

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2026, Том 13, № 2 / 2026, Vol. 13, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/17SATS226.pdf>

DOI: 10.15862/17SATS226 (<https://doi.org/10.15862/17SATS226>)

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Козлов, П. Г. Структурообразование геополимерных бетонов на основе гидроудаленных золошлаковых отходов / П. Г. Козлов, Р. С. Федюк // Транспортные сооружения. — 2026. — Т. 13. — № 2. — URL: <https://t-s.today/PDF/17SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/17SATS226.

For citation:

Kozlov P.G., Fediuk R.S. The structure formation of geopolymer concretes based on hydraulically removed ash and slag waste. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2026;13(2): 17SATS226. Available at: <https://t-s.today/PDF/17SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/17SATS226. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 625.7

Козлов Павел Геннадьевич

ФГАОУ ВО «Дальневосточный университет», Владивосток, Россия

Преподаватель военного учебного центра

E-mail: Kozlov.pg@dvfu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7826-0221>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=810915

Федюк Роман Сергеевич

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия

Профессор военного учебного центра

Доктор технических наук, профессор

E-mail: Roman44@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2279-1240>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=635540

Структурообразование геополимерных бетонов на основе гидроудаленных золошлаковых отходов

Аннотация. Глобальная антропогенная нагрузка на экосистемы, обусловленная деятельностью цементной и энергетической отраслей, требует перехода к экологически безопасным строительным технологиям. Перспективным направлением признано производство бесцементных геополимерных бетонов с комплексной утилизацией золошлаковых отходов. Методом математического планирования экспериментов разработана широкая номенклатура составов, оптимальным способом уплотнения которых является вибрирование (1000 об/мин, 1 мин). Фазовый состав и кинетика структурообразования исследованы методами сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа, дифференциально-термического анализа и инфракрасной спектроскопии. Установлено, что в отличие от традиционных портландцементных систем, где доминируют гидросиликаты кальция, микроструктура разработанных геополимеров представлена гидроалюмосиликатами кальция и натрия. Интеграция атомов алюминия в кристаллическую решётку гидратных новообразований обеспечивает существенное упрочнение материала. Выявленный механизм структурообразования щелочеактивированных композиций на основе предварительно подготовленных золошлаковых продуктов подтверждает их высокую реакционную способность. Полученные геополимерные бетоны обладают повышенной ранней прочностью, коррозионной стойкостью и морозостойкостью, что делает их пригодными для эксплуатации в агрессивных средах. Материалы рекомендуются для возведения транспортных

сооружений (дорожные покрытия, опоры мостов, элементы тоннелей), способствуя снижению углеродного следа на 40–60 % и рациональному использованию промышленных отходов в рамках концепции циркулярной экономики. Результаты исследований внедрены в практику проектных организаций, а разработанная технология демонстрирует экономическую эффективность за счёт сокращения затрат на утилизацию отходов и снижение энергоёмкости производства вяжущих материалов.

Ключевые слова: строительство; структурообразование; геополимер; бетон; золошлаки; отходы; щелочь

Введение

Глобальные экологические вызовы современной цивилизации обусловлены внутренними противоречиями общественного прогресса, значительным увеличением антропогенного воздействия на окружающую среду и дисбалансом в социально-экономическом и научно-техническом развитии различных государств и регионов мира [1]. В настоящее время одной из главных экологических проблем в мире является глобальная антропогенная модификация природной среды, обусловленная, в том числе, значительным влиянием энергетических предприятий на экосистемы [2; 3], с учетом того, что угольные предприятия энергетики занимают важное место в экономиках крупнейших держав [4–6] (рис. 1).

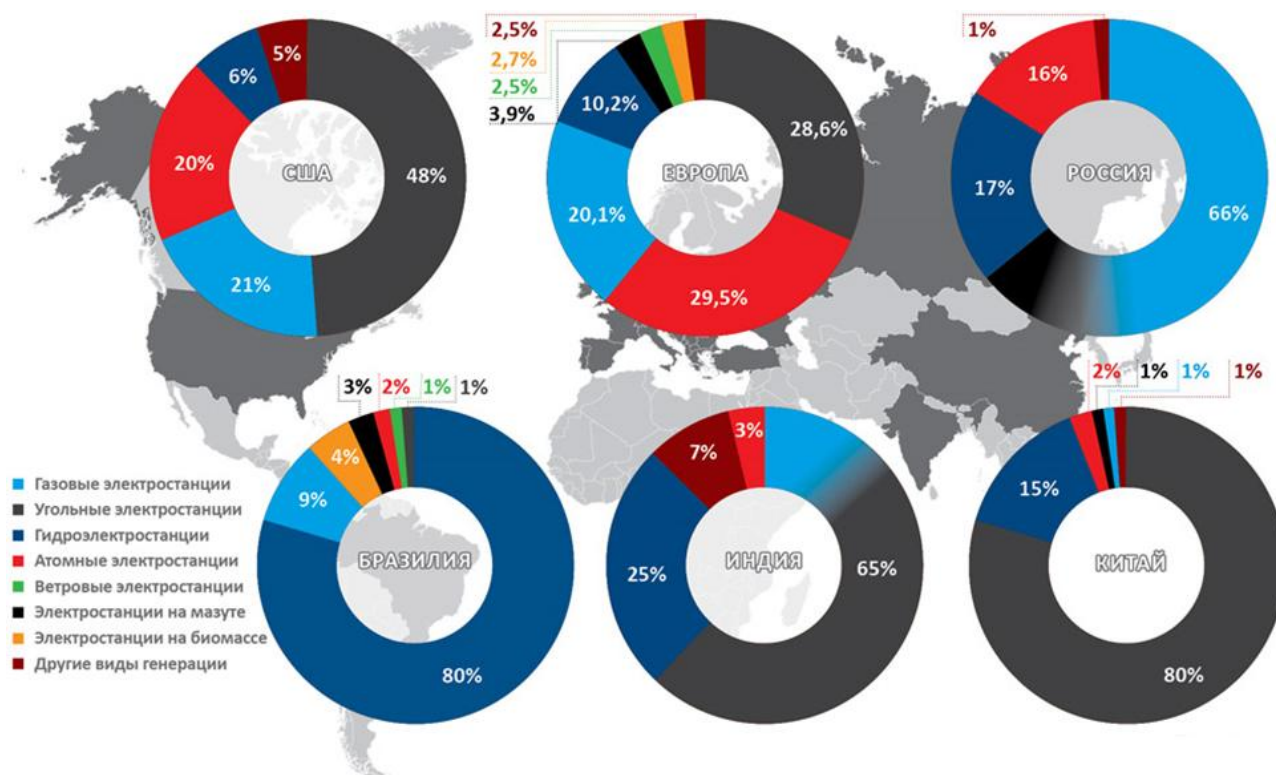


Рисунок 1. Структура генерации электроэнергетики
(по странам) (изображение с сайта <https://peretok.ru/infographics/699/6099/>)

В России всего 3 млн тонн золошлаковых отходов (не более 15 % от общего количества ежегодно образующихся отходов) используются для дальнейшей переработки в стройиндустрии, дорожном строительстве и других отраслях промышленности [7–10]. Для примера, в развитых странах утилизируют 70–90 % от выхода ЗШО, а в Нидерландах и Дании — до 100 % [11] (табл. 1).

Таблица 1

Утилизация ЗШО в разных странах

Страна	Уровень утилизации ЗШО (%)	Основные направления использования
Нидерланды и Дания	до 100 %	Строительные материалы, дорожное строительство
Япония	96–98 %	Расширение островных территорий
Германия	85–90 %	Строительство, дорожное покрытие, рециклинг
Южная Корея	80 %	Производство бетона, керамики
Китай	75–80 %	Строительные материалы, дорожное строительство
Индия	70–75 %	Производство цемента, кирпича, дамбы
Польша	60–65 %	Цемент, строительные блоки
США	45–50 %	Бетон, заполнители, рекультивация
Австралия	40–45 %	Дорожное строительство, строительные заполнители
ЮАР	20–25 %	Ограниченное применение
Россия	10–15 %	Небольшое использование в стройматериалах

Разработано авторами на основе статистических данных МЭА, отчёты Минэнерго РФ, Центральные статистические управления, отраслевые обзоры (2020–2023)

Таким образом, налицо проблема накопления миллиардов тонн золошлаковых отходов, занимающих сотни тысяч гектаров. При этом в Российской Федерации их утилизация находится на низком уровне, что вызывает необходимость ее расширения и поиск новых направлений рециклинга.

За границей изучение вопросов применения золошлаковых отходов (coal bottom ash) интенсивно развивается, в частности, доказана возможность замещения цемента в бетонах до 50 мас. % без снижения эксплуатационных характеристик [12–15].

Характеристики ЗШО могут варьироваться в довольно широком диапазоне в зависимости от вида используемого угля, технологии измельчения твердого топлива перед его загрузкой в печь, технологического процесса (прежде всего, температура и продолжительность) сжигания, метода удаления золошлаковых материалов и т. д. [16; 17]. ЗШО характеризуются железо-алюмосиликатным составом с аморфной матрицей и включениями в форме микросфер [18]. Удаление недожога угля и избытка оксида железа увеличивает активность золошлакового сырья [19].

Создание малоцементных и бесцементных материалов с позиции природоподобных технологий перспективно осуществлять на основе положений новой науки геоники, созданной В. С. Лесовиком [20]. Целью геоники является управление структурообразованием искусственных каменных материалов для достижения характеристик природных аналогов (имеющих прочностные свойства на порядок выше современных бетонов). При этом, необходимо понимать, что создание искусственных материалов нового поколения возможно только в случае применения трансдисциплинарного подхода, сочетающего в себе современные достижения различных отраслей науки.

Таким образом, золошлаковые отходы являются перспективным экоориентированным сырьем для замещения цемента в бетонах до 50 мас. %. Дальнейшее снижение нагрузки цементной промышленности на природную систему может быть достигнуто путем производства бесцементных бетонов (например, геополимеров) с позиции трансдисциплинарного подхода, что и является целью данной статьи.

Материалы и методы

Исходные материалы, используемые для изготовления образцов геополимерного бетона:

1. Золошлаковые отходы тепловых электростанций Приморского края (Владивостокской ТЭЦ-2, Приморской ГРЭС и Артёмовской ТЭЦ): применялись в качестве всех основных компонентов бетонной смеси — вяжущего, наполнителя и заполнителя.
2. Щелочной активатор — гидроксид натрия (каустическая сода) производства Zhongtai Chemical (КНР) в форме гранул (NaOH с чистотой 98 %) плотность: около 2,13 г/см³ при 20°C.
3. Вода затворения.

Таким образом, впервые все компоненты бетонной смеси (за исключением щелочного активатора и воды затворения) предложено получать из золошлаковых отходов.

Поскольку геополимерный бетон является новым (малоисследованным) строительным материалом, у него нет стандартного состава смеси. Из анализа литературы, приведенного во введении, известно, что при проектировании геополимера заполнитель принят около 70 % от всей бетонной смеси по массе. Зная плотность бетона, можно получить объединённую массу щелочной жидкости и золошлаковых материалов.

Для определения соотношения смеси для различных марок геополимерного бетона применяется метод математического планирования экспериментов (совокупность статистических и математических процедур, направленных на рациональный выбор условий проведения экспериментов с целью установления количественных зависимостей между факторами и откликом, минимизации числа опытов и повышения достоверности получаемых моделей), в котором варьировались 3 переменные (молярность (концентрация раствора гидроксида натрия), добавление кремнезема, полученного из ЗШО по разработанной технологии, и уровень замещения песка на предварительно подготовленные золошлаковые материалы в качестве заполнителя) (табл. 2). Варьируемые переменные выбраны на основе анализа литературы и предварительных исследований автора.

Таблица 2

Математическое планирование эксперимента

Варьируемые переменные	Минимум	Среднее значение	Максимум
X ₁ — Молярность	4	6	8
X ₂ — Добавление SiO ₂ , мас. %	0	0,5	1
X ₃ — Замещение песка на предварительно подготовленные ЗШМ в качестве заполнителя, мас. %	0	50	100

Создано авторами

Проектирование составов в кодированных переменных приведено в таблице 3. В результате разработано 8 составов, позволяющих охватить и изучить весь изучаемый спектр варьируемых характеристик.

Таблица 3

План эксперимента в кодированных переменных

Состав	X ₁	X ₂	X ₃
Г1	0	0	-1
Г2	0	-1	-1
Г3	-1	0	-1
Г4	0	1	-1
Г5	1	0	0
Г6	1	1	0
Г7	1	-1	1
Г8	-1	1	1

Создано авторами

Разработанные составы приведены в таблице 4. За контрольный принят состав Г1 — с минимальной молярностью, без добавления кремнеземного модификатора.

Таблица 4

Разработанные составы геополимеров, мас. %

Маркировка образцов	Компоненты					Молярность осадка автоклавирования
	Осадок автоклавирования	ЗШМ	Песок	Кремнезем	Вода	
Г1	15	0	70	0	12	6
Г2	14,5	0	70	0,5	14	4
Г3	15	0	70	0	14	4
Г4	14,5	0	70	0,5	10	8
Г5	14	35	35	1	12	6
Г6	14	35	35	1	10	8
Г7	14	70	0	1	14	4
Г8	15	70	0	0	10	8

Создано авторами

Структурообразование геополимеров, заявленное в цель работы, оценивалось по динамике уплотнения.

Морфологические особенности микроструктуры изучались на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Tescan MIRA3, позволяющим осуществлять энергодисперсионную спектроскопию. Ускоряющее напряжение — до 30 кВ. Разрешение — до 1 нм. Детекторы: SE (вторичные электроны) — для рельефа; BSE (обратно рассеянные электроны) — для фазового контраста; EDS-детектор (энергодисперсионный) — для элементного анализа. При использовании РЭМ визуализировано распределение частиц, выявлено наличие дефектов и изучен механизм взаимодействия компонентов.

Минералогический (фазовый) состав изучался на порошковом рентгеновском дифрактометре D8 Advance Bruker AXS (рентгенофазовый анализ, РФА). Источник излучения: рентгеновская трубка с Cu-анодом (длина волны $\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 1,5406 \text{ \AA}$). Напряжение/ток трубки — до 40 кВ / 40 мА. Диапазон углов 2θ — 3–80°. Шаг сканирования — 0,02° 2θ . Время экспозиции — 1 с на шаг (общее время измерения — ~60 мин). Детектор — полупроводниковый (VANTEC-2). Вращение образца — 15 об/мин для усреднения ориентации кристаллитов. Обработка проводилась с применением баз данных DIFFRAC Plus (Bruker) и PDF-2 (ICDD): база эталонных дифрактограмм для идентификации фаз. Погрешность измерения углов дифракции — не более $\pm 0,02^\circ$.

Термические исследования выполнялись с применением дериватографа Q-1500D методами дифференциально-термического анализа (ДТА) и термогравиметрии (ТГ). Образцы нагревали в платиновых тиглях в атмосфере аргона со скоростью 10°C/мин от 30 до 998°C. Термограммы записывали с плотностью 100 точек в минуту, обрабатывали с привлечением программного обеспечения NETZSCH Proteus Analysis (v 5.2.1). Погрешность прибора: при ТГ — 0,1 мг, при ДТА — 5 %

Инфракрасная спектроскопия проводилась на высокочувствительном спектрофотометре с преобразованием Фурье Shimadzu IR Affinity-1S на таблетках с KBr.

Результаты и обсуждение

В связи с тем, что технология геополимеров относительно нова и отлична от технологии цементных бетонов, важным для достижения целевых эксплуатационных характеристик является разработка способа уплотнения. Предложены три способа уплотнения: прессование, штыкование и вибрирование.

Прессование осуществлялось в течение 90 секунд при давлении 8 МПа. Следует признать этот метод не очень эффективным по ряду причин. Во-первых, повышенное давление уплотняет структуру, вытесняя необходимую воду из образца, что замедляет гидратацию и, соответственно, структурообразование. Во-вторых, вытесненная жидкая фаза оставляет пустоты и поры во всем объеме образца, делая рыхлую микроструктуру (рис. 2).



Рисунок 2. Образцы геополимеров в возрасте 28 суток, уплотненных прессованием (создано авторами)

Штыкование проводилось металлическим стержнем в спиральном направлении от краев к центру, по одному проколу на каждые десять квадратных сантиметров. Процесс является достаточно трудоемким и малоэффективным, так как также частично отмечаются рыхлые области на поверхности (рис. 3).



Рисунок 3. Образцы геополимеров в возрасте 28 суток, уплотненных штыкованием (создано авторами)

Уплотнение на вибрационном столе с частотой 1000 об/мин в течение 1 минуты (до появления пузырьков воздуха и цементного молочка на поверхности) показало лучшие результаты. Залитая смесь, подвергнутая вибрационному уплотнению, выдерживалась в формах при нормальных условиях (18–20°C) (рис. 4).

Структурообразование разработанных композитов можно оценить по динамике уплотнения на протяжении нормативного срока твердения (и даже за его пределами).

Сравнивая массу одинаковых объемов различных сырьевых смесей, видим, что основное влияние на нее оказывает наиболее высокоплотный материал — песок (табл. 5).



Рисунок 4. Затвердевшие образцы в возрасте 28 суток и их внутреннее строение (вибрационное уплотнение) (создано авторами)

Таблица 5

Разработанные составы геополимеров, мас. %

Маркировка образцов	Сырьевая смесь	1 сутки	7 суток	14 суток	28 суток	56 суток
Г1А	2 176	2 182 ±3	2 375 ±7	2 429 ±5	2 498 ±10	2 515 ±11
Г1В	2 180	2 186 ±5	2 381 ±9	2 434 ±8	2 502 ±9	2 519 ±10
Г1П	2 178	2 184 ±6	2 377 ±5	2 431 ±8	2 500 ±10	2 517 ±9
Г2А	2 176	2 185 ±8	2 375 ±8	2 433 ±7	2 505 ±7	2 523 ±8
Г2В	2 180	2 188 ±3	2 379 ±4	2 436 ±6	2 509 ±8	2 517 ±11
Г2П	2 178	2 186 ±7	2 379 ±7	2 434 ±5	2 507 ±7	2 525 ±10
Г3А	2 175	2 183 ±8	2 376 ±9	2 431 ±8	2 503 ±9	2 521 ±8
Г3В	2 179	2 186 ±5	2 378 ±5	2 434 ±6	2 507 ±8	2 525 ±11
Г3П	2 177	2 184 ±6	2 376 ±8	2 432 ±9	2 505 ±7	2 523 ±8
Г4А	2 176	2 184 ±4	2 373 ±6	2 432 ±7	2 504 ±8	2 522 ±9
Г4В	2 180	2 187 ±3	2 381 ±7	2 435 ±5	2 508 ±10	2 526 ±10
Г4П	2 178	2 185 ±6	2 377 ±9	2 433 ±8	2 506 ±7	2 524 ±9
Г5А	1 876	1 885 ±7	2 077 ±5	2 133 ±7	2 205 ±8	2 223 ±8
Г5В	1 880	1 888 ±5	2 079 ±4	2 136 ±6	2 209 ±9	2 227 ±11
Г5П	1 878	1 886 ±8	2 079 ±8	2 134 ±9	2 207 ±7	2 225 ±9
Г6А	1 878	1 887 ±7	2 077 ±7	2 135 ±8	2 207 ±8	2 227 ±10
Г6В	1 882	1 890 ±8	2 083 ±5	2 138 ±9	2 211 ±7	2 229 ±8
Г6П	1 880	1 888 ±3	2 079 ±9	2 136 ±5	2 209 ±10	2 227 ±9
Г7А	1 577	1 586 ±7	1 778 ±7	1 834 ±9	1 906 ±7	1 924 ±9
Г7В	1 581	1 589 ±6	1 780 ±6	1 837 ±7	1 910 ±8	1 928 ±11
Г7П	1 579	1 587 ±4	1 780 ±8	1 835 ±9	1 908 ±9	1 926 ±9
Г8А	1 577	1586 ±6	1776 ±6	1832 ±6	1 904 ±8	1 922 ±10
Г8В	1 581	1587 ±5	1782 ±7	1835 ±5	1 908 ±7	1 926 ±9
Г8П	1 579	1585 ±3	1778 ±9	1834 ±8	1 906 ±10	1 924 ±11

Последние буквы в маркировке образцов обозначают ТЭС, с которой взяты ЗШО: А — Артемовская ТЭС, В — Владивостокская ТЭС-2, П — Приморская ГРЭС. Создано авторами

В составах Г1–Г4, где традиционный заполнитель составляет 70 % по массе, плотность сырьевой смеси достигает 2175–2180 кг/м³, что соответствует характеристикам бетона средней плотности. Природный заполнитель — кварцевый песок — является невозобновляемым, дорогостоящим и, в ряде случаев, привозным материалом.

Поэтому разработанные составы Г4–Г8 нацелены на минимизацию потребления природных ресурсов (вплоть до полного замещения золошлаковыми отходами). Более того в этом случае значительно снижается вес сырьевой смеси, что снижает затраты на транспортировку, а в дальнейшем и снижает вес конструкции, позволяя повышать этажность здания или высоту сооружения.

С точки зрения структурообразования экспериментальные результаты динамики уплотнения можно объяснить следующим образом. В индукционный период и при начале гелеобразования (1 сутки) происходит быстрое растворение алюмосиликатного сырья в щелочном активаторе с высвобождением ионов Si^{4+} и Al^{3+} . Начинается поликонденсация с образованием кремнезёмисто-алюминатных олигомеров (Si-O-Al связей). Материал находится в пластичном состоянии, затем начинает загустевать. Плотность начинает увеличиваться за счёт уменьшения пористости и начала коагуляции.

На следующем этапе (интенсивная гелеобразующая и конденсационная стадия) происходит активное формирование трёхмерной геополимерной сети (N-A-S-H гель — натриевый алюмосиликатный гидрат). Отмечается снижение щелочности и стабилизация pH. Материал твердеет, объёмная усадка может быть незначительной. Поры начинают заполняться гелевой фазой, поэтому плотность значительно растёт (до $\sim 200 \text{ кг/м}^3$ от исходной смеси).

К 14 суткам завершается активная геополимеризация — основная масса гелеобразной фазы уже сформирована. Происходит «созревание» структуры — перестройка и уплотнение гелевой сети. Плотность продолжает расти, но медленнее. Уменьшается количество макро- и микропор.

К 28 суткам происходит стабилизация структуры — геополимеризация практически завершена. Возможны медленные постконденсационные процессы. Структура становится плотной и однородной. Остаточная пористость (а значит, и плотность) практически достигает минимума. При дальнейшем долгосрочном структурном «созревании» (до 56 суток) отмечаются очень медленные процессы уплотнения и рекристаллизации (частичная кристаллизация цеолитоподобных фаз).

Плотность может незначительно увеличиться (на 1 %) за счёт дальнейшего уплотнения. В некоторых случаях — стабилизация или даже незначительное снижение плотности из-за микроусадки или образования микротрещин.

Это подтверждает результаты основоположника геополимеров Д. Давидовица: геополимеризация в щелочной среде осуществляется за 3 стадии [21]:

1. Растворение Al_2O_3 и SiO_2 в концентрированном растворе NaOH или KOH.
2. Разложение природных полимерных образований на мономерные составляющие.
3. Твердение искусственно сформированных полимеров в результате переоконденсации мономеров.

Теория полимеризации геобетонных доказывает, что на первой стадии кинетика реакции характеризуется растворением алюмосиликатных оксидов с переходом в раствор ионов Na^+ или K^+ , в результате чего pH повышается. Связки Si-O и Al-O разъединяются, трансформируя ионы Si^{4+} и Al^{3+} в коллоидную форму с дальнейшей консолидацией в геополимерный искусственный камень.

Приведенный механизм протекания вышеупомянутых процессов при щелочной активации с позиции растворения и роста кристаллов объясняет прямую зависимость между степенью аморфности вещества и его активностью и, как следствие, степенью его растворимости в щелочной среде. Автоклавирование в щелочном растворе позволяет создать высоконасыщенный реакционноспособный материал, который при затворении водой начинает твердеть.

Типичным продуктом реакции геополимеризации является полученный затвердевший материал, микроструктура которого представляет собой плотную упаковку цеолитоподобных новообразований (рис. 5).

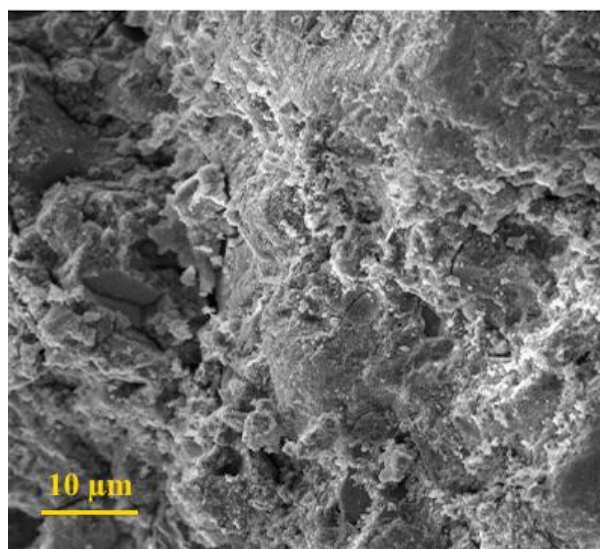


Рисунок 5. Микроструктура разработанных геополимеров в возрасте 28 суток (образец Г5А) (создано авторами)

Микроструктурный энергодисперсионный анализ подтверждает присутствие гидросиликатных тоберморитоподобных соединений, гидроалюмосиликатов кальция и натрия типа C–A–S–H и N–A–S–H (рис. 6).

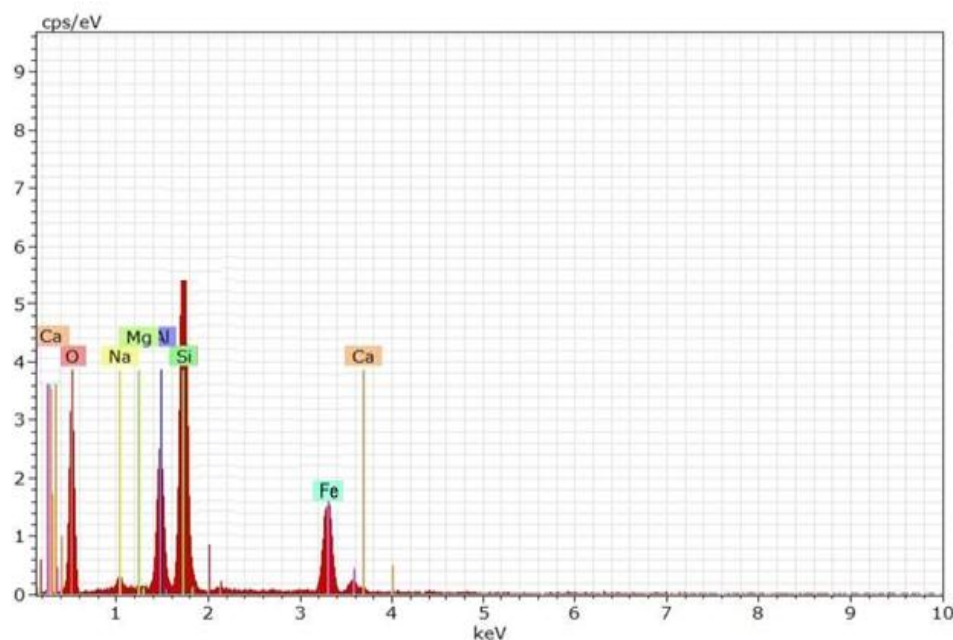


Рисунок 6. Микроструктурный энергодисперсионный анализ разработанных геополимеров в возрасте 28 суток (образец Г1В) (создано авторами)

В отличие от продуктов гидратации традиционных портландцементных бетонов, представленных основными структурообразующими новообразованиями гидросиликатов кальция, в разработанных геополимерах микроструктура составлена гидроалюмосиликатами кальция и натрия. В этом случае, атомы алюминия, встроенные в кристаллическую решетку гидратных новообразований, значительно упрочняют ее, что будет доказано далее в процессе исследования механических характеристик материала.

При этом, отмечается значительный структурообразующий эффект кремнезема, полученного в процессе утилизации золошлаковых отходов.

Эти же результаты подтверждаются исследованиями методом РФА (рис. 7), показывающие эффективность структурообразования геополимеров, представленных различными алюминатными соединениями.

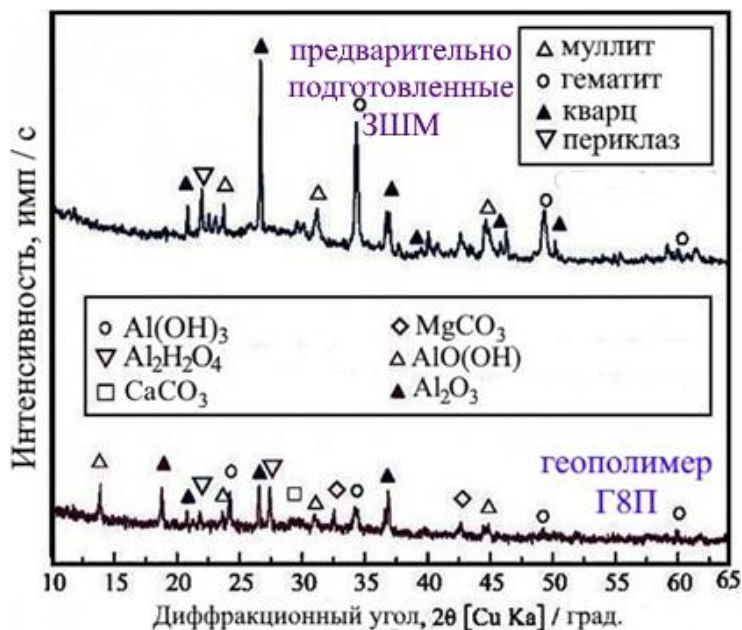


Рисунок 7. Микроструктурный энергодисперсионный анализ разработанных геополимеров в возрасте 28 суток (образец Г1В) (создано авторами)

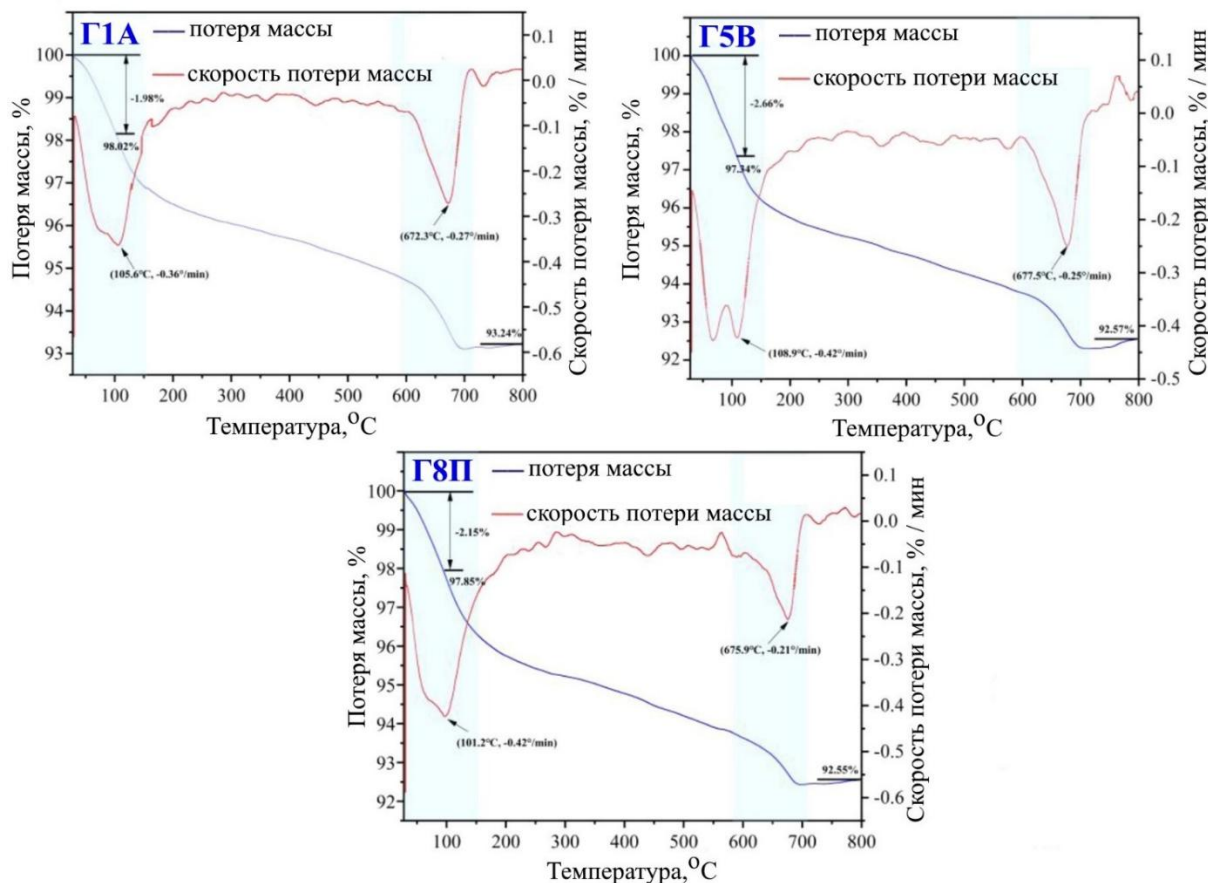


Рисунок 8. Дифференциально-термический анализ разработанных геополимеров в возрасте 28 суток (создано авторами)

Результаты дифференциально-термического анализа показаны на рисунке 8, где две очевидные области потери массы сосредоточены при 20–220°C и 670–680°C. Испарение физически адсорбированной воды или не прореагировавшей свободной воды происходит в нижней области около 100 °С. Для разработанных геополимеров потери массы около 20–220°C в основном связаны с разложением продуктов гидратационного геля. Комплексные исследования (СЭМ, ЭДС, РФА, ДТА, ИК-спектроскопия) показывают преимущественно наличие гелей $\text{Ca}(\text{Na})\text{-A-S-H}$, обеспечивающих прочность матрицы.

Другой очевидный диапазон дифференциального термического анализа — около 675°C, что объясняется разложением карбонатной фазы.

На рисунке 9 представлены характерные пики инфракрасного спектра как для золошлаковых материалов, так и для геополимеров.

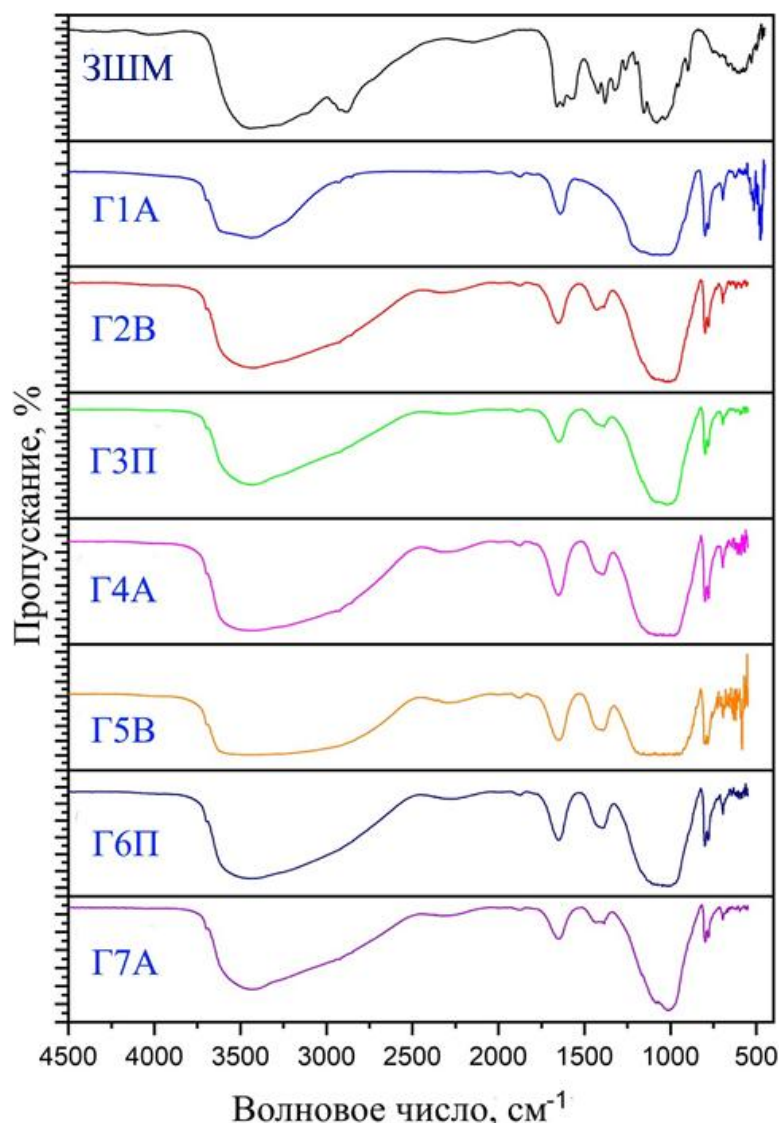


Рисунок 9. Дифференциально-термический (создано авторами)

Присутствие функциональных групп, принадлежащих природному цеолиту, соответствующему геополимеру и предварительно подготовленным золошлаковым материалам, подтверждается анализом спектров. ИК-спектры золошлаковых материалов и разработанных геополимеров были интерпретированы с использованием установленных соотношений для алюмосиликатных каркасов.

Широкая полоса в области $3200\text{--}3440\text{ см}^{-1}$ относится к валентным колебаниям O–H и N–H (водородно-связанные гидроксилы). Поглощение в области $1020\text{--}1100\text{ см}^{-1}$ согласуется с асимметричным растяжением связи Si–O–(Al/Si), типичным для геополимерных гелей. Полоса в области $1320\text{--}1390\text{ см}^{-1}$ может быть отнесена к колебаниям карбоната. Полоса пропускания в диапазоне от 550 см^{-1} до 1037 см^{-1} представляет собой симметричное растяжение связи (Si–O–Si и Al–O–Si) кристаллических и аморфных алюмосиликатов. Полосы около 690 см^{-1} и 799 см^{-1} соответствуют симметричным валентным колебаниям (Si–O–Si), в этих диапазонах предполагается присутствие кварца, тогда как в диапазоне $883\text{--}1425\text{ см}^{-1}$ наблюдается полоса пропускания, представляющая собой валентные колебания связи O–C–O карбоната.

Наконец, в полосе пропускания более 3000 см^{-1} это соответствует растяжению гидроксильной группы, которая, как предполагается, соответствует гидроксидам, используемым в качестве активаторов геополимеров или поверхностных вод.

Таким образом, выявлен механизм структурообразования щелочеактивированных материалов с применением различных продуктов предварительно подготовленных золошлаковых материалов. В отличие от продуктов гидратации традиционных портландцементных бетонов, представленных основными структурообразующими новообразованиями алюминатов и гидросиликатов кальция, в разработанных геополимерах микроструктура составлена гидроалюмосиликатами кальция и натрия. В этом случае, атомы алюминия, встроенные в кристаллическую решетку гидратных новообразований, значительно упрочняют ее.

Выводы

Проведённое исследование подтверждает, что снижение экологической нагрузки цементной промышленности на природные экосистемы эффективно достигается за счёт перехода к бесцементным геополимерным бетонам, разработанным на основе трансдисциплинарного подхода, объединяющего материаловедение, химию твёрдого тела, промышленную экологию и строительную инженерию. Методом математического планирования экспериментов создана оптимизированная номенклатура составов, в которой варьирование пропорций предварительно модифицированных золошлаковых отходов позволило точно регулировать реологические, прочностные и деформационные характеристики смеси. Экспериментально установлено, что вибрационное уплотнение при частоте 1000 об/мин в течение 60 секунд обеспечивает максимальную плотность упаковки частиц, минимизирует открытую пористость и формирует однородную структуру, что напрямую коррелирует с повышением марочной прочности и снижением водопоглощения.

Выявленный механизм структурообразования щелочеактивированных систем демонстрирует принципиальное отличие от традиционной цементной гидратации: вместо низкоосновных гидросиликатов кальция формируется трёхмерная каркасная сетка из гидроалюмосиликатов кальция и натрия. Ключевую роль в упрочнении играет изоморфное замещение и встраивание атомов алюминия в тетраэдрические позиции кристаллической решётки, что повышает степень поликонденсации, снижает капиллярную проницаемость и формирует материал с повышенной химической стойкостью к сульфатной, хлоридной и кислотной агрессии. Полученные геополимеры обладают стабильными показателями морозостойкости, низкой усадкой при твердении и ускоренным набором прочности на ранних сроках, что обеспечивает их технологическую совместимость с современными методами строительства.

Таким образом, разработанная технология позволяет не только полностью утилизировать техногенные отложения энергетики, но и создать конкурентоспособный строительный материал для объектов транспортной инфраструктуры.

Внедрение геополимерных бетонов способствует сокращению выбросов CO₂ на 40–60 %, снижению энергозатрат на производство вяжущих и формированию замкнутых циклов использования вторичных ресурсов в рамках стратегий низкоуглеродного развития. Рекомендовано дальнейшее масштабирование технологии в условиях промышленных полигонов, проведение долгосрочных натурных испытаний и адаптация нормативно-технической базы для стандартизации применения геополимерных композиций в капитальном и инфраструктурном строительстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурменко Ф. Ю. Перспективы и возможности использования золошлакового привода Молдавской ГРЭС / Ф. Ю. Бурменко, С. Л. Чирвина [и др.] // Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. — 2019. — № 3(63). — С. 165–168. — EDN: [WYNBXX](#). (дата обращения: 12.04.2026).
2. Панков П. П. Утилизация золошлаковых смесей в составах композиционных материалов для теплоизоляции земляного полотна / П. П. Панков, Д. В. Бесполитов, Н. Д. Шаванов, Н. А. Коновалова // Экология и промышленность России. — 2026. — Т. 30, № 2. — С. 22–27. — DOI: [10.18412/1816-0395-2026-2-22-27](#). — EDN: [HRJHDC](#). (дата обращения: 12.04.2026).
3. Adeleye B.N. Energy use and the role of per capita income on carbon emissions in African countries / B.N. Adeleye, R. Osabohien, A.I. Lawal, T. De Alwis // PLoS One. — 2021. — Т. 16, № 11. — Art. e0259488. — DOI: [10.1371/journal.pone.0259488](#). — EDN: [CLVCJW](#). (дата обращения: 12.04.2026).
4. Алексейко Л. Н. О комплексной переработке золошлаковых отходов энергетики / Л. Н. Алексейко, А. В. Таскин // Экология и развитие общества: труды IX Международной конференции / Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы (МАНЭБ). — 2005. — С. 12–21. — EDN: [EKMKWI](#). (дата обращения: 12.04.2026).
5. Левкина Е. В. Актуальность исследования экономической безопасности как экономической категории / Е. В. Левкина, Ж. И. Лялина, Е. А. Курасова // Экономическая безопасность. — 2022. — Т. 5, № 1. — С. 339–350. — DOI: [10.18334/ecsec.5.1.114359](#). — EDN: [JJSOWV](#). (дата обращения: 12.04.2026).
6. Бесполитов Д. В. Утилизация вскрышных пород в составах композиционных материалов для устройства технологических дорог горнорудных предприятий / Д. В. Бесполитов, Н. А. Коновалова, П. П. Панков, Н. Д. Шаванов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2023. — № 1. — С. 188–197. — DOI: [10.15372/FTPRPI20230118](#). — EDN: [KSIBWO](#). (дата обращения: 12.04.2026).
7. de Oliveira L.B. Durability of geopolymers with industrial waste / L.B. de Oliveira, M.T. Marvila, E. C. Pereira [et al.] // Case Studies in Construction Materials. — 2022. — Т. 16. — Art. e00839. — DOI: [10.1016/j.cscm.2021.e00839](#). — EDN: [IYNFGM](#). (дата обращения: 12.04.2026).
8. Рахимов Р. З. Геополимеры / Р. З. Рахимов, Н. Р. Рахимова, О. В. Стоянов // Вестник Казанского технологического университета. — 2014. — Т. 17, № 23. — С. 189–196. — EDN: [TCCWKT](#). (дата обращения: 12.04.2026).

9. Шестаков Н. И. Сравнение биопозитивности покрытий дорожных одежд методом анализа иерархий / Н. И. Шестаков, Б. П. Титаренко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2021. — № 3(84). — С. 25–34. — EDN: [DTMSCB](#). (дата обращения: 12.04.2026).
10. Ремнев В. В. Золошлаковые бетоны на основе технической серы для гибких защитных матов / В. В. Ремнев, Д. В. Кузеванов, А. В. Ремнев // Технологии бетонов. — 2023. — № 6(191). — С. 33–36. — EDN: [VBAFUJ](#). (дата обращения: 12.04.2026).
11. Ерошкина Н. А. Вяжущее, полученное из магматических горных пород с добавкой шлака, и бетон на его основе / Н. А. Ерошкина, В. И. Калашников, М. О. Коровкин // Региональная архитектура и строительство. — 2011. — № 2. — С. 62–65. — EDN: [NVZXMf](#). (дата обращения: 12.04.2026).
12. Dong Y. Remediation of Pb-Cd contaminated soil using coal bottom ash-based geopolymers and coir: Soil remodeling and mechanism / Y. Dong, Y. Xiang, H. Hou [et al.] // Journal of Cleaner Production. — 2023. — Т. 423. — Art. 138706. — DOI: [10.1016/j.jclepro.2023.138706](#). — EDN: [XYOJUK](#). (дата обращения: 12.04.2026).
13. Guo L. Effect of an alkali activators on the compressive strength and reaction mechanism of coal gangue-slag-fly ash geopolymer grouting materials / L. Guo, J. Liu, M. Zhou, S. An // Construction and Building Materials. — 2024. — Т. 426. — Art. 136012. — DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2024.136012](#). — EDN: [DZZUBO](#). (дата обращения: 12.04.2026).
14. Jian H. Research on composite municipal solid waste incineration bottom ash and granulated blast furnace slag based geopolymers with sodium alginate for sealing coal seam gas drainage boreholes / H. Jian, C. Wang, G. Dou, X. Zhong // Fuel. — 2024. — Т. 358, Part B. — Art. 130278. — DOI: [10.1016/j.fuel.2023.130278](#). — EDN: [QJCMXP](#). (дата обращения: 12.04.2026).
15. Qin Z. Combined preparation and application of geopolymer pavement materials from coal slurry-slag powder-fly ash mining solid waste: A case study / Z. Qin, Y. Yuan, Z. Chen [et al.] // Construction and Building Materials. — 2024. — Т. 441. — Art. 137510. — DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2024.137510](#). — EDN: [XLPJMW](#). (дата обращения: 12.04.2026).
16. Соловьев А. А. Программа по использованию золошлаковых отходов Омских ТЭЦ / А. А. Соловьев, Л. Ю. Парицкая // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, Омск, 23–24 ноября 2023 года. — Омск: СибАДИ, 2023. — С. 571–574. — EDN: [DTIWE](#). (дата обращения: 12.04.2026).
17. Lukina N.V. Chapter 19 — Biological recultivation of fly ash dumps strengthening bioeconomy and circular economy in the Ural region of Russia / N.V. Lukina, E.I. Filimonova, M.A. Glazyrina [et al.] // Bioremediation and Bioeconomy / ed. M.N. Vara Prasad. — 2nd ed. — Elsevier, 2024. — С. 499–527. — DOI: [10.1016/B978-0-443-16120-9.00003-0](#). (дата обращения: 12.04.2026).
18. Сочава В. Б. Введение в учение о геосистемах / В. Б. Сочава. — Новосибирск: Наука, 1978. — 320 с. — EDN: [TARVMP](#). (дата обращения: 12.04.2026).
19. Pandey V.C. Carbon sequestration in fly ash dumps: Comparative assessment of three plant association / V.C. Pandey, N. Sahu, S. K. Behera, N. Singh // Ecological Engineering. — 2016. — Т. 95. — С. 198–205. — DOI: [10.1016/j.ecoleng.2016.06.010](#). (дата обращения: 12.04.2026).

20. Лесовик В. С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении: монография / В. С. Лесовик. — 2-е изд., доп. — Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. — 287 с. — ISBN 978-5-361-00354-9. — EDN: [WOAVYD](#). (дата обращения: 12.04.2026).
21. Davidovits J. Geopolymer and geopolymeric materials / J. Davidovits // Journal of Thermal Analysis. — 1989. — Т. 35. — С. 429–441. — DOI: [10.1007/bf01904446](https://doi.org/10.1007/bf01904446). — EDN: [WREEAP](#). (дата обращения: 12.04.2026).

Kozlov Pavel Gennadievich

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

E-mail: Kozlov.pg@dvfu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7826-0221>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=810915

Fediuk Roman Sergeevich

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

E-mail: Roman44@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2279-1240>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=635540

The structure formation of geopolymer concretes based on hydraulically removed ash and slag waste

Abstract. The global anthropogenic load on ecosystems, caused by the activities of the cement and energy industries, requires a transition to environmentally friendly construction technologies. The production of cement-free geopolymer concretes with comprehensive disposal of ash and slag waste is recognized as a promising direction. Using the method of mathematical experimental design, a wide range of formulations has been developed, the optimal method of compacting which is vibration (1000 rpm, 1 min). The phase composition and kinetics of structure formation were studied using scanning electron microscopy, X-ray phase analysis, differential thermal analysis, and infrared spectroscopy. It was established that, unlike traditional Portland cement systems, where calcium hydrosilicates dominate, the microstructure of the developed geopolymers is represented by calcium and sodium hydroaluminosilicates. The integration of aluminum atoms into the crystal lattice of hydrated formations ensures significant strengthening of the material. The identified mechanism of structure formation in alkali-activated compositions based on pre-prepared ash and slag products confirms their high reactivity. The resulting geopolymer concretes have increased early strength, corrosion resistance and frost resistance, which makes them suitable for use in aggressive environments. The materials are recommended for the construction of transport structures (road pavements, bridge supports, tunnel elements), contributing to a 40–60 % reduction in the carbon footprint and the rational use of industrial waste within the framework of the circular economy concept. The research results have been implemented in the practice of design organizations, and the developed technology demonstrates economic efficiency due to reduced costs for waste disposal and lower energy consumption in the production of binding materials.

Keywords: construction; structure formation; geopolymer; concrete; ash slag; waste; alkali