

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»

КОЗЛОВ Павел Геннадьевич

**Экологически безопасные геополимерные
бетоны на основе предварительно
подготовленных золошлаковых
материалов**

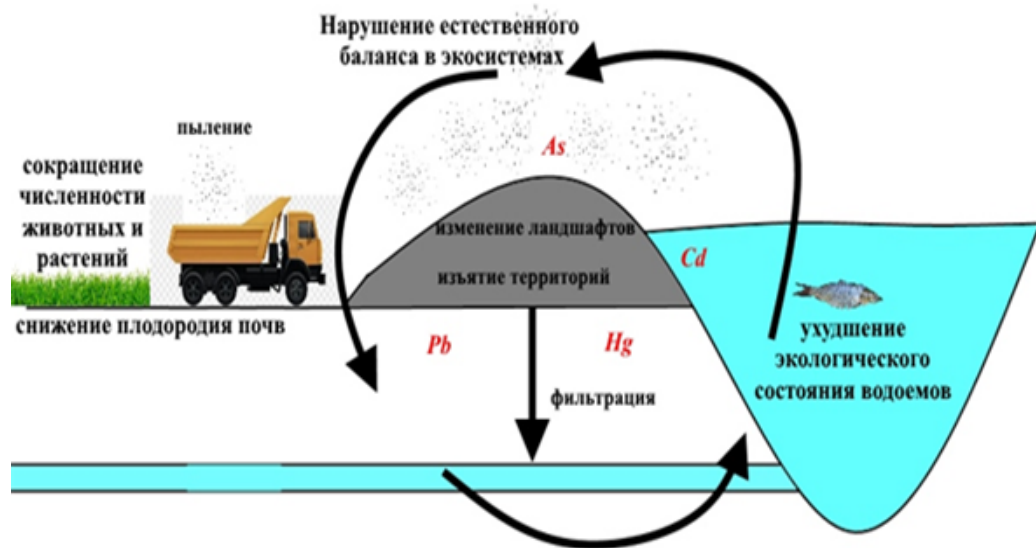
Специальность 1.5.15. Экология (технические науки)

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Р.С. Федюк

Владивосток -2026

Стратегия экологической безопасности РФ
Стратегия национальной безопасности РФ
Стратегии научно-технологического развития РФ
Приоритетные направления научно-технологического развития РФ
Сквозные технологии РФ
Национальные цели развития РФ на период до 2030 г. и на перспективу до 2036 г.

Исследование – на стыке 2 национальных проектов России –
«Экологическое благополучие» и «Новые материалы и химия»



Ежегодные платежи (НВОС)
500 руб. / м³ ЗШО

Степень разработанности темы



Капустин, 2014



Лесовик, 2018



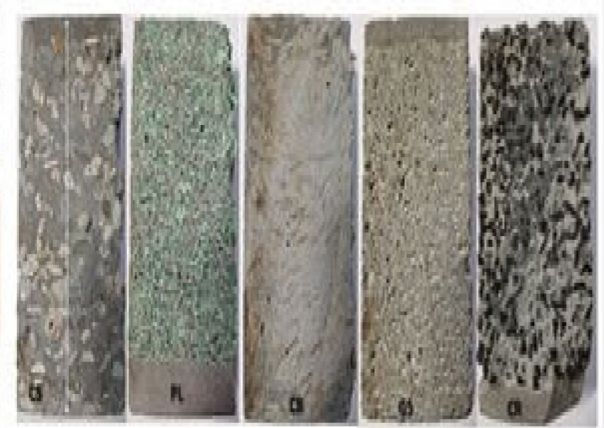
Петропавловская, 2025



Duxson, 2020



Provis, 2023



Tayeh, 2026

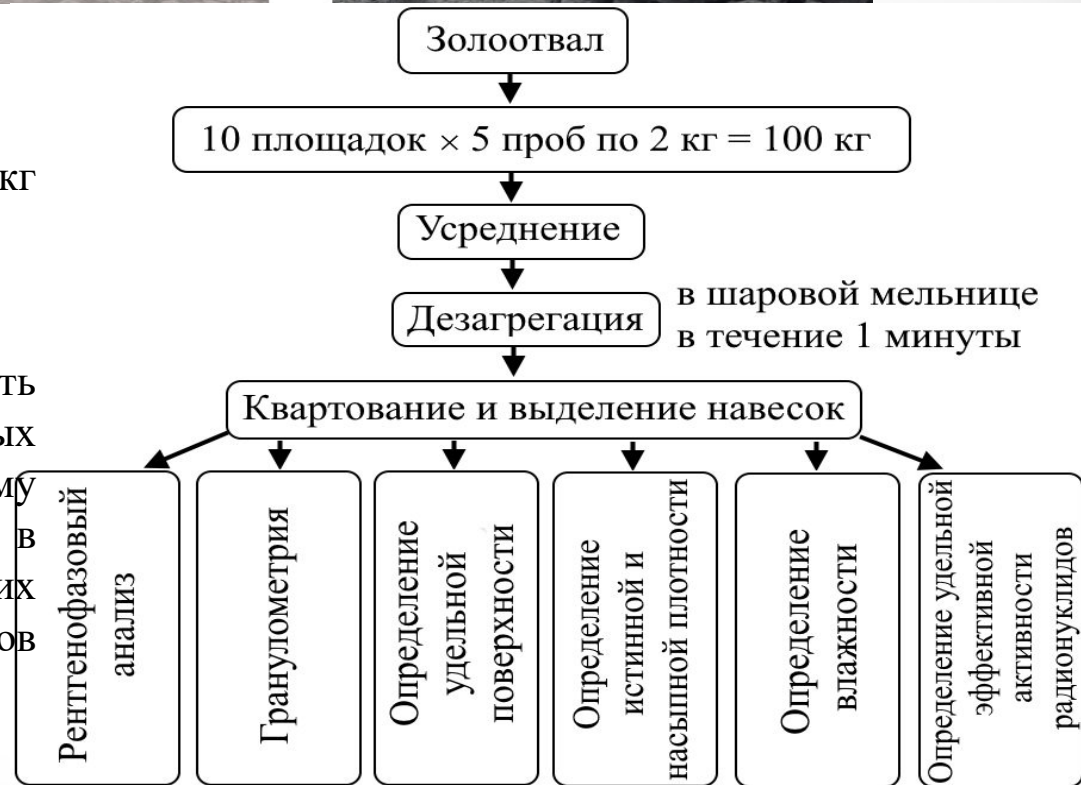
Пробел в комплексных исследованиях, посвященных экологически направленным энергоэффективным технологиям очистки гидроудаленных золошлаковых отходов, а также механизмам структурообразования геополимерных строительных материалов на их основе.

Район работ, отбор проб и пробоподготовка



Владивостокская ТЭЦ-2 - $112,93 \pm 22,64$ Бк/кг
Приморская ГРЭС - $115,13 \pm 21,93$ Бк/кг
Артёмовской ТЭЦ - $108,63 \pm 18,41$ Бк/кг

Удельная эффективная активность естественных радионуклидов золошлаковых отходов позволяет отнести их все к первому классу материалов (менее 370 Бк/кг) в соответствии с ГОСТ 30108-94, то есть их можно использовать для всех видов строительных работ.

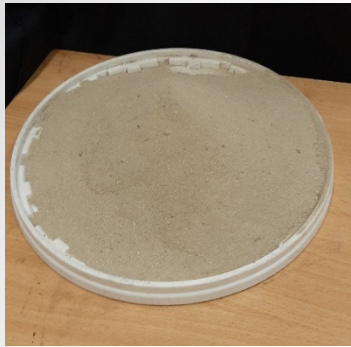


Сырьевые материалы

Вязущее

Щелочной активатор

Мелкий заполнитель



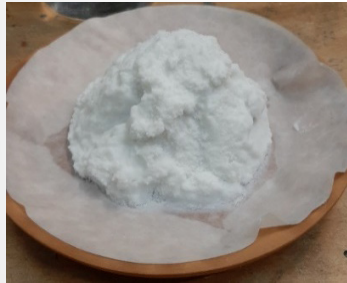
ЗШМ

гидроксид
натрия

вода

Техногенный
(ЗШМ)

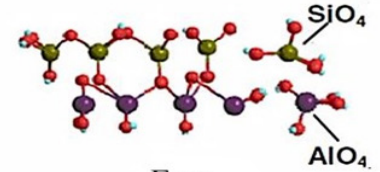
природный
(кварцевый песок)



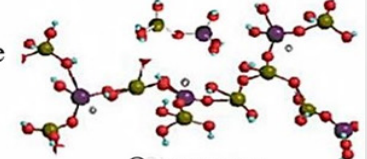
SiO₂



ШАГ 1
растворение
H₂O, Na⁺/K⁺, OH⁻



ШАГ 2
реконденсация
Гель
Na⁺/K⁺, OH⁻



ШАГ 3
полимеризация и твердение
H₂O



Механизм
реакции
геополимеризации

Усовершенствование технологии очистки ЗШО

гидроклассификация
и флотация

1500 об/мин,
2-5 мин

дезинтеграция
и помол

0,045 - 0,325 мм

магнитная
сепарация (1 этап)

0,3–0,6 Тл

магнитная
сепарация
(2 этап)

0,1–0,3 Тл

сушка

150°C, 1 час

ИСХОДНЫЕ
ЗОЛОШЛАКОВЫЕ
ОТХОДЫ

магнитная
сепарация (1 этап)

0,3–0,6 Тл

магнитная
сепарация
(2 этап)

0,1–0,3 Тл

сушка

150°C, 1 час



ЗШС, очищенная от недожога и железа

Получение геополимерного вяжущего

Пропорции разработанных составов, мас. доли

| Состав | ЗШС | NaOH | H ₂ O |
|--------|-----|------|------------------|
| 1 | 1 | 3 | 5 |
| 2 | 1 | 2 | 4 |
| 3 | 2 | 2 | 7 |



Выбор технологических параметров автоклавирования

| Технологические параметры | Время, час. | Давление, МПа | Температура, °С |
|---------------------------|-------------|---------------|-----------------|
| 1 | 0,5 | 1 | 200 |
| 2 | 1 | 1,5 | 220 |
| 3 | 1,5 | 2 | 240 |

Гидротермальная
обработка
(автоклавирование)



Получение геополимерного вяжущего

Сепарация
щелочеактивированных ЗШМ
(30 мин при частоте
вращения 3500 об/мин)



Осадок автоклавирования
(геополимерное вяжущее)

Осадок автоклавирования ЗШМ,
измельченный в шаровой мельнице
(10 минут до достижения удельной
поверхности 500 м²/кг)



Химический состав осадка автоклавирования ЗШМ, мас. %

| ЗШМ (ТЭС) | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | TiO ₂ | Na ₂ O | др. | п.п.п. |
|--------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|--------------|------------------|-------------------|--------------|--------|
| Артемовская ТЭС | 62,4± 0,8 | 27,2± 0,4 | 0,8±0,0 8 | 4,2 ±0,08 | 1,4 ±0,08 | 0,3 ±0,01 | 2,1 ±0,02 | 1,6 ±0,01 | - |
| Владивостокская ТЭС-2 | 62,7± 0,7 | 27,7± 0,4 | 0,6±0,0 3 | 4,1 ±0,08 | 1,2 ±0,08 | 0,4 ±0,01 | 1,9 ±0,01 | 1,4 ±0,01 | - |
| Приморская ГРЭС | 62,3± 0,6 | 27,1± 0,4 | 1,2±0,0 8 | 4,3 ±0,08 | 1,4 ±0,08 | 0,2 ±0,01 | 2,2 ±0,03 | 1,7 ±0,01 | - |

Сравнение разработанного состава с мировыми аналогами

| Параметры | Davidovits, J. (1994) [143] | Bakharev, T., Fernández-Jiménez, A. (2005) [129] | Duxson, P., Provis, J.L. et al. (2007) [148] | Provis, J.L., Bernal, S.A. (2014) [176] | Разработанный состав |
|-------------------------|---|---|---|--|---|
| Сырье | Метакаолин (продукт термической обработки каолиновой глины при 600–800°C) | Гранулированный доменный шлак (ГДШ), богатый CaO | Зола-уноса низкокальциевая, SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ > 70%) | Смесь золы-уноса (40–70%) и гранулированного доменного шлака (30–60%) | Предварительно подготовленный ЗШМ |
| Активатор | Растворы NaOH (8–14 М) и/или силикат натрия (Na ₂ SiO ₃) | NaOH (4–8 М) или Na ₂ SiO ₃ (иногда в комбинации) | NaOH (10–14 М) + Na ₂ SiO ₃ | NaOH (8–12 М) + Na ₂ SiO ₃ | Раствор NaOH (4–8 М) |
| M _s | 1,0–2,5 | 0,8–1,4 | 1,0–1,6 | 1,0–1,6 | 1,0–2,0 |
| Температура твердения | 60–80°C, 24–72 ч. | 20–40°C (часто без пропарки) | 60–80°C, 24–48 ч. | 25–60°C 72 ч. | 18–20°C |
| Технологический процесс | Метакаолин смешивается с щелочным активатором. Полученная паста заливается в формы и подвергается термической обработке | ГДШ смешивается с активатором при комнатной температуре. Быстрое схватывание (в течение 1–2 часов) позволяет обходиться без термообработки. | Зола-уноса перемешивается с активатором, заливается в формы и пропаривается, иначе реакция крайне медленная. | Сухая смесь золы и шлака гомогенизируется, затем в неё вводится активатор. Быстрое схватывание обеспечивается за счёт шлака, а зола улучшает долговечность | Инновационное геополимерное вяжущее на основе осадка, образующегося при автоклавной обработке золошлаковых материалов и подвергнутого механохимической активации |
| Прочность при сжатии | 40–50 МПа | 30–45 МПа | 20–50 МПа | 30–50 МПа | выше 60 МПа |
| Примечание | Высокие энергозатраты, как при производстве метакаолина, так и при получении геополимеров | Дефицитное сырье | Необходимость применения товарных продуктов: золы-уноса и жидкого стекла | Недостатки двух предыдущих вариантов | В отличие от составов, требующих введения щёлочи при приготовлении смеси, материал готов к использованию: для активации - добавить воду, что исключает сложные, энергоёмкие и потенциально опасных технологических операциях. |

Проектирование составов геополимерных бетонов

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 |

| 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 |

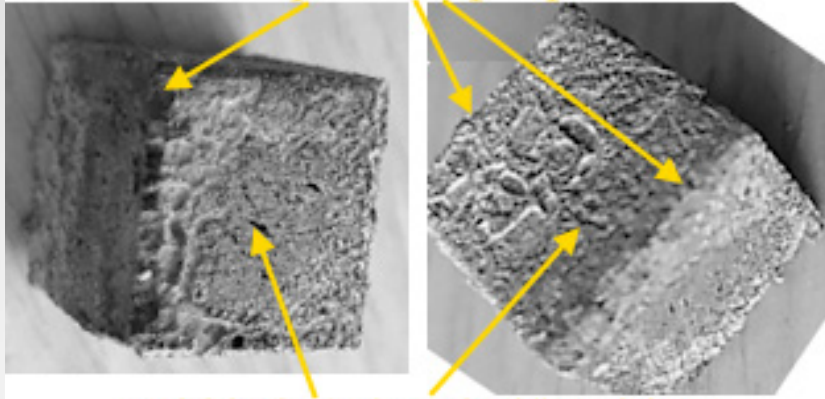
План эксперимента в кодированных переменных

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

Разработанные составы геополимеров, мас. %

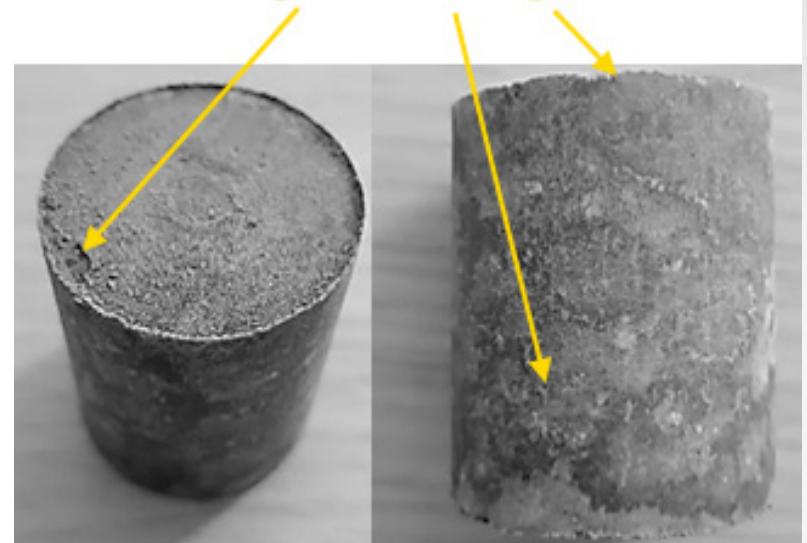
Экспериментальное определение оптимального способа уплотнения

неровные ребра



шероховатая поверхность

частично рыхлая поверхность



Образцы геополимеров в возрасте 28 суток, уплотненных прессованием

Образцы геополимеров в возрасте 28 суток, уплотненных штыкованием



Образцы геополимеров в возрасте 28 суток и их внутреннее строение (вибрационное уплотнение)

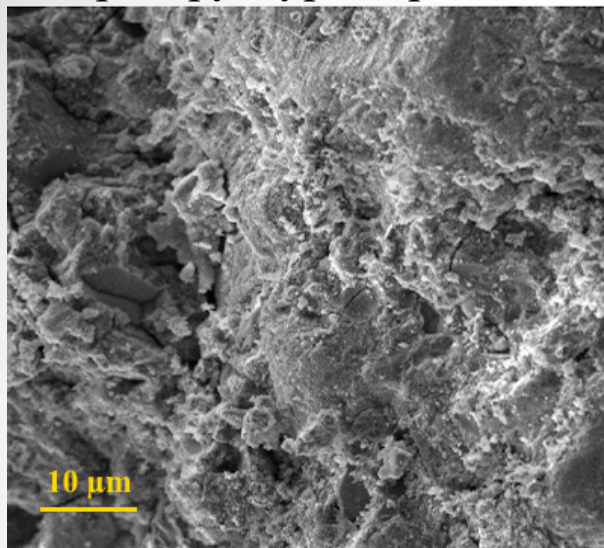
Плотность геополимеров в различные сроки твердения, кг / м³

| Маркировка образцов | Сырьевая смесь | 1 сутки | 7 суток | 14 суток | 28 суток | 56 суток |
|---------------------|----------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Г1А | 2176 | 2182±3 | 2375±7 | 2429±5 | 2498±10 | 2515±11 |
| Г1В | 2180 | 2186±5 | 2381±9 | 2434±8 | 2502±9 | 2519±10 |
| Г1П | 2178 | 2184±6 | 2377±5 | 2431±8 | 2500±10 | 2517±9 |
| Г2А | 2176 | 2185±8 | 2375±8 | 2433±7 | 2505±7 | 2523±8 |
| Г2В | 2180 | 2188±3 | 2379±4 | 2436±6 | 2509±8 | 2517±11 |
| Г2П | 2178 | 2186±7 | 2379±7 | 2434±5 | 2507±7 | 2525±10 |
| Г3А | 2175 | 2183±8 | 2376±9 | 2431±8 | 2503±9 | 2521±8 |
| Г3В | 2179 | 2186±5 | 2378±5 | 2434±6 | 2507±8 | 2525±11 |
| Г3П | 2177 | 2184±6 | 2376±8 | 2432±9 | 2505±7 | 2523±8 |
| Г4А | 2176 | 2184±4 | 2373±6 | 2432±7 | 2504±8 | 2522±9 |
| Г4В | 2180 | 2187±3 | 2381±7 | 2435±5 | 2508±10 | 2526±10 |
| Г4П | 2178 | 2185±6 | 2377±9 | 2433±8 | 2506±7 | 2524±9 |
| Г5А | 1876 | 1885±7 | 2077±5 | 2133±7 | 2205±8 | 2223±8 |
| Г5В | 1880 | 1888±5 | 2079±4 | 2136±6 | 2209±9 | 2227±11 |
| Г5П | 1878 | 1886±8 | 2079±8 | 2134±9 | 2207±7 | 2225±9 |
| Г6А | 1878 | 1887±7 | 2077±7 | 2135±8 | 2207±8 | 2227±10 |
| Г6В | 1882 | 1890±8 | 2083±5 | 2138±9 | 2211±7 | 2229±8 |
| Г6П | 1880 | 1888±3 | 2079±9 | 2136±5 | 2209±10 | 2227±9 |
| Г7А | 1577 | 1586±7 | 1778±7 | 1834±9 | 1906±7 | 1924±9 |
| Г7В | 1581 | 1589±6 | 1780±6 | 1837±7 | 1910±8 | 1928±11 |
| Г7П | 1579 | 1587±4 | 1780±8 | 1835±9 | 1908±9 | 1926±9 |
| Г8А | 1577 | 1586±6 | 1776±6 | 1832±6 | 1904±8 | 1922±10 |
| Г8В | 1581 | 1587±5 | 1782±7 | 1835±5 | 1908±7 | 1926±9 |
| Г8П | 1579 | 1585±3 | 1778±9 | 1834±8 | 1906±10 | 1924±11 |

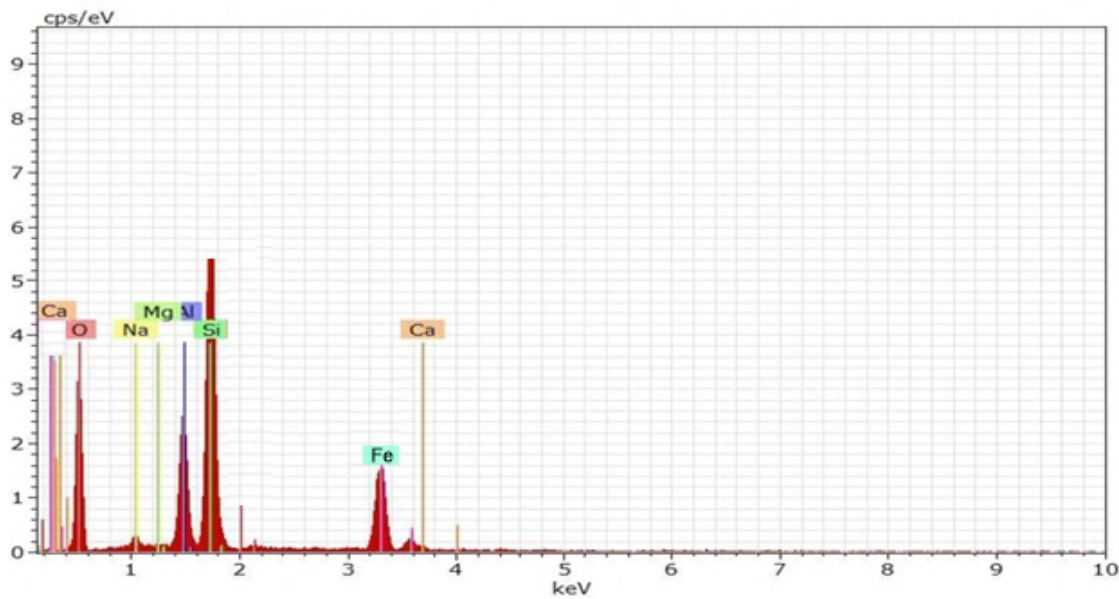
Примечание: последние буквы в маркировке образцов обозначают ТЭС, с которой взяты ЗШО:
 А - Артемовская ТЭЦ, В - Владивостокская ТЭЦ-2, П - Приморская ГРЭС

Микроструктура разработанных геополимеров (28 суток)

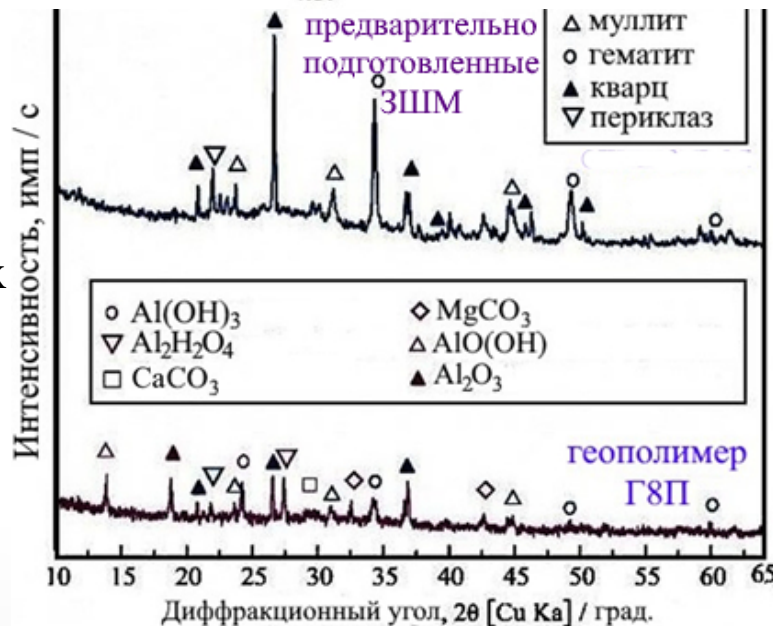
Микроструктура образца Г5А



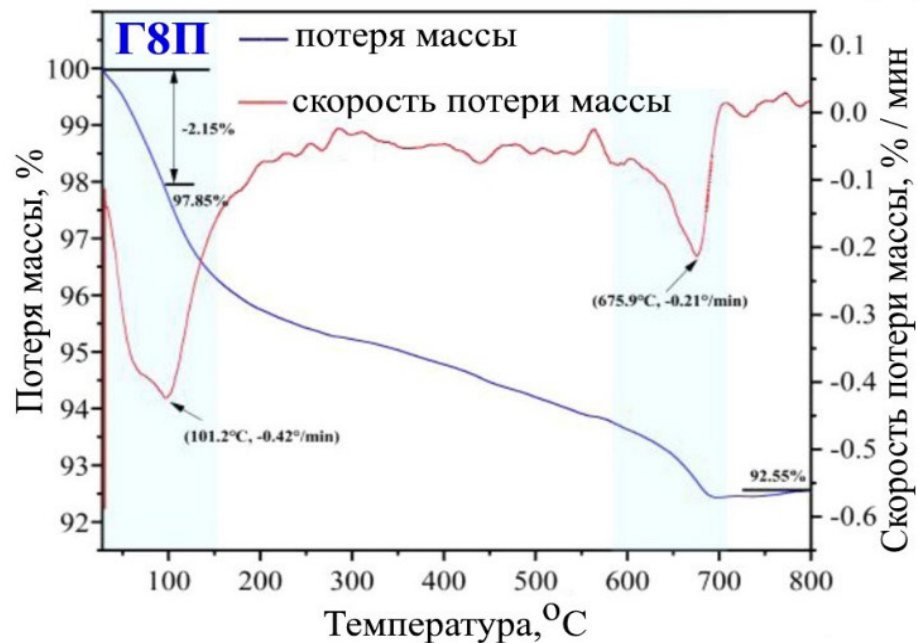
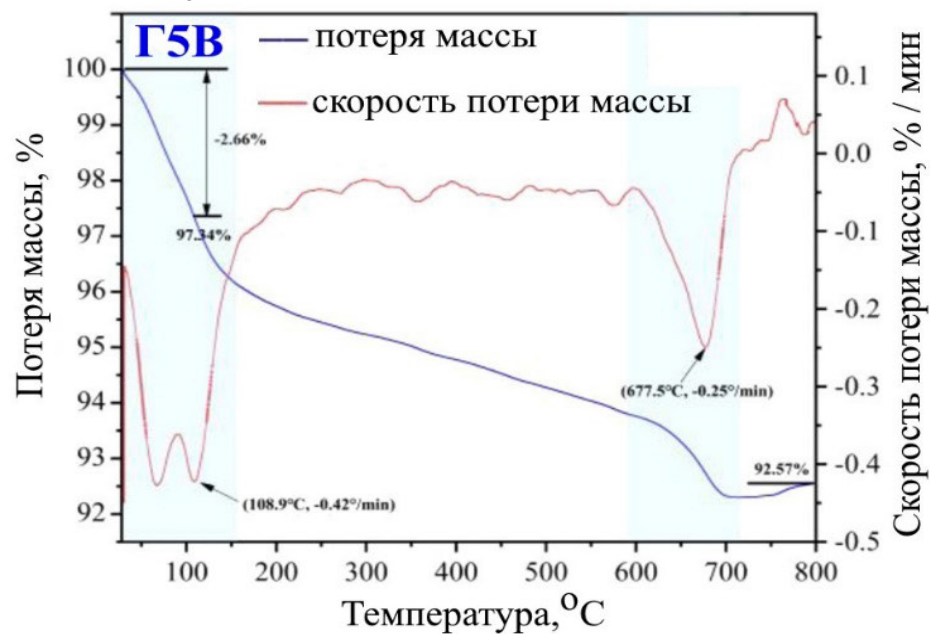
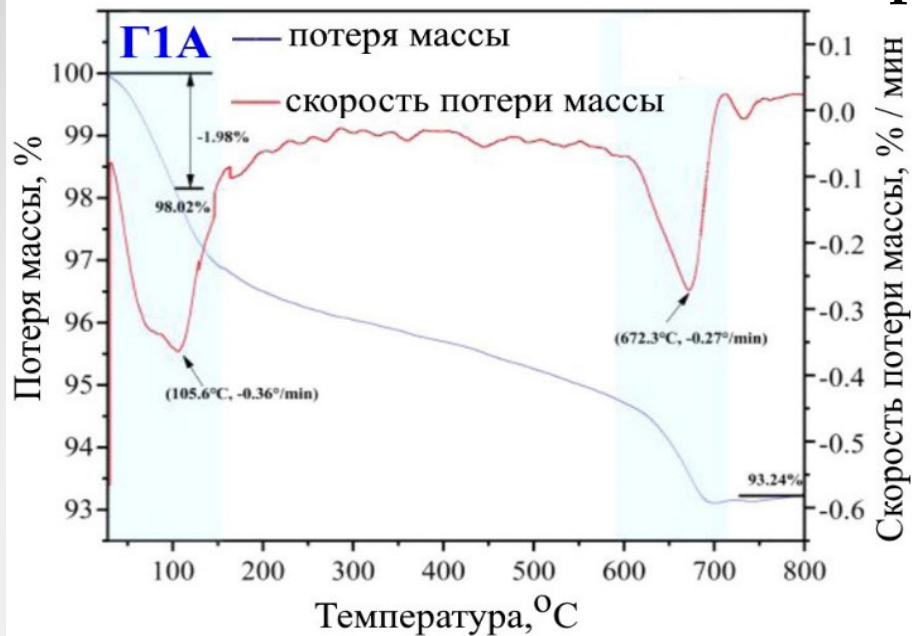
Энергодисперсионный анализ образца Г1В



Рентгенофазовый анализ разработанных геополимеров



Дифференциально-термический анализ разработанных геополимеров (28 суток)



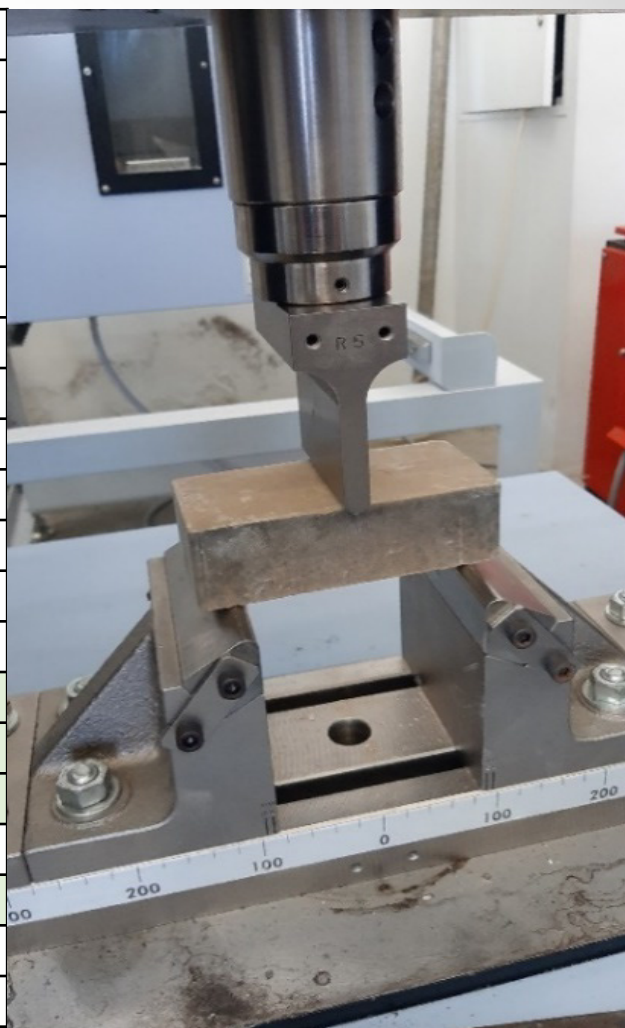
Прочность при сжатии геополимеров в различные сроки твердения, МПа

| Маркировка образцов | 2 суток | 7 суток | 14 суток | 28 суток | 56 суток |
|---------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Г1А | 9,1±0,1 | 21,2±0,5 | 28,3±0,6 | 40,9±0,61 | 42,2±0,7 |
| Г1В | 9,1±0,2 | 21,3±0,6 | 28,2±0,6 | 41,0±0,61 | 42,5±0,7 |
| Г1П | 9,2±0,2 | 21,4±0,4 | 28,0±0,7 | 41,1±0,7 | 42,1±0,8 |
| Г2А | 11,2±0,3 | 28,9±0,6 | 37,4±0,6 | 50,4±0,6 | 52,3±0,7 |
| Г2В | 11,1±0,3 | 29,0±0,5 | 37,3±0,6 | 50,5±0,6 | 52,5±0,6 |
| Г2П | 11,3±0,4 | 28,8±0,7 | 37,5±0,7 | 50,3±0,7 | 52,4±0,8 |
| Г3А | 8,1±0,1 | 17,2±0,4 | 23,3±0,4 | 35,9±0,44 | 37,1±0,5 |
| Г3В | 8,1±0,2 | 17,3±0,2 | 23,2±0,2 | 35,0±0,2 | 37,2±0,17 |
| Г3П | 8,2±0,2 | 17,4±0,3 | 23,0±0,2 | 35,1±0,2 | 37,1±0,27 |
| Г4А | 10,3±0,2 | 23,8±0,6 | 32,5±0,6 | 43,3±0,6 | 47,4±0,62 |
| Г4В | 10,2±0,3 | 23,9±0,6 | 32,6±0,61 | 43,3±0,61 | 47,3±0,27 |
| Г4П | 10,4±0,3 | 23,7±0,4 | 32,4±0,44 | 43,5±0,44 | 47,5±0,44 |
| Г5А | 14,2±0,4 | 34,9±0,8 | 48,4±0,79 | 62,4±0,79 | 67,3±0,8 |
| Г5В | 14,1±0,5 | 35,0±0,6 | 50,3±0,61 | 59,5±0,61 | 65,5±0,61 |
| Г5П | 14,3±0,4 | 35,8±0,7 | 49,5±0,6 | 60,4±0,6 | 66,4±0,62 |
| Г6А | 13,2±0,5 | 33,9±0,7 | 44,4±0,7 | 56,4±0,7 | 62,3±0,7 |
| Г6В | 13,1±0,4 | 31,0±0,8 | 46,3±0,8 | 55,5±0,8 | 61,5±0,7 |
| Г6П | 13,3±0,3 | 34,8±0,6 | 45,5±0,7 | 57,4±0,7 | 63,4±0,8 |
| Г7А | 12,2±0,4 | 30,9±0,5 | 41,4±0,52 | 52,4±0,52 | 57,3±0,53 |
| Г7В | 12,1±0,3 | 29,0±0,4 | 43,3±0,27 | 53,5±0,27 | 57,5±0,27 |
| Г7П | 12,3±0,4 | 28,8±0,5 | 42,5±0,52 | 51,4±0,52 | 57,4±0,53 |
| Г8А | 7,0±0,2 | 15,2±0,1 | 20,3±0,1 | 27,9±0,6 | 32,1±0,1 |
| Г8В | 7,1±0,3 | 15,3±0,3 | 20,2±0,4 | 28,0±0,4 | 32,2±0,53 |
| Г8П | 7,2±0,1 | 15,4±0,2 | 20,0±0,2 | 28,1±0,2 | 32,1±0,44 |



Прочность при изгибе геополимеров в различные сроки твердения, МПа

| Маркировка образцов | 2 суток | 7 суток | 14 суток | 28 суток | 56 суток |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Г1А | 1,3±0,06 | 3,5±0,18 | 4,0±0,20 | 6,9±0,36 | 7,2±0,36 |
| Г1В | 1,3±0,06 | 3,5±0,18 | 4,2±0,21 | 6,9±0,35 | 7,5±0,37 |
| Г1П | 1,4±0,07 | 3,4±0,17 | 4,0±0,20 | 6,9±0,35 | 7,1±0,35 |
| Г2А | 1,9±0,09 | 3,9±0,19 | 5,4±0,27 | 7,1±0,35 | 7,3±0,36 |
| Г2В | 1,8±0,09 | 4,0±0,20 | 5,3±0,27 | 7,1±0,35 | 7,5±0,37 |
| Г2П | 1,9±0,09 | 3,8±0,19 | 5,5±0,27 | 7,2±0,36 | 7,4±0,36 |
| Г3А | 1,2±0,06 | 2,8±0,14 | 3,9±0,20 | 5,1±0,25 | 6,1±0,30 |
| Г3В | 1,2±0,06 | 2,8±0,14 | 3,9±0,20 | 5,0±0,25 | 6,2±0,31 |
| Г3П | 1,3±0,06 | 2,8±0,14 | 3,9±0,20 | 5,1±0,25 | 6,1±0,30 |
| Г4А | 1,5±0,06 | 3,8±0,19 | 4,1±0,20 | 6,1±0,30 | 7,9±0,39 |
| Г4В | 1,4±0,07 | 3,9±0,19 | 4,2±0,21 | 6,1±0,30 | 7,9±0,39 |
| Г4П | 1,5±0,07 | 3,7±0,18 | 4,3±0,21 | 6,2±0,31 | 7,9±0,39 |
| Г5А | 2,3±0,10 | 4,9±0,24 | 8,1±0,46 | 10,4±0,52 | 10,5±0,52 |
| Г5В | 2,2±0,11 | 5,0±0,25 | 8,3±0,41 | 10,3±0,52 | 10,5±0,52 |
| Г5П | 2,3±0,11 | 5,1±0,25 | 8,5±0,42 | 10,4±0,52 | 10,5±0,52 |
| Г6А | 2,2±0,10 | 4,9±0,24 | 6,4±0,32 | 9,8±0,49 | 10,3±0,52 |
| Г6В | 2,1±0,10 | 4,8±0,24 | 6,3±0,32 | 9,7±0,48 | 10,5±0,53 |
| Г6П | 2,3±0,11 | 4,8±0,24 | 6,5±0,32 | 9,8±0,49 | 10,4±0,52 |
| Г7А | 2,2±0,11 | 3,9±0,19 | 6,9±0,33 | 8,6±0,43 | 9,9±0,49 |
| Г7В | 2,1±0,10 | 4,0±0,17 | 7,0±0,35 | 8,5±0,42 | 9,9±0,49 |
| Г7П | 2,3±0,11 | 3,8±0,19 | 7,0±0,32 | 8,4±0,42 | 9,8±0,49 |
| Г8А | 1,0±0,05 | 2,2±0,11 | 3,3±0,32 | 4,9±0,44 | 5,8±0,28 |
| Г8В | 1,1±0,05 | 2,3±0,11 | 3,2±0,20 | 4,0±0,40 | 5,8±0,59 |
| Г8П | 1,2±0,06 | 2,4±0,12 | 3,0±0,15 | 4,1±0,20 | 5,6±0,58 |

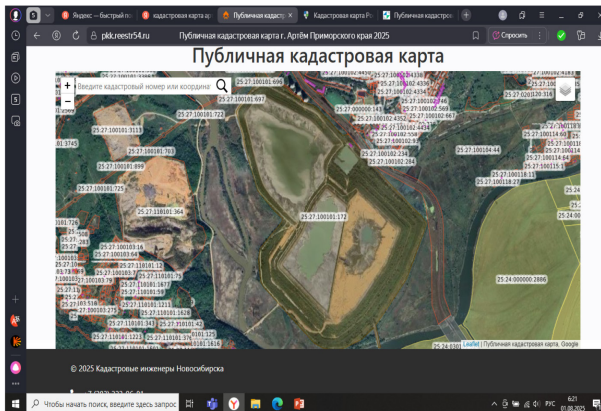


Спутниковые снимки и кадастровые карты золоотвалов

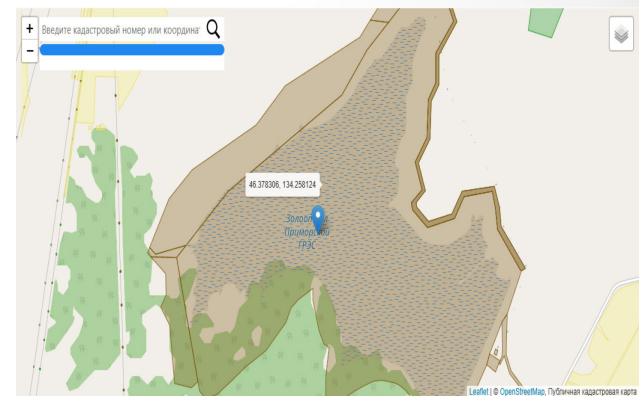
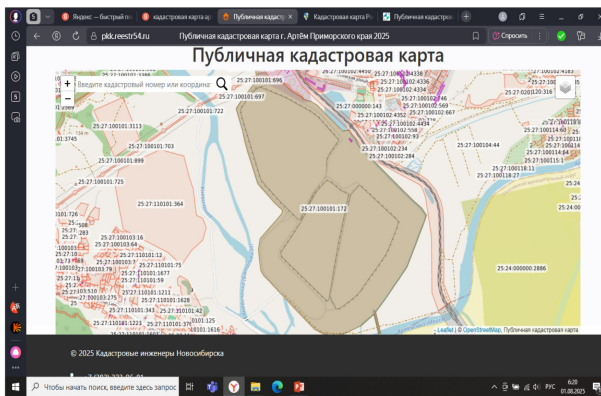
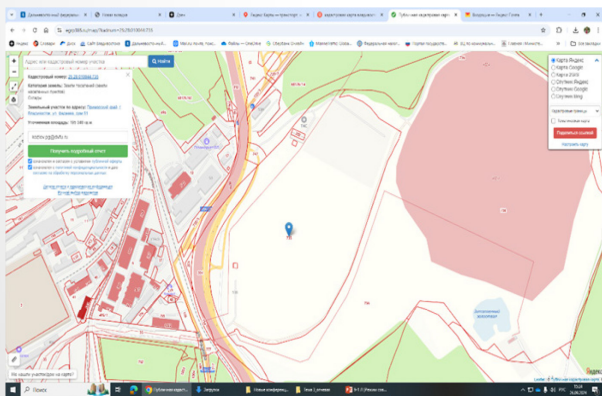
Владивостокская ТЭЦ-2



Артемовская ТЭЦ



Приморская ГРЭС



Растения, применяемые в исследовании



Характеристики исходных субстратов

| Показатель | Исходные ЗШО | ЗШМ + торф | ЗШМ + перегной | ЗШМ + биогумус | ЗШМ + минерал. удобрения | ЗШМ + супесь | Бурозем |
|------------------------------|--------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------|--------------|-----------|
| Артемовская ТЭЦ | | | | | | | |
| рН | 8,5±0,2 | 4,2±0,1 | 6,2±0,1 | 6,8±0,2 | 7,4±0,2 | 7,0±0,2 | 4,4±0,1 |
| Органика (%) | 1,2±0,02 | 32±0,8 | 28±0,7 | 45±0,12 | 9,2±0,3 | 4,6±0,1 | 4,1±0,1 |
| ЕКО (мг-экв/100 г) | 6,3±0,2 | 25±0,6 | 20±0,5 | 30±0,8 | 9,8±0,3 | 10,5±0,4 | 28±0,7 |
| Pb (мг/кг) | 22±0,5 | 5±0,1 | 3±0,1 | 2±0,1 | 16±0,4 | 14±0,4 | 10±0,2 |
| Cd (мг/кг) | 0,8±0,005 | <0,1 ±0,001 | <0,1 ±0,001 | <0,1 ±0,001 | 0,9 ±0,006 | 0,6±0,005 | 0,3±0,003 |
| Владивостокская ТЭЦ-2 | | | | | | | |
| рН | 8,4±0,2 | 4,2±0,1 | 6,2±0,2 | 6,8±0,2 | 7,4±0,2 | 7,0±0,2 | 4,4±0,1 |
| Органика (%) | 1,3±0,06 | 32±0,8 | 28±0,7 | 45±0,9 | 9,2±0,2 | 4,6±0,1 | 4,1±0,1 |
| ЕКО (мг-экв/100 г) | 6,4±0,2 | 25±0,7 | 20±0,5 | 30±0,8 | 9,8±0,3 | 10,5±0,4 | 28±0,7 |
| Pb (мг/кг) | 23±0,5 | 5±0,2 | 3±0,1 | 2±0,1 | 16±0,4 | 14±0,4 | 10 |
| Cd (мг/кг) | 0,2±0,002 | <0,1 ±0,001 | 0,3 ±0,003 | <0,1 ±0,001 | 1,0±0,01 | 0,5±0,005 | 0,4±0,004 |
| Приморская ГРЭС | | | | | | | |
| рН | 8,6±0,2 | 4,0±0,1 | 6,4±0,1 | 7,0±0,2 | 7,6±0,2 | 6,8±0,2 | 4,4±0,2 |
| Органика (%) | 1,1±0,02 | 34±0,9 | 26±0,7 | 43±0,12 | 8,9±0,05 | 4,4±0,02 | 3,9±0,02 |
| ЕКО (мг-экв/100 г) | 6,6±0,1 | 23±0,7 | 22±0,7 | 32±0,9 | 10,1±0,5 | 10,7±0,5 | 30±0,9 |
| Pb (мг/кг) | 21±0,6 | 7±0,1 | 1±0,01 | 1±0,01 | 14±0,5 | 12±0,5 | 8±0,3 |
| Cd (мг/кг) | 0,4±0,004 | <0,1±0,01 | 0,5±0,005 | <0,1 ±0,001 | <0,1 ±0,001 | 0,7±0,007 | 0,6±0,008 |



посадка семян



участок с посадками

Содержание тяжелых металлов в исходных субстратах

| Показатель | Pb | Cd | Zn | Cu | Cr | Ni |
|-----------------------------|---------|-------------|---------|---------|----------|---------|
| ПДК | ≤ 5 | ≤ 0,1 | ≤ 50 | ≤ 30 | ≤ 10 | ≤ 5 |
| Артемовская ТЭЦ | | | | | | |
| Исходные ЗШО | 7,5±0,2 | 0,4±0,01 | 83±0,24 | 52±0,12 | 31±0,12 | 8,9±0,2 |
| ЗШМ + торф | 4,3±0,1 | 0,04±0,001 | 34±0,12 | 23±0,11 | 6,3±0,02 | 2,4±0,1 |
| ЗШМ + перегной | 4,1±0,1 | 0,01±0,0002 | 33±0,12 | 21±0,11 | 7,2±0,04 | 3,7±0,1 |
| ЗШС + биогумус | 2,3±0,1 | 0,05±0,001 | 18±0,06 | 10±0,06 | 3,2±0,02 | 2,1±0,1 |
| ЗШМ + минеральные удобрения | 4,4±0,1 | 0,04±0,001 | 42±0,13 | 17±0,1 | 2,1±0,01 | 3,6±0,1 |
| ЗШМ + супесь | 4,2±0,1 | 0,02±0,001 | 36±0,12 | 19±0,1 | 3,0±0,01 | 2,1±0,1 |
| Бурозем | 1,8±0,1 | 0,03±0,001 | 22±0,11 | 12±0,05 | 2,5±0,01 | 1,8±0,1 |
| Владивостокская ТЭЦ-2 | | | | | | |
| Исходные ЗШО | 7,1±0,2 | 0,2±0,003 | 86±0,25 | 57±0,2 | 31±0,13 | 9,0±0,6 |
| ЗШМ + торф | 4,4±0,1 | 0,03±0,001 | 34±0,13 | 23±0,11 | 6,4±0,02 | 3,5±0,1 |
| ЗШМ + перегной | 4,2±0,1 | 0,02±0,001 | 34±0,12 | 26±0,14 | 7,2±0,03 | 4,1±0,1 |
| ЗШС + биогумус | 2,2±0,1 | 0,03±0,001 | 14±0,05 | 10±0,04 | 3,6±0,02 | 2,1±0,1 |
| ЗШМ + минеральные удобрения | 4,5±0,1 | 0,05±0,001 | 45±0,16 | 16±0,15 | 2,1±0,01 | 3,8±0,2 |
| ЗШМ + супесь | 4,1±0,1 | 0,01±0,001 | 33±0,12 | 20±0,14 | 3,1±0,01 | 1,6±0,1 |
| Бурозем | 1,1±0,1 | 0,02±0,001 | 25±0,11 | 16±0,15 | 2,5±0,01 | 1,8±0,1 |
| Приморская ГРЭС | | | | | | |
| Исходные ЗШО | 7,4±0,2 | 0,3±0,001 | 81±0,22 | 52±0,19 | 30±0,12 | 9,1±0,2 |
| ЗШМ + торф | 4,1±0,1 | 0,02±0,001 | 29±0,12 | 28±0,09 | 6,5±0,07 | 3,6±0,2 |
| ЗШМ + перегной | 4,4±0,1 | 0,01±0,001 | 29±0,12 | 31±0,12 | 7,1±0,2 | 4,0±0,2 |
| ЗШС + биогумус | 1,9±0,1 | 0,04±0,001 | 9±0,06 | 11±0,06 | 3,7±0,1 | 2,0±0,1 |
| ЗШМ + минеральные удобрения | 4,8±0,1 | 0,04±0,001 | 50±0,3 | 17±0,09 | 2,0±0,01 | 3,9±0,2 |
| ЗШМ + супесь | 3,8±0,1 | 0,01±0,001 | 28±0,1 | 19±0,1 | 3,0±0,01 | 1,7±0,1 |
| Бурозем | 1,1±0,1 | 0,01±0,001 | 20±0,1 | 17±0,1 | 2,6±0,01 | 1,7±0,1 |

График всхожести растений

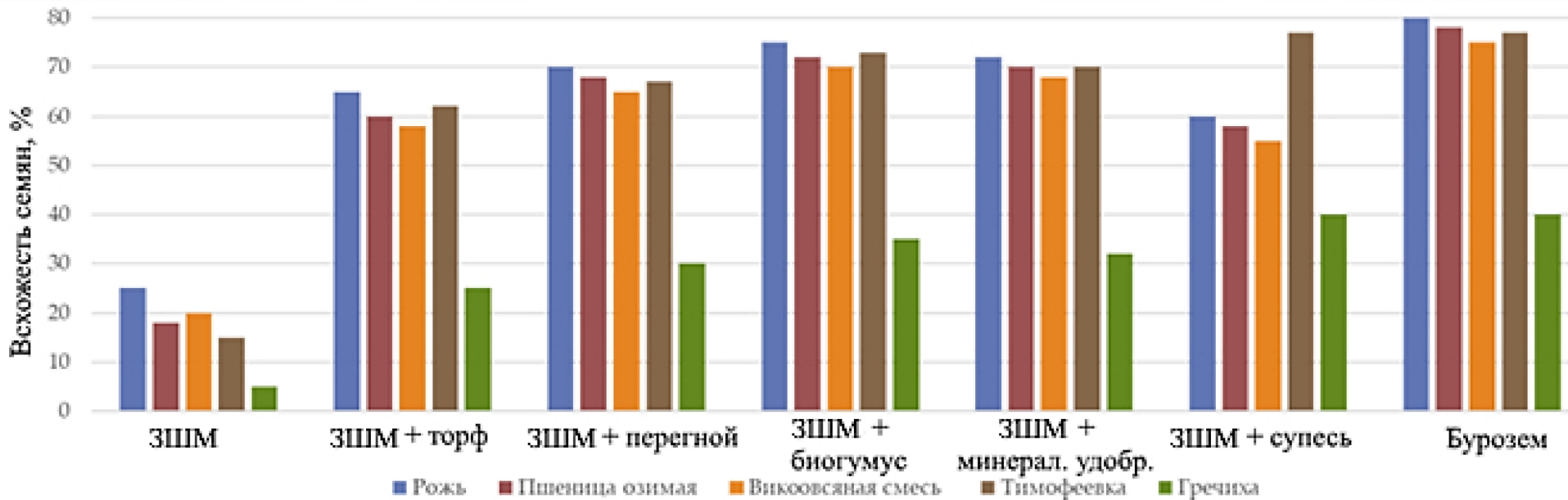
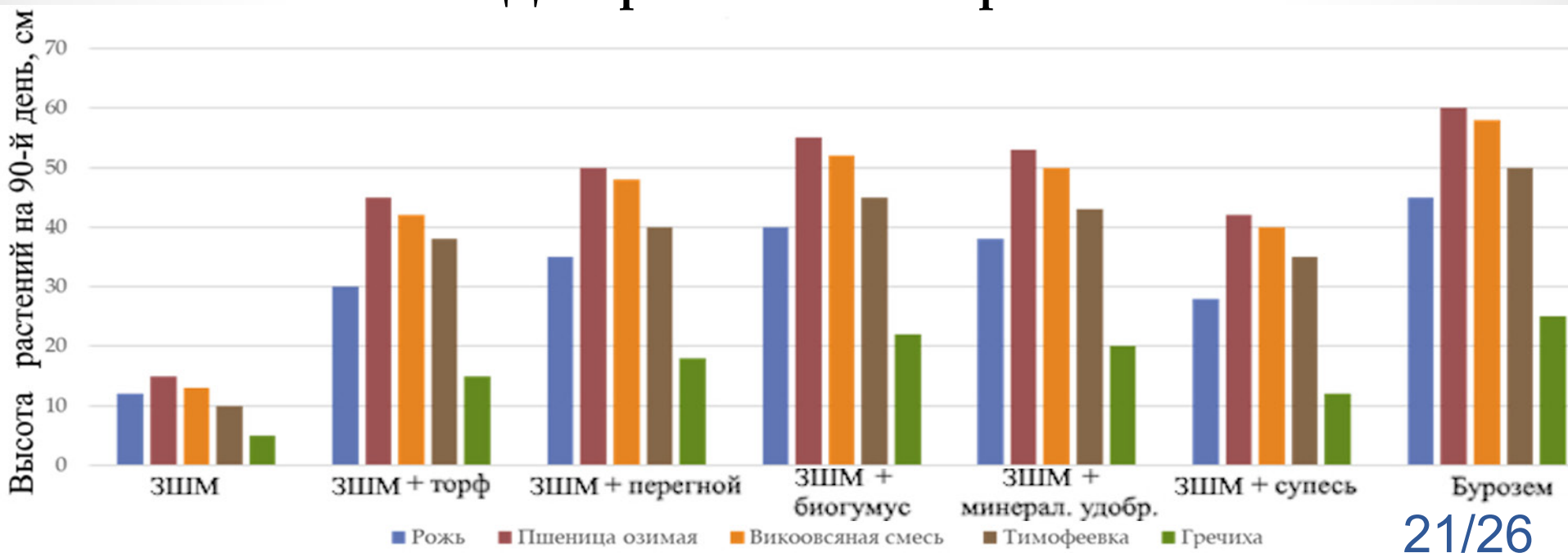


Диаграмма высоты растений



Растения в субстрате №2 (бурозем 50% + ЗШМ 50%)



Растения в субстрате №3 (бурозем 75% + ЗШМ 25%)



рожь

пшеница

ВИКООВСЯНАЯ СМЕСЬ

Дата высадки 22.11.2024 г. Дата съёмки 06.12.2024 г.



Разработанная технологическая схема утилизации золошлаковых отходов с получением коммерческих продуктов

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Артемспецстрой»



Миронов А.А.
« 23 » 06 2025 г.

АКТ
внедрения разработанного геополимерного бетона

г. Артём Приморского края « 23 » июня 2025 г.

Комиссия в составе: главного инженера ООО «Артемспецстрой» к.т.н. Баранова Андрея Вячеславовича, профессора военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете, д.т.н., профессора Федюка Романа Сергеевича, преподавателя военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете Козлова Павла Геннадьевича провела натурные испытания разработанного геополимерного бетона, полученного в процессе утилизации многотоннажных золошлаковых смесей. Внедрение было осуществлено при ремонте шести сооружений гражданской обороны.

Технические характеристики отремонтированных сооружений соответствуют требованиям СП 88.13330.2014 «Защитные сооружения гражданской обороны».

Главный инженер ООО «Артемспецстрой», к.т.н.  Баранов А.В.
Профессор военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете, д.т.н., профессор  Федюк Р.С.

Преподаватель военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете  Козлов П.Г.



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Артемспецстрой»

Миронов А.А.
« 23 » 06 2025 г.

АКТ
оценки экологического состояния золоотвала Артемовской ТЭЦ

г. Артём Приморского края « 26 » мая 2025 г.

Комиссия в составе: главного инженера ООО «Артемспецстрой» к.т.н. Баранова А.В., профессора военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете, д.т.н., профессора Федюка Романа Сергеевича, преподавателя военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете Козлова Павла Геннадьевича участвовала в оценке экологического состояния золоотвала Артемовской ТЭЦ. Доказана эффективность утилизации золошлаковых смесей, что позволяет рекультивировать освобожденный подстилающий грунт путем засева сидератом. Установлена удовлетворительная всхожесть различных сидератов: пшеницы, ржи и вико-овсяной смеси.

Главный инженер ООО «Артемспецстрой», к.т.н.  Баранов А.В.
Профессор военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете, д.т.н., профессор  Федюк Р.С.

Преподаватель военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете  Козлов П.Г.

Внедрение результатов



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

АКТ
внедрения способа обогащения золошлаковых смесей тепловых электростанций для производства строительных вяжущих

Комиссия в составе: главного инженера Проектного института Бадрутдинова Рустама Рашитовича, главного специалиста Проектного института, д.т.н., доцента Радайкина Олега Валерьевича, главного специалиста Проектного института, д.т.н., профессора Сабитова Линара Салихановича подтверждает, что изобретение «Способ обогащения золошлаковых смесей тепловых электростанций для производства строительных вяжущих», защищенное патентом RU2806396 (авторы Лесовик Валерий Станиславович, Ключев Сергей Васильевич, Лесовик Руслан Валерьевич, СяоВэньшуй, Федюк Роман Сергеевич, Панарин Игорь Иванович, Козлов Павел Геннадьевич), эффективно применяется при производстве строительных вяжущих.

Способ обогащения золошлаковых смесей тепловых электростанций для производства строительных вяжущих внедрен в серийное производство. Продемонстрирована работа технологий. Проведена оценка соответствия продукции. Разработана стратегия по улучшению производства. Уровень готовности продукта согласно ГОСТ Р 71726-2024 соответствует ТRL9.

Научное обоснование патентозащищенных результатов проведено Козловым П.Г. (научный руководитель д-р техн. наук Федюк Р.С.) в рамках подготовки диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук «УТИЛИЗАЦИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ»

Экономический эффект при мощности производства строительных бещементных вяжущих 130 000 т/год составляет 152 410 000 рублей по сравнению с традиционным портландцементом ЦЕМ 142.5Н.



Главный инженер
Проектного института  Р.Р. Бадрутдинов
Главный специалист
Проектного института д.т.н., профессор,
Советник РААСН  Л.С. Сабитов

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
АРТЕМСПЕЦСТРОЙ

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Артемспецстрой»

Миронов А.А.
« 23 » 06 2025 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ
на утилизацию золошлаковых отходов

РАЗРАБОТАН:
Научный руководитель, д.т.н., проф.
 Федюк Р.С.
Соискатель  Козлов П.Г.

г. Артём
2025



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

АКТ
внедрения бетонной смеси

Комиссия в составе: главного инженера Проектного института Бадрутдинова Рустама Рашитовича, главного специалиста Проектного института, д.т.н., профессора Сабитова Линара Салихановича подтверждает, что изобретение «Бетонная смесь и способ ее приготовления», защищенное патентом RU2829956 (авторы Федюк Роман Сергеевич, Вавренко Светлана Викторовна, Панарин Игорь Иванович, Вавренко Вадим Геннадьевич, Фараонов Алексей Эдуардович, Козлов Павел Геннадьевич), эффективно применяется при производстве экологических бетонов с улучшенными физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками.

Способ обогащения золошлаковых смесей тепловых электростанций для производства строительных вяжущих внедрен в серийное производство. Продемонстрирована работа технологий. Проведена оценка соответствия продукции. Разработана стратегия по улучшению производства. Уровень готовности продукта согласно ГОСТ Р 71726-2024 соответствует ТRL9.

Научное обоснование патентозащищенных результатов проведено Козловым П.Г. (научный руководитель д-р техн. наук Федюк Р.С.) в рамках подготовки диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук «УТИЛИЗАЦИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ».

Экономический эффект при мощности производства строительных бещементных вяжущих 140 000 м³/год составляет 163 520 000 рублей по сравнению с традиционной бетонной смесью класса В35.

Главный инженер
Проектного института  Р.Р. Бадрутдинов
Главный специалист
Проектного института д.т.н., профессор,
Советник РААСН  Л.С. Сабитов

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
АРТЕМСПЕЦСТРОЙ

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Артемспецстрой»


Миронов А.А.
« 23 » 06 2025 г.

ГЕОПОЛИМЕРНЫЙ БЕТОН

Технические условия
СТО 02033954-062-2025

РАЗРАБОТАН:
Научный руководитель, д.т.н., проф.
 Федюк Р.С.
Соискатель  Козлов П.Г.

г. Артём
2025

ИТОГИ ВЫПОЛНЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Научно обоснована и экспериментально доказана эффективность применения золошлаковых отходов ТЭС в качестве источника для получения новых экологически безопасных геополимерных бетонов классов до В60 на сжатие и $V_{tb}10,0$ на растяжение при изгибе.

Усовершенствовано технологическое решение очистки золошлаковой смеси (включающее дезинтеграцию с сепарацией фракции 0,045-0,325 мм, гидроклассификацию, флотацию, двухстадийную магнитную сепарацию и сушку), которая способна стать эффективной основой для геополимерного вяжущего.

Биологическим тестированием (результатами роста растений *Vicia sativa* + *Avena sativa*, *Secale cereale*, *Triticum aestivum*, *Phleum pratense*, *Fagopyrum esculentum* на рекультивированных золоотвалах) доказано снижение вредного воздействия на природную окружающую среду (содержание в растениях, мг/кг: Pb - 1,1-4,3; Cd - 0,01-0,05; Zn - 18-50; Cu - 10-31; Cr - 2,0-7,2; Ni - 1,6-4,1) за счет утилизации золошлаковых отходов для изготовления геополимеров и других вторичных продуктов.

Разработанная технологическая схема позволяет снизить объём золоотвалов, минимизировать затраты на рекультивацию (за счёт компенсации расходов за счёт продажи геополимерной продукции) и исключить необходимость добычи природных аналогов (глины, цемента), что соответствует принципам циркулярной экономики и устойчивого развития.

Благодарю за внимание !