основные стадии и механизмы геополимеризации, влияние щёлочных активаторов и параметров синтеза на формирование структуры и свойства материалов. Показано, что геополимерные композиты обладают высокой прочностью, термостойкостью и химической стойкостью при существенно меньшем углеродном следе, что делает их перспективными для применения в строительстве и утилизации промышленных отходов.

Отмечено, что Республика Казахстан располагает значительными запасами как природных алюмосиликатных пород, так и вторичных техногенных ресурсов, что создаёт предпосылки для широкого внедрения геополимерных технологий в целях снижения экологической нагрузки и повышения эффективности использования минерального сырья.

**Ключевые слова:** геополимер, активатор, сырье, алюмосиликаты, зола уноса, промышленные отходы, шламы.

**Введение.** Горно-металлургический комплекс Республики Казахстан играет ключевую роль в экономике страны, однако его развитие сопровождается рядом системных проблем. Среди основных следует отметить истощение сырьевой базы, низкую комплексность использования минерального сырья, высокий уровень износа основных производственных фондов и значительное загрязнение окружающей среды. Технологическое отставание, отсутствие интегрированных комплексов полного производственного цикла (от добычи сырья до выпуска высококачественной продукции), малая емкость и рассредоточенность внутреннего рынка также остаются серьезными вызовами. Продукция предприятий характеризуется высокой энерго-, трудо- и материалоемкостью, а также дефицитом инвентарного подвижного состава.

Данные проблемы подчеркивают необходимость внедрения инновационных, безотходных технологий и разработки эффективных методов утилизации и рециклиинга отходов горно-металлургического сектора [1]. В этом контексте особый интерес представляет применение геополимерных композитов – перспективные неорганические материалы, применение которых способствует развитию экологически устойчивого строительства.

### **1 Геополимеры как альтернатива портландцементу**

Геополимерные композиты представляют собой неорганические полимерные материалы, получаемые в результате реакции щёлочной активации алюмосиликатных соединений. Эти материалы рассматриваются как перспективная альтернатива портландцементу в строительной индустрии благодаря их высокой прочности, химической стойкости и долговечности, а также значительно меньшему углеродному следу [2, 3].

Цементная промышленность является одним из крупнейших источников антропогенных выбросов углекислого газа, на долю которой приходится около 6-8% глобальных выбросов CO<sub>2</sub>. По современным оценкам, при производстве каждой тонны цемента в атмосферу выделяется от 0,66 до 1,5 тонн CO<sub>2</sub>, что делает данный процесс одним из наиболее углеродоёмких в строительном секторе [4, 5]. Основные источники эмиссий связаны с термическим разложением карбонатов (кальцинацией известняка) и высокими энергетическими затратами при обжиге клинкера.

В этой связи особый интерес вызывают технологии, направленные на снижение углеродной интенсивности производства строительных материалов. Одним из наиболее эффективных решений является применение геополимерных вяжущих систем, производство которых сопровождается снижением выбросов  $\text{CO}_2$  до 80% по сравнению с традиционным портландцементом [6]. Кроме того, геополимеры позволяют использовать техногенные алюмосиликатные материалы, что способствует снижению нагрузки на природные ресурсы и уменьшению объёма промышленных отходов.

Геополимерные композиты демонстрируют не только высокие механические характеристики, но и устойчивость к воздействию агрессивных сред, повышенную термостойкость и долговечность в условиях переменных температур и влажности. Благодаря этим свойствам они могут применяться в гражданском и промышленном строительстве, транспортной инфраструктуре, а также при утилизации отходов металлургического и энергетического производства. Исследователи [7] отмечают, что геополимеры обладают исключительной термической стабильностью при воздействии повышенных температур, что обуславливает их потенциал в качестве поверхностных защитных покрытий для противопожарных применений. Высокая термостойкость геополимерных матриц объясняется совокупностью факторов, таких как уплотнение структуры, уменьшение пористости и образование кристаллических фаз при нагревании. Эти процессы подтверждаются результатами исследований, посвящённых тепловому поведению, микроструктурной эволюции и остаточной прочности геополимеров после термического воздействия.

Таким образом, геополимерные материалы рассматриваются как экологически и технологически обоснованная альтернатива портландцементу, обеспечивающая снижение углеродного следа, рациональное использование ресурсов и переход к устойчивому развитию строительного сектора.

## 2 Сырьевые источники для геополимеризации

Сырьё играет ключевую роль в формировании структуры, прочности и долговечности геополимерных материалов. Процесс геополимеризации основан на взаимодействии щелочных активаторов с алюмосиликатным сырьём, в результате которого формируется пространственная сетчатая структура. Для систем, активированных натрием, характерно образование пространственной сетчатой структуры типа  $\text{N}-\text{A}-\text{S}-\text{H}$  (натриево-алюмосиликатный гидрат), описываемого обобщённой схемой:  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}-\text{A}-\text{S}-\text{H}$ . В системах, содержащих кальций (шлаки, золы, техногенные силикатные отходы), параллельно или преимущественно формируется гель типа  $\text{C}-\text{A}-\text{S}-\text{H}$  (кальциево-алюмосиликатный гидрат), описываемый схематически как:  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}-\text{A}-\text{S}-\text{H}$ . Оба типа обеспечивают развитие прочности и долговечности геополимерных композитов [8, 9].

Наиболее часто используемыми алюмосиликатными материалами являются метакаолин, золы-уноса (классов F и C), доменные гранулированные шлаки, красный шлам, зола рисовой шелухи, а также керамические и стекольные отходы [10-13]. Эти материалы различаются по содержанию оксидов кремния и алюминия, степени аморфности и морфологии частиц, что напрямую влияет на их реакционную способность и кинетику процесса геополимеризации.

В последние годы всё большее внимания уделяется применению вторичных ресурсов и промышленных отходов в качестве сырья для геополимеров. К ним относятся зола от сжигания биомассы, керамические шламы, цементно-бетонные отходы, измельчённое стекло и отходы камнеобработки [14-16]. Использование таких материалов позволяет существенно снизить себестоимость и углеродный след производства, одновременно решая проблему утилизации промышленных побочных продуктов. По данным современных исследований, внедрение отходных алюмосиликатных систем позволяет сократить выбросы  $\text{CO}_2$  на 40-60% по сравнению с цементными материалами на основе портландцемента [8].

По происхождению алюмосиликатное сырьё подразделяется на две основные группы:

- природные материалы (каолинит, метакаолин, вулканический пепел, диатомит), отличающиеся стабильным химическим составом и высокой чистотой [17, 18];
- техногенные отходы (золы-уноса, доменные и ферросплавные шлаки, красный шлам, зола рисовой шелухи, отходы камнеобработки и строительного производства, т.д.) [19-24].

Метакаолин представляет собой продукт кальцинации каолина, получаемый при температуре 600-800°С, что сопровождается значительными энергетическими затратами и выбросами парниковых газов [25]. Его производство вносит вклад как в глобальное потепление, так и в истощение природных запасов глины. Кроме того, метакаолин является сравнительно дорогостоящим сырьём, что стимулирует поиски более доступных и устойчивых по происхождению материалов [26-28]. В целях повышения экономической эффективности и экологической устойчивости в последние годы предпринимаются активные попытки частичной или полной замены метакаолина промышленными и техногенными отходами. В качестве альтернативного сырья для геополимеров успешно используются отходы различного происхождения – красный шлам, зола рисовой шелухи, отвальные хвосты горнодобывающей промышленности, зола-уноса и донная зола угольных электростанций, каталитические остатки нефтехимии, отходы стекольного и керамического производства, зола от сжигания пальмового масла, зола целлюлозно-бумажного шлама и осадки, получаемые при очистке сточных вод [25].

Химический состав и соотношение основных оксидов оказывают решающее влияние на структуру и свойства конечных геополимеров. Согласно исследованиям [29], повышение соотношения Si/Al способствует увеличению прочности за счёт формирования связей типа Si–O–Si, однако при этом снижается термическая стабильность материала. Авторы работы [30] показали, что оптимальное формирование гелевой структуры наблюдается при  $\text{Si}/\text{Al} \approx 1,5$ , а дальнейшее увеличение этого соотношения приводит к росту прочности на сжатие. Fletcher и соавторы [31] установили, что повышение содержания  $\text{SiO}_2$  положительно влияет на модуль упругости.

Особое внимание в последние годы уделяется переработке отходов красного кирпича и керамических изделий, которые обладают высоким содержанием  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и могут служить эффективным заменителем метакаолина [32-34]. Mahmoodi в своей работе [32] исследовали влияние параметров  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  и L/S (жидкость/твёрдое) на степень геополимеризации и установили, что наибольшая прочность достигается при соотношениях  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 7,1$  и  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,24$ . В работе [33] также отмечено влияние водоцементного отношения на прочность композитов на основе кирпичных отходов.

Исследования [35, 36] показали, что такие материалы обладают высокой удобоукладываемостью – расплыв смеси достигает 235-300 мм, а присутствие кальция способствует ускоренному твердению и росту прочности. Проведённые исследования подтверждают, что отходы обожжённого кирпича и красной глины являются перспективным сырьём для получения геополимеров, способным частично или полностью заменить метакаолин. Однако вопросы влияния соотношений Na/Al и Si/Al на микроструктуру и эксплуатационные свойства геополимеров на основе комбинированного сырья требуют дальнейшего изучения [37]. Обобщённые данные о составе исследованных алюмосиликатных систем, их молярных соотношениях и достигнутых механических характеристиках приведены в таблице 1.

Дополнительные данные о влиянии химико-минералогического состава сырья на формирование структур N–A–S–H и C–A–S–H подтверждаются как экспериментальными исследованиями, так и современными патентными разработками. Согласно материалам патента US 8,523,998 B2, даже комплексные по составу отходы – продукты термической обработки нефтеносных сланцев – способны формировать устойчивую геополимерную матрицу при соблюдении контролируемых молярных соотношений  $\text{Si}/\text{Al} = 2-5$  и наличия реакционноспособного кальция. Последний выступает естественным активатором и способствует образованию смешанных гелевых фаз N–A–S–H/C–A–S–H, что повышает плотность и раннюю прочность материала [38].

Ряд зарубежных патентов также подчёркивает, что структурная организация геополимерного геля определяется не только содержанием  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , но и степенью полимеризации сетки и координацией алюминия. В патенте US 5,342,595 описаны различные семейства геополимеров (M-PS, M-PSS, M-PSDS), для которых изменение соотношения Si/Al и характера связей Si–O–Al приводит к варьированию термостойкости, химической стойкости и склонности к образованию пор [39]. При повышении доли кремнезёма гелевая структура становится более трёхмерной и менее подверженной дегидратации, что согласуется с выводами академических работ [29-31].

Таблица 1 – Примеры рецептур геополимеров и их основные преимущества

№	Состав геополимеров	Технический результат	Источник
1	70% доменного гранулированного шлака + 30% золы биомассы оливковых косточек	Прочность 18-33 МПа (28 сут.)	[14]
2	Геополимерный бетон на основе золы-уноса или гранулированного доменного шлака с частичной заменой 10-20% вяжущего тонкомолотым стекольным порошком	10-20% – повышение прочности, плотности и стойкости; >20 % – увеличение пористости и снижение реактивности	[15]
3	Каолин-основанный геополимер с добавлением 0.6-1.2 мас. % алюминиевого порошка (вспенивающий агент)	При 0.8 % Al – оптимальная пористость, удельная поверхность 23.58–54.81 м <sup>2</sup> /г, эффективность удаления Cu <sup>2+</sup> до 98 %	[20]
4	Метакаолин с частичной заменой 33.3-66.6% на отходы красной керамики	33.3% замещения – прочность не снижается; 50 % – повышение прочности раствора (лучшее уплотнение структуры); 66.6% – резкое снижение прочности	[25]
5	Геополимерный раствор на основе золы-уноса с замещением 0-100% золой от сжигания пальмового масла	Ускоренное образование микропор при нагревании; смещение максимума прочности с 300°C (FA) до 500°C при добавлении POFA; повышение термостойкости	[28]
6	Геополимерный композит с варьируемой долей кварца и аморфного SiO <sub>2</sub> (0-100%)	Аморфный SiO <sub>2</sub> усиливает геополимеризацию и повышает прочность; кварц → отсутствие связности и снижение прочности; при стабильном Si/Al кварц повышает прочность за счёт уплотнения структуры	[30]
7	Отходы красного кирпича с частичной заменой 20-50 мас.% кальций-алюминатного цемента	40 % – 50 МПа за 3 суток (20 °C); при 65 °C до 92 МПа за 7 суток; ускорение геополимеризации; высокие дозы (50 %) – слишком быстрое твердение	[33]

Важным практическим аспектом является возможность модификации геополимерной структуры за счёт включения в сырьевую смесь дополнительных алюмосиликатных или реакционноспособных фаз. В патенте EP 4 484 398 A1 [40] показано, что добавление алюминиевого шлама или других алюмосодержащих отходов способствует формированию высокопористой и одновременно прочной структуры за счёт выделения водорода и последующего образования развитой внутренней поверхности. Это открывает перспективы для создания теплоизоляционных, фильтрационных и лёгких конструкционных материалов на геополимерной основе (табл. 2).

Совокупность научных и патентных данных демонстрирует, что разнообразие алюмосиликатного сырья – природного, техногенного и комбинированного – позволяет гибко управлять формированием гелевых структур и микропористости, что расширяет область применения геополимеров и делает выбор состава ключевым этапом разработки высокоэффективных композитов.

### 3 Механизм геополимеризации

Процесс геополимеризации представляет собой сложную совокупность физико-химических реакций, происходящих между щелочным активатором и алюмосиликатным сырьём. Его можно условно разделить на три основные стадии [25]:

На первой стадии под действием раствора щёлочного активатора (NaOH, KOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) происходит разрушение алюмосиликатной решётки исходного материала и переход активных форм кремния и алюминия в раствор [47].

На втором этапе происходит гидролиз и поликонденсация растворённых алюмосиликатных видов с образованием прочных ковалентных связей Si–O–Al и Si–O–Si, формирующих трёхмерную гелевую сетку N–A–S–H, а в присутствии кальция одновременно протекает образование фазы C–A–S–H, что приводит к уплотнению структуры и ускоренному набору прочности [48].

Таблица 2 – Примеры патентных рецептур геополимеров

№	Состав геополимеров	Технический результат	Источник
1	Геополимер из отходов нефтеносных сланцев, Si/Al=2–5, CaO до 15%	Образование смешанных гелей N–A–S–H/C–A–S–H; рост плотности, прочности, стойкости к химической коррозии	[38]
2	Композиция на основе алюминиевого шлама + алюмосиликатное сырье	Образование высокопористой структуры; возможность получения теплоизоляционных материалов	[40]
3	Геополимерный порошковый состав: 60–90% твёрдого геополимерного прекурсора(гранит/микросилика/шлак и), 5-8% ZnO, 1-10% твёрдый активатор (МОН, M=Li/Na/K)	Повышенная ранняя прочность; ускоренное твердение; улучшенная прокачиваемость и долговечность	[41]
4	Геополимерный цемент из 20-50% стеклобоя + алюмосиликатное сырьё (каолиниты/латериты/летучая зола), с NaOH/KOH и жидким стеклом	Формирование цемента с высокой ранней прочностью (до 30 МПа через 2 часа при нагреве); высокая химическая стойкость; понижение стоимости за счёт повторного использования стекла	[42]
5	35-45% алюминиевая золь, 10-15% шлак доменный, 35–45% стальной шлак, 8–12% метакаолин; активатор: $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ (30% от массы сырья)	Формирование высокопрочного геополимера; эффективная утилизация промышленных отходов; экономичность; хороший набор прочности при 60°C и в нормальных условиях	[43]
6	Алюмосиликатное сырьё + щёлочной активатор ( $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) + газообразующий компонент (металлический Al или другие порообразующие добавки)	Регулируемая пористость; возможность получения лёгкого, пористого геополимера; высокие теплоизоляционные свойства; применение в фильтрах, сорбентах и теплоизоляционных системах	[44]
7	Метакаолин / алюмосиликатный прекурсор + щелочной раствор ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3, \text{NaAlO}_2, \text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ )	Образование золя-геля без высокотемпературного обжига; возможность получения геополимера без стадий сушки и размалывания; упрощение процесса	[45]
8	Геополимерный цемент из переработанного стекла (50-95%) + алюмосиликатное сырьё + щёлочной активатор ( $\text{NaOH}/\text{KOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )	Улучшенное твердение при низких температурах; повышение ранней прочности; высокая экологичность за счёт утилизации стекла; снижение $\text{CO}_2$ и стоимости производства	[46]

На третьем этапе происходит гелеобразование и твердение, сопровождающиеся уплотнением структуры, удалением избыточной воды и формированием межчастичных связей. Условия твердения – температура, влажность и продолжительность выдержки – оказывают существенное влияние на кинетику реакций и конечные свойства композита. Оптимальный температурный диапазон 40-80°C способствует ускорению процессов поликонденсации, особенно при использовании низкореакционного сырья, обеспечивая более равномерное формирование структуры и рост прочности [49].

Регулирование параметров, таких как соотношение Si/Al, концентрация щёлочи, модуль активатора ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) и режим твердения, позволяет целенаправленно управлять структурой и свойствами геополимерных композитов. При этом наличие реакционноспособных соединений кальция способствует образованию гибридных фаз С–А–S–H, повышающих раннюю прочность и степень уплотнения структуры [50].

Щёлочные активаторы играют ключевую роль в определении скорости и механизма геополимеризации [51]. В качестве щелочных активаторов при синтезе геополимеров наиболее часто применяются соединения щелочных металлов – гидроксиды ( $\text{NaOH}, \text{KOH}$ ) и силикаты ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3, \text{K}_2\text{SiO}_3$ ), а также карбонат бария ( $\text{BaCO}_3$ ) [52-55]. Гидроксиды ( $\text{NaOH}, \text{KOH}$ ) выполняют функцию сильных оснований, способствующих растворению алюмосиликатного сырья и высвобождению активных форм кремния и алюминия. По данным Jaarsveld и Deventer [56], использование  $\text{NaOH}$  в качестве активатора способствует более интенсивной поликонденсации, обеспечивая повышение прочности на сжатие, снижение степени кристалличности и повышение кислотостойкости по сравнению с системами на основе KOH.

В то же время силикаты ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ) обеспечивают поступление растворимого кремния, что способствует формированию более плотной и прочной гелевой структуры геополимера, улучшая его механические характеристики [57, 58].

Концентрация щёлочи является одним из наиболее значимых факторов, влияющих на эффективность геополимеризации. Повышение молярности раствора  $\text{NaOH}$  (обычно в диапазоне 6-12 М) усиливает щёлочную среду и, следовательно, ускоряет растворение алюмосиликатного сырья. Однако при чрезмерной концентрации наблюдается избыточное образование неструктурированных алюминатов и силикатов, что может приводить к повышенной пористости и неоднородности структуры. В исследованиях [59] показано, что оптимальный диапазон концентрации  $\text{NaOH}$  составляет 8-10 М, при котором достигается наилучшее сочетание растворимости, плотности геля и прочностных характеристик.

Наиболее распространённой считается комбинированная система  $\text{NaOH}-\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , обеспечивающая оптимальный баланс между растворением и последующим образованием геля. Комбинация  $\text{NaOH}$  с жидким стеклом ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) повышает содержание растворённого кремния в смеси, что улучшает механические свойства композита [60]. Как отмечается в работе [61], молярная концентрация  $\text{NaOH}$ , применяемая в исследованиях, обычно не превышает 20 М, а отношение  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  не должно быть выше 1,0, что позволяет избежать ухудшения структуры и обеспечить стабильные физико-химические характеристики материала.

Учитывая, что реакционная способность алюмосиликатного сырья значительно варьирует, влияние состава щёлочного активатора необходимо рассматривать на примере различных типов прекурсоров. Это позволяет оценить универсальность выявленных закономерностей и то, как изменение отношения  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  отражается на прочности геополимеров, полученных из сырья с разной активностью. В этой связи на рисунке 1 представлены данные, демонстрирующие характер изменения прочности для трёх типов геополимерных систем (С100 – геополимер, полученный на основе измельчённого кирпичного боя; С50М50 – композиция, включающая кирпичное сырьё и метакаолин в соотношении 50/50; М100 – система на основе высокореактивного метакаолина) при варьировании состава активатора.

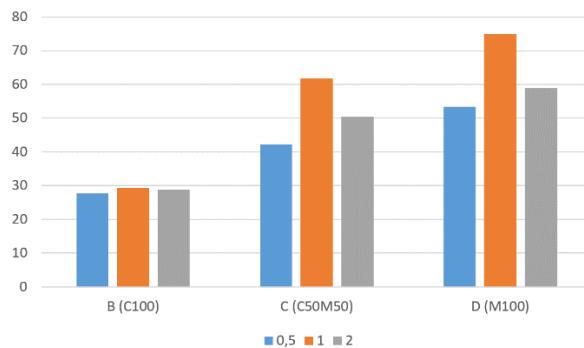


Рисунок 1 – Влияние отношения  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  (0.5; 1; 2) на прочность геополимеров (построено на основе анализа данных источника [62])

Анализ литературных данных показывает, что изменение отношения  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  оказывает выраженное влияние на прочность геополимеров. Как видно из зависимостей, приведённых на рисунке 1, для всех исследованных систем максимальные значения прочности достигаются при  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} \approx 1.0$ , тогда как более низкие или высокие значения приводят к снижению прочностных характеристик. Такая экстремальная зависимость отражает оптимальное соотношение растворённого кремнезёма и щёлочности раствора, обеспечивающее наиболее интенсивное формирование гелевых фаз N–A–S–H и C–A–S–H. Полученные тенденции согласуются с результатами работ [62] и подчеркивают важность выбора сбалансированного состава активатора.

В ряде исследований установлено, что концентрация щёлочного активатора оказывает определяющее влияние на эффективность протекания геополимеризации и формирование структуры материала. Так, в работе [63] представлены результаты, свидетельствующие о

том, что оптимальная концентрация гидроксида натрия ( $\text{NaOH}$ ) находится в диапазоне 8–12 М, при котором обеспечивается максимальная степень растворения алюмосиликатного сырья и формирование прочной трёхмерной структуры геополимера. Кроме того, показано, что при содержании силиката натрия ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) в пределах 35–50% по массе достигаются улучшенные показатели прочности на сжатие и плотности за счёт формирования более упорядоченной алюмосиликатной сетки [63].

Влияние щёлочного активатора проявляется не только в химическом, но и в морфологическом аспекте: варьирование концентрации и модуля активатора определяет размер и распределение пор, степень упорядоченности гелевой фазы и соотношение аморфных и кристаллических участков в структуре. Более высокая концентрация  $\text{NaOH}$  способствует ускоренному растворению частиц сырья, но может приводить к неравномерному росту гелевой сетки, тогда как увеличение содержания  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  стабилизирует структуру и способствует формированию более плотной матрицы N–A–S–H.

Таким образом, процесс геополимеризации включает взаимосвязанные реакции растворения, миграции и поликонденсации алюмосиликатных тетраэдров с образованием аморфно-кристаллической структуры. Управление составом щёлочного активатора, мольными соотношениями и температурными условиями позволяет целенаправленно регулировать структуру и свойства получаемого материала.

Установление взаимосвязей между химическим составом щёлочного активатора, параметрами геополимеризации и свойствами конечного материала имеет решающее значение для разработки композитов с прогнозируемыми характеристиками. Это создаёт основу для дальнейших исследований в области адаптивного подбора активаторов под конкретные виды алюмосиликатного сырья и условий эксплуатации геополимеров.

### **Заключение**

На основании проведённого обзора наиболее перспективными для условий страны являются геополимерные системы, основанные на сочетании доступных техногенных алюмосиликатных ресурсов – золы ТЭЦ, доменных и ферросплавных шлаков, отходов обогащения и переработки бокситов – с высокореактивными природными компонентами, такими как метакаолин и диатомит. Наилучшие эксплуатационные показатели достигаются при использовании щёлочного активатора с отношением  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  порядка 1.0 и концентрацией  $\text{NaOH}$  8–10 М, что обеспечивает формирование плотной гелевой структуры и прочностные характеристики на уровне 60–75 МПа.

Для отечественной строительной промышленности наиболее значимыми техническими решениями являются вовлечение техногенных отходов в качестве основного алюмосиликатного сырья, оптимизация модуля жидкого стекла, регулирование водотвёрдого отношения и применение низкотемпературных условий твердения. Реализация таких подходов позволяет одновременно снизить себестоимость материалов, повысить степень переработки техногенных накоплений и обеспечить выпуск экологически безопасных строительных изделий, что делает геополимерные технологии одним из ключевых направлений устойчивого развития отрасли.

### **Список литературы**

1. О внесении изменений и дополнений в Постановление Правительства Республики Казахстан от 30 октября 2010 года № 1144 «Об утверждении Программы по развитию горно-металлургической отрасли в Республике Казахстан на 2010–2014 годы».
2. Chemical fundamentals of geopolymers in sustainable construction / M. Makungu et al // Materials Today Sustainability. – 2024. – Vol. 27. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100842>.
3. Geopolymers: The green alternative to traditional materials for engineering applications / Z. Jwaidat et al // Infrastructures. – 2023. – № 8. – P. 98.
4. Tayeh B.A. The utilization of recycled aggregate in high performance concrete: A review / B.A. Tayeh, D.M. Al Saffar, R. Alyousef // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – № 9. – P. 8469–8481.
5. Geopolymer concrete as sustainable material: A state-of-the-art review / F. Farooq et al // Construction and Building Materials. – 2021. – № 306. – P. 124762.
6. Sustainable Geopolymer Tuff Composites Utilizing Iron Powder Waste: Rheological and Mechanical Performance Evaluation / M.L.K. Khouadjia et al // Sustainability. – 2025. – № 17. – P. 1240. <https://doi.org/10.3390/su17031240>.

7. Review: geopolymers for fire protection applications / R. Mohamed et al // J Mater Sci. – 2025. – № 60. – P. 18678-18709. <https://doi.org/10.1007/s10853-025-11496-z>.
8. Geopolymer Materials: Cutting-Edge Solutions for Sustainable Design Building / L. Ricciotti et al // Sustainability. – 2025. – № 17. – P. 7483. <https://doi.org/10.3390/su17167483>.
9. Ujianto M. Structural Behavior of Precast Concrete Wall Panels Due to Dynamic Load: A Review / M. Ujianto, A.Z. Mohd Ali, M. Solikin // AIP Conf. Proc. – 2019. – № 2114. – P. 050013.
10. Dimas D.D. Utilization of alumina red mud for synthesis of inorganic polymeric materials / D.D. Dimas, I.P. Giannopoulou, D. Panias // Miner. Process. Extr. Metall. Rev. – 2009. – № 30. – P. 211-239.
11. Nuaklong P. Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens / P. Nuaklong, V. Sata, P. Chindaprasirt // Constr. Build. Mater. – 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.152>.
12. Alomayri T. Experimental study of the microstructural and mechanical properties of geopolymer paste with nano material ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) / T. Alomayri // J. Build. Eng. – 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jobc.2019.100788>.
13. Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites / J. He et al // Cem. Concr. Compos. – 2013. – № 37. – P. 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.11.010>.
14. Olive biomass ash as an alternative activator in geopolymer formation: A study of strength, radiology and leaching behavior / M.M. Alonso et al // Cement and Concrete Composites. – 2019. – Vol. 104. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103384>.
15. Maaty Al.A. Geopolymer Concrete Performance Utilising Waste Glass: A Review / Al.A. Maaty, M.F. Ghazy, M.G. Eldmarny // Mansoura Engineering Journal. – 2025. – Vol. 50, Iss. 3. <https://doi.org/10.58491/2735-4202.3254>.
16. Harnessing waste for sustainable construction: Novel synthesizing activators from waste for geopolymer concrete / Murali G. et al // Theor. Appl. Fract. Mech. – 2024. – № 124. – P. 103559.
17. Properties and performance of fly ash-based geopolymer as concrete repair material / W.W.A. Zailani et al // In Recent Developments of Geopolymer Materials; Woodhead Publishing: Cambridge, UK. – 2025. – P. 163-179.
18. Shafiq M.U. Applications of geopolymers / M.U. Shafiq, M. Jamil, , Khan, M., 2025. // Sustain. Struct. Mater. 256.
19. Smith, J. Sustainable recycling practices for waste glass in construction materials / J. Smith // J. Sustain. Mater. – 2021. – № 12. – P. 45e54.
20. Effect of Aluminium Powder on Kaolin-Based Geopolymer Characteristic and Removal of  $\text{Cu}^{2+}$  / N. Ariffin et al // Materials. – 2021. – № 14. – P. 814.
21. Assessment of the Suitability of Ceramic Waste in Geopolymer Composites: An Appraisal / I. Luhar et al // Materials. – 2021. – № 14. – P. 3279. <https://doi.org/10.3390/ma14123279>.
22. New Blended Cement from Polishing and Glazing Ceramic Sludge / F. Andreola et al // Int. J. Appl. Ceram. Technol. – 2009. – № 7. – P. 546-555.
23. Study of Novel Geopolymer Concrete Prepared with Slate Stone Cutting Sludge, Chamotte, Steel Slag and Activated with Olive Stone Bottom Ash / R. Carrillo Beltran et al // Materials. – 2025. – № 18. – P. 1974. <https://doi.org/10.3390/ma18091974>.
24. Geopolymers: An option for the valorization of incinerator bottom ash derived «end of waste» / Lancellotti I. // Ceramics International. – 2015. – Vol. 41, Issue 2, Part A. – P. 2116-2123. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.008>.
25. Madhuchhanda S. Partial replacement of metakaolin with red ceramic waste in geopolymer / S. Madhuchhanda, D. Kausik // Ceramics International. – 2021. – Vol. 47, Issue 3. – P. 3473-3483. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.191>.
26. A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar / P. Zhang et al // Composites B: Engineering. – 2018. – № 152. – P. 79-95.
27. Pacheco-Torgal F. Properties of tungsten mine waste geopolymeric binder / F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes, S. Jalali // Construction and Building Materials. – 2008. – № 22. – P. 1201-1211.
28. Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures / N. Ranjbar et al // Construction and Building Materials. – 2014. – № 65. – P. 114-121.

29. Effects of Si/Al ratio on the structure and properties of metakaolin based geopolymer / P.G. He et al // Ceram. Int. – 2016. – № 42. – P. 14416-14422.
30. Role of the silica source on the geopolymerization rate / A. Autef et al // J. Non-Cryst. Solids. – 2012. – № 358. – P. 2886-2893.
31. The composition range of aluminosilicate geopolymers / R.A. Fletcher et al // J. Eur. Ceram. Soc. – 2005. – № 25. – P. 1471-1477.
32. Optimization of brick waste-based geopolymer binders at ambient temperature and pre-targeted chemical parameters / O. Mahmoodi et al // J. Clean. Prod. – 2020. – № 268. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122285>.
33. Influence of calcium aluminate cement (CAC) on alkaline activation of red clay brick waste (RCBW) / L. Reig et al // Cement Concr. Compos. – 2016. – № 65. – P. 177-185.
34. Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste / L. Reig et al // Construct. Build. Mater. – 2013. – № 43. – P. 98-106.
35. Application of waste brick powder in alkali activated aluminosilicates: functional and environmental aspects / J. Fort et al // J. Clean. Prod. – 2018. – № 194. – P. 714-725.
36. Development of high-strength alkali-activated pastes containing high volumes of waste brick and ceramic powders / C.L. Hwang et al // Construct. Build. Mater. – 2019. – № 218. – P. 519-528.
37. Rossignol, Feasibility of producing geopolymer binder based on a brick clay mixture / J. Payne et al // Ceram. Int. – 2017. – № 43. – P. 9860-9871.
38. US 8 523 998 B2. Process for producing geopolymers / Edgar Gasafi, Katja Dombrowski-Daube. – Publ. – 2013.
39. US 5 342 595 A. Process for obtaining a geopolymicalumino-silicate and products thus obtained / J. Davidovits, M. Davidovics, N. Davidovits. – Publ. – 1994.
40. EP 4 484 398 A1. Geopolymer compositions comprising aluminum sludge and use thereof / A. Da Silva, A. Bem d'Eça Peixinho, F. Mendes Gaspar, T. Siqueira de Almeida Archer de Carvalho. – Publ. 2023.
41. № 20220629 A1. One-part geopolymer composition: patent application / Mahmoud Khalifeh, Mohamed Ahmed Fathy Abdelshafy Omran; applicant: Universitetet i Stavanger. – Publ. 2023.
42. WO 2015/089611 A1. Geopolymer cement produced from recycled glass and method for producing same: international patent application / Sidnei Antonio Pianaro, Gino Capobianco; applicant: Universidade Estadual de Ponta Grossa. – Publ. 2015.
43. CN 110759655 B. Industrial-waste-based geopolymer : invention patent / Tian Jun, E Xinrui, Wang Deyong, Qu Tianpeng, Shi Jialun, Xiong Yuandong, Lu Shilei, Zhang Min ; applicant: Suzhou University. – Publ. 2021.
44. Пат. RU 2503617 С2. Фризон Ф., Жуссо Дюбъен К. Способ получения геополимера с регулируемой пористостью, полученный геополимер и различные варианты его применения. Опубл. 2014.
45. ЕА 040554 В1 Кондратович Ф. Л., Утрана К., Микошек-Оперхальская М. Способ получения геополимера или геополимерного композита. Опубл. 2022.
46. WO 2015/089611 A1. Cimento geopolimérico a partir de vidros reciclados e seu processo de obtenção / R.H. Santos et al – 2015.
47. Radhakrishnan S. Analysis of Ferro-Geopolymer Panels Reinforced with Different Types of Fibres / S. Radhakrishnan, N. Soundarapandian // Struct. Concr. – 2025. – № 26. – P. 2052-2066.
48. Temuujin J. Preparation and thermal behaviour of potassium aluminosilicate geopolymers / J. Temuujin, A. van Riessen, K.J.D. MacKenzie // J. Non-Cryst. Solids. – 2010. – № 356. – P. 2023-2027.
49. Garcia-Lodeiro I. Variation in hybrid cements over time / I. Garcia-Lodeiro, A. Fernandez-Jimenez, A. Palomo // Cem. Concr. Res. – 2013 – № 52. – P. 112-122.
50. Effect of Silicate Modulus and Metakaolin Incorporation on the Carbonation of Alkali Silicate-Activated Slags / S.A. Bernal et al // Cem. Concr. Res. – 2010. – № 40. – P. 898-907.
51. The role of calcium in blended fly ash geopolymers / G.M. Canfield et al // J. Mater. Sci. – 2014. – № 17. – P. 5922-5933.
52. Influence of Activators on Mechanical Properties of Modified Fly Ash Based Geopolymer Mortars / P. Prochon et al // Materials (Basel). – 2020. – № 13(5). – P. 1033. <https://doi.org/10.3390/ma13051033>. PMID: 32106414; PMCID: PMC7084247.

53. Exemplification of efficacy of homebrewed sodium silicate solution processed from eco-processed pozzolan and palm oil clinker powder in geopolymer mortar / H.A.A.E. Ghanim et al // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 460. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139825>.
54. Effect of natural and artificial silicon additives on the physicomechanical performance of dolomite-based alkaline-activated mortar / M. Kaya et al // Silicon. – 2024. – № 16(1). – P. 215-230. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02677-z>.
55. JProvis.L. Alkali-activated materials / J.L. Provis // Cem. Concr. Res. – 2018. – № 114. – P. 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>.
56. Jaarsveld van J. Effect of the Alkali Metal Activator on the Properties of Fly Ash-Based Geopolymers / J. Jaarsveld van, J. Deventer van // Eng. Chem. Res. – 1999. – № 38. – P. 3932-3941.
57. Fawer M. Life cycle inventories for the production of sodium silicates / M. Fawer, M. Concannon, W. Rieber // Int. J. Life Cycle Assess. – 1999. – № 4(4). – P. 207-212. <https://doi.org/10.1007/BF02979498>.
58. Effect of sodium hydroxide concentration on fresh properties and compressive strength of selfcompacting geopolymer concrete / F.A. Memon et al // J. Eng. Sci. Technol. – 2013. – № 8(1). – P. 44-56.
59. Influence of Alkaline Activator Properties on Corrosion Mechanisms and Durability of Steel Reinforcement in Geopolymer Binders / M. Chira et al // Coatings. – 2025. – № 15. – P. 734. <https://doi.org/10.3390/coatings15060734>.
60. Pacheco-Torgal F. Alkali-activated binders: A review / F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes, S. Jalali // Part 2. About materials and binders manufacture. Constr. Build. Mater. – 2008. – № 22. – P. 1315-1322.
61. Effect of Sodium Silicate to Sodium Hydroxide Ratios on Strength and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Binder / M.S. Morsy et al // J. Sci. Eng. – 2014. – № 39. – P. 4333-4339.
62. Effect of Sodium Silicate and Sodium Hydroxide Ratioson Compressive Strength of Ceramic Brick and Metakaolin Waste-Based Geopolymer Binder / M. Statkauskas et al // Materials. – 2025. – № 18. – P. 4947. <https://doi.org/10.3390/ma18214947>.
63. Anburuvel A. The role of activators in geopolymer-based stabilization for road construction: a state-of-the-art review / A. Anburuvel // Multiscale and Multidiscip. Model. Exp. and Des. – 2023. – № 6. – P. 41-59. <https://doi.org/10.1007/s41939-022-00139-4>.

**Информация о финансировании.** Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP26197535 «Разработка геополимерных композитов на основе металлургических отходов»).

**Б.Т. Ғылымханов<sup>1</sup>, А.Ж. Кожанова<sup>1</sup>, А.А. Амитова<sup>1</sup>, М.А. Елубай<sup>2</sup>, Г.С. Айткалиева<sup>\*</sup>**

<sup>1</sup>Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,  
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтбаев көшесі, 22

<sup>2</sup>Торайғыров университеті,  
140000, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ., Ломов көшесі, 64  
\*e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university

## **АЛЮМОСИЛИКАТТЫ ШИКІЗАТ НЕГІЗІНДЕГІ ГЕОПОЛИМЕРЛЕР: МЕХАНИЗМДЕРІ, ШИКІЗАТ КӨЗДЕРІ ЖӘНЕ ҚОЛДАНУ БОЛАШАФЫ**

Мақалада портландцементке экологиялық тұрғыдан тұрақты балама ретінде геополимерлі композиттердің даму бағыттары қарастырылған. Геополимеризация процесіне арналған шикізат көздері – табиғи алюмосиликатты материалдар мен өнеркәсіптің техногендік қалдықтары: ұшпа күл, домна және ферроқорытта шлактары, қызыл шлам және энергетика мен металлургия өндірістерінің басқа да жанама өнімдері талданған. Геополимеризацияның негізгі салындары мен механизмдері, сілтілік активаторлардың және синтез параметрлерінің материал құрылымы мен қасиеттеріне әсері сипатталған. Геополимерлі композиттердің жоғары беріктікке, термотұрақтылыққа және химиялық тәзімділікке ие екенінің, сондай-ақ көміртек ізі айтарлықтай төмен екендігі көрсетілген. Бұл оларды құрылыш және өнеркәсіптік қалдықтарды қайта өңдеу салаларында қолдануға перспективалы материал етеді.

Қазақстан Республикасы табиғи алюмосиликаттың көндердің және техногендік екінші ресурстардың мол қорына ие, бұл экологиялық жүктемені азайту және минералдық шикізатты тиімді пайдалану мақсатында геополимерлік технологиялардың көнінен өнгізуге алғышарттар жасайды.

**Түйін сөздер:** геополимер, активатор, шикізат, алюмосиликаттар, ұшпа күл, өнеркәсіптік қалдықтар, шламдар.

**B. Gylymhanov<sup>1</sup>, A. Kozhanova<sup>1</sup>, A. Amitova<sup>1</sup>, M. Yelubay<sup>2</sup>, G. Aitkaliyeva<sup>\*</sup>**

<sup>1</sup>Satbayev University,

050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, 22 Satbayev Street,

<sup>2</sup>Toraighyrov University,

140000, Republic of Kazakhstan, Pavlodar, 64 Lomov Street,

\*e-mail: gaitkaliyeva@satbayev.university

## **GEOPOLYMERS BASED ON ALUMINOSILICATE RAW MATERIALS: MECHANISMS, RAW MATERIAL SOURCES AND APPLICATION PROSPECTS**

The paper discusses current trends in the development of geopolymer composites as an environmentally sustainable alternative to Portland cement. An analysis of raw material sources for geopolymers is presented, including natural aluminosilicate materials and industrial by-products such as fly ash, blast furnace and ferroalloy slags, red mud, and other residues from energy and metallurgical industries. The main stages and mechanisms of geopolymers are described, as well as the influence of alkaline activators and synthesis parameters on the formation of the structure and properties of the materials. It is shown that geopolymers exhibit high strength, thermal stability, and chemical resistance with a significantly lower carbon footprint, making them promising for use in construction and industrial waste recycling.

It is noted that the Republic of Kazakhstan possesses substantial reserves of both natural aluminosilicate rocks and secondary technogenic resources, which creates favorable conditions for the widespread implementation of geopolymer technologies aimed at reducing environmental impact and improving the efficiency of mineral resource utilization.

**Key words:** geopolymer, activator, raw materials, aluminosilicates, fly ash, industrial waste, sludge.

### **Сведения об авторах**

**Бекболат Талғатұлы Ғылымханов** – докторант кафедры «Химические процессы и промышленная экология», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан; e-mail: bbekaa23@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5554-1061>.

**Акерке Жарқыновна Кожанова** – магистрант кафедры «Химическая и биохимическая инженерия», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан; e-mail: kozhanova250802@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7154-9370>.

**Айгүль Амантаевна Амитова** – PhD, исследователь, научный руководитель проекта кафедры «Химическая и биохимическая инженерия», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан; e-mail: aikkash@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7721-6473>.

**Мәдениет Азаматұлы Елубай** – кандидат химических наук, декан факультета естественных наук, профессор, Торайғыров Университет; e-mail: yelubay.m@tou.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6209-5215>.

**Гульзат Сляшевна Айткалиева<sup>\*</sup>** – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Химическая и биохимическая инженерия», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан; e-mail: gaitkaliyeva@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9872-6317>.

### **Авторлар туралы мәліметтер**

**Бекболат Талғатұлы Ғылымханов** – «Химиялық үдерістер және өнеркәсіптік экология» кафедрасының докторанты, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: bbekaa23@mail.ru № ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5554-1061>.

**Акерке Жарқынқызы Кожанова** – «Химиялық және биохимиялық инженерия» кафедрасының магистранты, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: kozhanova250802@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7154-9370>.

**Айгүл Амантаевна Амитова** – PhD, зерттеуші, жоба ғылыми жетекшісі, «Химиялық және биохимиялық инженерия» кафедрасы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aikkash@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7721-6473>.

**Мәдениет Азаматұлы Елубай** – химия ғылымдарының кандидаты, Жаратылыстану ғылымдары факультетінің деканы, профессор, Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: yelubay.m@tou.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6209-5215>.

**Гүлзат Сляшқызы Айткалиева\*** – PhD, қауымдастырылған профессор, «Химиялық және биохимиялық инженерия» кафедрасы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9872-6317>.

#### Information about the authors

**Bekbolat Gylymhanov** – Doctoral student, Department of Chemical Processes and Industrial Ecology, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: bbekaa23@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5554-1061>.

**Akerke Kozhanova** – Master's student, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kozhanova250802@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7154-9370>.

**Aigul Amitova** – PhD, Researcher, Project Supervisor, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aikkash@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7721-6473>.

**Madeniet Yelubay** – Candidate of Chemical Sciences, Dean of the Faculty of Natural Sciences, Professor, Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan; e-mail: yelubay.m@tou.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6209-5215>.

**Gulzat Aitkaliyeva\*** – PhD, Associate Professor, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9872-6317>.

Поступила в редакцию 24.10.2025

Поступила после доработки 01.12.2025

Принята к публикации 02.12.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4\(20\)-77](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4(20)-77)



FTAXР: 31.25.19

Check for updates

**М.К. Кабулова<sup>1,2,\*</sup>, Т.Қ. Джумадилов<sup>2</sup>, Ж.Қ. Қорғанбаева<sup>1</sup>, Ю.В. Гразулявичус<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, 050060, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Достық көшесі 13

<sup>2</sup>«Ә.Б. Бектұров атындағы химия ғылымдары институты» АҚ, 050060, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Уалиханов көшесі 106

<sup>3</sup>Каунас технологиялық университеті, Литва Республикасы, Каунас қ., Донелайчио көшесі 73

\*e-mail: kabulovamk@mail.ru

## МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ИНТЕРПОЛИМЕРЛІ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ НЕОДИМ ИОНДАРЫН СОРБЦИЯЛАУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРИ

**Аңдатпа:** Бұл зерттеуде неодим иондарын еki өнеркәсіптік сорбенттерден, Amberlite IR120(H<sup>+</sup>) және AB-17-8(OH<sup>-</sup>) ионалмастырғыш шайырлардан тұратын интерполимерлік жүйелерді пайдалана отырып, олардың ерітінді қоспасынан селективті сорбциялау мүмкіндіктері әртүрлі молярлық қатынаста зерттелді. Алынған нәтижелер негізінде полимерлердің максималды активтенуі Amberlite IR120:AB-17-8 (5:1) қатынастарында болатыны анықталды. Неодим иондарын максималды сорбциялау дәрежесі осы қатынастарда байқалады. Сорбция процесі статикалық режимде жүргізілді. Полимерлердің қашықтан өзара әрекеттесуінің 48 сағатынан кейін неодим иондарын максималды сорбциялау дәрежесі 56,2%, полимерлік тізбектің байланысу дәрежесі 3,96 % болды. Бастапқы активтенбеген Amberlite IR120 (6:0) және AB-17-8 (0:6) полимерлермен салыстырғанда интерполимерлік жүйелердің сорбциялық белсенделілігінің Amberlite IR120: AB-17-8 (5:1), Amberlite IR120:AB-17-8 (3:3) қатынастарында анағұрлым жоғары болатынын бастапқы полимерлердің жалпы есептік мәндері дәлелдеді. Алынған нәтижелер интерполимерлік жүйелерде бастапқы полимерлердің электрохимиялық және сорбциялық қасиеттерінің өзгеретінін, яғни функционалды топтардың реакцияға түсү қабілеті артатынын көрсетті. Бұл оларды неодим иондарын бөліп алудың тиімді сорбциялық технологиясын жасау үшін қолдануға мүмкіндік береді.