УДК 666.3:537.311.3:553.61(575.2)
AGRIS P33
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132/15

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЖАШ-ТИЛЕК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

*©**Калидин кызы Т**., ORCID: 0009-0004-3691-5920, Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан, tkalidinova@gmail.com*
*©**Ташполотов Ы**., ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN-код: 2425-6716, д-р физ.-мат. наук, Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан, itashpolotov@mail.ru*

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR ELECTRICALLY CONDUCTIVE COMPOSITES BASED ON ALUMINOSILICATE RAW MATERIALS FROM THE ZHASH-TILEK DEPOSIT OF THE KYRGYZ REPUBLIC

*©**Kalidin kyzy T**., ORCID: 0009-0004-3691-5920, Osh State University, Osh, Kyrgyzstan*
*©**Tashpolotov Y**., ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN-code: 2425-6716, Dr. habil., Osh State University, Osh, Kyrgyzstan, itashpolotov@mail.ru*

Аннотация. Работа посвящена решению фундаментально-прикладной материаловедческой задачи — синтезу электропроводящих композиционных материалов (ЭКМ) на основе природного алюмосиликатного сырья Чон-Алайского региона (месторождение Жаш-Тилек) и углеродного наполнителя, полученного высокотемпературным пиролизом бурого угля месторождения Кызыл-Булак (Кыргызская Республика). Исследованы закономерности изменения плотности, пористости и электрической проводимости в зависимости от концентрации наполнителя. Установлено, что порог перколяции достигается при содержании углерода 15–18 мас. %. Спектральный анализ подтвердил формирование муллитового каркаса, обеспечивающего стабильность структуры. Полученные материалы перспективны для создания антистатических покрытий и резистивных нагревательных элементов.

Abstract. This study addresses a fundamental and applied materials science task: the synthesis of electrically conductive composite materials (ECCMs) based on natural aluminosilicate raw materials from the Chon-Alay region (Zhash-Tilek deposit) and a carbon filler obtained via high-temperature pyrolysis of brown coal from the Kyzyl-Bulak deposit (Kyrgyz Republic). The patterns of density, porosity, and electrical conductivity changes as functions of filler concentration were investigated. The percolation threshold was determined to occur at a carbon content of 15–18 wt.%. Spectral analysis confirmed the formation of a mullite framework that ensures structural stability. The resulting materials show strong potential for application in antistatic coatings and resistive heating elements.

Ключевые слова: электропроводящая керамика, композиты, каолин, монтмориллонит, углеродный наполнитель, порог перколяции, Чон-Алайский район.

Keywords: electrically conductive ceramics, composites, kaolin, montmorillonite, carbon filler, percolation threshold, Chon-Alay District.

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

Синтез электропроводящих композитных материалов (ЭКМ) на основе природного алюмосиликатного сырья — глин, бентонита, каолина и цеолитов — в сочетании с углеродными наполнителями, такими как пиролитический технический углерод или графит, представляет собой актуальное направление современной физики твердого тела и материаловедения [1, 2].

Формирование непрерывной электропроводящей сетки в диэлектрической алюмосиликатной матрице традиционно реализуется тремя ключевыми технологическими методами [2, 5].

Первым из них является керамический метод, заключающийся в сухом или полусухом смешивании компонентов. Он включает совместную механоактивацию глины и графита в шаровых мельницах с последующим прессованием и высокотемпературным обжигом при температурах 800–1100°C в защитной инертной атмосфере азота (N_2) или аргона (Ar) [3].

Вторым подходом выступает щелочная активация, или геополимеризация, при которой алюмосиликатная матрица обрабатывается щелочным раствором ($NaOH/Na_2SiO_3$) при умеренных температурах от 20 до 85°C с одновременным введением углеродного наполнителя [1].

Главное преимущество данного метода состоит в возможности полностью исключить выгорание углерода без применения инертных газов. Третий метод — интеркаляционный синтез с пиролизом — заключается в том, что межслоевое пространство глины сначала заполняют органическим веществом, а затем нагревают его прямо внутри кристаллической структуры матрицы для термического разложения. [2, 3].

Однако практическая реализация этих методов сталкивается с рядом существенных научных проблем [5].

Главная из них — гетерогенность диспергирования и агломерация фаз. Из-за выраженной гидрофильности алюмосиликатов и гидрофобности технического углерода возникают значительные ван-дер-ваальсовы силы межчастичного притяжения, что приводит к комкованию наполнителя и нарушению однородности проводящей сети [4].

Это, в свою очередь, обусловливает высокий порог перколяции: при неэффективном распределении компонентов для достижения стабильной проводимости (выше 10^{-2} См/см) требуется высокая концентрация углерода (более 20–30 мас.%), что влечет за собой резкое падение механической прочности и сильное разрыхление структуры [5].

Кроме того, при высокотемпературном спекании керамики неизбежно происходит окисление углеродной фазы до газов CO и CO_2 под действием кислорода воздуха или остаточных гидроксильных групп самой глины, что разрушает сформированные проводящие каналы [3].

Наконец, ситуацию осложняет деградация межфазного контакта на границе «глина — углерод»: слабое адгезионное взаимодействие между силикатными тетраэдрами $[SiO_4]^{4-}$ и sp^{2-} углеродной решеткой ограничивает перенос заряда механизмом прыжковой проводимости с высоким межзерновым сопротивлением [5].

Для преодоления указанных ограничений разработаны физико-химические пути оптимизации синтеза ЭКМ. В целях устранения агломерации применяется механохимическая активация и ультразвуковая соникация при мокром помоле с добавлением поверхностно-активных веществ (например, лигносульфонатов или СДБ), что модифицирует поверхность углерода и обеспечивает гетерокоагуляцию частиц [4].

Чтобы снизить порог перколяции до 1,5–5 мас.% без потери прочности, используют гибридные наполнители, сочетающие дисперсный технический углерод (0D/3D) с

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

одностенными или многостенными углеродными нанотрубками (1D) и графеном (2D) для создания объёмных 3D-сеток [1, 5].

Проблема окисления углерода решается термодинамическим контролем атмосферы спекания с применением восстановительных сред (N_2+5% H_2) или методов экспресс-консолидации, таких как искровое плазменное спекание (SPS) [3].

В качестве альтернативы высокотемпературным процессам все более активно внедряется щелочно-геополимерный синтез, который позволяет формировать прочный трехмерный алюмосиликатный каркас при низких температурах, полностью предотвращая термическую деструкцию углеродного наполнителя [1].

Известно, что Кыргызстан обладает богатыми запасами природного алюмосиликатного сырья (глин, полевых шпатов, каолина) и углей. В связи с этим в данной статье исследована технология синтеза электропроводящих композитных материалов (ЭКМ) на основе глины месторождения Жаш-Тилек и углеродного наполнителя, полученного пиролизом бурого угля месторождения Кызыл-Булак Чон-Алайского района. Использование местного сырья для создания функциональной керамики решает стратегическую задачу производства высокотехнологичных материалов (экранов защиты от электромагнитного излучения, нагревательных элементов, антистатических покрытий и «умных» строительных композитов) без привлечения дорогостоящих импортных компонентов. Кроме того, в контексте развития водородной энергетики и альтернативных видов топлива в Кыргызской Республике, электропроводящая алюмосиликатная керамика представляет практический интерес для разработки твердооксидных топливных элементов и газовых датчиков. В связи с этим исследование взаимосвязи между микроструктурой получаемого композита и механизмом переноса электрического тока в алюмосиликатной матрице является актуальным.

Современная наука о материалах рассматривает керамические композиты не просто как изоляторы, а как основу для управления квантовыми эффектами. Связь с купратными сверхпроводниками: Исследование электропроводности в системе «керамическая матрица — проводящий наполнитель» имеет прямые параллели с физикой слоистых купратов (например, систем на основе Y-Ba-Cu-O или Sb-Ba-Ca-Cu-O). В купратах проводящие слои оксида меди (CuO2) чередуются с изолирующими слоями. Разработка ЭКМ на основе природного сырья КР позволяет моделировать процессы перколяции и переноса заряда в сильно коррелированных электронных системах и гетерогенных средах.

Цель работы: Теоретическое обоснование и экспериментальная разработка технологии получения электропроводящих композиционных материалов с контролируемыми физико-химическими свойствами на основе алюмосиликатного сырья Чон-Алайского региона (месторождение Жаш-Тилек) и углеродного наполнителя, полученного пиролизом бурого угля месторождения Кызыл-Булак для создания элементов функциональной электроники.

Объекты и методы исследования

В качестве базовой диэлектрической матрицы использовалась глина месторождения Чон-Алайского района (с. Жаш-Тилек). Проводящим наполнителем служил технический углерод (графит), полученный путем пиролиза бурого угля месторождения Кызыл-Булак Чон-Алайского района (Алайский угленосный бассейн). Используемый уголь месторождения Кызыл-Булак относится к гумусовым бурым углям марки Б и характеризуется высокой степенью углефикации. Исходное сырье имеет среднюю зольность (Ad) 15,63% (при интервале значений 5,05–42,89%), выход летучих веществ (V_{daf}) 41,67% (35,71–50,21%) и крайне низкое содержание рабочей серы (Std), составляющее в среднем 0,027% (0,01–0,96%). Элементный состав угля представлен высоким содержанием углерода (Ctd = 80,3%$), водорода (Htd =

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

4,56%) и азота (Ntd = 0,74%). Среднее значение удельной теплоты сгорания (Qdaf) составляет 5785 ккал/кг (вариации от 4492 до 7551 ккал/кг).

Для получения высокоуглеродистого проводящего наполнителя применялся метод пиролиза — термической переработки бурого угля без доступа кислорода. При оценке параметров исходного углеродсодержащего сырья проводилась комплексом стандартных физико-химических методов: технический и элементный анализы использовались для определения зольности (Ad), выхода летучих веществ (Vdaf), массовой доли серы (Std), а также элементного состава (C, H, N). Измерение удельной теплоты сгорания (Qdaf) осуществлялось калориметрическим методом.

Чон-Алайская долина, и в частности окрестности села Жаш-Тилек, характеризуются уникальными геологическими условиями, обусловленными стыком Памиро-Алайских горных систем. Данный регион обладает значительным потенциалом нерудных ископаемых. Бентонитовые и бентонитоподобные глины: фиксируются залежи палеогеновых и неогеновых глин высокой дисперсности с преобладанием монтмориллонитовой группы. Высокая адсорбционная способность позволяет равномерно распределять наноразмерные проводящие добавки в объеме матрицы, предотвращая их агрегацию.

Каолиновое сырье: проявления первичных и переотложенных каолинов связаны с зонами выветривания алюмосиликатных пород. Алюмосиликатное сырье (суглинки и аргиллиты): широко распространены легкоплавкие глины, выступающие связующим компонентом при низкотемпературном спекании. Для точной идентификации вещественного состава пробы истирания сырья, был выполнен развернутый анализ методом ИСПА спектрометрии (Метрология ОМГб-01) в Центральной лаборатории при Министерстве природных ресурсов, экологии и технического надзора Кыргызской Республики.

Таблица 1

МАКРОКОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ОКСИДОВ МАТРИЦЫ

Оксид	*%*	*Описание и технологическая роль в ЭКМ*
SiO_2	>50	Кремнезем. Высокое содержание указывает на выраженную песчанистость/кварцевую составляющую. Снижает воздушную усадку и чувствительность композита к сушке.
Al_2O_3	12	Глинозем. Главный показатель огнеупорности и пластичности. Значение в 12% относит данное сырье к категории кислых глин с умеренно-низким содержанием глинозема, что типично для легкоплавких суглинков.
Fe_2O_3	7	Оксид железа (III). Сильный плавень и хромофор. Обеспечивает интенсивный красно-коричневый цвет после обжига и значительно снижает температуру спекания матрицы.
CaO	9	Оксид кальция. Высокое содержание (вероятно, в виде кальцита). Действует как резкий плавень, сужая интервал спекания, способствует интенсивному жидкофазному спеканию.
MgO	5	Оксид магния. В сочетании с CaO усиливает флюсующий эффект, снижая температуру плавления силикатной массы.
K_2O	1.5	Щелочной оксид. Участвует в образовании легкоплавкой стеклофазы при обжиге (950 -10000C), фиксирующей углеродный каркас.
Na_2O	5	Высокое содержание натрия. Указывает на полевошпатовую или солончаковую/минерализованную составляющую породы. Увеличивает количество жидкой фазы при обжиге.

А. Макрокомпонентный состав (породообразующие оксиды). Анализ основных оксидов определяет базовое технологическое направление использования глины и механизмы формирования силикатного расплава (Таблица 1). Факторная оценка макросостава: анализ

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

показывает, что исследуемая глина представляет собой легкоплавкое, высокожелезистое, карбонатно-щелочное глинистое сырье (близкое по свойствам к тяжелым суглинкам). Отношение SiO_2 к коагулянтам указывает на умеренную пластичность и высокую спекаемость при сравнительно низких температурах, что критически важно для предотвращения преждевременного выгорания углерода при обжиге.

Б. Микроэлементный состав и геохимические особенности. Развернутый спектральный анализ на редкие, рассеянные и тяжелые металлы (в весовых процентах, где 10-3% означает 10 ppm) выявил важные закономерности. Mn (марганец): 1.5% — аномально высокое содержание для рядовых глин. Совместно с Fe_2O_3 (7%) марганец выступает мощным катализатором спекания и интенсивно окрашивает черепок в темно-коричневый (черный) цвет. При контролируемом обжиге ионы переходных металлов (Fe, Mn) могут служить катализаторами локальной графитизации наполнителя. Ti (Титан): 310-1% = 0.3% — изоморфная примесь, сопутствующая железистым минералам. Cr(Хром): 9 10-3% = 0.009%, Ni (Никель): 310-3%, V (Ванадий): <0.3 10-3%. Тяжелые металлы находятся в пределах естественного геохимического фона. Редкие и редкоземельные элементы (TR): Y = 1.510-3%, La < 1.2 10-3%, Yb = 0.310-3%. Показатели соответствуют стандартным кларковым (фоновым) значениям, промышленного интереса для извлечения {REE} сырье не представляет. Токсичные и благородные металлы: Pb = 0.5 10-3%, As < 3 10-3%, Cd} < 0.310-3%, Hg< 0.510-3%. Содержание экотоксикантов ниже пределов обнаружения или на уровне минимального фона. Суммарный анализ доказывает, что сырье является экологически чистым и безопасным для промышленного применения. Золото (Au) и платина (Pt) находятся ниже чувствительности прибора (<0.510-3% и <0.310-3% соответственно).

В. Дифракционные характеристики глин и минеральный состав. При исследовании неориентированных и ориентированных препаратов на дифрактометре (излучение Cu Kα, λ= 1.5418A) зафиксированы следующие фазы (Таблица 2). Монтмориллонит (смектит): главный породообразующий минерал. Рефлекс d(001)=12.4-15.2A в воздушно-сухом состоянии; при насыщении этиленгликолем набухает до 16.8-7.5 A, а после прокаливания при 5500C коллапсирует до 9.6-10.0A. Высокая дисперсность и лабильная решетка обеспечивают молекулярное обволакивание частиц углерода. Иллит/гидрослюда: острый пик 9.9-10.1A, стабильный при модификации. Обеспечивает жесткость каркаса при формовании. Каолинит: интенсивные пики 7.15A и 3.57A}, полностью исчезающие при 550 0C вследствие перехода в рентгеноаморфный метакаолинит. Высокая дисперсность (широкие пики монтмориллонита) подтверждает способность матрицы эффективно распределять нано-уголь, создавая непрерывную проводящую сеть (перколяционные каналы) в межзеренных границах без критической потери прочности.

Таблица 2

ХАРАКТЕРНЫЕ МЕЖПЛОСКОСТНЫЕ РАССТОЯНИЯ МИНЕРАЛОВ МАТРИЦЫ (d, A)

Минерал	*Воздушно-сухой*	*С этиленгликолем*	*После прокаливания (550∘C)*
Монтмориллонит	12.4-15.2	16.8-17.5	9.6-10.0
Иллит	9.9-10.1	9.9-10.1	9.9-10.1
Каолинит	7.15	7.15	Исчезает (Аморф)
Кварц	3.34	3.34	3.34

Получение углеродного наполнителя из углей месторождения. Превращение ископаемого угля в функциональный электропроводящий наполнитель включает 4 этапа.

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

Механохимическая подготовка и обогащение: дробление до фракции 1–3 мм, флотация для снижения первичной зольности (кварц, сера) и механоактивация в планетарных мельницах для создания дефектов кристаллической структуры.

Высокотемпературный пиролиз (карбонизация): термическая деструкция без доступа кислорода при 800-1000^{0}C. Происходит удаление летучих (H_2, CH_4) и перестройка аморфного углерода в графитоподобные структуры (турбостратный углерод), формирующие носители заряда.

Деминерализация (химическая очистка): обработка кокса растворами HCl или HF для удаления остаточных оксидов (Fe, Si, Ca), что улучшает «смачиваемость» углерода алюмосиликатным расплавом при спекании.

Ультрадисперсное измельчение («нано-уголь»): вибро-центробежное истирание до размера частиц <1мкм. Высокая удельная поверхность позволяет частицам обволакивать зерна глинистых минералов.

Технологический цикл производства ЭКМ. Подготовка глины: измельчение сырья Жаш-Тилек до фракции менее 50 мкм. Смешивание: гомогенизация каолин-монтмориллонитовой матрицы и углеродного наполнителя Кызыл-Булак в шаровой мельнице. Формование: полусухое прессование образцов при давлении 15–20 МПа. Термообработка: спекание в муфельной печи при 900-1100^{0}C строго в восстановительной/инертной среде (под засыпкой древесного угля или в аргоне) для предотвращения окисления углерода ($C+O_2 \rightarrow CO_2$).

При введении углеродного наполнителя (УН) физико-механические свойства композитов, обожженных при 1050^{0}C в инертной среде, претерпевают закономерные изменения (Таблица 3).

Таблица 3

ДИНАМИКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭКМ

Содержание УН (мас. %)	*Плотность (ρ, г/см³)*	*Общая пористость (%)*	*Линейная усадка (%)*	*Предел прочности (МПа)*
0(Чистая глина)	2.45	4–6	12.5	45.0
5	2.38	7–9	10.2	42.5
15(Порог перколяции)	2.21	14–16	7.8	35.0
25	2.05	22–25	5.4	24.0

Анализ физических параметров: плотность материала снижается, так как плотность углерода (≈1.8-2.0 г/см^3) ниже плотности спеченного алюмосиликата. Углеродные частицы препятствуют свободной усадке глинистых минералов, выполняя роль микрокаркаса, что снижает общую линейную усадку (уменьшается риск деформации изделий), но увеличивает микропористость. Электропроводность σ измерялась четырехзондовым методом.

Расчет удельной проводимости проводился по формуле: $\sigma = l/(RS)$, где R — измеренное сопротивление (Ом); S — площадь поперечного сечения (м²); l — расстояние между контактами (м). На основе данных выделены три микроструктурные зоны (Таблица 4).

Диэлектрическая зона (0–10% УН): Частицы углерода полностью изолированы слоями силикатной матрицы. Удельное сопротивление высокое (ρ>108 Ом*м). Перенос заряда идет по механизму редких туннельных перескоков.

Переходная зона (10–18% УН) — «Порог перколяции»: формируются первые непрерывные цепочки (токопроводящие мостики). Сопротивление скачкообразно падает на 6–8 порядков (Таблица 5).

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

Проводящая зона (>20% УН): формируется развитый трехмерный бесконечный кластер углерода внутри муллитового каркаса. Сопротивление стабилизируется в диапазоне 10-1-101 Ом*м.

Проводимость приобретает стабильный полупроводниковый характер (с ростом температуры сопротивление снижается).

Таблица 4

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ И СТРУКТУРЫ (СЭМ-анализ)

Параметр	*Низкое содержание УН (<10%)*	*Оптимальное (15–20%)*	*Избыточное (>30%)*
Распределение фаз	Островковое (изолированное)	Гомогенное (сетчатое)	Агломерированное (комки)
Граница раздела	Плотный контакт	Микропористый контакт	Наличие макротрещин
Электрическая стабильность	Низкая (дрейф параметров)	Высокая	Низкая (из-за хрупкости)

Таблица 5

ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПОЛНИТЕЛЯ

Содержание, %	*Уд. сопротивление, ρ, Ом·м*	*Плотность, г/см³*	*Характеристика зоны*
5%	1010	2.1	Диэлектрик
15%	104	2.0	Переходная зона (Перколяция)
25%	1.2 10-2	1.85	Проводник

Физика переноса заряда в полученной системе «глинистая матрица — пиролитический углерод» описывается классической теорией перколяции и механизмом прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка (VRH — Variable Range Hopping): $\sigma(T) = \sigma 0 \exp[-(T0/T)p]$, где p = 1/4 для трехмерных гетерогенных сред (модель Мотта). После термической обработки при 950-1150^{0}C в восстановительной атмосфере рентгеноструктурная картина исходного сырья кардинально меняется, что доказывает структурную перестройку:

Аморфизация глинистых фаз. В процессе обработки полностью исчезают характерные пики монтмориллонита (12.5–15 Å) и каолинита (7.15 Å): каолинит превращается в метакаолинит, а монтмориллонит теряет химически связанную воду. На дифрактограмме появляется «аморфное гало» в области углов $2\theta \approx 20–30°$, что свидетельствует об образовании жидкой фазы алюмосиликатного стекла, которая склеивает углеродные частицы. Появление этого расплава при низкой температуре обусловлено высоким содержанием плавней (CaO = 9%, Fe_2O_3 = 7%, Na_2O = 5%), подтвержденным методом ИСП-АЭ.

Синтез муллита и кристобалита: при температурах выше 1050^{0}C фиксируются интенсивные рефлексы муллита ($3Al_2O_3*2SiO_2$) при 3.39A, 2.69A и 2.42A, а также кристобалита (4.05A). Муллит формирует жесткий игольчатый каркас, капсулирующий углерод. Состояние наполнителя: наличие диффузного максимума (рефлекс 002) в интервале d= 3.4-3.5A подтверждает сохранение углеродного скелета с турбостратной структурой внутри матрицы. Отсутствие пиков оксидов углерода доказывает адекватность защитной восстановительной среды обжига. Кварц (3.34A) сохраняется в виде реликтовой фазы, выполняя роль отощителя. Формирование муллитового каркаса является ключевым детерминантом эксплуатационной надежности ЭКМ. Этот каркас выполняет двойную функцию: механически армирует композит (обеспечивая прочность более 30 МПа при пористости до 15%) и надежно защищает углеродный наполнитель Кызыл-Булак от окисления при эксплуатации, гарантируя долговечность электрофизических параметров. На основе

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

комплексного химико-физического баланса сырья Жаш-Тилек установлены следующие технологические направления.

Функциональные ЭКМ: оптимальное сочетание электропроводности (ρ≈10-2 Ом*м) и прочности достигается при концентрации углеродного наполнителя 15–18 мас. %. Данные параметры позволяют рекомендовать материал для антистатических экранов, резистивных нагревателей и «умных» строительных элементов.

Строительная керамика (без добавок): из-за высокого содержания плавней сырье идеально д ля рядового кирпича марок М100–М150 и керамзита (высокая вспучиваемость за счет 7% Fe_2O_3 и 6.5% Na_2O+K_2O).

Ограничение: высокое содержание CaO (9%) требует тонкого измельчения на вальцах во избежание образования крупных включений извести («дутиков»), вызывающих деструкцию при гидратации ($CaO \rightarrow Ca(OH)_2$).

Огнеупорное направление: материал непригоден для огнеупоров, так как суммарное количество плавней ($Fe_2O_3+CaO+MgO+Na_2O+ K_2O$) достигает ≈27.5%, что снижает температуру плавления ниже 1150-1200^{0}C.

Заключение

Интеграция результатов ИСПА спектрометрии легкоплавкой полиминеральной глины села Жаш-Тилек Чон-Алайского района и продуктов пиролиза угля месторождения Кызыл-Булак позволила научно обосновать технологию ЭКМ. Высокая дисперсность монтмориллонитовой составляющей матрицы в сочетании с активным жидкофазным спеканием обеспечивает формирование однородной перколяционной сети углерода при концентрации 15–18 мас. %. Полученный композит зафиксирован в химически стабильном муллит-силикатном каркасе, что открывает широкие перспективы для импортозамещающего производства элементов функциональной электроники в Кыргызской Республике. Установлено, что фазовый состав глинистой матрицы месторождения Жаш-Тилек (монтмориллонит + каолинит + иллит) в сочетании с высоким содержанием щелочно-земельных и железистых плавней (≈27.5%) создает условия для формирования жидкофазного алюмосиликатного расплава при сниженных температурах (950-1000^{0}C). Это полностью предотвращает деструкцию углеродного наполнителя. Впервые предложена и теоретически обоснована технологическая цепочка утилизации местной полиминеральной глины (монтмориллонит-каолинит-иллитового состава) и высокоуглеродистого пиролитического остатка низкозольного, малосернистого бурого угля марки Б (Кызыл-Булак) для синтеза функциональной электрокерамики. Порог перколяции системы достигается при введении 15-18 мас. % пиролитического углерода Кызыл-Булак. При данном соотношении формируется непрерывный 3D-кластер проводящих каналов, обеспечивающий удельное сопротивление ρ≈10-1-101 Ом.м при сохранении достаточной механической прочности (σизг ≥35 МПа) и обжиговой усадки (7.8%). Экспериментально зафиксирован порог перколяции в диапазоне 15-18 мас. % углеродного наполнителя. В этой области происходит скачкообразный падение удельного электрического сопротивления на 6–8 порядков (от 1010 Ом.м до 104-101 Ом.м) с выходом на стабильный полупроводниковый характер проводимости (σ≈10-1-101См/м). В процессе термического синтеза (1050-1150^{0}C) аморфная алюмосиликатная фаза кристаллизуется с выделением игольчатого муллита ($3Al_2O_3$ .SiO_2) и кристобалита. Муллитовая микроструктура надежно капсулирует углеродные цепочки, изолируя их от атмосферного кислорода при последующей эксплуатации композита в качестве нагревательных элементов. Области практического применения: антистатические полы и экраны ЭМИ (содержание наполнителя 12-15 мас. % (ρ≈103-104 Ом.м); резистивные

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

низкотемпературные нагревательные панели (содержание наполнителя 16-20 мас.% (ρ≈10-1-101 Ом.м); компоненты водородной энергетики: использование подложек ЭКМ для электродов и носителей катализаторов в газовых датчиках.

Список литературы:

1. Alvarado A., Baykara H., Riofrio A., Cornejo M., Merchan-Merchan W. Preparation, characterization, electrical conductivity, and life cycle assessment of carbon nanofibers-reinforced Ecuadorian natural zeolite-based geopolymer composites // Heliyon. 2024. V. 10. №6. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28079

2. Kalendova A., Kupkova J., Urbaskova M., Merinska D. Applications of clays in nanocomposites and ceramics // Minerals. 2024. V. 14. №1. P. 93. https://doi.org/10.3390/min14010093

3. Maj I., Matus K. Aluminosilicate clay minerals: Kaolin, bentonite, and halloysite as fuel additives for thermal conversion of biomass and waste // Energies. 2023. V. 16. №11. P. 4359. https://doi.org/10.3390/en16114359

4. Cruz-Delgado V. J., Valdez-Garza J. A., Mata-Padilla J. M., Martínez-Colunga J. G., Ávila-Orta C. A. Preparation and characterization of electrically conductive polymer nanocomposites with different carbon nanoparticles // Carbon Nanotubes. 2021. P. 11-28. https://doi.org/10.5772/intechopen.95912

5. Lopes T. J., Azevedo A. M. D., Monteiro S. N., Araujo-Moreira F. M. Electrical properties of composite materials: A comprehensive review // Journal of Composites Science. 2025. V. 9. №8. P. 438. https://doi.org/10.3390/jcs9080438

6. Кингэри У. Д. Введение в керамику. М.: Стройиздат, 1967. 500 с.

7. Протокол испытаний №129-с от 29.05.2026 г. Центральная лаборатория при Министерстве природных ресурсов, экологии и технического надзора Кыргызской Республики.

8. Поляков В. В. Физика перколяционных композиционных материалов. Барнаул, 2003. 132 с.

References:

1. Alvarado, A., Baykara, H., Riofrio, A., Cornejo, M., & Merchan-Merchan, W. (2024). Preparation, characterization, electrical conductivity, and life cycle assessment of carbon nanofibers-reinforced Ecuadorian natural zeolite-based geopolymer composites. *Heliyon*, *10*(6). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28079

2. Kalendova, A., Kupkova, J., Urbaskova, M., & Merinska, D. (2024). Applications of clays in nanocomposites and ceramics. *Minerals*, *14*(1), 93. https://doi.org/10.3390/min14010093

3. Maj, I., & Matus, K. (2023). Aluminosilicate clay minerals: Kaolin, bentonite, and halloysite as fuel additives for thermal conversion of biomass and waste. *Energies*, *16*(11), 4359. https://doi.org/10.3390/en16114359

4. Cruz-Delgado, V. J., Valdez-Garza, J. A., Mata-Padilla, J. M., Martínez-Colunga, J. G., & Ávila-Orta, C. A. (2021). Preparation and characterization of electrically conductive polymer nanocomposites with different carbon nanoparticles. *Carbon Nanotubes*, 11-28. https://doi.org/10.5772/intechopen.95912

5. Lopes, T. J., Azevedo, A. M. D., Monteiro, S. N., & Araujo-Moreira, F. M. (2025). Electrical properties of composite materials: A comprehensive review. *Journal of Composites Science*, *9*(8), 438. https://doi.org/10.3390/jcs9080438

6. Kingeri, U. D. (1967). Vvedenie v keramiku. Moscow. (in Russian).

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

7. Protokol ispytanii №129-s ot 29.05.2026 g. Tsentral'naya laboratoriya pri Ministerstve prirodnykh resursov, ekologii i tekhnicheskogo nadzora Kyrgyzskoi Respubliki. (in Russian).

8. Polyakov, V. V. (2003). Fizika perkolyatsionnykh kompozitsionnykh materialov. Barnaul. (in Russian).

Поступила в редакцию
02.08.2026 г.

Принята к публикации
16.08.2026 г.

Ссылка для цитирования:

Калидин кызы Т., Ташполотов Ы. Разработка технологии электропроводящих композитов на основе алюмосиликатного сырья месторождения Жаш-Тилек Кыргызской Республики // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №11. С. 127-136. https://doi.org/10.33619/2414-2948/132/15

Cite as (APA):

Kalidin kyzy, T., & Tashpolotov, Y. (2026). Development of Technology for Electrically Conductive Composites Based on Aluminosilicate Raw materials from the Zhash-Tilek Deposit of the Kyrgyz Republic. *Bulletin of Science and Practice, 12*(11), 127-136. (in Russian). https://doi.org/10.33619/2414-2948/132/15

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)