

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»**

На правах рукописи



ГХЕБРЕМЕДХИН КИДАНЕ ВЕЛДАЙ

**СИЛИКАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПЛОТНОЙ СТРУКТУРЫ
НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ ГОСУДАРСТВА ЭРИТРЕЯ**

Специальность 2.1.5 – Строительные материалы и изделия

диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Володченко Анатолий Николаевич

Белгород – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	11
1.1 Состояние строительной отрасли в Африке	12
1.1.1 Тенденции развития строительной отрасли	12
1.1.2 Строительные материалы и техника в Государстве Эритрея.....	13
1.1.3 Состояние производства материалов гидротермального твердения в странах Африки	16
1.2 Алюмосиликатные породы Государства Эритрея	18
1.2.1 Глинистые породы тропического и субтропического климата	18
1.2.2 Латеритные породы	19
1.2.3 Вулканический пепел	21
1.3 Роль алюмосиликатных пород в улучшении свойств известково- кремнеземистых вяжущих	23
1.4 Задачи реформирования существующей культуры строительства жилых домов в Государстве Эритрея	28
1.5 Выводы	34
2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	36
2.1 Сырьевые материалы	36
2.1.1 Кремнеземистый и известковый компоненты	36
2.1.2 Природное алюмосиликатное сырье Государства Эритрея	37
2.2 Методы исследований	38
2.2.1 Определение активности извести	38
2.2.2 Определение числа пластичности	39
2.2.3 Идентификация минерального состава сырья и силикатных материалов	40
2.2.4 Получение образцов методом полусухого прессования	41
2.2.5 Математическая обработка результатов исследований	42
2.2.6 Определение линейного массового коэффициента ослабления излучения	43
2.3. Выводы	44
3 ХАРАКТЕРИСТИКА СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ГОСУДАРСТВА ЭРИТРЕЯ	45
3.1 Глины месторождения Дэбуб	47

3.2 Глины месторождения Маэкель.....	52
3.3 Латериты.....	56
3.4 Вулканический пепел месторождения Эрафаиле	61
3.5 Песок месторождения Дэбуб.....	65
3.6 Оценка химического состава алюмосиликатного сырья.....	67
3.7. Выводы	70
4 СИЛИКАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПЛОТНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ПОРОД.....	72
4.1 Силикатные материалы автоклавного твердения плотной структуры на основе алюмосиликатных пород.....	72
4.2 Силикатные материалы автоклавного твердения плотной структуры с использованием вяжущего на основе латерита и вулканического пепла	76
4.3 Свойств силикатных материалов плотной структуры с использованием вяжущего на основе алюмосиликатных пород методом математического планирования эксперимента	79
4.3.1 Автоклавные силикатные материалы плотной структуры	79
4.3.2 Неавтоклавные силикатные материалы плотной структуры.....	87
4.4 Рациональные составы силикатных материалов плотной структуры на основе алюмосиликатного сырья Государства Эритрея	93
4.5 Радиационно-защитные свойства силикатных материалов плотной структуры на основе латерита и вулканического пепла	98
4.6 Фазообразование в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ алюмосиликатных пород Государства Эритрея.....	100
4.6.1 Фазообразование в силикатных материалах плотной структуры на основе глины месторождения Дэбуб и вулканического пепла...	100
4.6.2 Фазообразование в силикатных материалах плотной структуры на основе глины месторождения Маэкель и вулканического пепла .	105
4.6.3 Фазообразование в силикатных материалах плотной структуры на основе латерита и вулканического пепла	110
4.7 Выводы	119
5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПЛОТНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ПОРОД ГОСУДАРСТВА ЭРИТРЕЯ	121

5.1 Техничко-экономическая целесообразность применения алюмосиликатного сырья Государства Эритрея	121
5.2 Характеристика получаемых силикатных материалов.....	122
5.3 Технология производства силикатного кирпича с использованием алюмосиликатного сырья	123
5.4 Расчет материальных затрат при производстве силикатного кирпича на основе алюмосиликатного сырья.....	126
5.5 Выводы	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	129
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	132
Приложение А. Титульный лист рекомендации по использованию алюмосиликатных пород Республики Эритрея для производства автоклавных и пропаренных силикатных материалов	145
Приложение Б. Титульный лист технологического регламента на организацию производства автоклавного силикатного кирпича с использованием вяжущего на основе глинистых пород и вулканического пепла Государства Эритрея.....	146
Приложение В. Титульный лист технологического регламента на организацию производства пропаренного силикатного кирпича с использованием вяжущего на основе глинистых пород и вулканического пепла Государства Эритрея.....	147
Приложение Г. Справка о проведении геолого-разведочных работ по поиску и разведке месторождений алюмосиликатных пород для производства силикатных материалов.....	148
Приложение Д. Протокол о намерениях использования результатов исследований при подготовке технико-экономического обоснования на строительство завода по производству силикатного кирпича в Государстве Эритрея	149
Приложение Е. Справка о внедрении результатов научно- исследовательской работы в учебный процесс	150
Приложение Ж. Справка о внедрении результатов научно- исследовательской работы в учебный процесс инженерно- технологического колледжа Мейнфхи	151

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Жилищная проблема имеет глобальные масштабы, остро отражаясь на экономическом развитии и демографии государств Африки, включая Государство Эритрея. Ограниченность внутреннего рынка строительных материалов является ключевым препятствием для устойчивого роста строительной отрасли страны. Значительная зависимость от импорта цемента, арматуры, керамических изделий существенно повышает стоимость строительства и снижает доступность качественного жилья для населения. Современное развитие требует кардинальных изменений подходов к строительству, за счет внедрения передовых технологий, обеспечивающих снижение себестоимости строительных материалов, использования экологически чистых материалов на основе местного сырья и диверсификации ассортимента продукции в соответствии с экономической и экологической политикой правительства.

В связи с этим разработка рецептурно-технологических параметров производства силикатных материалов плотной структуры с использованием сырьевых ресурсов Государстве Эритрея является актуальной задачей, решение которой позволит расширить номенклатуру доступных для строительства строительных материалов и снизить зависимость от импорта.

Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова, с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова

Степень разработанности темы. Производство силикатных материалов гидротермального твердения является хорошо зарекомендовавшей себя технологией в странах с мощным промышленным потенциалом. Исследования, проведенные в последние десятилетия рядом научных школ, были направлены на улучшение эксплуатационных характеристик силикатных материалов путем введения различных добавок, а также использования нетрадиционного алюмосиликатного сырья, за счет которого ускоряется фазо- и структурообразование в связующих системах, что повышает физико-механические показатели силикатных материалов. Исследования показали, что для этих целей пригодны только глины определенного минерального состава и генезиса. Однако возможно увеличение разнообразия

разия используемых глинистых пород за счет использования в сырьевой смеси для производства силикатных материалов дополнительно вулканического пепла, большие запасы которого находятся на территории Государства Эритрея.

Цель работы. Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе алюмосиликатных пород Государства Эритрея.

Для достижения этой цели решались следующие **задачи**:

– исследование химического и минерального состава песчано-глинистых отложений и вулканических пород Государства Эритрея;

– изучение процессов фазо- и структурообразования в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ на примере вяжущего гидротермального твердения, полученного на основе песчано-глинистых пород и вулканического пепла Государства Эритрея;

– разработка математических моделей, описывающих влияние содержания глинистых пород и вулканического пепла на свойства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры для определения рациональных составов сырьевых смесей;

– разработка технологической схемы производства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе глинистых пород и вулканического пепла Государства Эритрея;

– разработка нормативно-технической документации для внедрения результатов научной работы.

Научная новизна работы. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение получения автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе алюмосиликатных пород Государства Эритрея, заключающееся во введении в состав вяжущего на основе извести, глины и вулканического пепла (ВП). Установлено, что эффективность применения ВП повышается при использовании глинистых пород с низким содержанием SiO_2 , что связано с наличием активной аморфной фазы кремнезема в составе ВП, и, соответственно, снижением соотношения $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ менее 0,2. Такое композицион-

ное вяжущее обеспечивает получение силикатных материалов плотной структуры с марками до М 200 (неавтоклавный) и до М 250 (автоклавный).

Выявлены особенности процессов структурообразования известково-глино-песчаной смеси с содержанием ВП в условиях пропарки и при автоклавировании, заключающиеся в том, что рентгеноаморфные фазы и минералы с дефектной кристаллической структурой, входящие в состав ВП, при взаимодействии с известью образуются гидросиликаты кальция, в том числе алюминийсодержащий тоберморит и гидрогранаты, что способствует формированию плотной микроструктуры цементирующего вещества и обеспечивает высокие физико-механические показатели силикатных материалов.

Установлены закономерности влияния содержания активного СаО, глинистых пород и вулканического пепла на предел прочности при сжатии, среднюю плотность, водопоглощение и коэффициент размягчения автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры, что позволяет определить рациональные составы сырья для получения силикатных материалов с заданными физико-механическими показателями с учетом минимизации материальных и энергетических затрат.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические представления о гидротермальных процессах фазо- и структурообразования в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$, протекающих в условиях твердения силикатных материалов плотной структуры. Установлено, что алюмосиликатное сырье, представленное глинистыми породами и вулканическим пеплом, активно реагирует с известью в гидротермальных условиях, за счет чего формируются связующие вещества, обеспечивающие высокие эксплуатационные свойства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры. Полученные результаты исследований можно использовать для расширения поиска сырья на территории Государства Эритрея, пригодного для получения силикатных материалов.

В результате разработаны предельные составы прессованных силикатных материалов гидротермального твердения на основе алюмосиликатного сырья Государства Эритрея, позволяющие получать автоклавные и неавтоклавные силикат-

ные кирпичи и камни с прочностью на сжатие соответственно 16–20 МПа и 18–25 МПа, соответствующие классам средней плотности 2, маркам по прочности до М250, маркам по морозостойкости до 50, водопоглощению не ниже 6 %.

Предложена технологическая схема производства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе алюмосиликатного сырья Государства Эритрея, включающая подготовку вяжущего совместным помолом извести, глины и вулканического пепла, смешение с песком, гашение сырьевой смеси, получение изделий методом полусухого прессования, автоклавную обработку или пропарку.

Методология и методы исследований. Методологической основой диссертационной работы являются научные разработки в области стеновых силикатных материалов, получаемых на основе сырья различных генетических типов. Исследование алюмосиликатных пород Государства Эритрея и фазового состава продуктов гидротермального твердения заключалось в определении химического состава рентгенофлуоресцентным методом анализа (XRF) и минерального состава с использованием дифрактометра и дериватографа. Микроструктуру сырья и полученных композиционных материалов изучали с помощью растрового электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU, оборудованного устройством для проведения элементного анализа методом энерго-дисперсионной спектроскопии (ЭДС). Радиационно-защитные свойства материалов изучали с использованием радиоизотопного источника ^{60}Co . Оптимизацию составов сырьевых смесей проводили с использованием метода математического планирования эксперимента. Физико-механические испытания проводили в соответствие с нормативными документами.

Положения, выносимые на защиту:

- обоснованное и экспериментально подтвержденное технологическое решение получения автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе алюмосиликатных пород Государства Эритрея;
- особенности процессов структурообразования известково-глино-песчаной смеси с вулканическим пеплом при автоклавировании и в условиях пропарки;
- закономерности влияния состава формовочного сырья на эксплуатацион-

ные свойства силикатных материалов плотной структуры, полученных в условиях автоклавной обработки и пропарки;

– составы и свойства прессованных силикатных материалов гидротермального твердения (пропаренные и автоклавные) на основе алюмосиликатного сырья Государства Этерия;

– технология производства автоклавных и неавтоклавных стеновых материалов плотной структуры на основе сырья Государства Эритрея.

Степень достоверности результатов обеспечена применением комплекса современных взаимодополняющих методов исследования сырьевых и синтезированных материалов, статистической обработкой экспериментальных данных, согласованностью полученных данных с фундаментальными положениями строительного материаловедения и научными результатами других исследователей.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских конференциях: XIII и XIV Международном молодежном форуме «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2021, 2024); Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 300-летию Российской академии наук (Белгород, 2022); Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова (Белгород, 2023); Международной научно-практической конференции «Инновации в строительстве» (Брянск, 2023, 2024, 2025); VI Международной (XIX Региональной) научной конференция «Техногенные системы и экологический риск» (Обнинск, 2023); XI Международной научно-практической конференции, приуроченной к 120-летию со дня рождения К.А. Артемьева (Омск, 2024).

Внедрение результатов исследований. Результаты экспериментальных исследований планируется использовать при выполнении комплексной целевой программы по развитию строительной отрасли в Государстве Эритрея.

Для внедрения результатов диссертационной работы разработаны следующие нормативные документы:

– рекомендации по использованию алюмосиликатных пород Государства Эритрея для производства автоклавных и пропаренных силикатных материалов;

– технологический регламент на организацию производства автоклавного силикатного кирпича с использованием вяжущего на основе глинистых пород и вулканического пепла Государства Эритрея;

– технологический регламент на организацию производства пропаренного силикатного кирпича с использованием вяжущего на основе глинистых пород и вулканического пепла Государства Эритрея.

– планируется строительство завода по производству силикатного кирпича на основе глинистых пород и вулканического пепла.

Теоретические и экспериментальные результаты исследований используются в учебном процессе при подготовке: бакалавров и магистров по направлениям 18.03.01 «Химическая технология», 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», магистров по направлению 28.04.03 «Нanomатериалы» в БГТУ им В.Г. Шухова (Российская Федерация), а также при подготовке инженеров по специальности «Гражданские инженеры» в Государстве Эритрея.

Публикации. Основные положения работы изложены в 9 научных публикациях, в том числе: в 3 статьях в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ (К1).

Личный вклад автора. Автором проведен сбор и анализ литературных источников, исследованы состав и свойства алюмосиликатных пород Государства Эритрея как сырья для производства стеновых материалов гидротермального твердения, изучены процессы фазообразования в системах при гидротермальной обработке. На основе данных расчетов по уравнениям регрессии определены составы сырьевых смесей с использованием сырья Государства Эритрея. Проведен комплекс исследований физико-механических свойств силикатных материалов плотной структуры, последующая обработка и анализ полученных результатов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 151 странице машинописного текста, включающего 16 таблиц, 58 рисунков, список литературы из 124 наименований, 7 приложений.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Область строительных материалов (включая металлы, полимеры, керамику и композиты) и технологии производства представляет собой междисциплинарную область, посвященную исследованию и совершенствованию материалов, используемых в строительстве. Эта область исследований в первую очередь сосредоточена на понимании внутренних свойств различных материалов, улучшении методов производства и инновациях новых материалов, которые соответствуют определенным стандартам производительности [1–5].

Работы в этой области часто включают исследование альтернативных источников сырья, что может способствовать разработке более эффективных технологий производства строительных материалов. Поскольку строительная отрасль сталкивается с нарастающим давлением по снижению своего экологического следа, необходимо изучение пути создания экологически чистых материалов и технологических процессов. Это включает разработку энергоэффективных производственных процессов, при которых отходы сокращаются за счет повторного использования материалов.

Строительная отрасль представляет собой сегмент экономики, который создает значительные проблемы, как для окружающей среды, так и для социально-экономического прогресса, особенно в развивающихся странах. Долгое время структурная целостность была основным критерием при оценке строительных материалов. Однако в современном мире экономические факторы и их последующее влияние на окружающую среду стали иметь первостепенное значение в стремлении к устойчивому развитию в области науки о строительных материалах [5–9]. Научные исследования и технологические инновации в области строительных материалов направлены на создание рамок для повышения эффективности строительства с конечной целью обеспечения долгосрочной устойчивости строительной отрасли, учитывая экологический баланс, проблемы долговечности, социально-экономические последствия и культурные факторы.

1.1 Состояние строительной отрасли в Африке

1.1.1 Тенденции развития строительной отрасли

Данные по многим африканским странам указывают на качественную и количественную недостаточность строительного сектора для удовлетворения объемов промышленного и гражданского строительства, что препятствует экономическому развитию этих стран. Континент в настоящее время сталкивается с повышенным спросом на жилье. Строительный сектор существенно зависит от импортных строительных материалов [10–14]. Преимущественно используются иностранные строительные технологии и нормативные документы, что делает их в значительной степени несовместимыми с местными условиями и требованиями. Результаты этого несоответствия способствуют высоким затратам на строительные материалы.

Африканский континент обладает разнообразными природными ресурсами потенциально пригодными для получения строительных материалов. Согласно отчету Программы ООН по поселениям (2011), «в Африке существует значительный потенциал по снижению стоимости и увеличению доступности строительных материалов, одновременно используя их способность поддерживать местные экономики и создавать рабочие места. Расширение доступного жилья также должно осуществляться таким образом, чтобы быть экологически устойчивым и не наносить ущерба местным экосистемам и природным ресурсам». Обычные строительные материалы больше не обеспечивают качественное строительство, так как они вызвали разрушительные экономические и экологические последствия [15–18]. Поэтому существует необходимость в проведении исследований по целесообразности и использованию местных сырьевых материалов для строительства с целью обеспечения устойчивости и трансформации строительной технологии.

Обзор существующих традиционных и современных жилых зданий с точки зрения комфорта, устойчивости, доступности и воздействия на окружающую среду и рекомендация наилучшей альтернативы является междисциплинарным вопросом, требующим учета геологической базы данных, климатических и социаль-

но-экономических тенденций, институциональных и технологических возможностей конкретной страны. Несмотря на то, что данных по рассматриваемой междисциплинарной теме практически нет, автор прилагает необходимые усилия для извлечения и структурирования всех актуальных данных, чтобы стимулировать дальнейшую работу. Одна из основных проблем заключается в том, что исследовательская инфраструктура и институциональный потенциал находятся в зачаточном состоянии в большинстве африканских стран в целом и в Эритрее в частности из-за продолжающейся геополитической нестабильности в Восточной Африке [19].

В настоящее время уделяется большое внимание развитию современным методам строительства в Африке, которые минимизируют воздействие на окружающую среду. Это включает использование экологически чистых материалов, внедрение энергоэффективных проектов и продвижение сертификаций зеленого строительства. Поскольку в африканских странах наблюдается тенденция стабилизации политического и экономического положения, они становятся более привлекательными направлениями для иностранных инвесторов, ищущих возможности в строительстве и развитии инфраструктуры. Учитывая, что изменение климата представляет собой значительные риски для целостности инфраструктуры, будущие строительные проекты, вероятно, будут включать меры по повышению устойчивости к экстремальным погодным условиям.

1.1.2 Строительные материалы и техника в Государстве Эритрея

Архитектурные стили в Эритрее развивались с середины II тысячелетия до н.э. до I тысячелетия н.э., что совпало с ростом сложных агропасторальных поселений. Этот период ознаменовал переход от временных жилищ к постоянным поселениям, характеризующимся ярко выраженными архитектурными особенностями. Археологические находки на таких объектах, как Сембель и Май-Чихот, выявляют стеновые конструкции, напоминающие древнюю архитектуру, датируемую VIII-IV веками до н.э. [20, 21].

История строительства домов в Эритрее глубоко переплетена с культурными, экологическими и историческими контекстами региона. Самыми ранними строительными материалами, использовавшимися в Эритрее, были глиняные кирпичи, камень и дерево. Эти материалы выбирались на основе их доступности и пригодности для местного климата. Глиняные кирпичи и дерево в основном использовались для простых жилых сооружений, таких как дома и конюшни, в то время как камень оставлялся для более значительных построек, таких как храмы и памятники, которые предназначались для того, чтобы прослужить веками.

Глиняные кирпичи являются одним из старейших строительных материалов, используемых в Эритрее. Они изготавливаются из смеси глины, песка и воды, которая затем формируется в кирпичи и сушится на солнце [22, 23]. Этот метод строительства не только экономически эффективен, но и экологически чист, так как использует местные ресурсы. Глиняные кирпичи обычно используются для жилых зданий и конюшен благодаря своим отличным теплоизоляционным свойствам, которые помогают поддерживать комфортную температуру внутри помещений, как в жарком, так и в прохладном климате.

Камень является еще одним основным строительным материалом в Эритрее, особенно для более значительных сооружений, таких как церкви и памятники. Исторически камень рассматривался как прочный материал, способный выдержать испытание временем. Высокая прочность на сжатие камня делает его подходящим для строительства несущих стен и арок. В древние времена камни часто добывались локально; однако редкие декоративные камни, такие как мрамор, импортировались для важных строений. Использование камня отражает как эстетические соображения, так и практические потребности в долговечности архитектуры [24].

Дерево традиционно использовалось наряду с глиной и камнем в эритрейской архитектуре. Оно выполняет различные функции, включая структурную поддержку (в качестве балок или стропил) и эстетическую отделку (например, резьбу). Разные виды дерева выбираются в зависимости от их доступности и при-

годности для конкретных строительных нужд. Например, деревянные крыши распространены во многих традиционных домах по всей Эритрее [24].

В современное время, несмотря на то, что традиционные материалы остаются преобладающими, в эритрейскую архитектуру были интегрированы современные техники и материалы. Структуры, такие как Меребае, сочетают камень и дерево с современными элементами, такими как оцинкованные листы, чтобы создать полумодерные дома, которые отражают как культурное наследие, так и современные тенденции [25, 26].

Архитектурные стили, которые мы видим сегодня – от домов Хидмо, типичных для высокогорий, до структур Агудо, встречающихся в низменных районах – демонстрируют сочетание традиционных практик с адаптациями для удовлетворения современных потребностей. Эти здания не только выполняют функциональные задачи, но и символизируют идентичность сообщества и культурную преемственность.

Эритрейское жилье можно классифицировать на несколько традиционных типов в зависимости от региональных различий:

Хидмо – обычно встречается в высокогорных районах, эти строения, похожие на саман, построены с использованием местных материалов;

Агудо – характеризуются соломенными крышами, эти хижины распространены в низменных регионах;

Агнет – полуномадическая структура, используемая преимущественно пасторальными народами; это обычно круглая хижина, сделанная из высушенных веток и матов;

Мереба – более современный каменный дом с крышей из профнастила, часто строящийся квалифицированными каменщиками [27].

Каждый тип отражает не только практические соображения, касающиеся климата и доступных ресурсов, но и культурные ценности, и социальную организацию внутри сообществ. Современная эритрейская архитектура продолжает отражать традиционные стили, одновременно включая современные элементы. Влияние колониальной архитектуры очевидно в городских центрах, таких как

Асмара, где здания демонстрируют сочетание местных традиций с европейскими дизайнами. Эта фузия привела к уникальным архитектурным выражениям, которые перекликаются как с исторической значимостью, так и с современной функциональностью.

Более того, современные конструкции отвечают климатическим условиям через устойчивые практики, которые эффективно используют обильные местные материалы. Народная архитектура представляет собой не просто укрытие, но также воплощает культурную идентичность и ценности сообщества.

1.1.3 Состояние производства материалов гидротермального твердения в странах Африки

Данные научных публикаций не содержат достаточных сведений о наличии производства материалов гидротермального твердения в странах Африки. Согласно отчетам Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), Программы развития ООН (ПРООН) и Международного энергетического агентства (МЭА), автоклавные силикатные изделия не распространены в Африке из-за экономических ограничений, проблем с инфраструктурой, ограниченных производственных возможностей, нехватки квалифицированной рабочей силы, низкого спроса на рынке и осведомленности, а также конкуренции со стороны традиционных материалов.

Одной из основных причин, по которой автоклавные силикатные материалы не распространены в Африке, заключается в экономических ограничениях на инвестиции в современные строительные материалы, которые требуют значительных первоначальных капиталовложений и постоянного обслуживания [28]. Не развитые дорожные сети, ограниченный доступ к жизненно важным коммунальным услугам, таким как электричество и вода, а также недостаточная транспортная инфраструктура усложняют логистику транспортировки значительных объемов материалов или поддержания производственных мощностей для производства. Отсутствие надежной инфраструктуры подразумевает, что даже если автоклавные материалы будут производиться локально, его распределение на строи-

тельные площадки может оказаться логистически сложным и финансово обременительным.

Производство автоклавных силикатных изделий требует специализированных производственных мощностей, способных работать с автоклавами в контролируемых условиях [29]. Во многих африканских странах такие мощности либо отсутствуют, либо их количество ограничено из-за высоких затрат на установку и необходимости квалифицированного труда для их эффективной эксплуатации. Эта нехватка современных производственных возможностей приводит к зависимости от традиционных строительных материалов, которые не требуют таких сложных производственных процессов.

Существует заметный дефицит подготовленных специалистов, способных работать с современными стеновыми материалами [30, 31]. Эффективная реализация этих инновационных продуктов часто требует квалифицированных рабочих, обладающих глубоким пониманием их характеристик и методов установки. В нескольких африканских странах образовательные системы могут не обеспечивать адекватные программы подготовки, которые акцентируют внимание на современных строительных технологиях, в результате чего формируется рабочая сила, недостаточно подготовленная для использования этих прогрессивных строительных материалов.

Спрос на автоклавные силикатные изделия также формируется уровнем осведомленности и принятия на рынке среди строителей и застройщиков. Значительное количество специалистов в области строительства может проявлять предпочтение к традиционным материалам. Более того, при отсутствии надежных маркетинговых инициатив или успешных историй, которые бы разъясняли преимущества автоклавных материалов – такие как повышенная энергоэффективность или долгосрочная экономия затрат – существует минимальная мотивация для его широкого применения.

На многочисленных африканских рынках традиционные строительные материалы, такие как глиняные кирпичи и бетонные блоки, в изобилии доступны и часто более экономичны, чем автоклавные материалы, при оценке местных мето-

дов производства. Эти традиционные материалы обладают устоявшимися цепочками поставок и хорошо понимаются строителями, что делает их более привлекательными альтернативами, несмотря на потенциальные недостатки.

1.2 Алюмосиликатные породы Государства Эритрея

1.2.1 Глинистые породы тропического и субтропического климата

Широкое разнообразие почв в тропических и субтропических регионах, в отличие от широко изученных почв с умеренным климатом, практически не изучено. Тропические и субтропические почвы обладают отличительными особенностями и свойствами, хотя все они являются результатом одних и тех же почвообразующих факторов и формируются в результате сходных процессов.

Почвы тропических и субтропических регионов, где климат характеризуется высокими температурами и значительными осадками, отличаются высоким содержанием глинистых минералов. Формирование состава глинистых минералов зависит от различных факторов, включая исходные материнские породы, климат и рельеф территории. Большие осадки и температура в тропиках приводят к интенсивному химическому выветриванию и вымыванию растворимых веществ в почвенной матрице. Первичные минералы, включая полевые шпаты и слюды, подвергаются растворению или трансформации в каолинит ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), гётит ($\alpha\text{-FeOOH}$) и гибсит ($\alpha\text{-Al(OH)}_3$) [32–34].

В субтропических влажных климатических условиях гидроокислы железа и алюминия могут частично терять свое кристаллическое водное содержание. Гетит превращается в гематит. Обезвоживание гетита и последующее образование гематита объясняют резкий контраст в окраске между почвами, развитыми во влажных тропических климатах, и теми, что из субвлажных зон. Во влажных тропических условиях почвы преимущественно имеют желтый или желтовато-коричневый цвет (что указывает на наличие гетита), тогда как почвы, образованные в субвлажных климатах, преимущественно отображают красный цвет из-за присутствия гематита.

1.2.2 Латеритные породы

Поздние породы представляют собой мелкозернистые почвы, характеризующиеся значительной концентрацией оксидов железа, возникающих в результате обширного выветривания подстилающих родительских горных пород в условиях влажной тропической и субтропической среды [15, 35–37]. Поздняя порода представляет собой стратифицированную почву, состоящую из нестабильных компонентов – ила и глины, и стабильных компонентов – гравия и песка в присутствии влаги, что делает ее подходящей для производства кирпичей. Такие почвы обладают повышенной прочностью и устойчивостью к проникновению влаги, а также сниженной восприимчивостью к значительным объемным изменениям. Латерит характеризуется красноватым цветом из-за содержания оксида железа и традиционно используется в строительстве, сельском хозяйстве и в качестве сырья для различных промышленных применений.

Несмотря на его потенциальную полезность, латерит не был широко изучен как компонент автоклавных силикатных материалов. Исследования в области строительных материалов в основном сосредоточены на традиционных компонентах, таких как портландцемент, кремнистый песок и заполнители.

Латерит широко распространен в тропических регионах, что делает его экономически эффективной альтернативой традиционным сырьевым материалам, используемым в производстве автоклавных материалов. Включив латерит в эти материалы, производители могут снизить зависимость от невозобновляемых ресурсов, таких как цемент и заполнители, тем самым способствуя устойчивому развитию в строительной отрасли [38–41]. Пуццолановая активность латеритных почв может способствовать улучшению сцепления внутри матрицы, что приведет к получению более качественных конечных продуктов.

Поздние почвы обладают низкой теплопроводностью из-за своей пористой структуры. При интеграции в автоклавные силикатные материалы они могут улучшить теплоизоляционные свойства, делая здания более энергоэффективными за счет снижения потребностей в отоплении и охлаждении [15, 42, 43].

Использование латерита в автоклавных силикатных материалах стимулирует развитие инновационных строительных технологий, которые используют местные ресурсы. Включение латерита и других глинистых пород в строительные материалы также может способствовать сокращению отходов за счет использования грунта, который в противном случае мог бы считаться непригодным для традиционных применений из-за его переменных инженерных свойств при отсутствии обработки.

Преимущества использования латерита могут включать улучшенные механические свойства, аспекты экологичности благодаря наличию на местах и экономическую эффективность. Минеральный состав латеритов может значительно различаться в зависимости от их географического расположения. Такая изменчивость создает проблемы для стандартизации в исследованиях, направленных на использование латерита в продуктах автоклавной обработки. При финансировании научных исследований часто предпочтение отдается более известным материалам с известными эксплуатационными характеристиками, а не менее изученным альтернативам, таким как латерит.

Использование латерита в автоклавных силикатных материалах может представлять собой технические проблемы, связанные с условиями обработки или совместимостью с другими компонентами в проектировании смеси. Строительные нормы и правила часто отдают предпочтение установленным материалам, которые соответствуют конкретным критериям производительности. Недостаток комплексных исследований по латериту может затруднить его принятие как жизнеспособного компонента в рамках регулируемых строительных практик. Чтобы полностью понять, как латерит можно эффективно использовать в автоклавных силикатных системах, необходимы комплексные исследования, сосредоточенные на его физических свойствах, химических взаимодействиях в процессе автоклавирования и оценках долговечности на длительный срок.

1.2.3 Вулканический пепел

Вулканическая активность распространена в многочисленных регионах, и в результате повторяющихся вулканических извержений вулканические обломки доступны в большом количестве. Скалы, образованные в результате вулканических процессов, представляют значительный интерес для синтеза силикатных материалов благодаря своим внутренним свойствам, которые включают компоненты активной аморфной фазы.

Исторически, вулканический пепел использовался в строительстве с древних времен, особенно римлянами, которые признали его полезные свойства [44–46]. Они смешивали вулканический пепел с известью для создания прочного строительного материала, известного как пуццолана. Ключевые характеристики вулканического пепла включают его легкий вес, высокую пористость и пуццолановую активность, что позволяет ему реагировать с известью для образования соединений, которые улучшают прочность и долговечность.

Вулканические отложения охватывают широкий спектр применений, особенно в строительстве различных конструктивных форм, начиная от жилых зданий и заканчивая общественной инфраструктурой, благодаря своим полезным характеристикам, включая тепловую и акустическую изоляцию, нетоксичность, огнестойкость, высокий коэффициент прочности к весу [47–51]. Вулканический пепел может служить пуццолановым агентом при условии, что суммарный процент массы SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 превышает 70 мас. %.

В современном строительстве вулканический пепел может использоваться несколькими способами. Вулканический пепел может служить пуццолановой добавкой в производстве цемента. Его мелкие частицы способствуют образованию цементных соединений при смешивании с известью и водой, улучшая общую прочность и долговечность бетона. Более крупные фракции вулканического пепла могут использоваться в качестве легких заполнителей в бетоне и растворе. Благодаря своей пористой структуре вулканический пепел обеспечивает отличные теплоизоляционные свойства.

Один значительный аспект использования вулканического пепла в автоклавных силикатных материалах – это улучшение механических свойств, таких как прочность на сжатие и долговечность [52–54]. Когда вулканический пепел активируется в условиях автоклавирования, он способствует образованию плотной микроструктуры с улучшенной связью между частицами.

Использование вулканического пепла в качестве связующего материала соответствует принципам устойчивого строительства. Это снижает зависимость от портландцемента, который имеет высокий углеродный след из-за процесса его производства. Используя вулканический пепел, добываемый на местном уровне, можно также минимизировать экологическое воздействие, связанное с транспортировкой и переработкой. Этот аспект подчеркивает научную новизну, так как он решает современные проблемы, связанные с устойчивостью в строительстве.

Вулканический пепел был широко изучен за его пуццолановыми свойствами и потенциалом в качестве вспомогательного цементирующего материала, его конкретное применение в автоклавных силикатных материалах не получило такого же уровня внимания.

Вулканический пепел отличается высокой гетерогенностью, значительной изменчивостью в химическом составе, распределении размеров частиц и физических свойствах в зависимости от его источника [55, 56]. Эта изменчивость может усложнить процессы стандартизации, необходимые для его использования в автоклавных силикатных материалах. Для использования вулканического пепла необходимо четкое понимание как эти различия влияют на производительность в автоклавных приложениях.

Несмотря на то, что вулканический пепел обладает пуццолановой активностью, существует ограниченное количество исследований, посвященных его реакционной способности в сочетании с другими компонентами, используемыми при автоклавном производстве силикатов.

Экономическая целесообразность использования вулканического пепла в автоклавированных продуктах может создать трудности при изучении этого направления. Хотя вулканический пепел, как правило, имеет низкую стоимость,

затраты, связанные с его обработкой для соответствия конкретным требованиям автоклавного производства, могут превысить потенциальные выгоды, если не будут продемонстрированы значительные преимущества через испытания.

Существует нехватка стандартных руководств относительно использования вулканического пепла в автоклавных силикатных материалах, что может препятствовать исследованиям в этом направлении. Разработка четких параметров способствовало бы проведению большего количества исследований, сосредоточенных на потенциальных преимуществах этого материала.

1.3 Роль алюмосиликатных пород в улучшении свойств известково-кремнеземистых вяжущих

Глинистые минералы, определяемые как гидрофильные алюмосиликаты, проявляют как пластичность, так и адгезивные характеристики при взаимодействии с водой, затем затвердевая в процессе сушки или термической обработки [57–59]. Основной состав глины в первую очередь состоит из диоксида кремния (SiO_2), оксида алюминия (Al_2O_3) (или оксида магния (MgO), или обоих с возможной заменой на железо), в сочетании с значительными количествами кальция, калия, натрия и различных кристаллических примесей, таких как кварц, полевой шпат и слюда. Соотношения SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO и CaO играют важную роль в определении функциональных характеристик глинистых минералов. Эти минералы демонстрируют значительную физическую и химическую реактивность, что можно объяснить их мелкими размерами частиц, уникальными кристаллическими структурами, высокой адсорбционной способностью и отрицательными поверхностными зарядами. В результате они могут быть использованы в различных областях строительного сектора при правильной обработке.

Хорошо известно, что распространенный подход к улучшению состава известково-силикатных вяжущих, используемых в производстве автоклавных материалов, включает в себя внедрение активных алюмосиликатных компонентов в их матрицу [60–71]. Природные алюмосиликатные породы, как и промышленные от-

ходы алюмосиликатного состава, применяются в композитных вяжущих, тем самым способствуя активации химического взаимодействия между компонентами в системе «CaO–SiO₂–Al₂O₃–Fe₂O₃–H₂O» и снижая долю кварца в вяжущем, который является интенсивно эксплуатируемым и истощаемым ресурсом, а также значительно изменяя фазовый состав полученных продуктов.

Алюмосиликатные породы играют значительную роль в повышении эффективности известково-силикатных вяжущих, которые предназначены для получения различных строительных материалах, в частности автоклавных [60, 61, 64, 65]. Взаимодействие между известью (CaO), кремнеземом (SiO₂) и оксидом алюминия (Al₂O₃) из этих пород приводит к образованию сложных гидратационных продуктов, которые улучшают механическую прочность, долговечность и общие свойства материалов.

Глинистые отложения, которые занимают большую долю в составе алюмосиликатных пород, в большинстве своем являются продуктами промежуточной стадии выветривания магматических и метаморфических пород и характеризуются неупорядоченной структурой, что определяет их термодинамическую неустойчивость в гидротермальных условиях [72].

Особенность структуры глинистых минералов, таких как каолинит, монтмориллонит и гидрослюда, состоящих из двух- и трехслойных пакетов кремнекислородных тетраэдров и алюмогидроксильных октаэдров, а также неупорядоченное чередование слоев в смешаннослойных минералах определяет их повышенную реакционную способность [73].

Когда алюмосиликатные породы включаются в известково-силикатные системы, они вносят дополнительные источники кремнезема и глинозема. Это необходимо, поскольку наличие обоих компонентов способствует образованию гидросиликатов кальция (C–S–H) и гидроалюминатов кальция (C–A–H). Эти гидраты критически важны для связывания и обеспечивают структурную целостность конечного продукта. В частности, активированный кремнезем из алюмосиликатов усиливает образование низкоосновных гидросиликатов кальция, таких как 11 Å-тоберморит, который известен своими высокими механическими свойствами [60].

Известно также, что в процессе фазообразования в гидротермальных условиях в системе на основе алюмосиликатов происходит ускорение синтеза гелевидных и кристаллических высокоосновных и низкоосновных гидросиликатов кальция, тоберморита и гидрогранатов. При этом возможно образование алюминийсодержащего тоберморита, так как известно, что ионы кремния в структуре кристаллической решетки тоберморита способны замещаться ионами алюминия [74].

Введение алюмосиликатных материалов приводит к образованию различных фаз в процессе гидратации. Например, в связующей системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ присутствие алюмосиликатов способствует образованию не только CSH, но и цеолитных фаз, таких как вайрацит [60]. Эти цеолиты способствуют повышению долговечности за счет повышения устойчивости к таким факторам окружающей среды, как влажность и колебания температуры.

Исследования показывают, что добавление алюмосиликатных компонентов значительно улучшает прочность на сжатие. Например, замена части традиционных заполнителей гранитной пудрой (источником алюмосиликата) показала увеличение прочности на сжатие более чем на 50 %. Это улучшение связано с большей плотностью упаковки и сниженной микропористостью в матрице связующего [60–63]. Увеличенная плотность приводит к меньшему количеству пустот и дефектов, что делает материалы более прочными и долговечными.

Долговечность, обеспечиваемая алюмосиликатами, проистекает из их способности образовывать стабильные гидратационные продукты, которые сопротивляются деградации с течением времени. Наличие гидрогранатов также может положительно влиять на механические свойства; однако их точная роль остается менее понятной из-за различных мнений о влиянии их на характеристики конечного продукта. Тем не менее, снижение водопоглощения указывает на повышенную эффективность против воздействий атмосферных условий.

Использование аморфного кремнезема взамен кварцевого песка привлекло внимание благодаря уникальным свойствам и потенциальным преимуществам, которые предлагает аморфный кремнезем.

Кварцевый песок в основном состоит из кристаллического диоксида кремния (SiO_2) и широко используется в строительстве, производстве стекла и в качестве наполнителя благодаря своей твердости и химической стабильности. У него хорошо определенная кристаллическая структура, которая способствует его механической прочности. Аморфный кремнезем, с другой стороны, не имеет дальнедействующей упорядоченной кристаллической структуры. Он может быть получен из различных источников, таких как зола рисовой шелухи, вулканическая зола или синтетически. Отсутствие кристалличности придает аморфному кремнезему отличительные физические и химические свойства, включая большую поверхность, меньшую плотность и повышенную реактивность по сравнению с кристаллическими формами.

Аморфный кремнезем, как правило, имеет большую площадь поверхности, чем кварцевый песок. Это свойство может повысить его эффективность в качестве наполнителя или добавки в различных материалах за счет улучшения характеристик сцепления [75].

Аморфный кремнезем более активно участвует в химических реакциях по сравнению с кварцевым песком. Это может быть особенно полезно при производстве бетона, где пуццолановые реакции могут повысить прочность и долговечность. Из-за своей меньшей плотности по сравнению с кварцевым песком аморфный кремнезем может снизить общий вес композитных материалов без ущерба для структурной целостности. Использование вулканического пепла в качестве источника аморфного кремнезема может предоставить альтернативный материал для промышленности производства.

Когда кварц служит основным сырьевым компонентом, это требует применение отверждения насыщенным паром при значительно повышенных температурах, а именно превышающих $180\text{ }^\circ\text{C}$ [76, 77]. В отличие от кварца, альтернативные формы кремнезема, включая аморфный кремнезем, демонстрируют повышенную скорость растворения и требуют сравнительно меньше энергии для растворения. Таким образом, замена кварца на кремнеземные материалы с большей

растворимостью может предоставить преимущество в снижении температуры автоклавирования.

Растворение кремнеземных материалов существенно зависит от температуры, кинетика растворения более растворимого кремнезема может быть модифицирована за счет применения пониженной температуры автоклавирования по сравнению с той, которая требуется для разложения кварца. Действительно, снижая температуру автоклавирования, кремнезем с более высокой растворимостью может растворяться сравнительно медленнее, что, в свою очередь, приводит к увеличению отношения C/S первоначально образованных фаз C-S-H [76]. В результате трансформация CSH в тоберморит может происходить с большей легкостью.

Кварцевый песок служит основным сырьем для синтеза автоклавированных кальций силикатных композитов. Тем не менее, он становится все менее доступным, что требует исследования и оценки альтернативных кремнистых сырьевых материалов для потенциальной замены. Кристаллический диоксид кремния обладает низкой активностью, и его взаимодействие с известью возможно только при гидротермальных условиях. Повышенное давление, температура и наличие пара в процессе автоклавирования кальций силикатных композитов увеличивают растворимость кристаллического SiO_2 , тем самым облегчая его реакцию с известью и H_2O для генерации новых фаз гидросиликатов кальция (CSH) [78–80]. Синтезированный при этом тоберморит ($5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) действует как функциональный связующий компонент в известково-силикатных материалах. Количество и качество тоберморита в конечном итоге определяют свойства получаемого материала.

Вторичные сырьевые материалы использовались в производстве известково-силикатных композитов на протяжении длительного времени, охватывающего как исследовательские, так и практические применения. Однако эти вторичные сырьевые материалы преимущественно состоят из различных типов золы. Такие вторичные сырьевые материалы часто демонстрируют высокую концентрацию аморфного SiO_2 . Аморфный SiO_2 обладает большей растворимостью по сравнению с кристаллическим SiO_2 , что приводит к повышенной активности. Фаза CSH,

которая образуется при мольном соотношении $\text{Ca/Si} < 1$, соответствует структурным характеристикам тоберморита. Также утверждается, что растворимость кремнезема служит индикатором кинетики реакции между CaO и SiO_2 [77, 79]. Фаза CSH, полученная из кристаллического SiO_2 , характеризуется значительным количеством Ca(OH)_2 , в то время как фаза CSH, образованная в результате взаимодействия с аморфным SiO_2 , содержит значительное количество SiO_2 . Наличие SiO_2 может препятствовать процессу кристаллизации CSH в тоберморит. Следовательно, использование кристаллического SiO_2 приводит к более медленной скорости реакции, но имеет потенциал для получения более кристаллической формы тоберморита.

1.4 Задачи реформирования существующей культуры строительства жилых домов в Государстве Эритрея

Основным способом, с помощью которого люди определяют эволюцию своей культуры и цивилизации, является главным образом архитектура их зданий и поселений. Уникальные проекты зданий и сооружений в Эритрее демонстрируют изобретательность людей в адаптации к окружающей среде в дополнение к культурному самовыражению и образу жизни на протяжении тысячелетий. Использование глиняных изделий было традиционной практикой в эритрейском обществе, о чем свидетельствуют сохранившиеся нетронутыми древние сооружения и артефакты. Однако в международных публикациях не хватает обширных исследований, касающихся эволюции строительных технологий, приведших к их нынешнему виду.

Как и многие страны в субсахарской Африке, Эритрея сталкивается с серьезными жилищными проблемами и низким уровнем городского развития. Доступное и комфортное жилье, а также инфраструктура приемлемых стандартов обеспечивают безопасную и здоровую жизненную среду, способствуют экономическому росту за счет повышения производительности труда и создают социальную гармонию среди граждан и политическую стабильность в стране [81–85].

Строительная культура в Эритрее исторически основывалась на сочетании традиционных и современных строительных материалов. Однако растет признание необходимости реформирования этой культуры, особенно с акцентом на местные строительные материалы. Эта реформа обусловлена несколькими взаимосвязанными мотивами, которые охватывают экологическую устойчивость, экономическую жизнеспособность, культурную идентичность и социальную устойчивость.

Один из основных мотивов реформирования строительства жилых домов в Эритрее заключается в содействии экологической устойчивости [86–88]. Использование местных строительных материалов, таких как глиняные кирпичи, камень и дерево, может значительно снизить углеродный след, связанный с транспортировкой и производством импортируемых материалов. Используя ресурсы, которые доступны в регионе, строители могут минимизировать потребление энергии и выбросы парниковых газов. Кроме того, местные материалы часто обладают лучшими теплотехническими свойствами, подходящими для климата Эритреи, что приводит к более энергоэффективным домам, которые требуют меньше отопления или охлаждения.

Сосредоточение на местных строительных материалах может повысить экономическую жизнеспособность сообществ в Эритрее. Закупая материалы на месте, можно значительно снизить затраты на строительство по сравнению с импортом иностранных материалов. Этот переход не только поддерживает местные экономики, но и создает рабочие места в отраслях добычи и переработки материалов. Более того, инвестиции в местное ремесло могут привести к развитию квалифицированной рабочей силы, способной производить высококачественные строительные материалы, адаптированные к региональным потребностям.

Реформа строительных технологий с учетом приоритета использования местных материалов также служит укреплению культурной идентичности среди эритрейцев. Традиционные архитектурные стили, использующие местные материалы, отражают исторические и культурные нарративы сообществ. Возрождая эти практики, появляется возможность воспитать гордость за местное наследие и

ремесло, обеспечивая при этом, чтобы новые постройки гармонировали с культурным ландшафтом Эритреи. Этот подход помогает сохранить уникальные архитектурные стили, которые в противном случае могут быть утрачены из-за глобализации и гомогенизации.

Включение местных строительных материалов в жилищное строительство повышает социальную устойчивость в сообществах. Местные ресурсы часто более доступны в периоды кризиса или нарушений цепочки поставок, вызванных внешними факторами, такими как политическая нестабильность или колебания глобального рынка. Полагаясь на местные материалы, сообщества могут поддерживать свой жилищный фонд, не будучи чрезмерно зависимыми от внешних поставщиков. Эта самодостаточность имеет решающее значение для подготовки к бедствиям и усилий по восстановлению.

Использование местных природных материалов также может иметь преимущества для здоровья жителей. Многие традиционные строительные материалы содержат вредные химические вещества или загрязнители, которые могут влиять на качество воздуха в помещениях и общее состояние здоровья. В отличие от этого, традиционные методы строительства с использованием земляных материалов, таких как глиняные кирпичи, способствуют созданию более здоровой жилой среды, позволяя зданиям естественно «дышать» и уменьшая воздействие токсичных веществ.

Строительный сектор Эритреи должен укрепить свои строительные мощности в соответствии с ростом населения, чтобы решить существующую острую проблему жилья, содействовать и поощрять добровольное возвращение эмигрантов из-за границы, предоставляя доступное жилье. Согласно предыдущим оценкам, только в столице Асмара существует спрос на 100 000 новых домов [89].

Основные строительные материалы для жилищного строительства – это кирпичи, пустотелые цементные блоки и камни, изготовленные вручную или машинным способом, бетонные полы, покрытые плиткой. Кирпичные заводы работают на устаревшем производственном оборудовании. Строители, использующие дефицитное дрова для обжига кирпичей, прекратили производство из-за строгой

политики против вырубки лесов. В то время как те, кто зависит от потребления топлива, ограничены высокими производственными затратами и низкой покупательной способностью клиентов.

За последние несколько десятилетий спрос на цементные блоки резко возрос из-за ценового преимущества, доступности, улучшения качества и простоты производства по сравнению с кирпичом. Однако поставки цемента местного производства ограничены одним заводом небольшой мощности, который покрывает примерно 20 % годовой потребности страны [6]. Этот небольшой объем цемента потребляется в соответствии с приоритетом, который отдается проектам общественного строительства.

Различные виды облицовочного камня доступны по всей стране: песчаник, известняк, базальт, мрамор и гранит. Базальт используется для облицовки стен фундамента, в то время как песчаник, известняк и другие облицовочные камни используются для отделки фасадов в зависимости от их доступности [89–91]. В домах с высоким доходом мрамор и гранит используются для полов, облицовки, а также для подоконников и лестниц. Существуют необходимые специалисты и мастерские, специализирующиеся на резке и полировке мрамора и обработке гранита, но это трудоемкий и менее доступный процесс.

Большинство керамических плиток импортируются по высокой цене. Кровельные материалы изготавливаются либо из бетонных плит, покрытых асфальтом для водонепроницаемости, либо из гофрированных железных листов, поддерживаемых деревянными фермами и балками. Плитки и кровельные материалы местного производства не соответствуют современным требованиям.

Существует в основном две категории сельских домов, которые используют местные материалы и технологии. В сельских районах высокогорья Эритреи дома, известные как Хидмо, построены из камней [25, 26]. Хидмо – это традиционный дом, обычно построенный из камня, с деревянными столбами, поддерживающими деревянные стропила и балки, и покрытый ветвями и землёй в качестве крыши. Однако строительство Хидмо требует значительного количества древесины для кровли и несущих конструкций.

В настоящее время Хидмо больше не строятся, поскольку они потребляют слишком много древесины и рабочей силы. Эта народная архитектура претерпела ряд изменений под влиянием колониальной архитектуры и урбанизма, однако такие здания нуждаются в модернизации в соответствии с современным образом жизни, чтобы быть устойчивыми и снизить негативное воздействие на окружающую среду, сохраняя при этом свой тепловой комфорт и социально-культурный след.

Другой традиционный эритрейский дом представляет собой цилиндрическое сооружение с конической крышей, известное как Агудо [26]. Агудо распространен в низменностях Эритреи, а также в некоторых странах восточной и южной Африки, где также требуется много деревьев, хотя и не так много, как требуется для строительства хидмо. Агудо строятся из камней или саманного кирпича, а крыши опираются на большие деревянные бруски, которые сверху скрепляются плотным материалом в форме кольца. В сельских районах низменностей строительство домов Агудо зависит от древесины, но чрезмерное использование древесины в строительстве привело к неблагоприятным экологическим последствиям. Эти традиционные дома предназначены для обеспечения тепловой изоляции в регионах с жарким и засушливым климатом, но им не хватает минимальных инженерных стандартов и базовых удобств [89].

В отличие от небольших городов и деревень, которые имеют свой собственный характер, основанный на культурном наследии, крупные города Эритреи демонстрируют сильные колониальные черты и влияние, например, флорентийский стиль Асмэры и стиль Ар-деко, турецкий и египетский стили Массавы. В колониальный период (1882-1941) первые итальянские поселенцы в Эритрее нашли районы, богатые глиной, пригодной для изготовления кирпичей. Первоначально были построены небольшие заводы упрощенной технологии, где сырье помещалось в вырытые в земле резервуары для декантации и очистки глины, а кирпичи (обожженные в местных печах) начали использовать при строительстве современных эритрейских городов, таких как Асмэра, Керен и Декемхаре [92, 93].

Кирпичи были изготовлены из ила, найденного в озерах и прудах, и обожжены при температуре 700 °С для придания прочности. Добавки красных латеритов придают кирпичам характерный красный цвет. Столица Асмэра, представляющая собой исключительный пример раннего модернистского урбанизма начала 20-го века в Африке, известна своими зданиями в стиле Ар-деко, которые внесли ее в список всемирного наследия ЮНЕСКО.

Геологические условия Государства Эритрея определяют наличие минерального сырья для строительства, включая глины с различными геотехническими свойствами, латерит, гипс, известняк, пемзу и кварцевые месторождения [15, 93]. Другими наиболее часто используемыми строительными материалами были базальт, гранит, мрамор, кирпич, бетонные блоки, деревянная и разноцветная мозаика. Эритрея обладает не только неисчерпаемыми запасами строительных материалов, но и обладает навыками использования этих материалов. Однако молодое поколение больше полагается на простые методы производства бетонных блоков, которые менее трудоемки и просты.

Обожженный глиняный кирпич не производится из-за негативного воздействия на окружающую среду и после объявления правительством Эритреи строгой политики по борьбе с вырубкой лесов. В результате возникает необходимость в совершенствовании технологии производства экологически чистых строительных материалов, обычно называемых «зелеными» строительными материалами (например, прессованный глиняный кирпич, земляные насыпи, стабилизированные известью, и т.д.), чтобы способствовать устойчивому и доступному строительству [94].

Огромный импорт основных строительных материалов, таких как цемент и арматурная сталь, является основной причиной нехватки жилья и роста цен на жилье. Эти проблемы с поставками можно решить, продвигая улучшенные альтернативные местные строительные материалы, которые не оказывают негативного воздействия на окружающую среду. Эффективное использование местных строительных материалов не только снизит стоимость строительства и повысит доступность, но также обеспечит доход и рабочие места.

Для получения силикатных материалов пригодны глинистые породы определенного состава и генезиса. Тем не менее, имеется большое количество пород, не пригодных для этих целей. Повысить эффективность использования глинистых пород можно за счет дополнительного использования в составе известково-глинистого вяжущего вулканического пепла, который благодаря минеральному и гранулометрическому составу обладает высокой активностью, за счет чего гидротермальных условиях возможно ускорение процессов фазообразования и формирование цементирующего вещества, обеспечивающего высокие эксплуатационные показатели силикатных материалов, что явилось *рабочей гипотезой* данных исследований.

Адаптация хорошо зарекомендовавшего себя гидротермального метода производства силикатов в Эритрее является наиболее эффективным решением, учитывая обилие необходимых сырьевых материалов в непосредственной близости. Преимущества производства силикатов с использованием гидротермальной обработки заключаются в низком потреблении топлива и электроэнергии, более коротком времени цикла и возможности использования дополнительных природных материалов и отходов для повышения эффективности производства [68–71, 95, 96, 71].

1.5 Выводы

1. Данные по многим африканским странам указывают на качественную и количественную недостаточность строительного сектора для удовлетворения объемов промышленного и гражданского строительства, что препятствует экономическому развитию этих стран. Континент, и в частности Государство Эритрея, сталкивается с повышенным спросом на жилье. Использование иностранных строительных технологий и нормативных документов делает их в значительной степени несовместимыми с местными условиями и требованиями. Результаты этого несоответствия способствуют высоким затратам на строительные материалы.

2. Альтернативой традиционным строительным материалам могут являться силикатные материалы гидротермального твердения, сырье для которых широко распространено на территории Государство Эритрея. При использовании алюмосиликатных пород можно повысить эффективность известково-силикатных вяжущих веществ за счет ускорения химических взаимодействий, которые приводят к образованию новых фаз и оптимизации процессов структурообразования, увеличению механической прочности и повышенной долговечности. Их использование в качестве сырья позволит повысить производственные мощности и расширить номенклатуру производства строительных материалов за счет эффективного использования природных ресурсов.

3. Латерит широко распространен в тропических регионах, что позволяет считать его экономически эффективной альтернативой традиционным сырьевым материалам. Несмотря на его потенциальную полезность, латерит не был широко изучен как компонент сырья автоклавных силикатных материалов.

4. Вулканический пепел представляет собой перспективный компонент для автоклавных силикатных материалов благодаря наличию пуццолановых свойств. Однако нет нормативных документов относительно использования вулканического пепла в автоклавных силикатных материалах. Необходимы более подробные исследования по изучению возможности использования вулканического пепла в силикатных вяжущих, а также в сочетании с другими алюмосиликатами.

5. Задачи реформирования существующей культуры строительства жилых домов в Эритрее с акцентом на местные строительные материалы охватывает несколько аспектов: экологическая устойчивость, экономическая жизнеспособность, сохранение культурной идентичности, социальная устойчивость и преимущества для здоровья жителей. Подчеркивание этих аспектов не только соответствует глобальным тенденциям к устойчивому развитию, но также решает конкретные проблемы, с которыми сталкиваются эритрейские сообщества сегодня.

2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Сырьевые материалы

2.1.1 Кремнеземистый и известковый компоненты

В исследовательской работе использовалась известь АО «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ» г. Белгород. Активность извести составляла 87,7 %, температура гашения – 80 °С, время гашения – 3,5 мин. По ГОСТ 9179-2018 известь соответствует требованиям 2-го сорта [97]. При приготовлении сырьевой смеси использовалась водопроводная питьевая вода (ГОСТ 51232-98) [98].

В работе использовался песок месторождения Дэбуб Государства Эритрея, находящийся на территории администрации города Декемхаре в районе деревни Кейх-Кор и стандартный полифракционный песок производства «Евростройкомплект», соответствующий ГОСТ 6139-2003 [99], гранулометрический состав которого близок к песку месторождения Дэбуб. Характеристика песка месторождения Дэбуб приведена в главе 3.5.

Гранулометрический состав полифракционного песка в соответствие со стандартом приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Зерновой состав полифракционного песка

Полный остаток на контрольных ситах с размером стороны ячейки, мм						
2,0	1,6	1,00	0,90	0,50	0,16	0,08
–	2–12	28–38	–	62–72	82–92	98–100

Песок состоит из зерен кварца, включая преимущественно окатанные крупные зерна размером до 1,6 мм. По гранулометрическому составу песок состоит преимущественно из псаммитовых и алевритовых частиц. Модуль крупности песка составляет 2.9.

2.1.2 Природное алюмосиликатное сырье Государства Эритрея

В рамках исследования использовали три вида наиболее распространенных глинистых пород месторождений Дэбуб и Маэкель, вулканический пепел и кварцевый песок (рисунок 2.2).



Рисунок 2.1 – Природное сырье государства Эритрея:

a – глина месторождения Дебуб; *б* – глина месторождения Маэкель *в* – латерит;
г – вулканический пепел; *д* – кварцевый песок месторождения Дебуб

Глина месторождения Дэбуб отобрана на территории администрации города Декемхаре в районе деревни Ади-Голгол. Цвет породы варьируется от светло-серого до темно-красного в зависимости от содержания железа. В исследованиях использовали породу темно-серого цвета, что указывает на низкое содержание железа (см. рисунок 2.1, *a*). Глина месторождения Маэкель отобрана в районе деревни Целот. Цвет породы светло-коричневый (см. рисунок 2.1, *б*). Латеритная

глина (латерит) отобрана в северной части столицы Асмары административной зоны Маэкель. Этот образец был взят из горизонта, богатого оксидом железа, цвет породы красный (см. рисунок 2.1, в). Вулканический пепел отобран вблизи деревни Эрафаиле в районе вулкана Алид. Порода имеет светло-серый цвет (см. рисунок 2.1, з). Песок отобран на месторождении Дэбуб, находящемся на территории администрации города Декемхаре в районе деревни Кейх-Кор (см. рисунок 2.1, д).

2.2 Методы исследований

2.2.1 Определение активности извести

Метод определения активности известкового и известково-песчаного вяжущего, включающий измерение содержания активных СаО и MgO, применялся в соответствии с ГОСТ 22688-2018 [100]. В колбу вместимостью 250 мл наливали 150 мл дистиллированной воды, добавляли около 1 г извести или известково-песчаного вяжущего и 4–5 стеклянных шариков для облегчения перемешивания. Колбу нагревали на электрической плите, накрыв часовым стеклом, до кипения, затем охлаждали до 20–30 °С. Стенки колбы и часовое стекло промывали дистиллированной водой и добавляли несколько капель раствора фенолфталеина, придав раствору малиновый оттенок, указывающий на щелочную реакцию. Раствор титровали 1 н раствором HCl до полного обесцвечивания, при этом титрование продолжали до тех пор, пока раствор не оставался неокрашенным в течение 8 минут. Активность извести определяли по формуле (2.1):

$$A = \frac{V \cdot T_{CaO} 100}{Q}, \quad 2.1$$

где V – объем раствора 1 н соляной кислоты, пошедшей на титрование, мл; T_{CaO} – титр 1 н. раствора соляной кислоты, выраженный в г СаО; Q – масса навески извести, г.

2.2.2 Определение числа пластичности

Пластичность определяли в соответствии с ГОСТ 5180–2015 [101]. Для определения пластичности глины сначала с помощью балансировочного конуса определяли предел текучести (W_T), являющийся максимальным пределом пластического состояния, определяли с помощью балансировочного конуса. Измельчали породу до прохождения через сито с ячейкой 0,5 мм. Далее 50 г глины помещали в фарфоровую посуду и медленно добавляли дистиллированную воду, непрерывно помешивая лопаточкой, пока не образовывалась густая однородная пластичная масса. Затем посуду плотно накрывают крышкой. Через 24 часа глиняную массу снова тщательно перемешивали и засыпают обратно в чашку.

Чашку ставили на подставку, а уравнивающий конус подносили к поверхности массы. Металлический конус падал на глиняную массу. Если через 5 секунд конус опускался до глубины 10 мм, это указывало на достижение массой предела текучести – верхнего предела. Затем образцы глиняной массы по 15 г помещали в предварительно высушенные и взвешенные фарфоровые тигли, которые затем сушили до постоянного веса в печи при температуре 105 °С. Наконец, содержание влаги в массе при пределе текучести (W_T) определяли по формуле (2.2):

$$W_T = 100 \cdot \frac{w_1 - w_2}{w_0 - w}, \quad 2.2$$

где w_1 – масса влажного грунта и фарфоровой чашки, г; w_0 – масса высушенного грунта и фарфоровой чашки, г; w – масса пустой фарфоровой чашки, г.

Для определения границы раскатывания (W_p) глиняную массу вручную раскатывали на доску с образованием жгута диаметром примерно 3 мм. Процесс раскатывания продолжается до тех пор, пока тонкая глиняная полоса не начнет крошиться на куски длиной 3–10 мм. После достижения желаемой консистенции отбирают образцы по 15 г, помещают в предварительно высушенные фарфоровые тигли, а затем сушат при температуре 105 °С до достижения постоянного веса.

Разница между верхним и нижним пределами пластичности числом пластичности. Номер пластичности Π рассчитывается по формуле (2.3):

$$\Pi = W_T - W_P, \quad 2.3$$

2.2.3 Идентификация минерального состава сырья и силикатных материалов

Рентгенофазовый анализ. Рентгенофазовый анализ исследуемых образцов проводили на дифрактометре ДРОН-2 по методу порошковых дифрактограмм при следующих режимах работы аппарата:

Трубка рентгеновская.....БСВ-23 (Cu)

Фильтр.....Ni

Высокое напряжение.....27кВ

Анодный ток.....27 мА

Фазовый состав исследуемых материалов идентифицировали с помощью известных данных [102, 103].

Электронно-микроскопический анализ. Растровая электронная микроскопия (РЭМ) позволяет получить изображение с высоким разрешением. Для исследования микроструктуры образцов использовался сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU, характеризующийся высокими оптическими свойствами. Данная модель высоковакуумного микроскопа предназначена для работы, как с высоким, так и с переменным вакуумом. Техническая возможность позволяет изучать непроводящие образцы без напыления токопроводящим слоем. На данном микроскопе можно проводить анализ намагниченных объектов. Микроскоп оборудован устройством для проведения элементного анализа методом энерго-дисперсионной спектроскопии (ЭДС).

Рентгенофлуоресцентный анализ. Рентгенофлуоресцентный анализ – спектроскопический метод исследования вещества для определения элементного состава. В этом методе используется принцип измерения спектра вторичного рентгеновского излучения. Анализируемая проба облучается первичными рентге-

новскими лучами. При этом возникает вторичное рентгеновское излучение, по спектру которого определяется элементный состав пробы.

Для проведения анализа использовали рентгенофлуоресцентный спектрометр серии ARL 9900 WorkStation со встроенной системой дифракции. Вычисления производятся с помощью встроенного программного обеспечения, результаты анализа выдаются в электронном виде.

Для анализа исследуемые пробы образцов растирали в фарфоровой ступке до получения порошка с крупностью не более 20 мкм в количестве 20 г.

Дифференциально-термический анализ. Для проведения дифференциально-термического анализа использовался прибор NETZSCH STA 449 F3 Jupiter, позволяет выполнять измерения изменения массы и тепловых эффектов, при температурах между -150°C и 2400°C . Прибор позволяет проводить дифференциально-термический анализ (ДТА), термогравиметрический анализ (ТГ), дифференциально-термогравиметрический анализ (ДТГ) и дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Диапазон нагрева образцов составлял от 20 до 1000°C при скорости нагрева $10^{\circ}/\text{мин}$.

2.2.4 Получение образцов методом полусухого прессования

Исследуемое сырье предварительно высушивали в сушильном шкафу при температуре 105°C до постоянного веса и измельчали в вибрмельнице до удельной поверхности по ПСХ-2 $240\text{--}250\text{ м}^2/\text{кг}$. Комовую известь измельчали до $S_{\text{уд.}} = 350\text{ м}^2/\text{кг}$. Сырьевую массу готовили путем смешения сухих компонентов в заданных соотношениях. Сначала тщательно перемешивали используемую породу с известью и получали вяжущее с $S_{\text{уд.}} = 350\text{ м}^2/\text{кг}$. Полученное вяжущее перемешивали с песком, увлажняли необходимым количеством воды и выдерживали в герметически закрытой чашке. После гашения извести из полученных смесей при помощи гидравлического пресса формовали образцы-цилиндры размером по диаметру и высоте 25 мм при удельном давлении прессования 20 МПа.

Образцы всех составов подвергали гидротермальной обработке. Для этого образцы помещали в лабораторный автоклав и запаривали при давлении насыщенного пара 1 МПа по режиму: подъем давления пара – 1,5 ч, время изотермической выдержки – 6 ч, сброс давления пара – 1,5 ч. Часть образцов пропаривали в пропарочной камере при температуре 95 °С в течение 12 час.

Перед испытаниями образцы выдерживали 3 сут при комнатной температуре. Образцы испытывались на предел прочности при сжатии в сухом и водонасыщенном состоянии, рассчитывали коэффициент размягчения, определяли среднюю плотность, водопоглощение. Результаты определяли, как среднее арифметическое данных испытания 5 образцов. Предел прочности при сжатии определяли в соответствии с ГОСТ 10180–2012 [104], среднюю плотность и водопоглощение проводили по ГОСТ 7025–91 [105].

2.2.5 Математическая обработка результатов исследований

Изучение влияния составов сырьевых смесей на основе латерита и вулканического пепла на свойства материалов гидротермального твердения проводили с использованием метода математического планирования эксперимента. Для этого использовался метод ортогонального центрального композиционного планирования (ОЦКП). Преобразование от физической к безразмерной системе координат проводили по формуле (2.4):

$$x = \frac{x'_i - x_i^0}{x_i} \quad 2.4$$

где x_i^0 – центр интервала варьирования, x_i – половина длины интервала варьирования.

Полученные данные обрабатывали методом математической статистики, включая регрессионный, корреляционный и дисперсионный анализы. Для расчета коэффициентов уравнения регрессии и физико-механических показателей материала использовали компьютерную обработку исходных данных.

2.2.6 Определение линейного и массового коэффициента ослабления излучения

Для измерения использовали свинцовую емкость с внутренним диаметром 30 мм и внешним диаметром для исследуемого образца 34 мм (рисунок 2.2). На дно емкости помещали источник γ -излучения: ^{60}Co . Источник изготовлен в геометрии ОСГИ и представляют собой диск диаметром 29 мм. В центре диска находится радионуклид в виде пятна диаметром 3 мм, который по обеим сторонам герметизирован органическими пленками толщиной 50 мкм.

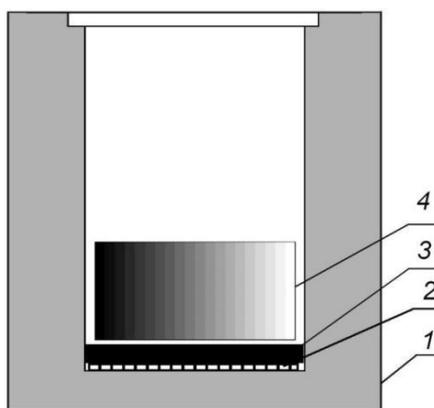


Рисунок 2.2 – Устройство для проведения измерения:

1 – свинцовый сосуд; 2 – источник излучения; 3 – исследуемый материал; 4 – детектор

Предварительно дозиметром-радиометром ДКС-96 измеряли экспозиционную дозу. Затем на источники излучения клали образцы исследуемых материалов. Таблетка материала полностью закрывала источники излучения, находясь между детектором и источниками. Детектор располагали на расстоянии 1–2 мм от таблетки. Далее измеряли экспозиционную дозу внутри емкости при наличии ослабляющего излучения исследуемого материала.

Расчет линейного коэффициента ослабления μ , см^{-1} рассчитывали по формуле (2.5):

$$\mu = \frac{1}{d} \left(\ln \frac{I_0}{I_i} \right), \quad 2.5$$

где I_0 – мощность экспозиционной дозы в отсутствии защиты, мкР/ч; I_1 – мощность экспозиционной дозы при наличии защиты (силикатного материала), мкР/ч; d – толщина материала, м.

В сравнении с линейным коэффициентом ослабления удобнее использовать массовый коэффициент ослабления излучения μ_m , см²/г (формула 2.6):

$$\mu_m = \mu/\rho, \quad 2.6$$

где μ – линейный коэффициент ослабления см⁻¹, ρ – плотность вещества (силикатного материала), г/см³.

2.3 Выводы

1. Приведена характеристика используемых в работе сырьевых материалов.
2. В работе использованы современные методы исследования: рентгенофазовый (РФА), дифференциально-термический (ДТА), термогравиметрический (ТГ), рентгенофлуоресцентный, сканирующая растровая микроскопии (РЭМ, ПЭМ), энерго-дисперсионная спектроскопия (ЭДС), а также физико-механические методы испытаний.
3. Для проведения экспериментов методом математического планирования использован метод ортогонального центрального композиционного планирования.
4. Экспериментальные исследования радиационно-защитных свойств и радиационной стойкости разработанного материала проводили с использованием радиоизотопного источника (⁶⁰Co).
5. Исследования выполнены с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

3 ХАРАКТЕРИСТИКА СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ГОСУДАРСТВА ЭРИТРЕЯ

Для оценки перспективы использования в силикатном производстве природного сырья Государства Эритрея было проведено исследование химического состава и физических свойств [106].

Эритрея расположена в северо-восточной части Африки. На западе и севере граничит с Суданом, на юге с Эфиопией, на юго-востоке с Джибути и Красным морем на востоке (рисунок 3.1). Территория Эритреи делится на три основных региона: центральное и северное нагорья, плоские равнины западной и юго-западной низменностей и плоские прибрежные восточные равнины [107]. Свойства глинистых пород, такие как физические характеристики, химический и минеральный состав определяются обширными геологическими процессами, происходящими в течение длительного периода времени. Располагаясь на относительно небольшой территории Государство Эритрея, тем не менее, имеет весьма разнообразную геологию (рисунок 3.2) [108].



Рисунок 3.1 – Административные зоны
Эритреи

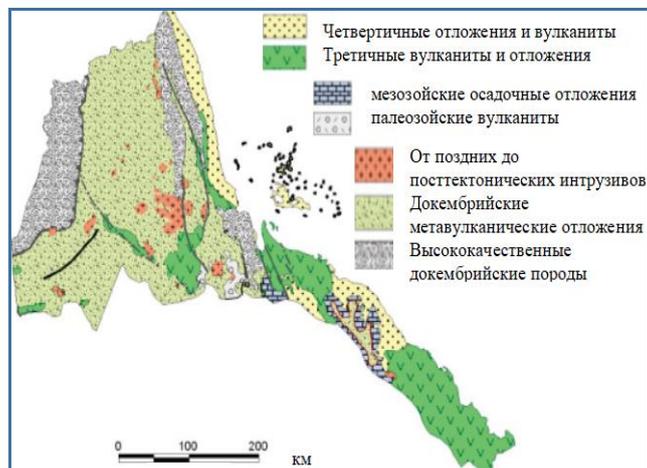


Рисунок 3.2 – Геологическая карта
Государства Эритрея

Геология Эритреи состоит из древних докембрийских пород фундамента, перекрытых более молодыми мезозойскими осадочными породами, а также вулканических и осадочных пород третичного и четвертичного периодов на вывет-

ренных и латеризованных поверхностях фундамента. В целом, геология страны состоит из протерозойских метаморфических пород различного состава, а также связанных с ними интрузий (60 %), третично-четвертичных вулканических пород (15 %) и как консолидированных, так и неконсолидированных отложений (25 %) [109]. Породы фундамента Эритреи являются частью Арабо-Нубийского щита.

Центральное нагорье Эритреи в олигоцене было сильно латеритизировано до накопления бимодальной вулканической толщи мощностью более 400 м. Интенсивная эрозия постепенно смыла раннетретичный покров, оставив лишь разрозненные остатки [110–113]. Изучение минеральной изменчивости в профиле латеритов на площади 700 км², расположенной в 100 км к юго-западу от Асмэры (столица Эритреи), дает пять различных профилей (рисунок 3.3).

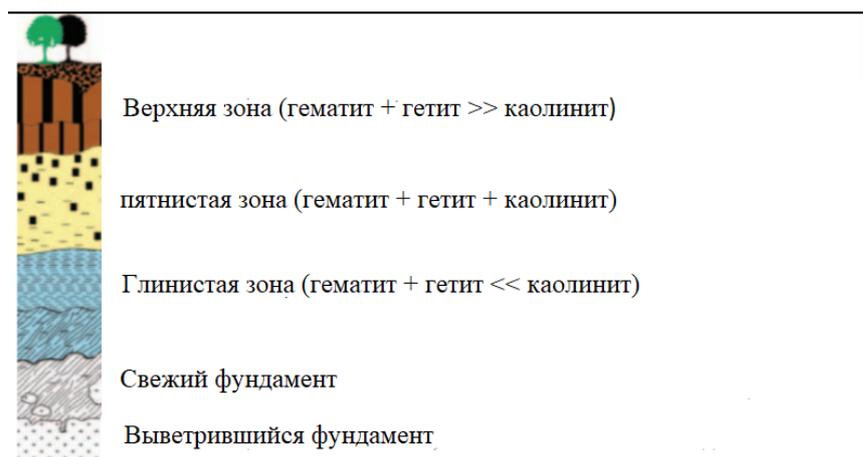


Рисунок 3.3 – Типичный профиль изменчивости латеритов

Самый верхний профиль состоит в основном из оксидов и гидроксидов железа, в частности из твердых конкреций оксидов железа (гематита и гетита) с подчиненным содержанием каолинитов. Красочная пятнистая зона представляет собой богатую глиной фацию с трубчатymi пустотами и неравномерным содержанием железа, которое представляет собой смесь каолинита и минералов железа. Третий профиль сверху – это глинистая зона, которая в основном состоит из каолинита. Каолин встречается на обширных территориях центральных и южных районов Эритреи [114].

Самый низкий профиль представляет собой свежий фундамент, из которого произошел латерит, и состоит из гранитных пород, метавулканических пород и редких метаосадочных пород. Над этим самым низким профилем находится выветренный фундамент, или крупнозернистый сапролит, содержащий краугольные камни, остатки первоначального фундамента.

Около 33 % территории Эритреи покрыто латеритом. Почвы сложны и варьируются от региона к региону по текстуре и другим свойствам [115]. В составе латеритов содержится в основном из минералов каолинита, гетита, гематита, гиббсита и кварца, а также оксиды титана и гидратированные оксиды алюминия, образующиеся в процессе выветривания.

3.1 Глины месторождения Дэбуб

Глина отобрана на месторождении Дэбуб, находящаяся на территории администрации города Декемхаре в районе деревни Ади-Голгол. Порода имеет песчаную структуру с низким показателем пластичности ($I_p = 10$), что позволяет отнести породу к суглинку. Цвет пород варьируется от светло-серого до темно-красного. В исследованиях использовали породу темно-серого цвета, что указывает на низкое содержание железа (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Химический состав глинистой породы месторождения Дэбуб

Содержание оксидов в породе, мас. %											
SiO ₂	SiO _{2(св.)}	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
67,15	36,35	19,41	3,10	0,42	1,56	2,00	0,03	0,18	2,61	3,34	99,8

В породе содержится большое количество свободного кварца (36,35 мас. %). Содержание Al₂O₃ составляет 19,41 мас. %, который входит в состав полевых шпатов и глинистых минералов. Содержание Fe₂O₃ – 3,10 мас. %. Порода отличается незначительной потерей при прокаливании 3,48 мас. %.

Результаты рентгенофазового анализа приведены на рисунке 3.4. Порода состоит преимущественно из кварца (4,27; 3,346; 1,821 Å) и полевого шпата

(3,249; 3,198; 3,786 Å). Рефлексы 10,163 и 7,225 Å свидетельствуют о наличии соответственно иллита и каолинита.

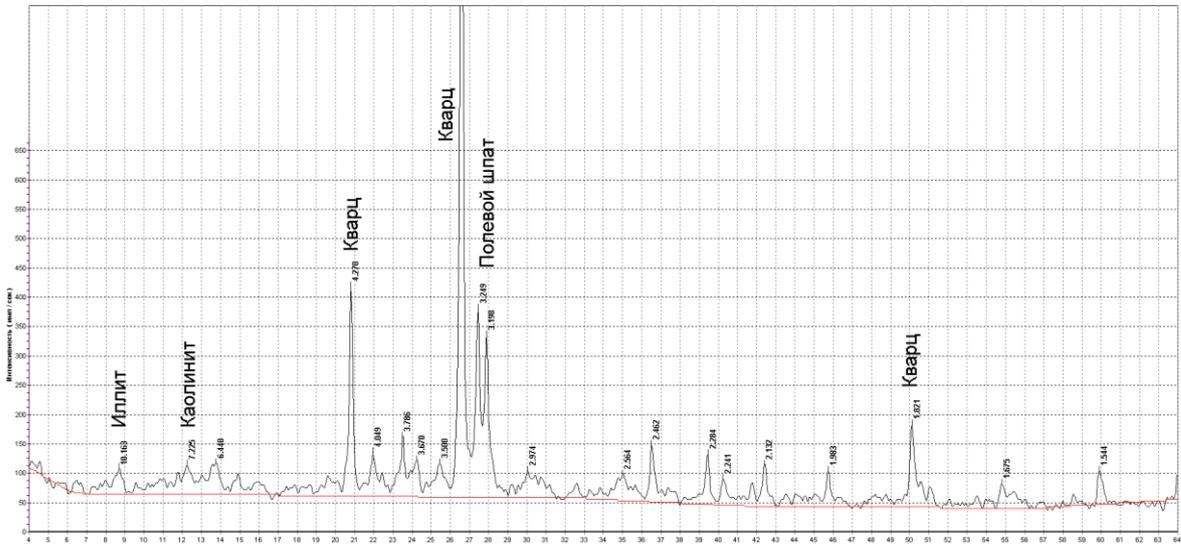


Рисунок 3.4 – Рентгенограмма глины месторождения Дзэуб

На кривой ДТА (рисунок 3.5) наблюдается эндотермический эффект при 90 °С, соответствующий удалению адсорбционной воды (кривые ТГ и ДТГ).

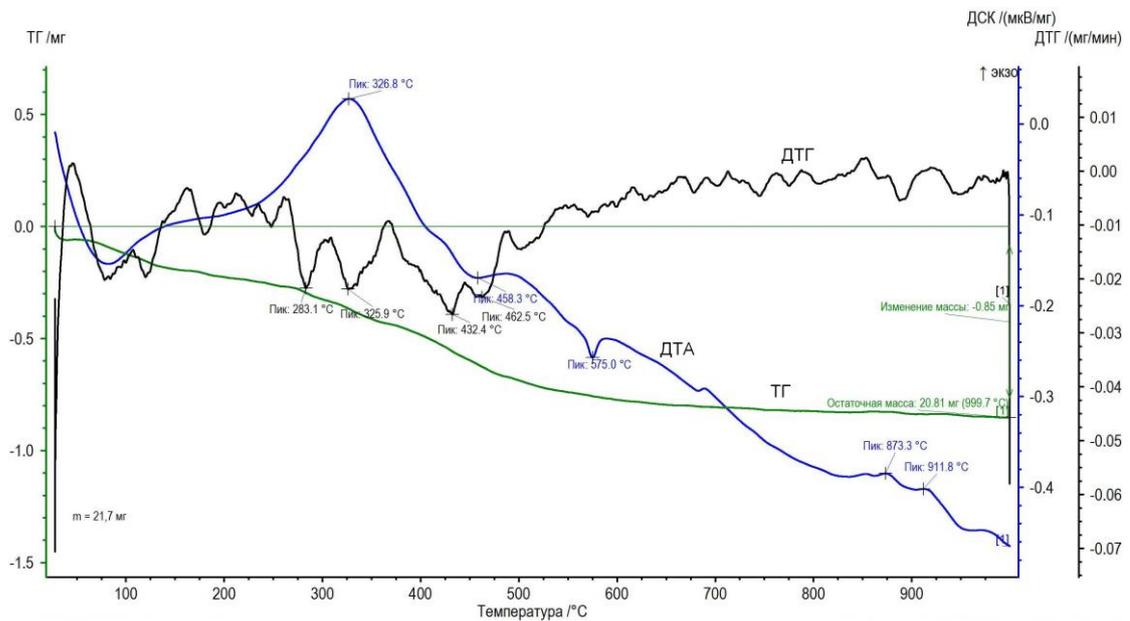


Рисунок 3.5 – Дериватограмма глины месторождения Дзэуб

Экзотермический эффект при 326,8 °С возможно связан с выгоранием в породе органических растительных остатков. Потеря массы в области температур 280–500 °С обусловлена, вероятно, наличием небольшого количества гидроокислов алюминия и железа. Эндотермический эффект при 575 °С соответствует по-

лиморфному превращению кварца. Небольшие экзотермические эффекты при 873,3 и 911,8 °С связаны, вероятно, с полиморфным превращением кварца.

По данным изучения на сканирующем электронном микроскопе порода представляет собой рыхлый композит (рисунок 3.6, *а*) скелетной микроструктуры.

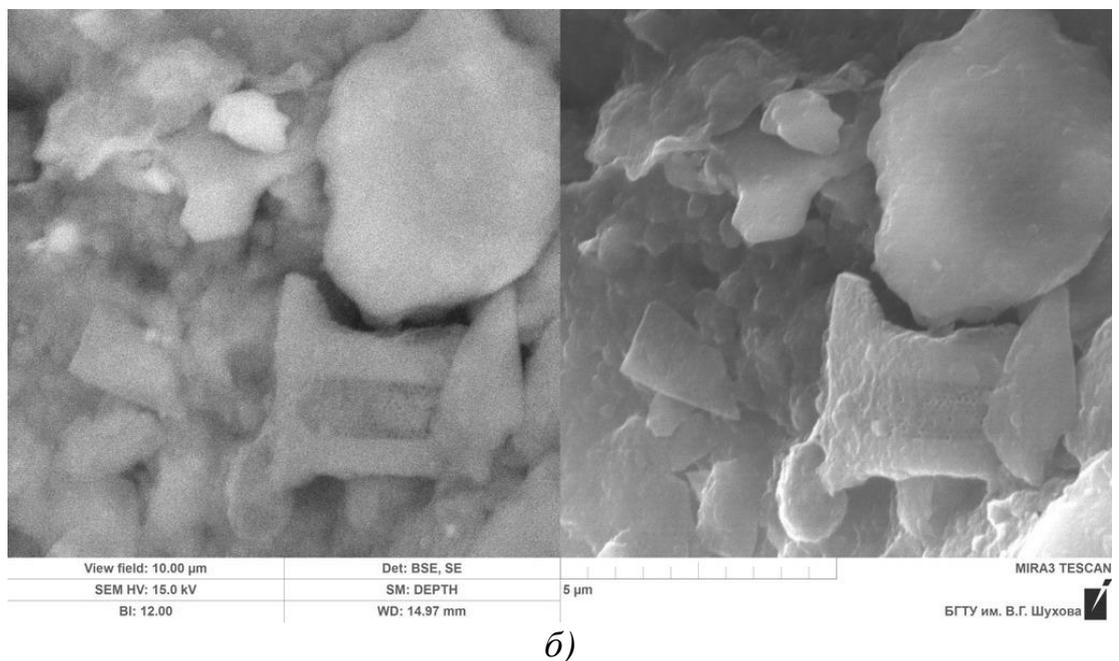
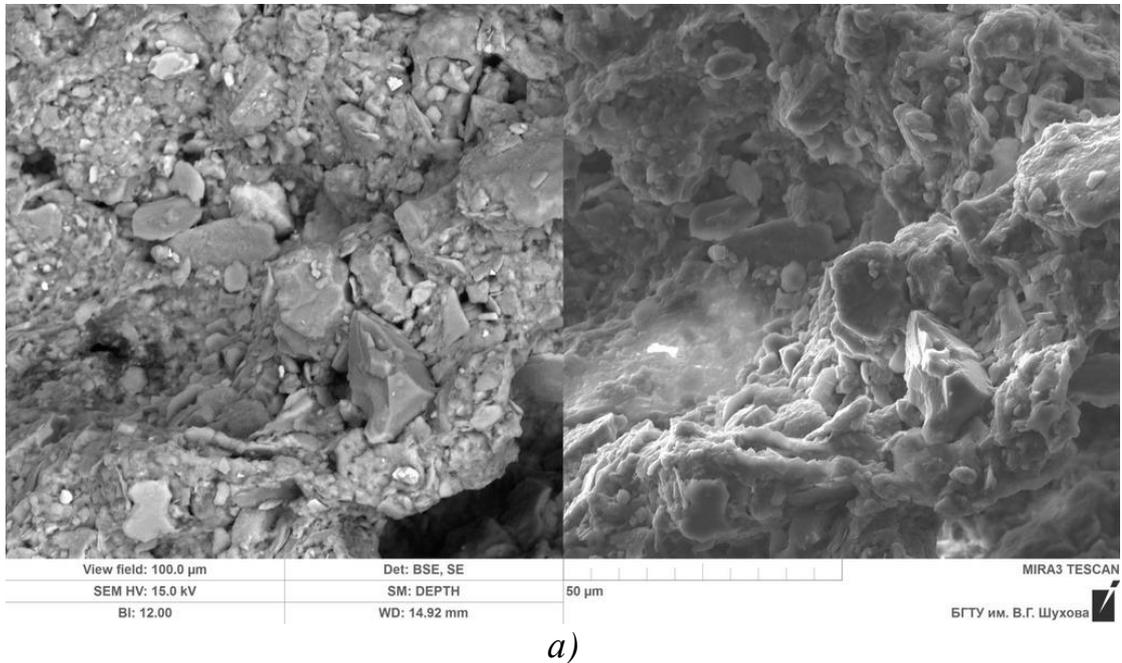


Рисунок 3.6 – Микроструктура глины месторождения Дэбуб, изображение BSE и SE, РЭМ:

а – $\times 100$; *б* – $\times 1000$

Основная масса сложена песчано-пылевато-глинистыми частицами размером до 25 мкм. Частицы представлены в основном зернами кварца и полевого

шпата, которые формируют однородный «скелет». Незначительное количество глинистых минералов не создает сплошной матрицы. Глинистые частицы создают контакты между песчаными и пылеватыми зёрнами. Глинистые составляющие находятся на контактах между песчаными и пылеватыми зёрнами и создают глинистые мостики, которые являются коагуляционными контактами.

Многослойная карта и спектры энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) некоторых минералов глины месторождения Дзбуб показаны на рисунках 3.7 и 3.8. Анализируя спектры ЭДС и ассоциацию элементов на многослойной карте, было выявлено наличие C, O, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti и Fe.

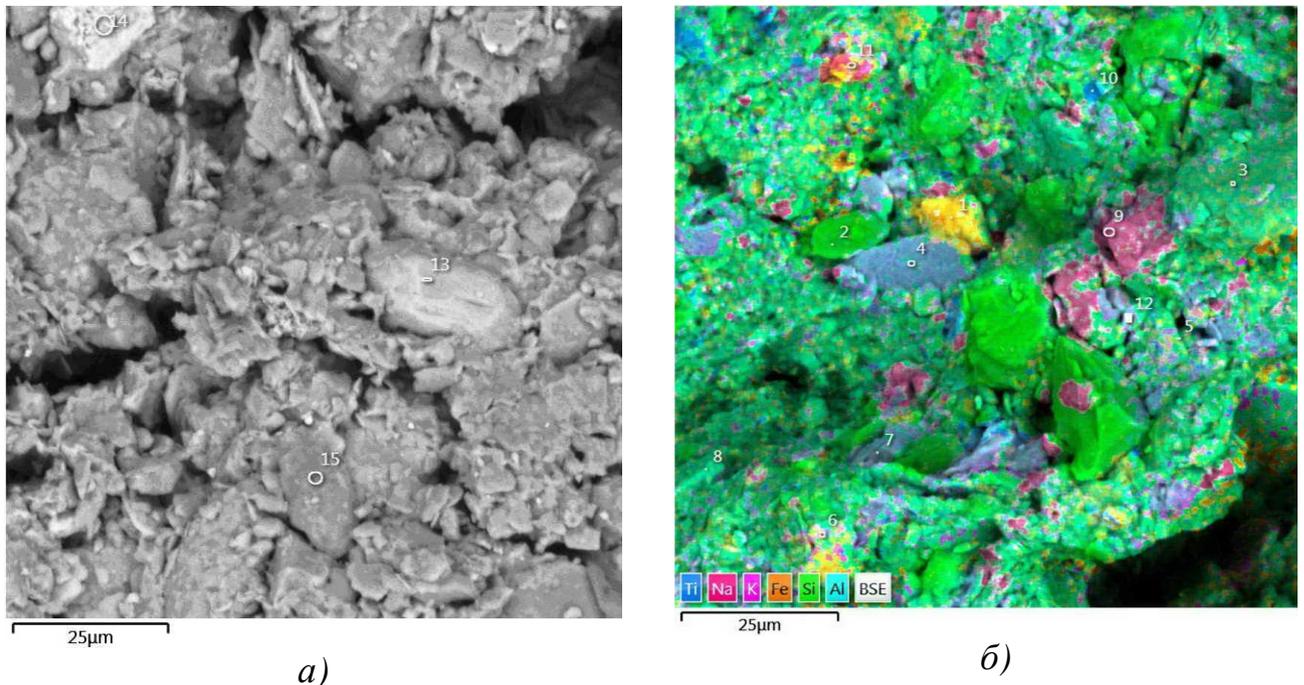


Рисунок 3.7 – Изображение BSE (а) глины месторождения Дзбуб;
многослойная карта (б): $\times 1000$

На полученных спектрах ЭДС выявлено заметное количество углерода в диапазоне от 7,29 до 15,84 ат. %. Это в первую очередь относится к органическим растительным остаткам, что подтверждено экзотермической реакцией на кривой ДТА при температуре 326,8 °С (см. рисунок 3.5).

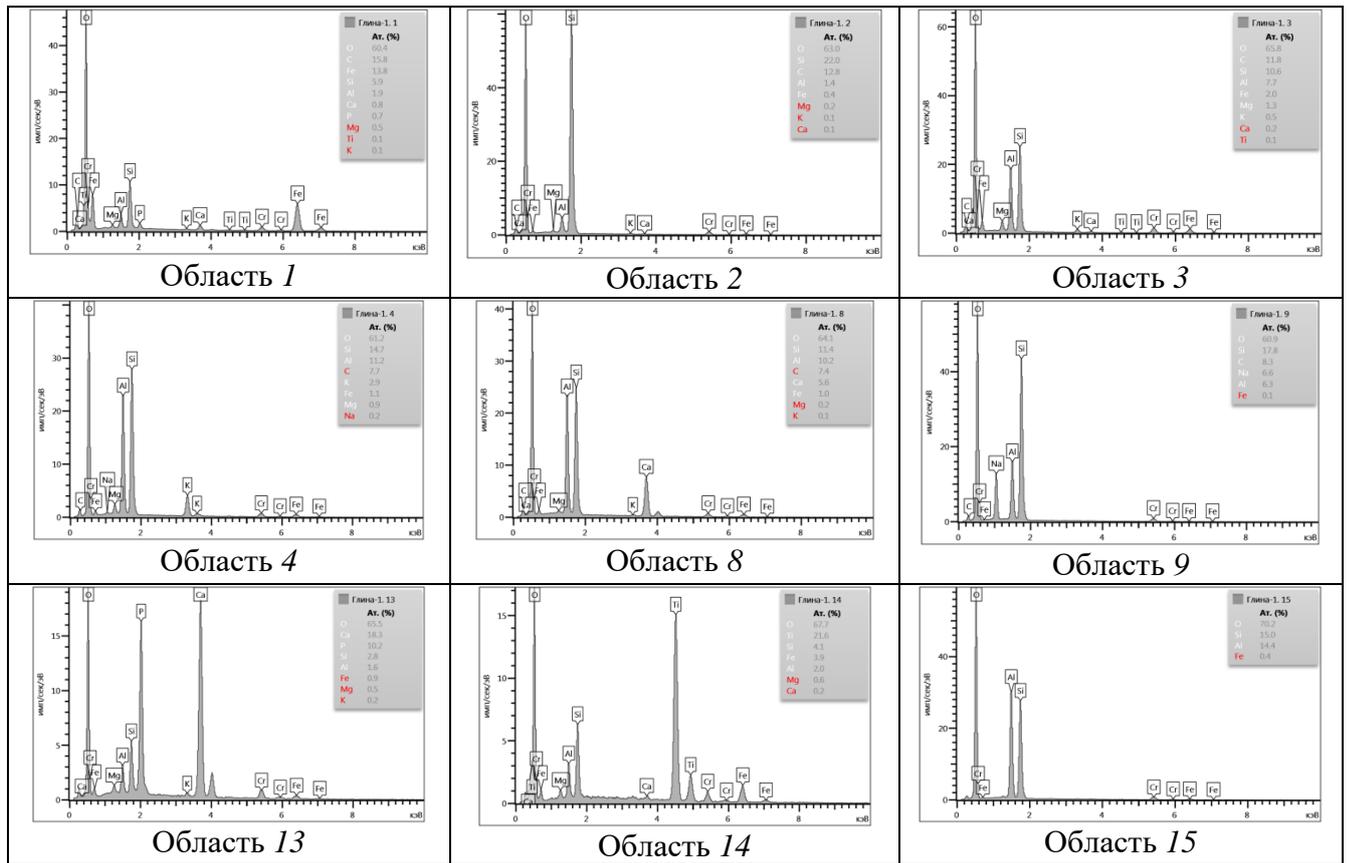


Рисунок 3.8 – Спектры ЭДС глины месторождения Дзуб

В дополнение к минералам, подтвержденным рентгенофазовым и термическим анализом, на основе спектров ЭДС, приведенных на рисунке 3.8 можно выделить минералы, такие как апатит (область 13), оксиды железа и титана (гематит и ильменит, область 1 и 14).

Содержание железа наблюдается во всех анализируемых областях, что может быть связано с его присутствием в иллите (область 3). Другими минералами, идентифицированными в породе, были полевые шпаты, такие как микроклин (область 4) анортит (область 8), альбит (область 9), а также каолинит (область 15) и кварц (область 2) (рисунок 3.8).

Таким образом, глина месторождения Дзуб представляет собой полидисперсную и полиминеральную породу. Основными породообразующими минералами являются кварц и полевые шпаты, такие как микроклин, анортит и альбит. В меньшем количестве содержится гематит, ильменит, апатит, иллит и каолинит. В породе содержатся также растительные органические остатки.

3.2 Глины месторождения Маэколь

Глина отобрана на месторождении Маэколь в районе деревни Целот. Число пластичности породы $I_p = 13$, что позволяет отнести глину к группе умеренно-пластичных и классифицировать как суглинок. Цвет породы светло-коричневый. Химический состав породы приведен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Химический состав глинистой породы месторождения Маэколь

Содержание оксидов в латерите, мас. %											
SiO ₂	SiO _{2(св.)}	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
55,49	16,15	30,17	8,42	0,57	1,27	1,24	0,05	0,21	0,43	1,88	99,73

Содержание оксида кремния (IV) в породе составляет 55,49 мас. %, из которого 16,15 мас. % приходится на свободный кварц. На долю оксида алюминия и железа (III) приходится соответственно 30,17 и 8,42 мас. %. Потери при прокаливании составляют 9,05 мас. %, что свидетельствует о большом содержании глинистых минералов, в которых содержится кристаллизационная вода.

Результаты рентгенофазового анализа приведены на рисунке 3.9. Преобладающими минералами являются кварц (4,27; 3,346; 1,821 Å) и каолинит (7,225; 3,59 Å). Железо представлено минералом гётитом (4,181; 2,694 Å). В небольших количествах содержатся хлорит (4,271; 4,77 Å), иллит (10,106 Å) и монтмориллонит (12,109 Å).

На кривой ДТА (рисунок 3.10) наблюдается эндотермический эффект при 73,7 °С, соответствующий потере адсорбционной воды. Эндотермический эффект при 320,7 °С, сопровождающийся потерей массы (кривые ТГ и ДТГ), вероятно, относится к обезвоживанию гётита. Эндотермический эффект при 502,2 °С соответствует потере кристаллизационной воды глинистых минералов. При 574,4 °С происходит полиморфное превращение кварца. Эндотермический эффект при 652,8 °С и экзотермический эффект при 968,2 °С свидетельствуют о наличии, соответственно, монтмориллонита и каолинита.

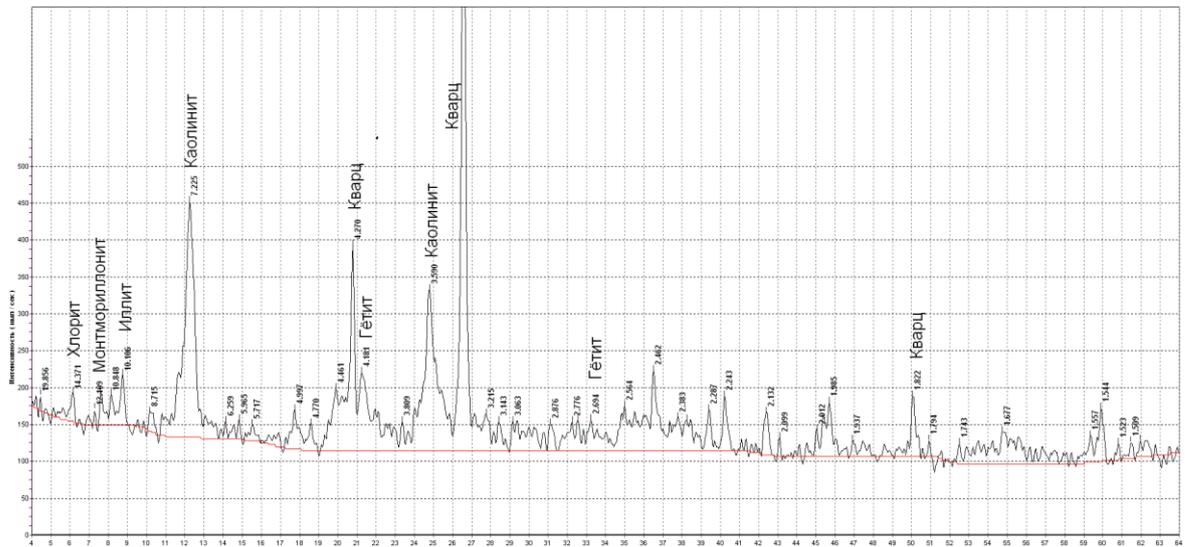


Рисунок 3.9 – Рентгенограмма глины месторождения Маэфель

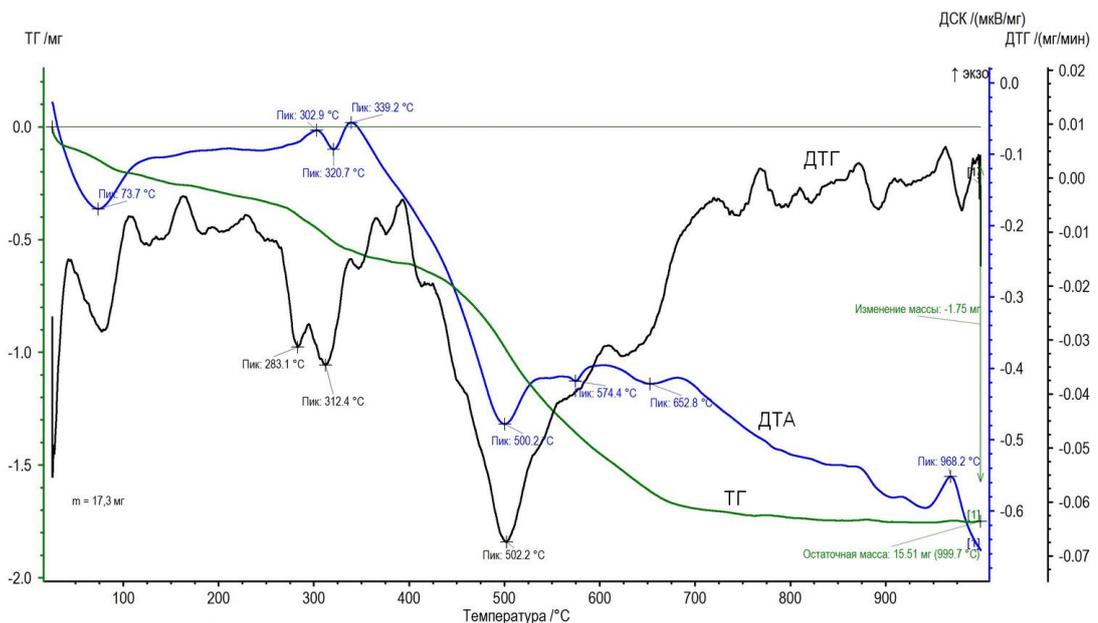
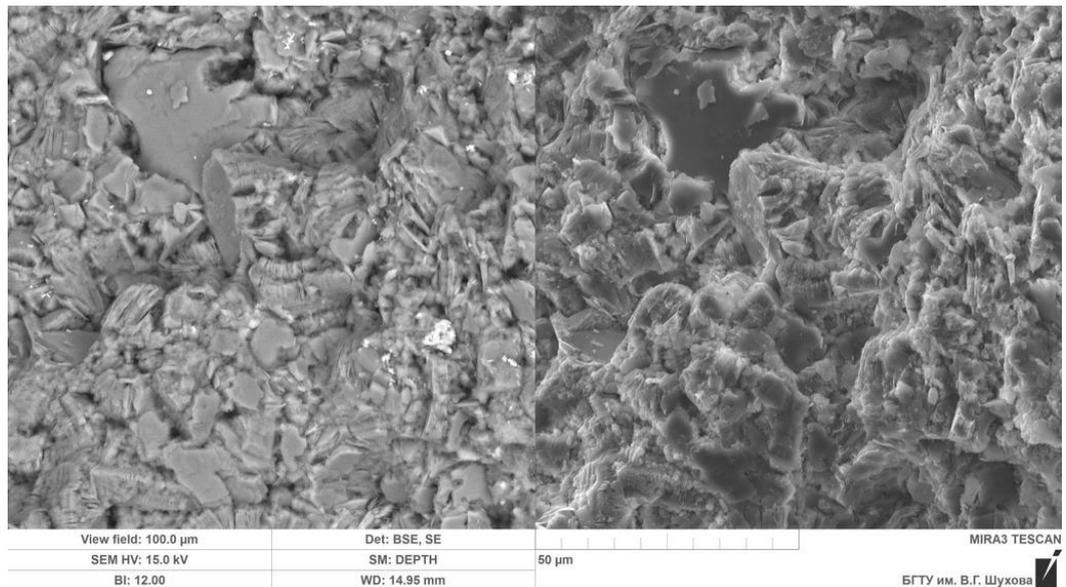
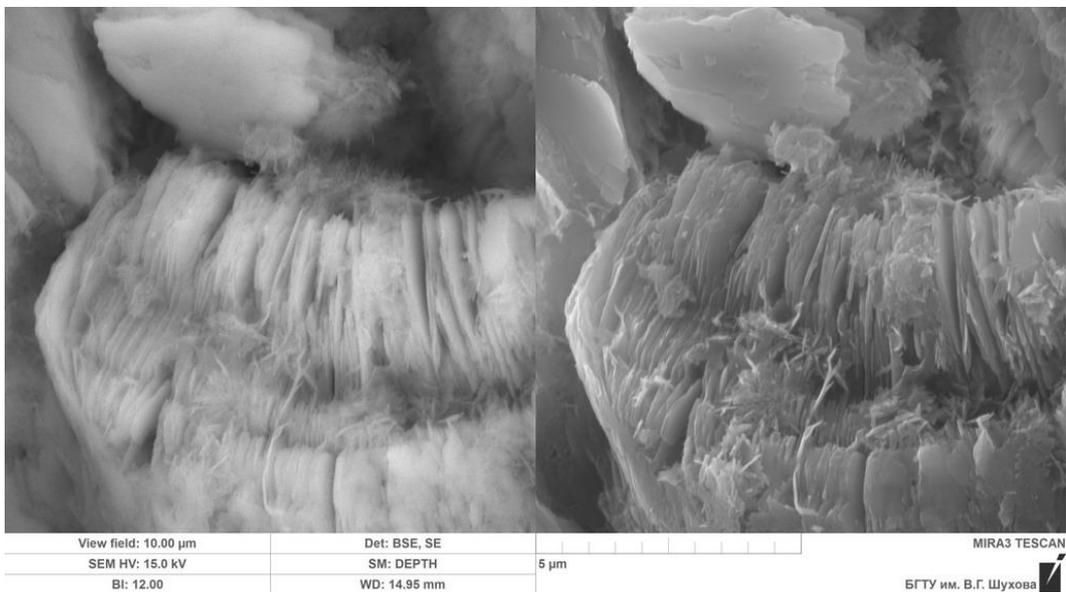


Рисунок 3.10 – Дериватограмма глины месторождения Маэфель

По данным сканирующей электронной микроскопии порода представляет собой рыхлый композит матричной микроструктуры, характеризующаяся наличием сплошной глинистой матрицы, содержащей расположенные в беспорядке песчаные зерна, которые не контактируют между собой (рисунок 3.11, а). На рисунке 3.11, б наблюдаются пакеты минерала каолинита.



а)



б)

Рисунок 3.11 – Микроструктура глины месторождения Маэколь, изображение BSE и SE, РЭМ:

$a - \times 100$; $b - \times 1000$

Многослойная карта и спектры энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) некоторых минералов глины месторождения Маэколь показаны на рисунках 3.12 и 3.13.

Анализируя спектры ЭДС и ассоциацию элементов на многослойной карте, было выявлено наличие C, O, Mg, Al, Si, P, Cl, K, Ca, Ti и Fe. Порода, вероятно, содержит небольшое количество органических растительных остатков. На спектрах ЭДС наблюдается наличие углерода (см. рисунок 3.13).

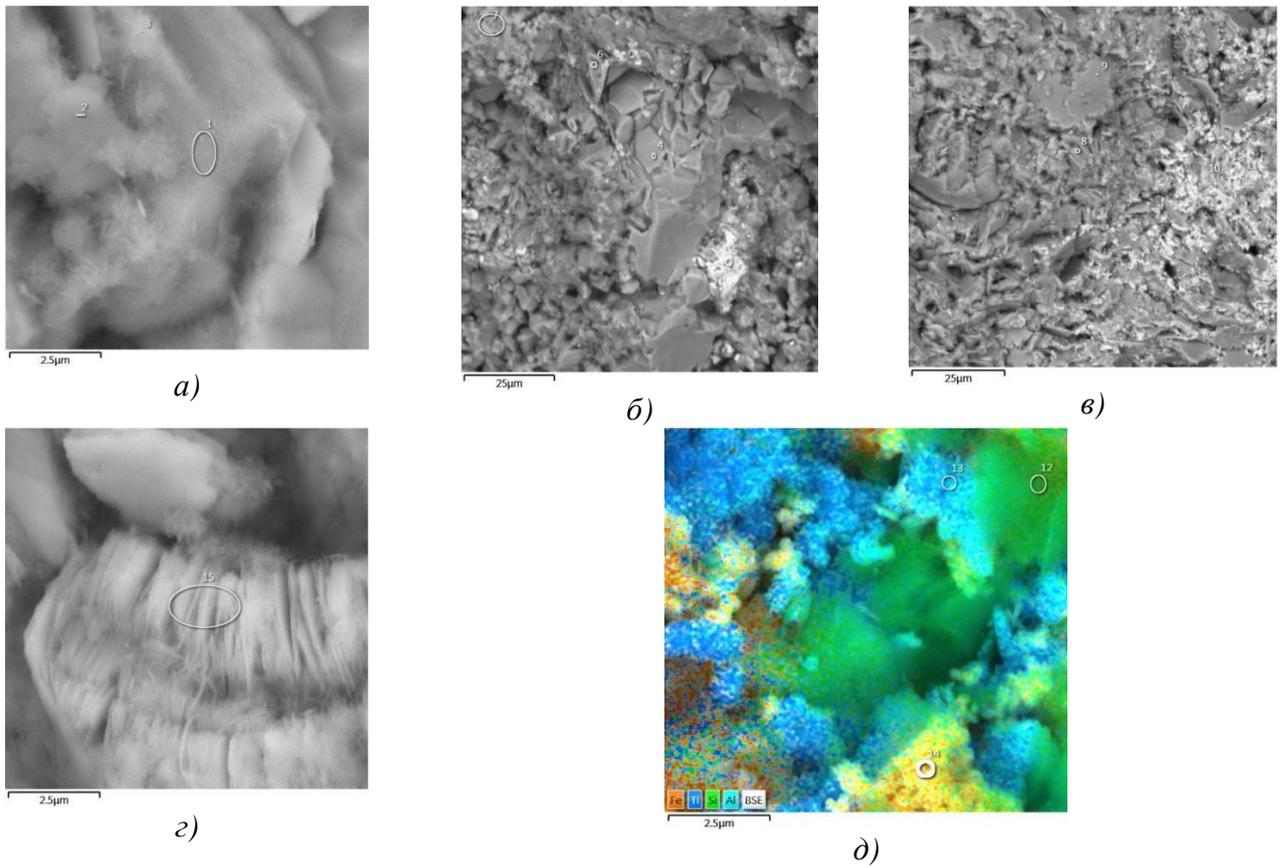


Рисунок 3.12 – Изображение BSE (а–с) и многослойная карта (д), глины месторождения Мазкель, ×1000

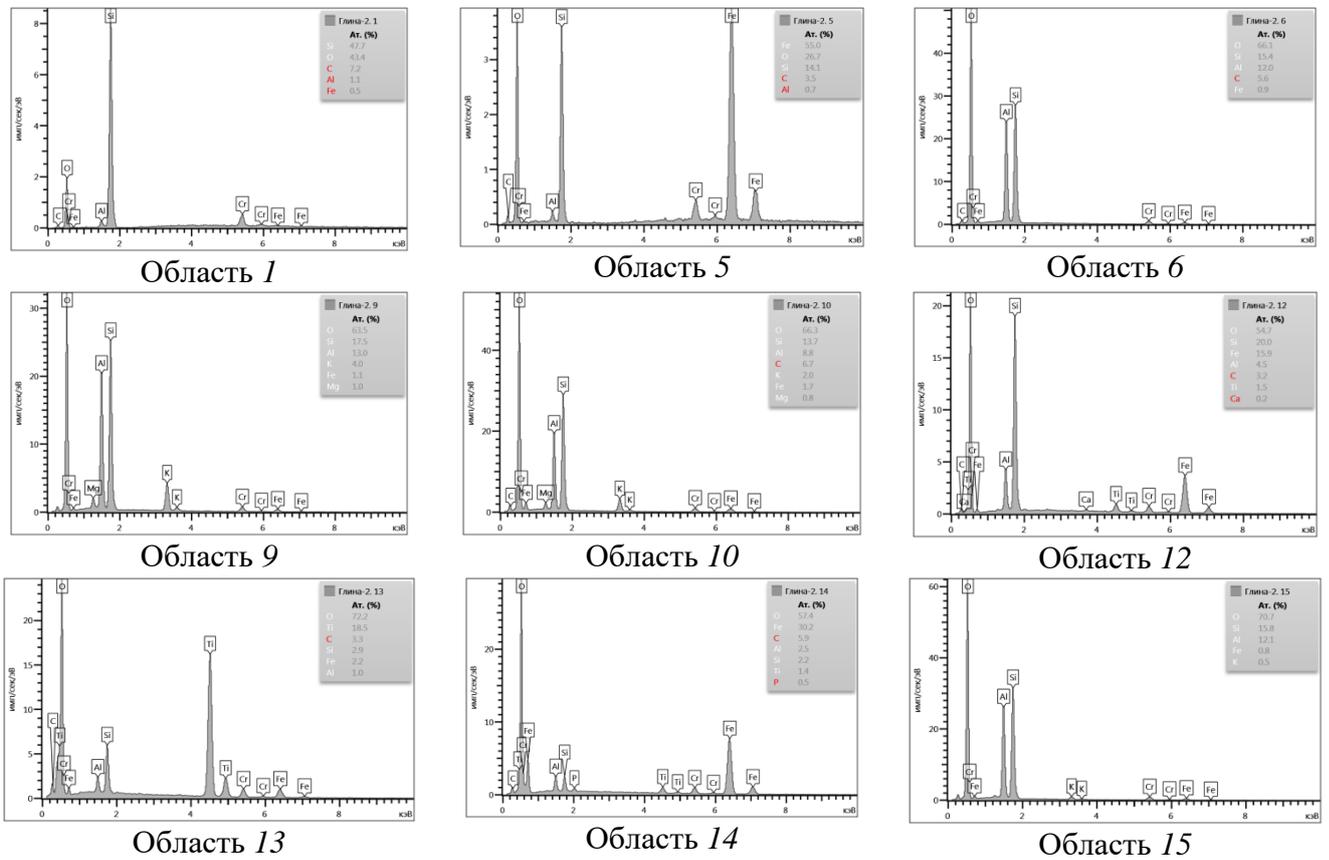


Рисунок 3.13 – Спектры ЭДС глины месторождения Мазкель

По данным многослойной карты и спектров ЭДС (см. рисунок 3.12 и 3.13) подтверждаются данные содержания в породе кварца (области 1, 5), каолинита (области 6, 15), гётита (области 5, 12, 14), иллита (область 10). Кроме этого установлено содержание ильменита (область 13) и микроклина (область 9).

Таким образом, глина месторождения Маэжель представляет собой полидисперсную и полиминеральную породу. Основными породообразующими минералами являются кварц, каолинит и гётит. В меньшем количестве содержатся ильменит, иллит, монтмориллонит и микроклин. В породе также содержатся в небольшом количестве растительные органические остатки.

3.3 Латериты

Латеритная глина отобрана в северной части столицы Асмары административной зоны Маэжель. Число пластичности латерита $I_p = 10$, что позволяет отнести глину к группе умереннопластичных и классифицировать как суглинок. Химический состав, полученный рентгенофлуоресцентным методом анализом, приведен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Химический состав латерита

Содержание оксидов в породе, мас. %											
SiO ₂	SiO _{2(св.)}	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
31,66	4,98	17,34	48,40	0,366	0,101	0,246	0,377	0,0754	–	0,353	98,92

Латерит содержит большое количество оксида железа (III) (48,40 мас. %), что в 1,5 раза выше, чем содержание оксида кремния (31,66 мас. %). Высокое содержание Fe₂O₃, вероятно, связано с существованием вторичных минералов, богатых железом, таких как гематит, гётит и слюдистые минералы, а также с частичным замещением алюминия железом в глинистом минеральном составе. Содержание оксида алюминия составляет 17,34 мас. %, который входит в состав глинистых минералов, а также, вероятно, гидроокислов алюминия. Потери при прока-

ливании составляют 10,6 мас. %, что свидетельствует о большом содержании глинистых минералов, в которых содержится кристаллизационная вода.

Минеральный состав латерита определяли рентгенофазовым анализом (рисунок 3.14).

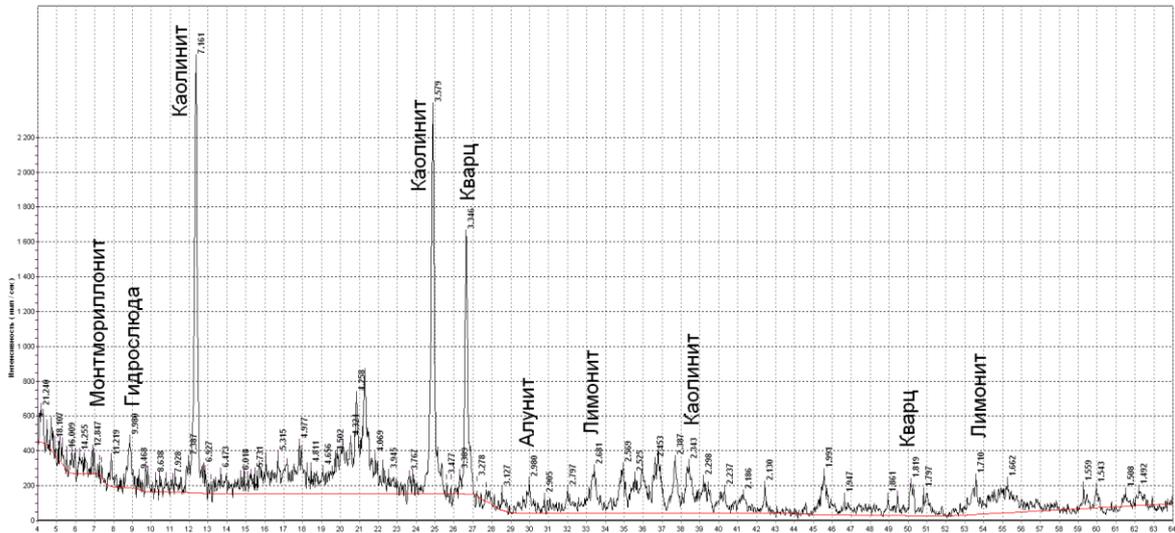


Рисунок 3.14 – Рентгенограмма латерита

Идентификация минералов проводилась по данным [103]. Рефлексы 4,262; 3,346; 1,819 Å указывают на наличие свободного кварца, содержание которого составляет 4,98 мас. % (см. таблицу 3.3). Исходя из данных по интенсивности рефлексов 7,161; 3,579; 2,343 Å каолинит является основным минералом. Рефлекс 9,980 Å соответствует наличию в породе гидрослюды. Из оксидов железа обнаружен лимонит, гётит (4,18; 2,681Å). Другими распространенными минералами, обнаруженными в породе, были монтмориллонит, хлорит и смешаннослойные минералы. В породе также, вероятно, присутствует алунит 2,98 Å.

Результаты рентгенофазового анализа подтверждаются дифференциально-термическим анализом (ДТА) (рисунок 3.15). На кривой ДТА фиксируется наличие эндотермических эффектов при 311, 496 и 577 °С и экзотермического эффекта при 954 °С. Первый эндотермический эффект соответствует потере воды гидроокислов железа, сопровождающееся потерей массы образца (кривая ТГ и ДТГ). Эндотермический эффект при 496 °С связан с потерей кристаллизационной воды глинистых минералов. Эндотермический эффект при 577 °С соответствует поли-

морфному превращению кварца. Экзотермический эффект при 954 °С свидетельствует о наличии каолинита.

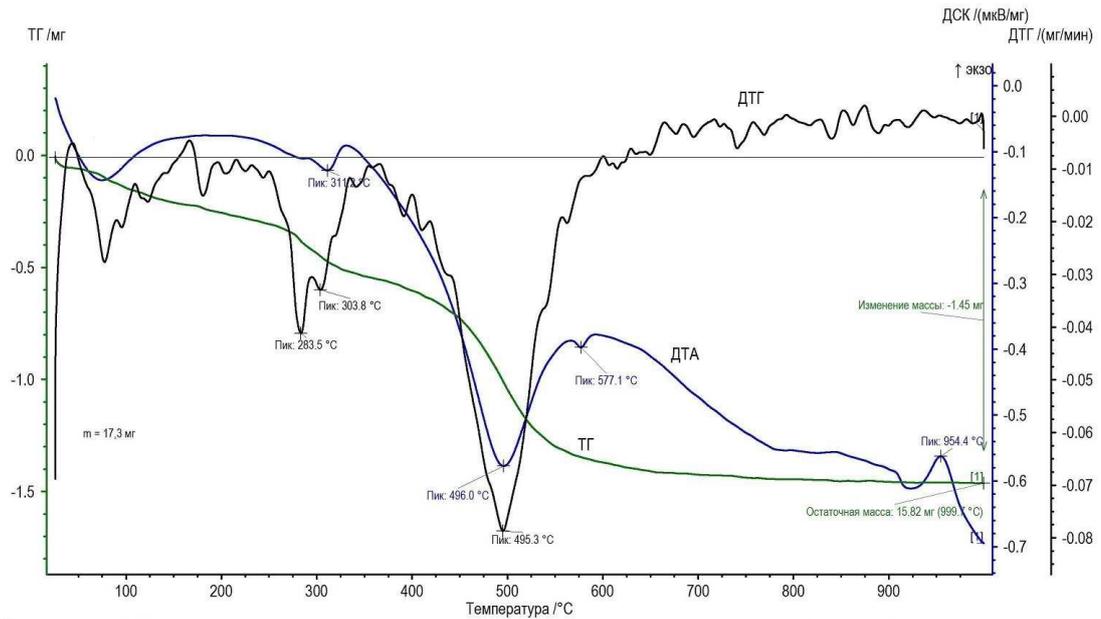


Рисунок 3.15 – Дериватограмма латерита

Латерит изучали на сканирующем электронном микроскопе с использованием многомасштабной визуализации SE (вторичного электрона) и BSE (обратно рассеянного электрона) с целью оценки возможных различий в морфологии фаз (рисунок 3.16).

Порода представляет собой рыхлый композит (см. рисунок 3.16, а) турбулентной микроструктуры. Основная масса сложена микроагрегатами размером до 40 мкм, имеющие сложное строение и состоят из скопления расположенных субпараллельно кристаллов хлорита, слюды и следы оксидов (Fe-Ti) (см. рисунок 3.16, б.). Платинчатые ультрамикроагрегаты представляют собой минералы каолинита $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ (см. рисунок 3.16, в).

Могослойная карта и спектры энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) некоторых минералов латерита показаны на рисунке 3.17 и 3.18. Анализируя спектры ЭДС и ассоциацию элементов на многослойной карте, было выявлено наличие C, O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti и Fe.

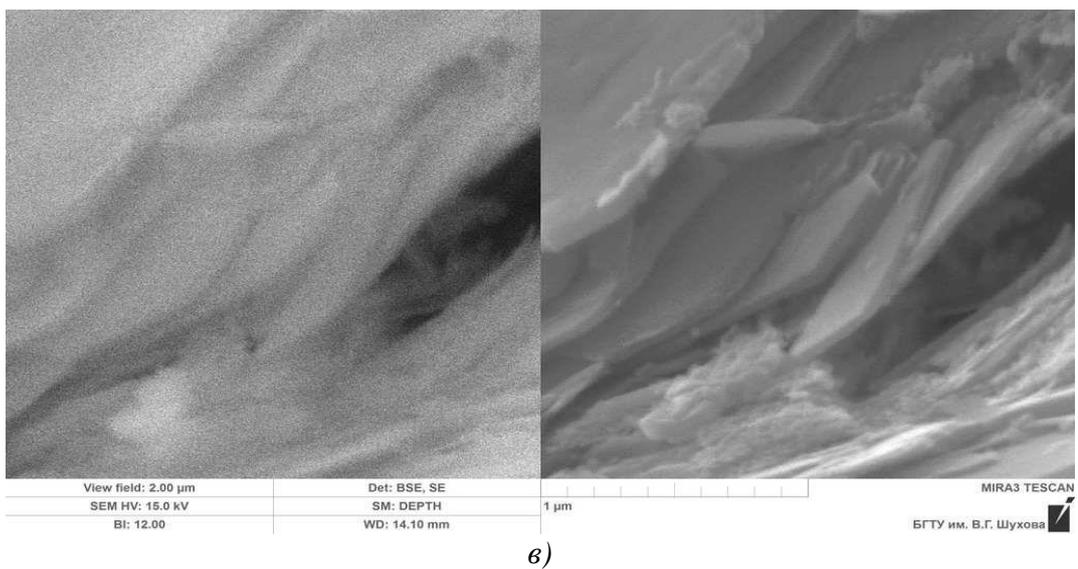
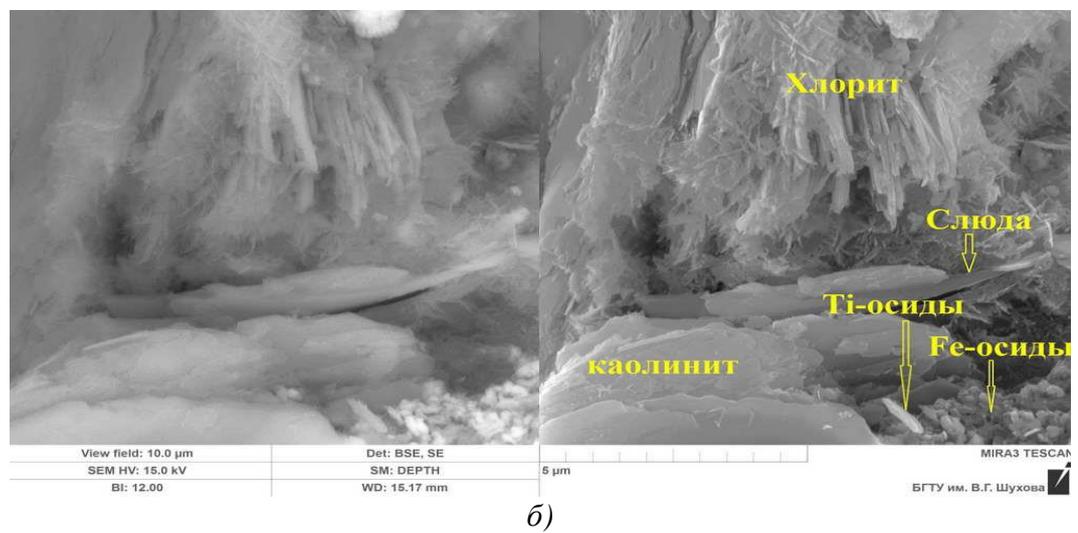
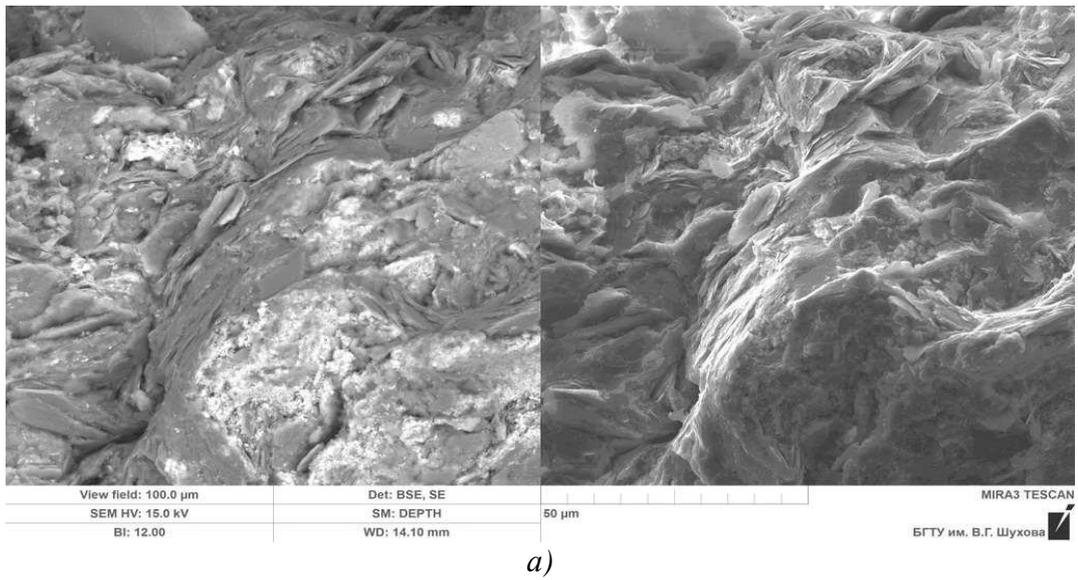


Рисунок 3.16 – Микроструктура латерита, изображение BSE и SE, РЭМ:

$a - \times 100$; $б - \times 1000$; $в - \times 10000$

На многослойной карте (см. рисунок 3.17, б, область 2) выделяется область с высоким содержанием железа (см. рисунок 3.18), которая смеси гидратов оксида железа (III) – лимониту $\text{FeOOH} \cdot (\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O})$.

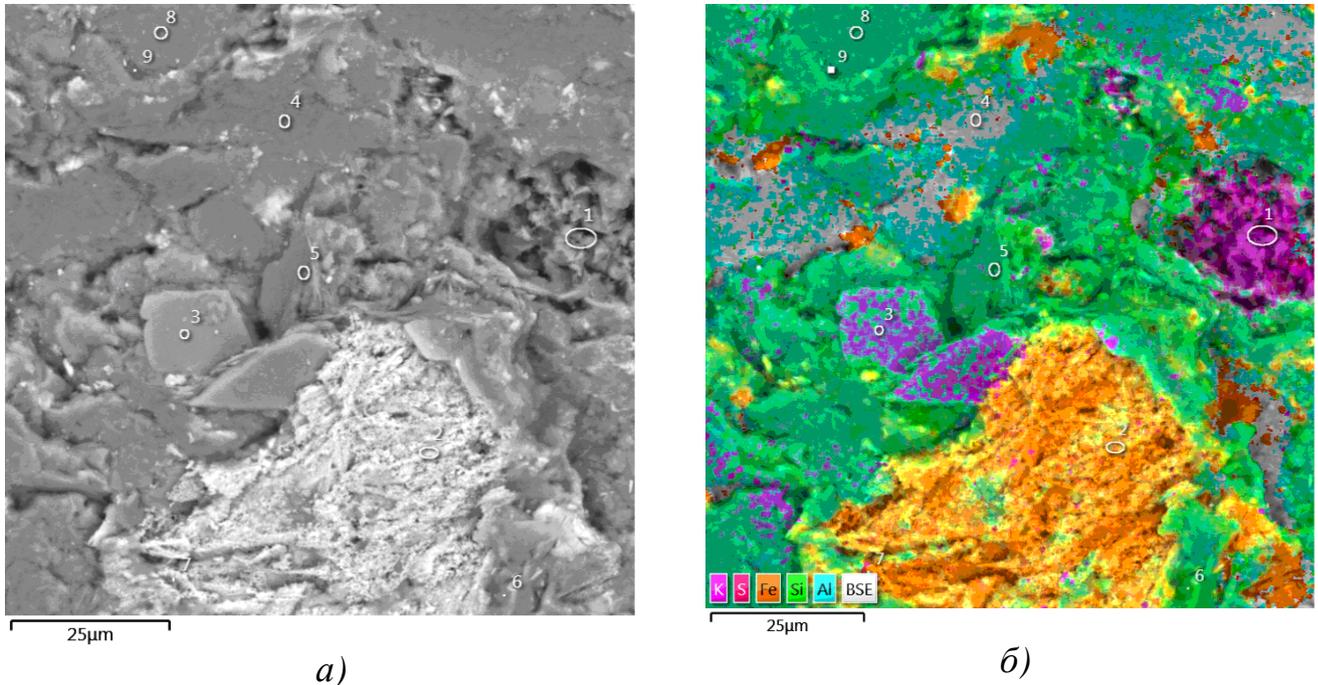


Рисунок 3.17 – Изображение BSE (а), многослойная карта (б) латерита, $\times 1000$

В областях 5, 8 и 9 (см. рисунок 3.17) по данным ЭДС (см. рисунок 3.18) преобладают элементы кислород, кремний и алюминия, что подтверждает данные рентгенофазового и термографического анализа о наличии каолинита. В области 3 присутствует магний и калий. Можно предположить, что поверхность каолинита частично покрыта слюдой (см. рисунок 3.17, б). В области 4 в небольшом количестве присутствует железо, что свидетельствует о наличии следов лимонита на поверхности каолинита (см. рисунок 3.17, б). В области 1 преобладает кислород, алюминий, сера и калий (см. рисунок 3.17, б и 3.18), что позволяет предположить о наличии алунита. $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$. В области 7 наблюдается титан и железа, что свидетельствует о содержании ильменита $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$. Преобладание кислорода и кремния в области б подтверждает полученные ранее данные о наличии в породе кварца.

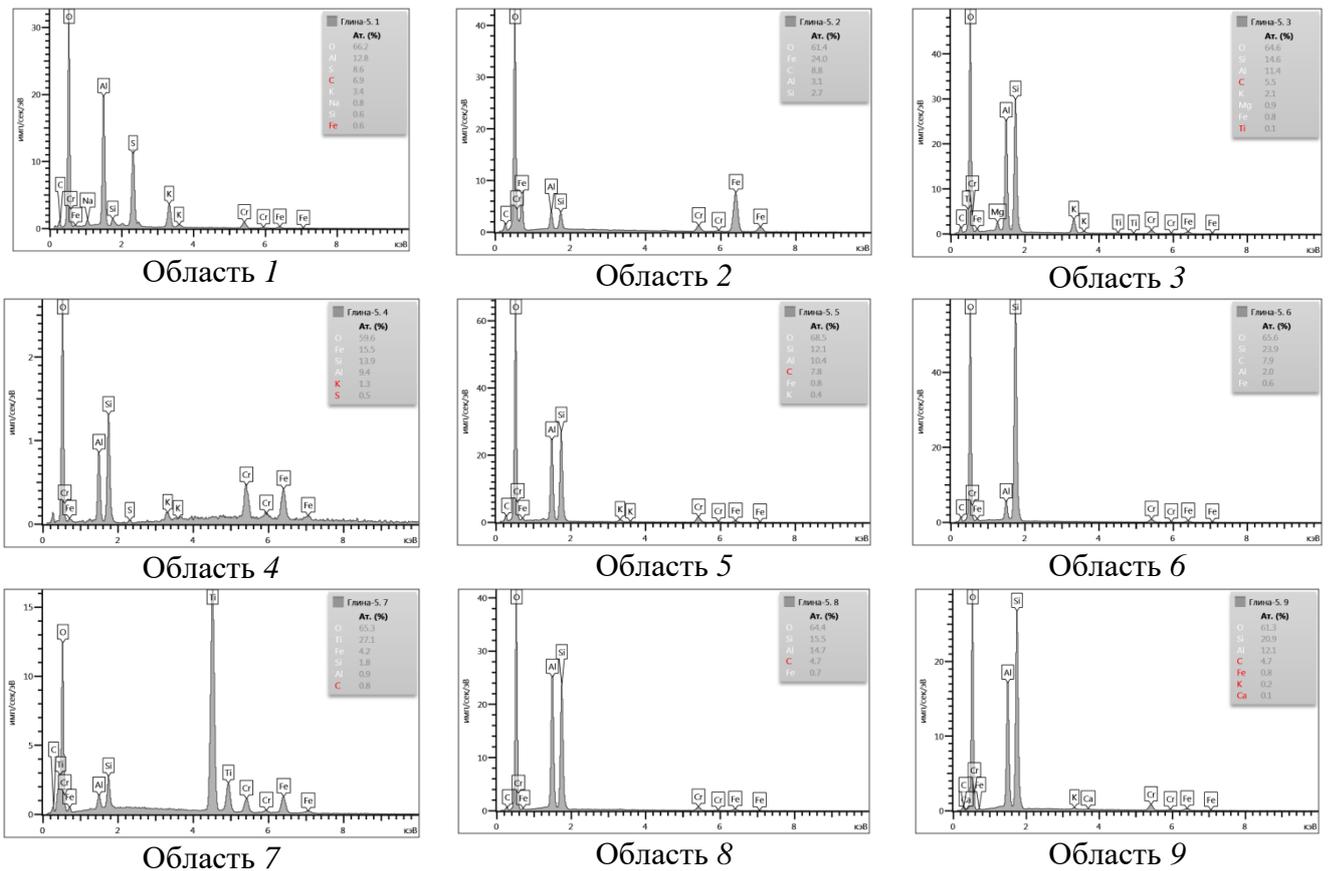


Рисунок 3.18 – Спектры ЭДС латерита

Таким образом, латерит представляет собой полидисперсную и полиминеральную породу. Основными породообразующими минералами являются каолинит, кварц и лимонит. В меньшем количестве содержится слюда, алунит и ильменит.

3.4 Вулканический пепел месторождения Эрафаиле

На территории Государства Эритрея находятся большие залежи вулканического пепла, в частности вблизи деревни Эрафаиле в районе вулкана Алид. Эти залежи возникли в результате извержения вулканов сотни тысяч лет назад.

Вулканический пепел представляет собой пылевидная порода, выброшенную из вулкана, Она состоит из мельчайших кусочков камня и стекла размером до 4 мкм. Эти являются твердыми и абразивными, с острыми краями. Как правило, минералы, входящие в состав пеплов, представлены апатитом, цирконом, оксидами титана и железа, ильменитом и титанитом.

Для исследований вулканический пепел отобран в районе деревни Эрафаиле. По данным химического анализа, полученного рентгенофлуоресцентным методом, содержание SiO_2 составляет 68,82 мас. %, что позволяет отнести породу к группе кислых (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Химический состав вулканического пепла

Содержание оксидов в вулканическом пепле, мас. %											
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	SO_3	P_2O_5	Cl	Na_2O	K_2O	Сумма
68,82	15,49	2,56	0,21	2,22	0,72	0,12	0,05	0,27	5,04	4,23	99,73

Для породы характерно повышенное содержание щелочей (Na_2O 5,04 мас.% и K_2O 4,23 мас. %) и высокое содержание конституционной воды – потери при прокаливании составляют 3,25 мас. %,

Рентгенофазовый анализ показал, что на рентгенограмме между углами 15 и 30° наблюдается повышенный фон, соответствующий наличию аморфной фазы (рисунок 3.19).

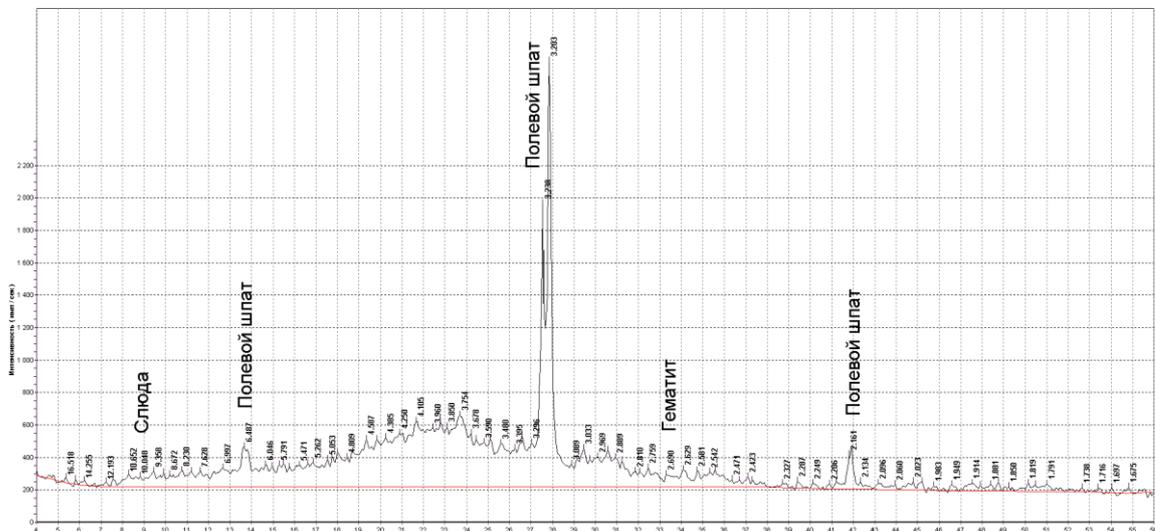
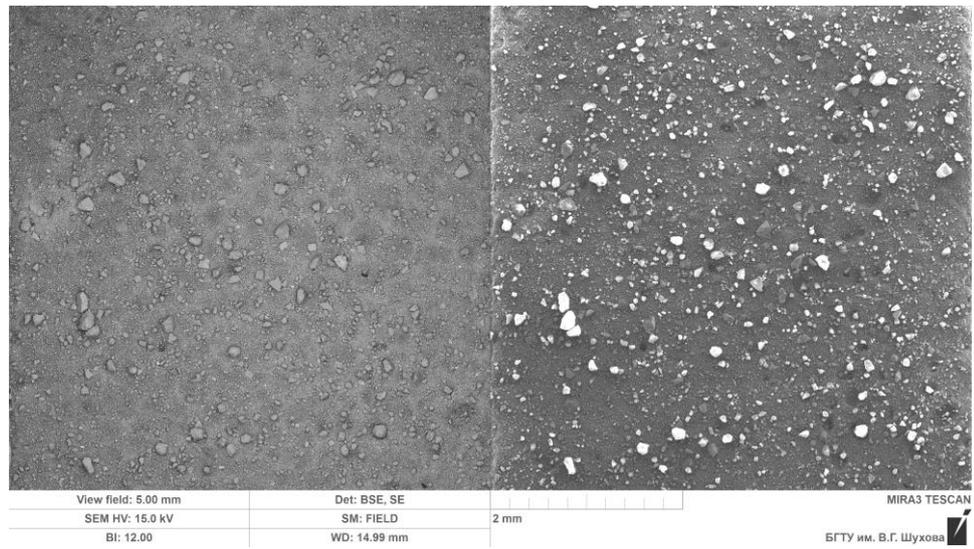


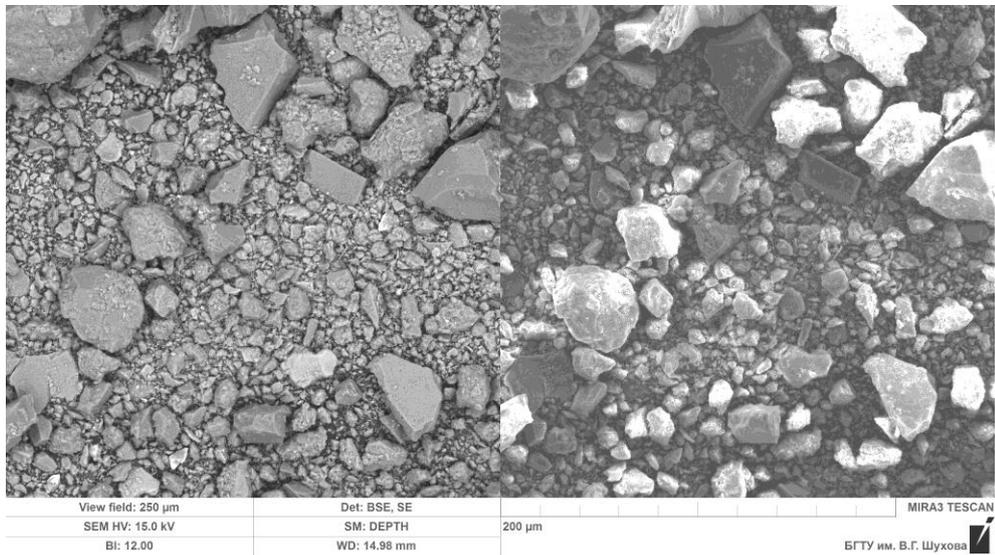
Рисунок 3.19 – Рентгенограмма вулканического пепла

Ярко выраженные рефлексы 6,487; 3,238; 3,203; 2,161 Å свидетельствует о наличие полевого шпата, что подтверждает данные результатов ЭДС. По интенсивности рефлексов можно предположить, что в вулканическом пепле содержится преимущественно рентгеноаморфная фаза и полевоый шпат.

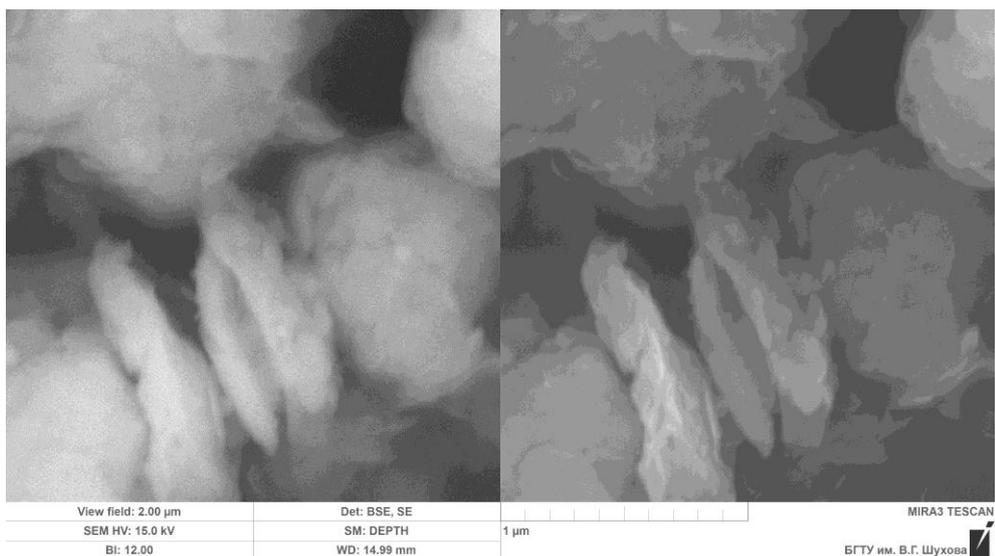
Микроскопические исследования приведены на рисунке 3.20.



а)



б)



в)

Рисунок 3.20 – Микроструктура вулканического пепла, изображение BSE и SE, РЭМ:
а – $\times 20$; б – $\times 400$; в – $\times 50000$

Вулканический пепел является полидисперсной породой, между частицами пепла отсутствует какой-либо цемент. Размер частиц колеблется в широком диапазоне. В небольшом количестве содержатся частицы размером 0,1–2 мм (см. рисунок 3.20, *а*). Основная масса частиц представлена размером от 40 до 1 мкм (см. рисунок 3.20, *б* и *в*). Толщина плоских части составляет 200–300 нм. По внешнему виду частицы размером 1 мкм представляют собой агрегаты из более мелких частиц (см. рисунок 3.20, *а*, *в*).

Микрофотографии BSE/SE, многослойная карта и спектры ЭДС некоторых минералов вулканического пепла представлены на рисунках 3.21 и 3.22.

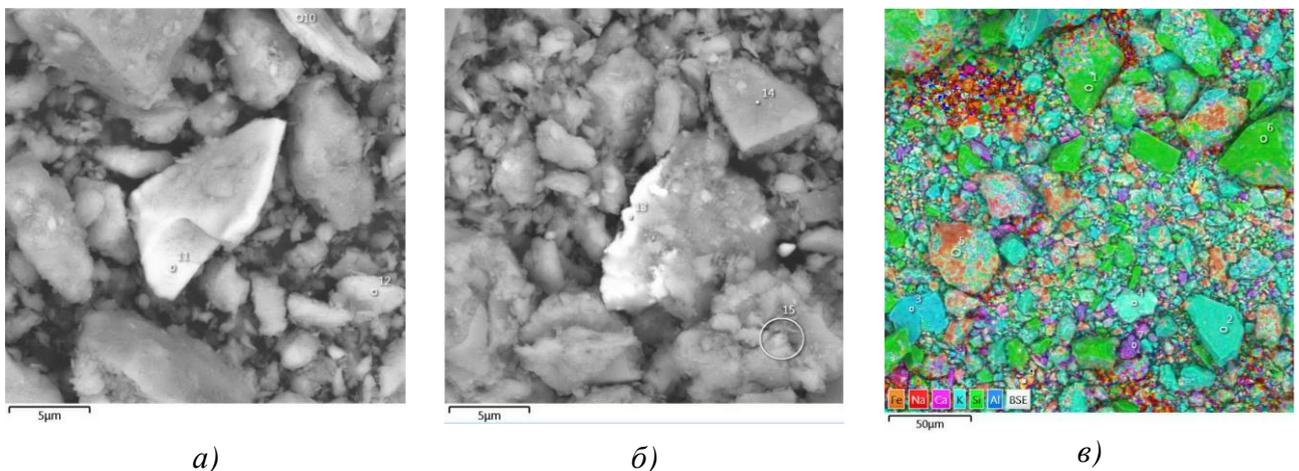


Рисунок 3.21 – Изображение BSE (*а* и *б*) и многослойная карта (*в*) вулканического пепла: *а*, *б* – $\times 4000$; *в* – $\times 500$

Анализируя спектры ЭДС и ассоциацию элементов на многослойной карте, было выявлено наличие элементов O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Mn и Fe. На поле изображения образца были выбраны области, для которых проводился примерный количественный анализ указанных элементов, что позволило определить вероятный минеральный состав породы.

Установлено, что порода обладает полиминеральным составом. В породе присутствует кварц SiO_2 (см. рисунок 3.21 и 3.22, область 1), полевые шпаты – микроклин $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ (область 3, 14) и анортит $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ (область 7), слюда $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3[\text{SiO}_3\text{AlO}_{10}][\text{OH,F}]_2$ (биотит) (область 4), гематит Fe_2O_3 (область 13), роговая обманка из группы амфиболов $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe,Al})_5(\text{Al,Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ (область 8), ильменит FeTiO_3 (область 9, 11).

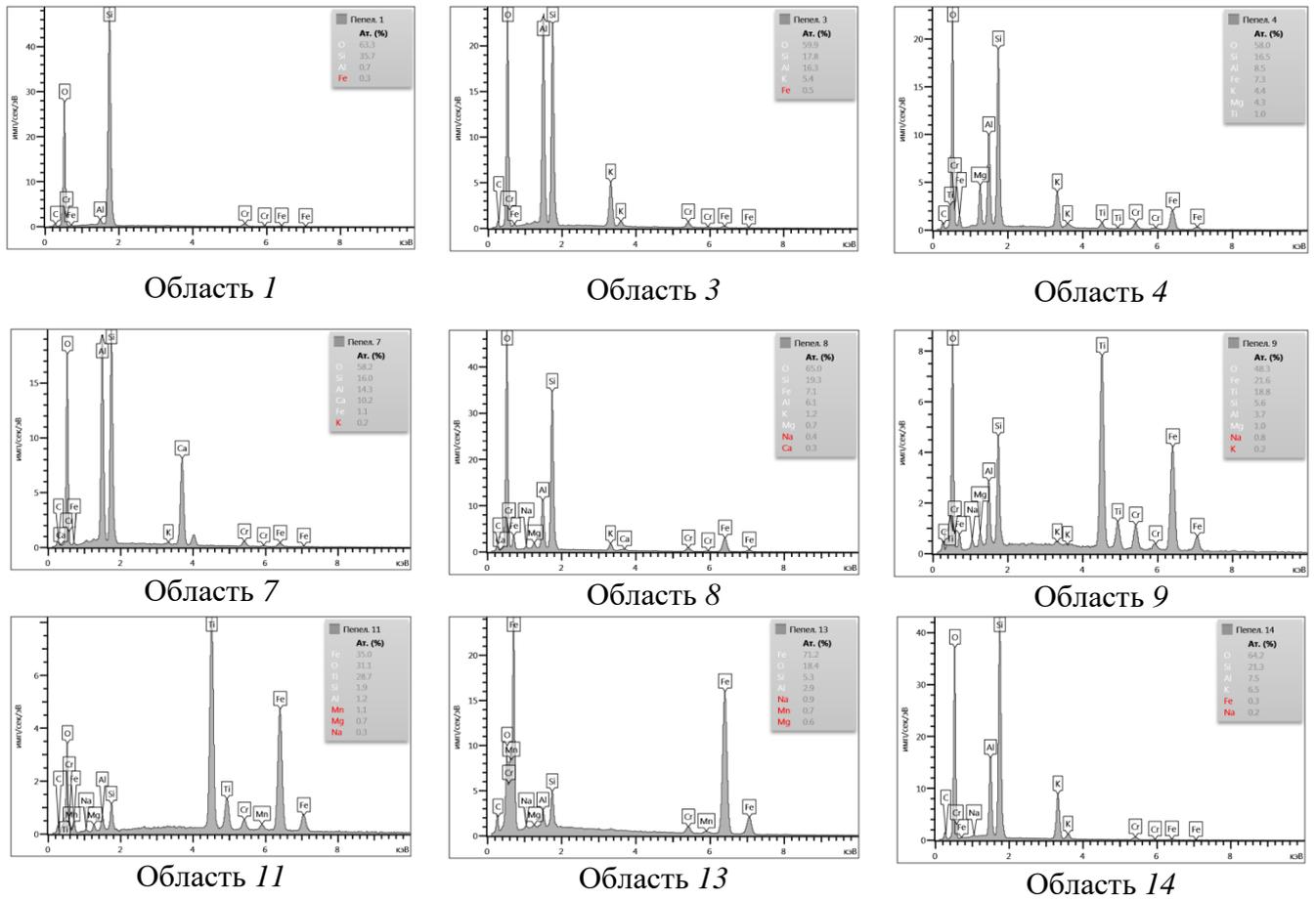


Рисунок 3.22 – Спектры ЭДС вулканического пепла

Таким образом, вулканический пепел представляет собой полидисперсную и полиминеральную породу. Порода состоит преимущественно из рентгено-аморфной фазы и полевого шпата. В меньшем количестве содержится кварц, слюда, гематит, ильменит и роговая обманка.

3.5 Песок месторождения Дэбуб

Песок отобран на месторождении Дэбуб, находящейся на территории администрации города Декемхаре в районе деревни Кейх-Кор. Этот это сырье в Государстве Эритрея используется для получения бетонов.

Согласно рентгенофлуоресцентному анализу, песок содержит 74,10 мас. % SiO_2 (таблица 3.5). Высокую долю Al_2O_3 (15,42 мас. %) и значительное количество CaO (1,19 мас. %), Na_2O (3,37 мас. %) и K_2O (3,70 мас. %) можно связать с присутствием полевого шпата, который является распространенной примесью в пес-

ках. Светло-коричневый цвет песка свидетельствует о наличии оксидов железа, которые составляют 1,26 мас. %. Наиболее вероятно железо присутствует в виде лимонита и гётита, покрывающие поверхность кварца. Потеря массы при прокаливании составляет 0,97 мас. %.

Таблица 3.5 – Химический состав песка месторождения Дебуб

Содержание оксидов в породе, мас. %									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
74,10	15,42	1,26	0,15	1,18	0,60	0,03	3,37	3,70	99,81

Для определения модуля крупности провели ситовой анализ песка по ГОСТ 8736–2014 [99] (таблица 3.6).

Таблица 3.6. Гранулометрический состав песка месторождения Дебуб

Размер отверстий сит, мм	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	Менее 0,16
Частные остатки на ситах, мас. %	0	4,5	16,95	38,6	18,15	18,55	3,25
Полные остатки на ситах, мас. %	0	4,5	21,45	60,05	78,2	96,75	3,25

По значению модуля крупности (2,6) песок можно охарактеризовать как крупный.

Результаты рентгенофазового и термического анализа приведены на рисунке 3.23 и 3.24. Преобладающими минералами являются кварц (4,258; 3,344; 1,821 Å) и полевые шпаты (3,239; 3,198; 3,776 Å), которые исходя из повышенного содержания Na₂O, K₂O и CaO представлены албитом, микроклином и анортитом. Повышенный фон между углами 13 и 20° соответствует наличию аморфной фазы.

На кривой дифференциально-термического анализа (рисунок 3.24) выделяется только эндотермический эффект при 574 °С, соответствующий полиморфному превращению кварца. Во всем диапазоне температур масса практически не изменяется (кривые ТГ и ДТГ), что свидетельствует об отсутствии минералов, содержащих летучие компоненты.

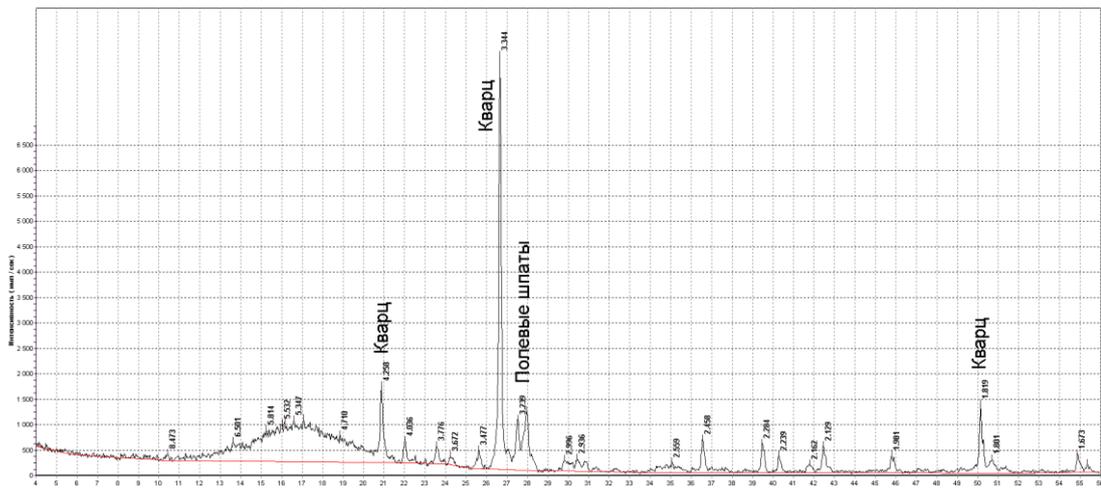


Рисунок – 3.23 – Рентгенограмма песка месторождения Дебуб

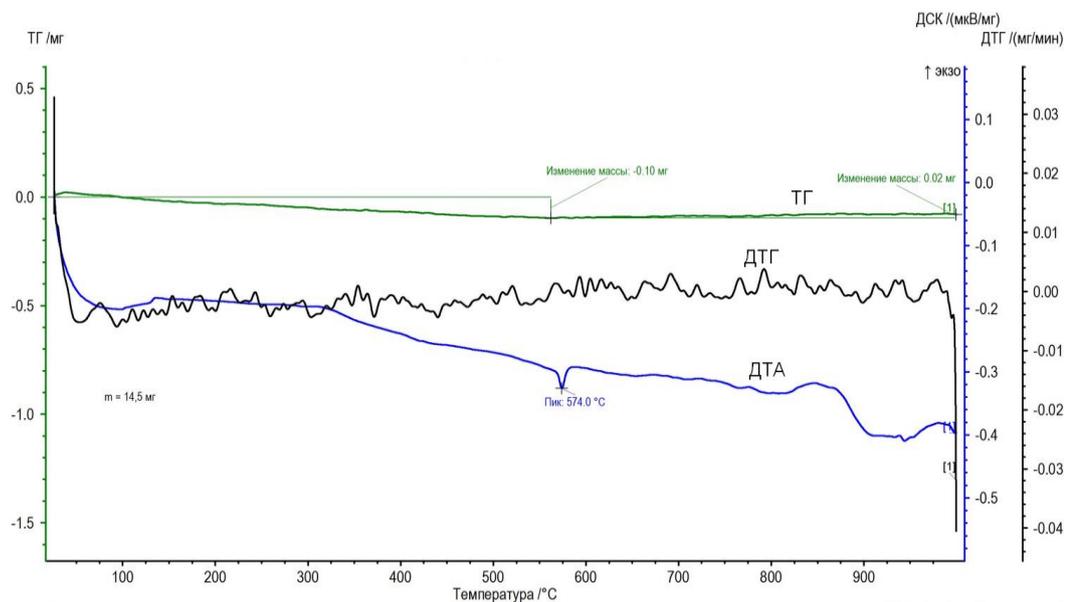


Рисунок – 3.24 – Дериватограмма песка месторождения Дебуб

Таким образом, песок месторождения Дебуб по химическому, гранулометрическому и минеральному составу соответствует ОСТ 21-1-80 «Песок для производства силикатных изделий автоклавного твердения» и пригоден для производства силикатного кирпича, камней и других мелкоштучных прессованных изделий.

3.6 Оценка химического состава алюмосиликатного сырья

Пригодность алюмосиликатных пород по химическому составу в качестве сырья для производства строительных материалов оценивали с использованием

диаграммы Августиника [116]. Положение пород на этой диаграмме по химическому составу показано в соотношении молей $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ и суммы молей плавней $\Sigma\text{R}_2\text{O} + \text{RO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (таблица 3.7 и рисунок 3.25).

Таблица 3.7 – Соотношение молей $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ и суммы молей плавней $\Sigma\text{R}_2\text{O} + \text{RO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ глинистых пород

№ породы	Порода	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$ (моль)	$\Sigma \text{R}_2\text{O} + \text{RO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (моль)
1	Глинистая порода месторождения Дэбуб	0,17	0,317
2	Глинистая порода месторождения Маэкель	0,319	0,134
3	Латерит	0,32	0,315
4	Вулканический пепел	0,133	0,2

Различные по свойствам глинистые породы занимают на этой диаграмме соответствующие участки: *a* – огнеупорные (шамотные) изделия; *б* – плитки для пола, канализационные трубы, кислотоупоры; *в* – гончарные глины; *г* – черепичные глины; *д* – клинкерные; *е* – кирпичные глины; *ж* – породы, пригодные для производства силикатных материалов.

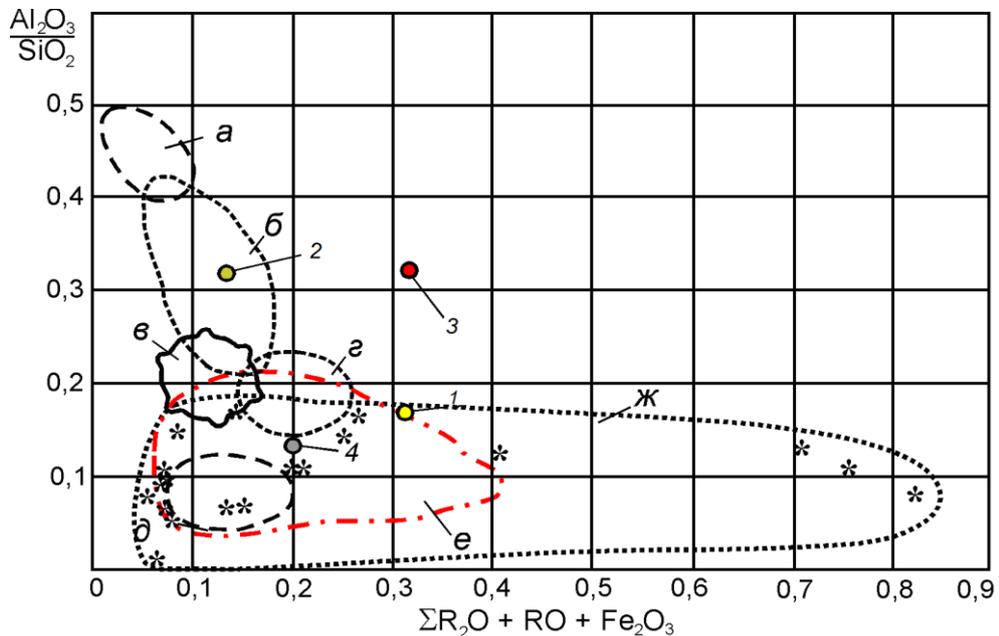


Рисунок 3.25 – Группировка глинистых пород в зависимости от их химического состава: участки с составами глин пригодных для производства: *a* – огнеупорных изделий; *б* – плиток для пола, канализационных труб, кислотоупора; *в* – гончарных изделий; *г* – черепицы; *д* – клинкера; *е* – кирпича; *1* – глинистая порода месторождения Дэбуб; *2* – глинистая порода месторождения Маэкель; *3* – латерит; *4* – вулканический пепел; * – пригодные для силикатных материалов

На диаграмме Августиника пунктирной линией дополнительно выделена область *ж*, в которую по своему химическому составу попадают глинистые породы, пригодные в качестве сырья для производства силикатных материалов автоклавного твердения. Соотношение Al_2O_3/SiO_2 при этом составляет меньше 0,2. Как было установлено [117], это породы незавершенной стадии минералообразования месторождений Курской магнитной аномалии, Архангельской алмазоносной провинции, Воронежской и Новгородской областей, а также Республики Йемен (обозначены символом «*»).

На диаграмме (см. рисунок 3.25) обозначены положения составов изучаемого алюмосиликатного сырья. Латерит с соотношением молей Al_2O_3/SiO_2 0,32 и суммы молей плавней 0,315 (*точка 3*) не попадает ни в один из указанных участков с составами глин пригодных для производства строительных материалов.

Глинистая порода месторождения Дэбуб и вулканический пепел (*точка 1 и 4*) находятся на участке *е* и *ж* (Al_2O_3/SiO_2 меньше 0,2), соответствующие областям использования для производства керамического кирпича и силикатных материалов. Необходимо учитывать, что вулканический пепел пригоден для производства силикатных материалов, а для получения керамического кирпича порода не пригодна, так как в ее составе отсутствуют глинистые минералы.

Глинистую породу месторождения Маэжель с соотношением Al_2O_3/SiO_2 равным 0,319 и и суммы молей плавней 0,134 (*точка 2*) можно использовать в производстве плитки для пола, канализационных труб и кислотоупоров, однако не пригодна для силикатных материалов.

Таким образом, глинистая порода месторождения Дэбуб пригодна для производства керамического кирпича и силикатных материалов автоклавного твердения. Из полученных данных следует, что Латерит и глинистая порода месторождения Маэжель обладают повышенным значением соотношения Al_2O_3/SiO_2 (соответственно 0,320 и 0,319) и не пригодны в качестве сырья для получения силикатных материалов автоклавного твердения. Снизить соотношение Al_2O_3/SiO_2 в этих породах можно за счет добавки вулканического пепла, имеющий существенно меньшее значение Al_2O_3/SiO_2 . Кроме этого вулканический пепел содержит аморф-

ную фазу, что окажет положительное влияние на процесс фазообразования в сырьевой смеси.

3.7 Выводы

1. Показано, что Государство Эритрея располагаясь на относительно небольшой территории, тем не менее, имеет весьма разнообразную геологию, которая состоит из древних докембрийских пород фундамента, перекрытых более молодыми мезозойскими осадочными породами, а также вулканических и осадочных пород третичного и четвертичного периодов на выветренных и латеризованных поверхностях фундамента.

2. Почвы Государства Эритрея сложны и варьируются от региона к региону по текстуре, составу и другим природным характеристикам. Большинство из них алюмосиликатные породы, образовавшиеся непосредственно в результате выветривания нижележащих коренных пород. Наиболее распространенной породой являются латериты, покрывающие около 33 % суши, а основными ее компонентами являются гематит, гетит и каолинит.

3. На территории Государства Эритрея в районе вулкана Алид находятся большие залежи вулканического пепла, которые возникли в результате извержения вулканов сотни тысяч лет назад.

4. Исследованы состав и свойства алюмосиликатных пород, представленных глинистыми породами месторождения Дэбуб и Маэкель, латеритом и вулканическим пеплом. Установлено, что алюмосиликаты представляют собой полидисперсные и полиминеральные породы. Основными породообразующими минералами глины месторождения Дэбуб являются кварц и полевые шпаты, такие как микроклин, анортит и альбит. В меньшем количестве содержится гематит, ильменит, апатит, иллит и каолинит. В породе содержатся также растительные органические остатки. Глины месторождения Маэкель содержат преимущественно кварц, каолинит и гетит. В меньшем количестве содержатся ильменит, иллит, монтмориллонит и микроклин. В породах содержатся также органические растительные остатки. Вулканический пепел состоит преимущественно из рентгено-

аморфной фазы и полевого шпата. В меньшем количестве содержится кварц, слюда, гематит, ильменит и роговая обманка.

5. Латерит и глинистая порода месторождения Маэкель обладают повышенным значением соотношения Al_2O_3/SiO_2 (соответственно 0,320 и 0,319) и не пригодны в качестве сырья для получения силикатных материалов автоклавного твердения. Снизить соотношение Al_2O_3/SiO_2 в этих породах можно за счет добавки вулканического пепла, имеющий существенно меньшее значение Al_2O_3/SiO_2 . Кроме этого вулканический пепел содержит аморфную фазу, что окажет положительное влияние на процесс фазообразования в сырьевой смеси.

6. Песок месторождения Дебуб по химическому составу соответствует ОСТ 21-1-80 «Песок для производства силикатных изделий автоклавного твердения» и пригоден для производства силикатного кирпича, камней и других мелкоштучных прессованных изделий.

7. Большие запасы глинистых пород, вулканического пепла и песка, их химический, минеральный и дисперсный состав обуславливает возможность использовать их в качестве сырья для производства силикатных материалов гидротермального твердения. Высокое содержание соединений железа в латерите позволит получать материалы с повышенными радиационно-защитными свойствами.

4 СИЛИКАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПЛОТНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ПОРОД

4.1 Силикатные материалы автоклавного твердения плотной структуры на основе алюмосиликатных пород

В исследованиях использовали глину месторождения Дэбуб, глину месторождения Маэкель и латеритную породу. Число пластичности пород составляет в пределах 10–13, что позволяет отнести их к суглинкам. Также использовали вулканический пепел, отобранный вблизи деревни Эрафаиле в районе вулкана Алид. Характеристика, химический и минеральный состав алюмосиликатных пород приведен в главе 3. Глина месторождения Дэбуб обладает светло-серым цветом, месторождения Маэкель – светло-коричневым. Особенностью латерита является высокое содержание оксида железа – 48,4 мас. %, что обуславливает красный цвет породы. Вулканический пепел обладает светло-серым цветом. Это позволит получать окрашенные силикатные материалы плотной структуры.

Готовили сырьевые смеси с содержанием глинистых пород 10–70 мас. %. При получении сырьевой смеси глинистые породы измельчали совместно с известью для получения известково-глинистого вяжущего, которое смешивали с песком. Контрольные известково-песчаные образцы готовили на основе молотой негашеной извести и известково-песчаного вяжущего (ИПВ). Активность ИПВ составляла 50,9 мас. %. Содержание активной СаО для всех сырьевых смесей составляло 8 мас. %. Формовочную смесь увлажняли водой и помещали в герметическую чашку для гашения извести. Воду добавляли в количестве, которое необходимо для получения массы влажностью 10 %. Из полученной смеси методом полусухого прессования при давлении 20 МПа формовали образцы, которые подвергали автоклавной обработке при давлении 1 МПа и времени изотермической выдержке 6 ч. Подъем и сброс давления пара составлял по 1,5 ч. Перед испытаниями образцы выдерживались 2 сут в условиях комнатной температуры. Полученные результаты отражены на рисунке 4.1 и в таблице 4.1.



Рисунок 4.1 – Предел прочности при сжатии силикатных материалов плотной структуры в зависимости от содержания алюмосиликатных пород:

1 – глина месторождение Дэбуб; 2 – глина месторождение Маэкель; 3 – латерит;
4 – вулканический пепел

Таблица 4.1 – Физико-механические характеристики силикатных материалов плотной структуры на основе алюмосиликатных пород Государства Эритрея

Показатели	Содержание алюмосиликатных пород, мас. %						
	0	10	20	30	40	50	70
<i>Глина месторождение Дэбуб</i>							
$R_{сж}$, МПа	17,70	20,52	25,35	25,86	22,50	16,29	14,00
$R_{сж}$ водонасыщенных образцов, МПа	13,93	16,41	21,72	23,79	19,58	13,02	10,78
Средняя плотность, кг/м ³	1815	1880	1920	1915	1850	1780	1690
Водопоглощение, %	12,22	10,37	8,02	8,72	11,92	14,87	18,29
Коэффициент размягчения	0,79	0,80	0,86	0,92	0,87	0,80	0,77
<i>Глина месторождение Маэкель</i>							
$R_{сж}$, МПа	17,70	15,73	16,00	16,50	16,80	11,57	11,65
$R_{сж}$ водонасыщенных образцов, МПа	13,88	11,33	10,88	11,33	11,42	7,75	7,68
Средняя плотность, кг/м ³	1815	1855	1860	1860	1820	1725	1680
Водопоглощение, %	12,22	12,81	13,44	13,53	15,15	19,29	20,91
Коэффициент размягчения	0,79	0,72	0,68	0,69	0,68	0,67	0,66
<i>Латерит</i>							
$R_{сж}$, МПа	17,70	14,75	11,90	14,21	18,93	16,39	15,88
$R_{сж}$ водонасыщенных образцов, МПа	14,16	10,61	11,29	12,22	15,90	13,72	13,72
Средняя плотность, кг/м ³	1815	1840	1880	1895	1850	1805	1720
Водопоглощение, %	12,22	12,36	12,59	12,70	13,61	15,70	18,37
Коэффициент размягчения	0,79	0,79	0,85	0,86	0,84	0,84	0,81
<i>Вулканический пепел</i>							
$R_{сж}$, МПа	17,70	13,61	20,68	22,07	23,02	24,05	25,00
$R_{сж}$ водонасыщенных образцов, МПа	13,98	12,16	18,19	20,43	19,79	20,69	21,50
Средняя плотность, кг/м ³	1815	1870	1925	1895	1855	1780	1705
Водопоглощение, %	12,22	11,59	9,53	7,71	6,29	6,46	7,20
Коэффициент размягчения	0,79	0,89	0,88	0,92	0,86	0,86	0,86

Предел прочности при сжатии ($R_{сж}$) известково-песчаных образцов (контрольных), в которых в качестве вяжущего использовали только измельченную известь, составил 17,7 МПа. Положительное влияние на прочностные показатели силикатных материалов плотной структуры оказывает только глинистая порода месторождения Дэбуб и вулканический пепел (см. рисунок 4.1, *кривая 1 и 4* и таблицу 4.1). Максимальной прочностью 25,35–25,86 МПа, что выше прочности контрольных на 43,2–46,1 %, образцы достигают при содержании глины Дэбуб 20–30 мас. %. С увеличением содержания породы до 70 мас. % прочность снижается до 14 МПа. Вулканический пепел в количестве 10 мас. % снижает прочность образцов до 13,61 МПа. При увеличении содержания породы до 70 мас. % прочность повышается до 25 МПа.

Снижение прочности при содержании вулканического пепла 10 мас. % связано, по-видимому, с уменьшением количества синтезированных новообразований, так как, вероятно, что в этой системе с известью реагируют преимущественно высокоактивные породообразующие минералы вулканического пепла. С увеличением содержания породы количество синтезированных новообразований увеличивается.

Глина месторождения Маэжель в количестве 10–40 мас. % снижает прочность образцов с 17,7 МПа до 15,75–16,8 МПа (см. рисунок 4.1, *кривая 2* и таблицу 4.1). При содержании породы 50–70 мас. % прочность снижается до 11,57–11,65 МПа.

С увеличением содержания в сырьевой смеси латерита до 20 мас. % прочность снижается до 11,9 МПа (см. рисунок 4.1, *кривая 3* и таблицу 4.1). С дальнейшим увеличением содержания породы прочность повышается и достигает максимума 18,93 МПа, что на 6,5 % выше прочности контрольных образцов. С дальнейшим увеличением содержания латерита до 70 мас. % предел прочности при сжатии снижается до 15,9 МПа.

Снижение прочности образцов с содержанием глины Маэжель и латерита меньше 40 мас. % связано, вероятно, как было установлено в работах [118, 119] с недостаточным количеством глинистой породы для полного связывания извести

и, соответственно, уменьшением количества цементирующих соединений. Содержание этих пород 40 мас. %, вероятно, является оптимальным для полного связывания извести и при дальнейшем повышении содержания породы остаются не прореагировавшие породообразующие глинистые минералы, что приводит к снижению прочности.

Для известково-песчаных силикатных материалов плотной структуры средняя плотность составляет 1815 кг/м^3 (см. таблицу 4.1). Алюмосиликатные породы повышают среднюю плотность, причем максимальное значение достигается при содержании глины месторождения Маэкель и латерита в количестве 30 мас. % и составляет соответственно 1860 и 1895 кг/м^3 . Глина месторождения Дэбуб и вулканический пепел повышают среднюю плотность соответственно до 1920 и 1925 кг/м^3 при содержании 20 мас. %.

Для глинистых пород месторождения Дэбуб и Маэкель максимальная прочность соответствует наибольшей средней плотности, из чего можно сделать вывод, что при этом достигается максимальная плотность упаковки материала. Несоответствие количества содержания латерита для достижения максимальной средней плотности и максимальной прочности свидетельствует, вероятно, о том, что наиболее плотная упаковка материала при содержании латерита 30 мас. % достигается за счет дисперсного оксида железа (III), который принимает незначительное участие в формировании новообразований. Для формирования максимального количества цементирующего вещества требуется больше глинистых минералов и, соответственно, латеритной породы.

Характер изменения величины водопоглощения образцов с увеличением содержания глинистых пород месторождения Маэкель и латерита до 40 мас. % практически совпадает и достигает значений соответственно 15,15 и 13,61 % (см. таблицу 4.1). С дальнейшим повышением содержания пород до 70 мас. % водопоглощение увеличивается соответственно до 20,91 и 18,37 %. Водопоглощение образцов на основе глинистой породы месторождения Дэбуб сначала уменьшается и достигает минимума 8,02–8,72 % при содержании породы 20–30 мас. %, что может быть связано с образованием наиболее плотной упаковки материала. Далее

водопоглощение повышается до 18,29 % при содержании породы 70 мас. %. Это подтверждает сделанное ранее предположение о наличии несвязанных глинистых минералах, за счет которых происходит повышение водопоглощения.

Коэффициент размягчения известково-песчаных образцов составляет 0,79 (см. таблицу 4.1). Водостойкость образцов на основе глины месторождения Дэбуб, латерита и вулканического пепла практически всех составов соответствует нормативным требованиям. Коэффициент размягчения составляет в пределах 0,8–0,92. Максимальная величина коэффициента размягчения для этих пород совпадает с наибольшей средней плотностью. Очевидно, что повышение водостойкости в основном определяется образованием плотной упаковки материала. Образцы на основе породы месторождения Маэкель обладают пониженной водостойкостью, коэффициент размягчения составляет 0,66–0,72. Это связано, вероятно, наличием большого количества глинистых минералов (см. главу 3.3), которые поглощая воду, снижают прочность образцов.

Таким образом, глинистая порода месторождения Дэбуб и вулканический пепел оказывают положительное влияние на физико-механические свойства силикатных материалов плотной структуры и пригодны в качестве сырья для их производства. Латерит и порода месторождения Маэкель не повышают прочностные показатели силикатных материалов, однако эти породы пригодны в качестве сырья для получения окрашенных прессованных силикатных автоклавных материалов.

4.2 Силикатные материалы автоклавного твердения плотной структуры с использованием вяжущего на основе латерита и вулканического пепла

Химический состав глинистой породы месторождения Дэбуб и вулканического пепла определяет положение на диаграмме Августиника, как пригодные для получения силикатных материалов (см. главу 3.6). Соотношение молей Al_2O_3/SiO_2 для этих пород составляет меньше 0,2 (см. таблицу 3.10). Латерит и глинистая порода месторождения Маэкель, для которых соотношение молей Al_2O_3/SiO_2 состав-

ляет соответственно 0,320 и 0,319, не попадают в область пригодных в качестве сырья для производства силикатных материалов (см. таблицу 3.10 и рисунок 3.25). Снизить соотношение молей Al_2O_3/SiO_2 для глины Маэкель и латерита можно за счет создания композитов с использованием вулканического пепла, имеющим существенно меньшее значение Al_2O_3/SiO_2 (0,133). Кроме этого вулканический пепел обладает повышенной активностью за счет содержания аморфной фазы.

Проведены исследования композиционных автоклавных силикатных материалов плотной структуры, для получения которых в качестве компонентов вяжущего использовались одновременно латерит и вулканический пепел.

Сырьевые смеси готовили с содержанием латерита 20 и 40 мас. %. В составе каждой из сырьевых смесей дополнительно содержался вулканический пепел в количестве от 0 до 30 мас. %. Вяжущее готовили путем совместного помола латерита, вулканического пепла и негашеной извести. Содержание активной СаО для всех сырьевых смесей составляло 8 мас. %. Формование и режим автоклавирования образцов описан в главе 4.1. Результаты испытаний приведены на рисунке 4.2 и в таблице 4.2.

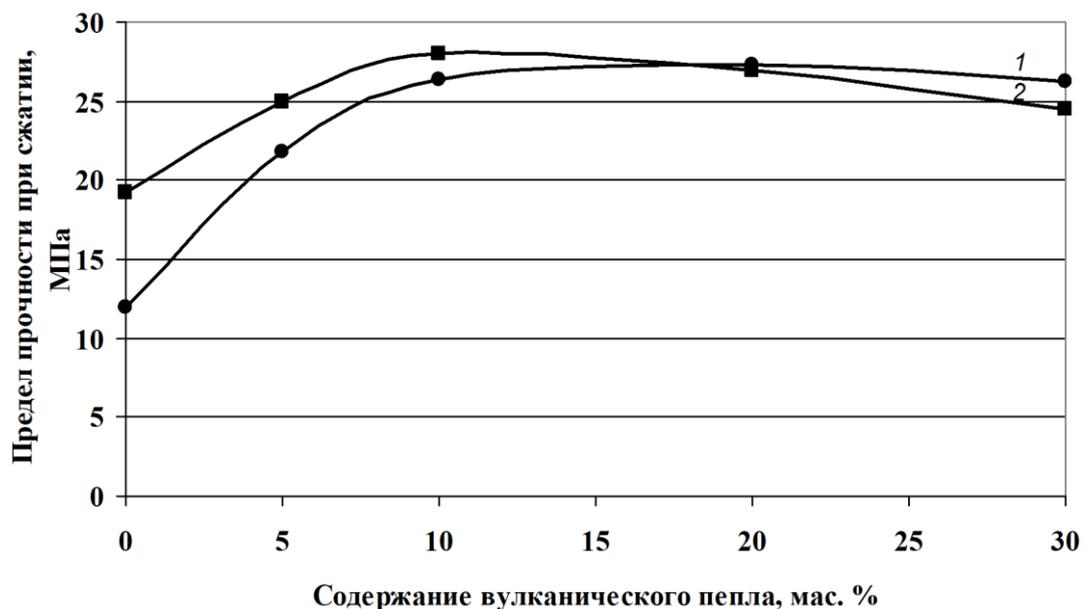


Рисунок 4.2 – Предел прочности при сжатии силикатных материалов плотной структуры в зависимости от содержания латерита и вулканического пепла:

содержание латерита, мас. %: 1 – 20; 2 – 40

Таблица 4.2 – Физико-механические характеристики композиционных силикатных материалов плотной структуры на основе латерита и вулканического пепла

Показатели	Содержание вулканического пепла				
	0	5	10	20	30
<i>Содержание латерита 20 мас. %</i>					
R _{сж} , МПа	11,90	21,80	26,38	27,25	26,31
R _{сж} водонасыщенных образцов, МПа	11,13	18,62	21,72	25,86	25,86
Средняя плотность, кг/м ³	1880	1910	1960	1920	1860
Водопоглощение, %	13,09	11,35	8,93	8,98	9,60
Коэффициент размягчения	0,85	0,85	0,82	0,95	0,98
<i>Содержание латерита 40 мас. %</i>					
R _{сж} , МПа	19,24	25,00	28,00	27,00	24,48
R _{сж} водонасыщенных образцов, МПа	14,49	22,76	20,03	24,05	23,28
Средняя плотность, кг/м ³	1850	1895	1875	1845	1810
Водопоглощение, %	13,61	11,48	11,04	11,54	11,37
Коэффициент размягчения	0,79	0,91	0,90	0,89	0,95

При содержании латерита 20 и 40 мас. % предел прочности при сжатии образцов составляет, соответственно, 11,9 и 19,24 МПа (см. рисунок 4.2, таблица 4.2). С увеличением содержания в сырьевой смеси вулканического пепла предел прочности при сжатии повышается и достигает максимальной величины при содержании породы 10–20 мас. % (см. рисунок 4.2). Наиболее существенное влияние вулканический пепел оказывает на прочность образцов с содержанием латерита 20 мас. % (см. рисунок 4.2, *кривая 1*). Предел прочности при сжатии повышается до 27,25 МПа, что выше прочности образцов без вулканического пепла в 2,3 раза. Прочность образцов с содержанием латерита 40 мас. % повышается в 1,45 раза и составляет 28 МПа. Необходимо отметить, что максимальная прочность, которую набирают образцы с 20 и 40 мас. % латерита практически одинакова.

Средняя плотность силикатных материалов плотной структуры с содержанием латерита 20 мас. % выше, чем с содержанием 40 мас. % (см. таблицу 4.2). Для образцов с содержанием латерита 20 мас. % средняя плотность возрастает с 1880 до 1960 кг/м³ при увеличении содержания вулканического пепла до 10 мас. %. При этом достигается максимальная плотность упаковки материала. Для образцов с большим содержанием латерита (40 мас. %) максимальная плотность

упаковки материала достигается уже при содержании вулканического пепла 5 мас. %, так как в сырьевой смеси больше дисперсного материала. Средняя плотность при этом составляет 1895 кг/м³.

Водопоглощение образцов, содержащих только латерит, имеют близкие значения – в пределах 13,06–13,61 %. При увеличении содержания вулканического пепла до 5–10 мас. % водопоглощение снижается до 8,93 и 11,93 % соответственно при содержании латерита 20 и 40 мас. % (см. таблицу 4.2). Дальнейшее повышение содержания вулканического пепла практически не влияет на изменение водопоглощения. Более низкие значения водопоглощения для материалов с содержанием латерита 20 мас. % связаны с более высокой средней плотностью этих образцов.

Все образцы с содержанием латерита и вулканического пепла обладают высокой водостойкостью. Коэффициент размягчения составляет в пределах 0,8–0,96 (см. рисунок 4.2).

Следовательно, использование в качестве компонентов вяжущего латеритных пород и вулканического пепла позволяет получать композиционные силикатные материалы плотной структуры с высокими физико-механическими показателями.

Таким образом, можно сделать вывод, что повысить эффективность использования глинистых пород как компонента вяжущего можно используя дополнительно вулканический пепел.

4.3 Свойства силикатных материалов плотной структуры с использованием вяжущего на основе алюмосиликатных пород методом математического планирования эксперимента

4.3.1 Автоклавные силикатные материалы плотной структуры

В работе использовали глинистые породы месторождения Дзбуб, месторождения Маэкель и латерит. Для подбора рациональных составов сырьевой смеси на основе глинистых пород и вулканического пепла исследования были проведены с использованием метода ортогонального центрального композиционного

планирования (ОЦКП) [120]. Все факторы x_1 , x_2 и x_3 при проведении экспериментов варьируются на трех уровнях – основном (0), нижнем (–1) и верхнем (+1), отстоящих от основного уровня величину Δx_i . Исходя из результатов, приведенных в главе 4.1, выбраны условия планирования эксперимента (таблица 4.3). Методика получения сырьевых смесей и образцов приведены в главе 4.1.

Таблица 4.3 – Условия планирования эксперимента

Факторы	Уровни варьирования			Интервал варьирования
	–1	0	+1	
Содержание глинистой породы, мас. % (x_1)	10	25	40	15
Содержание вулканического пепла, мас. % (x_2)	5	15	25	10
Содержание СаО _{акт.} %, (x_3)	6	8	10	2

Получены уравнения регрессии (формулы 4.1–4.12) влияние содержания глинистых пород, вулканического пепла и активной извести на предел прочности при сжатии ($R_{сж}$), среднюю плотность (ρ), водопоглощение (ω) и коэффициент размягчения ($K_{раз}$) автоклавных материалов плотной структуры.

Глина Дэбуб

$$R_{сж} = 15,49 + 1,26x_1 + 4,11x_2 + 0,024x_3 - 1,4056x_1^2 + 0,09x_2^2 - 0,616x_3^2 - 0,867x_1x_2 - 0,41x_1x_3 - 0,235x_2x_3 \quad 4.1$$

$$\rho = 1900,79 - 36,4x_1 - 25,0x_2 - 47,2x_3 - 16,99x_1^2 - 16,99x_2^2 - 2,019x_3^2 - 18,25x_1x_2 - 10,75x_1x_3 - 9,5x_2x_3 \quad 4.2$$

$$\omega = 9,11 + 0,75x_1 - 2,11x_2 + 0,73x_3 + 0,60x_1^2 + 0,69x_2^2 + 0,54x_3^2 + 0,39x_1x_2 + 0,29x_1x_3 + 0,22x_2x_3 \quad 4.3$$

$$K_{раз} = 0,857 + 0,044x_1 - 0,055x_2 + 0,002x_3 + 0,001x_1^2 + 0,001x_2^2 + 0,0004x_3^2 - 0,083x_1x_2 - 0,003x_1x_3 - 0,0035x_2x_3 \quad 4.4$$

Глина Маэжель

$$R_{сж} = 23,62 + 0,296x_1 + 2,895x_2 + 0,286x_3 - 0,518x_1x_2 + 0,605x_1x_3 \quad 4.5$$

$$\rho = 1855,3 - 44,5x_1 - 23,5x_2 - 38x_3 - 14,3x_1^2 - 14,3x_2^2 - 16,8x_3^2 - 28,75x_1x_2 - 5,0x_1x_3 + 1,25x_2x_3 \quad 4.6$$

$$\omega = 10,289 + 0,855x_1 - 0,581x_2 + 0,681x_3 + 0,101x_1^2 + 0,281x_2^2 + 0,4x_3^2 + 0,566x_1x_2 - 0,261x_1x_3 + 0,34x_2x_3 \quad 4.7$$

$$K_{раз} = 0,818 - 0,0086x_1 - 0,033x_2 + 0,035x_3 - 0,079x_1^2 + 0,07x_2^2 + \quad 4.8$$

$$+ 0,0002x_3^2 - 0,029x_1x_2 - 0,004x_1x_3 - 0,04x_2x_3$$

Латерит

$$R_{сж} = 21,883 + 0,025x_1 + 3,23x_2 - 0,085x_3 - 0,316x_1^2 - 1,411x_2^2 - 2,186x_3^2 - \quad 4.9$$

$$- 2,014x_1x_2 - 0,966x_1x_3 + 0,519x_2x_3$$

$$\rho = 1922,98 - 38,4x_1 - 32,6x_2 - 32,1x_3 - 27,29x_1^2 - 3,29x_2^2 - 18,79x_3^2 - \quad 4.10$$

$$- 40,88x_1x_2 - 14,38x_1x_3 - 1,13x_2x_3$$

$$\omega = 9,96 + 1,10x_1 - 0,65x_2 + 1,24x_3 + 0,37x_1^2 + 0,65x_2^2 + 0,76x_3^2 + \quad 4.11$$

$$+ 1,11x_1x_2 + 0,44x_1x_3 + 0,11x_2x_3$$

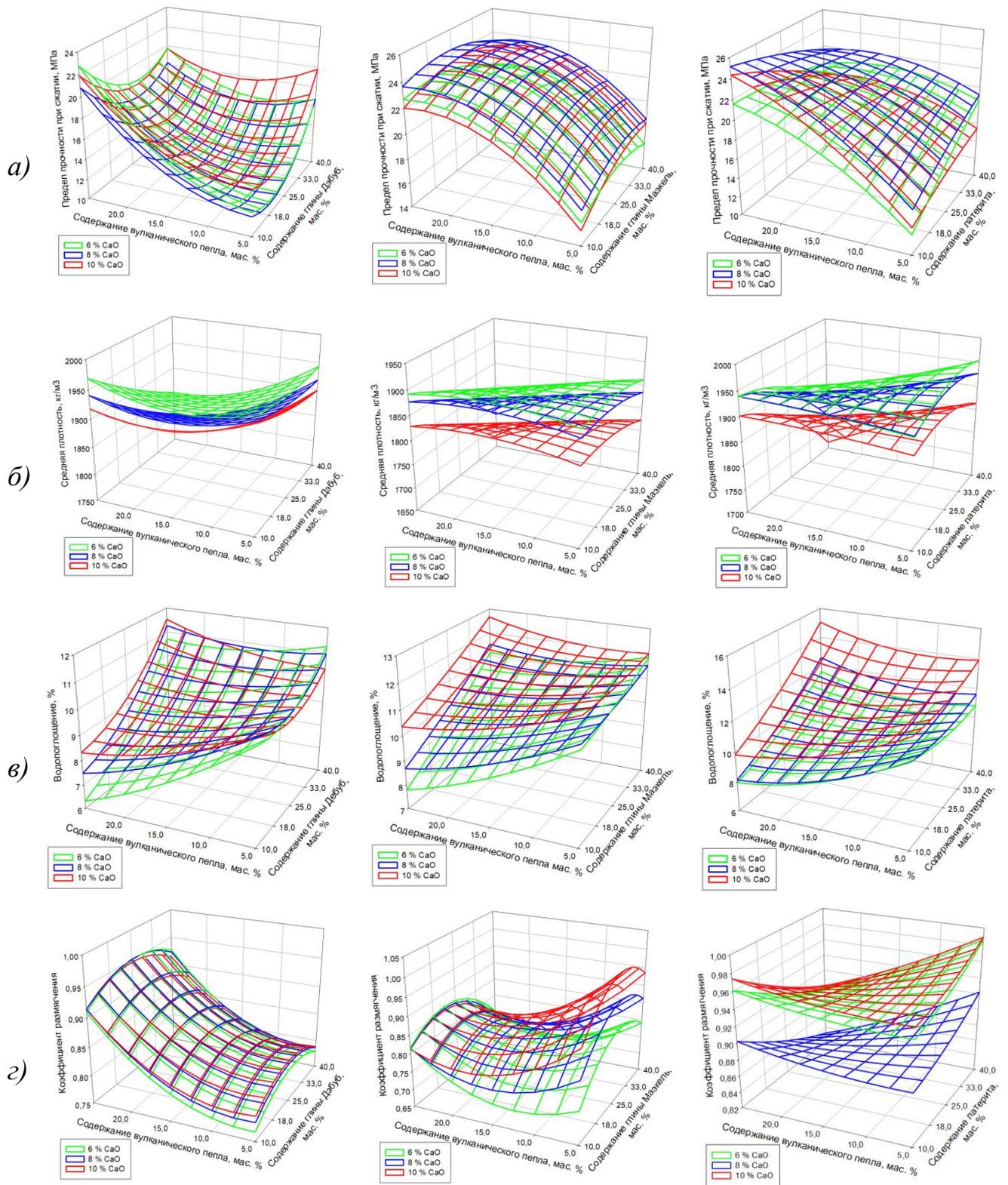
$$K_{раз.} = 0,8744 - 0,008x_1 - 0,018x_2 + 0,004x_3 + 0,0053x_1^2 + 0,0053x_2^2 + \quad 4.12$$

$$+ 0,0653x_3^2 - 0,0275x_1x_2 - 0,0025x_1x_3$$

По уравнениям уравнений регрессии проведены расчеты и построены графики зависимости $R_{сж}$, ρ , ω и $K_{раз}$ от содержания глинистых пород и вулканического пепла (рисунок 4.3).

Минимальным пределом прочности при сжатии обладают образцы с содержанием глины месторождения Дэбуб 10 мас. % и вулканического пепла 5 мас. %, при этом прочность зависит от активности сырьевой смеси (см. рисунок 4.3, а). При содержании $CaO_{акт}$ 6, 8 и 10 % прочность составляет 12,94, 12,1 и 15,58 МПа соответственно, причем минимальная прочность образцов с содержанием $CaO_{акт}$ 8%.

С увеличением содержания глины Дэбуб и вулканического пепла прочность повышается, причем характер изменения прочности зависит от содержания извести. Образцы с минимальном 5 %-ным содержанием вулканического пепла и содержанием $CaO_{акт}$ 10 % обладают наибольшей прочностью. С повышением содержания глины Дэбуб прочность увеличивается с 15,58 до 20 МПа. При содержании вулканического пепла 25 мас. % наибольшая прочность у образцов с содержанием $CaO_{акт}$ 6 %. Максимальная прочность составляет 22,7 МПа.



Глина Дэбуб

Глина Маэкель

Латерит

Рисунок 4.3 – Физико-механические характеристики автоклавных силикатных материалов плотной структуры в зависимости от содержания глины и вулканического пепла:

a – предел прочности при сжатии; *б* – средняя плотность; *в* – водопоглощение;

г – коэффициент размягчения

Следовательно, при минимальном содержании вулканического пепла (10 мас. %) оптимальное количество $\text{CaO}_{\text{акт}}$ составляет 10 %, а при максимальном (25 мас. %) оптимальное содержание $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6 %. Это связано, вероятно, с тем, что в случае преобладания в сырьевой смеси вулканического пепла синтезируется более прочный состав цементирующего соединения и требуется меньше извести, чем в случае преобладания глины.

Средняя плотность для образцов на основе глины Дэбуб с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6 и 8 % выше, чем у образцов с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 % (см. рисунок 4.3, б). Средняя плотность образцов с содержанием глины 10 мас. %, вулканического пепла 5 мас. % и $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6–10 % составляет в пределах 1942–1950 кг/м³. При содержании вулканического пепла 5 мас. % с увеличением содержания глины средняя плотность практически не изменяется. Увеличение в сырьевой смеси содержания вулканического пепла и глины Дэбуб приводит к снижению средней плотности образцов. Например, для образцов, содержащих вулканический пепел 25 мас. % и глины 40 мас. % средняя плотность при активности сырьевой смеси $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6, 8 и 10 % составляет соответственно 1850, 1815 и 1770 кг/м³.

Водопоглощение силикатных материалов плотной структуры (см. рисунок 4.3, в), зависит от величины средней плотности (см. рисунок 4.3, б). С уменьшением средней плотности образцов водопоглощение повышается. Наименьшие значения водопоглощения соответствуют содержанию $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6 %. Увеличение содержания извести приводит к повышению водопоглощения. Минимальным водопоглощением обладают образцы с содержанием глины Дэбуб 10 мас. % и вулканического пепла 25 мас. %. При содержании $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6, 8 и 10 % водопоглощение составляет 6,3, 7,45 и 8,42 % соответственно. Максимальное водопоглощение для образцов с содержанием глины Дэбуб 40 мас. % и вулканического пепла 25 мас. % при содержании $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6, 8 и 10 % составляет соответственно 10,8, 11,25 и 11,56 %.

Полученные силикатные материалы всех составов обладают водостойкостью. Значения коэффициента размягчения составляют в пределах 0,78–0,95 (см.

рисунок 4.3, з). С повышением содержания глины Дэбуб и вулканического пепла величина коэффициента размягчения увеличивается.

Как и в случае с глиной Дэбуб минимальный предел прочности при сжатии также наблюдается у образцов с содержанием глины месторождения Маэгель 10 мас. % и вулканического пепла 5 мас. % (см. рисунок 4.3, а). При содержании $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10, 6 и 8 % прочность составляет 15,22, 15,88 и 16,83 МПа соответственно. С увеличением содержания глины Маэгель и вулканического пепла прочность повышается.

Наибольшей прочностью обладают образцы с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 8 %. С повышением содержания глины Маэгель при содержании вулканического пепла 5 мас. % прочность увеличивается с 16,83 до 18,46 МПа, т.е. на 9,7 %. В наибольшей степени при содержании глины 10 мас. % с увеличением содержания вулканического пепла до 25 мас. % прочность повышается до 23,66 МПа, что на 40,6 % выше, чем с содержанием вулканического пепла 5 мас. %. При таком составе сырьевой смеси прочность образцов с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 % несколько ниже и составляет 22,04 МПа. Следовательно, оптимальное количество $\text{CaO}_{\text{акт}}$ для сырьевой смеси с глиной Маэгель составляет 8 %.

Средняя плотность образцов, как и в случае с глиной Дэбуб с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6 и 8 % выше, чем у образцов с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 % (см. рисунок 4.3, б). Средняя плотность образцов с содержанием глины Маэгель 10 мас. %, вулканического пепла 5 мас. % и $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6–8 % составляет в пределах 1865–1883 кг/м³. Для образцов с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 % средняя плотность ниже и составляет 1815 кг/м³. При содержании вулканического пепла 5 мас. % с увеличением содержания глины до 40 мас. % средняя плотность практически не изменяется. Также средняя плотность практически не изменяется при содержании глины 10 мас. % с увеличением содержания вулканического пепла до 25 мас. %. Только с одновременным увеличением содержания глины и вулканического пепла происходит снижение средней плотности. При содержании вулканического пепла 25 мас. % и глины Маэгель 40 % при содержании $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6, 8 и 10 % средняя плотность составляет 1755, 1730, и 1670 кг/м³ соответственно.

Значения водопоглощения образцов на основе глины Маэгель, как показывают полученные данные (см. рисунок 4.3, в), зависят от величины средней плотности (см. рисунок 4.3, б). С уменьшением средней плотности образцов водопоглощение повышается. Практически для всех образцов наименьшие значения водопоглощения соответствуют содержанию $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6 %. Увеличение содержания извести приводит к повышению водопоглощения. Минимальным водопоглощением обладают образцы с содержанием глины Маэгель 10 мас. % и вулканического пепла 25 мас. %. При содержании $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6, 8 и 10 % водопоглощение составляет 7,78, 8,67 и 10,35 % соответственно. Максимальное водопоглощение достигается с увеличением содержания глины до 40 мас. % и вулканического пепла до 25 мас. %, При содержании $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6, 8 и 10 % водопоглощение составляет соответственно 11,15, 11,51 и 12,67 %.

Коэффициент размягчения для образцов с глиной Маэгель ниже, чем для образцов на основе глины Дебуб (см. рисунок 4.3, г). Образцы практически всех составов с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 % являются водостойкими, для которых коэффициент размягчения составляет 0,8–0,95. С уменьшением содержания извести водостойкость снижается. Минимальной водостойкостью обладают образцы с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6 %. Коэффициент размягчения составляет 0,7–0,85.

Минимальным пределом прочности при сжатии обладают образцы с содержанием латерита 10 мас. % и вулканического пепла 5 мас. % (см. рисунок 4.3, а). Образцы с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6 и 10 % обладают приблизительно одинаковой величиной прочности 12,11 и 12,84 МПа соответственно. Прочность образцов с 8 % $\text{CaO}_{\text{акт}}$ выше и составляет 14,66 МПа. Оптимальное содержание активной CaO составляет 8 %. С увеличением содержания латерита и вулканического пепла предел прочности при сжатии повышается при всех активностях сырьевой смеси. В наибольшей степени повышение прочности происходит при увеличении содержания вулканического пепла до 25 мас. % (содержание латерита 10 мас. %). При этом прочность составляет 21,56, 25,15 и 24,36 МПа при содержании $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6, 8 и 10 % соответственно. Повышение прочности составило 1,7–1,9 раза. Увеличение содержания латерита приводит к повышению прочности в меньшей степени. При

содержании латерита 40 мас. % прочность повышается с увеличением содержания вулканического пепла только до 15–20 мас. % и далее снижается.

Средняя плотность для образцов на основе латерита с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6 и 8 % выше, чем у образцов с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 % (см. рисунок 4.3, б). Средняя плотность образцов с содержанием латерита 10 мас. %, вулканического пепла 5 мас. % и $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 % составляет 1887 кг/м^3 . Для образцов с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6 и 8 % этот показатель выше и практически одинаковый – 1920 кг/м^3 . Средняя плотность образцов с содержанием вулканического пепла 5 мас. % при повышении содержания латерита незначительно повышается. Для образцов с более высоким содержанием вулканического пепла и повышением содержания латерита средняя плотность снижается. Минимальная средняя плотность 1715 кг/м^3 соответствует образцам с содержанием латерита 40 мас. %, вулканического пепла 25 мас. % и $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %.

Показатели водопоглощения у образцов на основе латерита с содержанием 10 % $\text{CaO}_{\text{акт}}$ больше, чем у образцов с содержанием 6 и 8 % $\text{CaO}_{\text{акт}}$, причем для последних значения водопоглощения приблизительно одинаковы (см. рисунок 4.3, в). Это связано, вероятно, меньшей плотностью упаковки материала у образцов с 10 мас. % извести, чем у образцов с 6 и 8 мас. % извести. Это подтверждается тем, что у образцов с 10 % $\text{CaO}_{\text{акт}}$ средняя плотность меньше (см. рисунок 4.3, б). Минимальным водопоглощением обладают образцы с содержанием латерита 5 мас. % и вулканического пепла 25 мас. %. При содержании $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6, 8 и 10 % водопоглощение составляет 7,93, 8,11 и 9,81 % соответственно.

Полученные силикатные материалы плотной структуры всех составов обладают высокой водостойкостью. Значения коэффициента размягчения превышают 0,8 (см. рисунок 4.3, г). Самые высокие значения коэффициента размягчения у образцов с содержанием 6 и 10 мас. %. С увеличением содержания латерита и вулканического пепла коэффициент размягчения снижается, что связано, вероятно, с повышением водопоглощения (см. рисунок 4.3, г).

Таким образом, с использованием метода математического планирования эксперимента получены математические модели влияние состава сырья на свой-

ства силикатных материалов плотной структуры, что позволяет определить оптимальные составы сырья для получения автоклавных силикатных материалов с заданными физико-механическими показателями. На основе изучаемого сырья можно получать водостойкий автоклавный кирпич с пределом прочности при сжатии 18–25 МПа.

4.3.2 Неавтоклавные силикатные материалы плотной структуры

Изучена возможность получения на основе глинистых пород и вулканического пепла неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры. Гидротермальная обработка проводилась в условиях пропарки при 95 °С. Для подбора рациональных составов сырьевой смеси для неавтоклавных материалов на основе глин месторождения Дэбуб и вулканического пепла исследования также были проведены с использованием метода математического планирования эксперимента [121].

Интервалы планирования трехфакторного эксперимента приведены в таблице 4.3. Сырьевые смеси и образцы готовили по методике получения автоклавных образцов. Гидротермальная обработка образцов проводилась в пропарочной камере при температуре 95 °С в течение времени 12 ч.

Получены уравнения регрессии (формулы 4.13–4.24) влияние содержания глинистых пород, вулканического пепла и активной извести на предел прочности при сжатии ($R_{сж}$), среднюю плотность (ρ), водопоглощение (ω) и коэффициент размягчения ($K_{раз}$) неавтоклавных материалов плотной структуры.

Глина Дэбуб

$$R_{сж} = 13,24 + 1,639x_1 + 4,176x_2 - 0,083x_3 + 0,793x_1^2 + 0,138x_2^2 - 0,457x_3^2 - 4.13 \\ - 0,143x_1x_2 - 0,265x_1x_3 - 0,672x_2x_3$$

$$\rho = 1876,586 - 38,1x_1 - 26,4x_2 - 36,1x_3 - 4,649x_1^2 - 16,989x_2^2 + 13,85x_3^2 - 4.14 \\ - 8,649x_1x_2 - 24,25 x_1x_3 - 16,75x_2x_3$$

$$\omega = 8,865 + 0,882x_1 - 1,51x_2 + 0,876x_3 + 0,768x_1^2 + 0,433x_2^2 - 0,042x_3^2 + 4.15 \\ + 0,887x_1x_2 + 0,48x_1x_3 + 0,345x_2x_3$$

$$K_{\text{раз.}} = 0,857 - 0,004x_1 + 0,056x_2 - 0,005x_3 - 0,022x_1^2 + 0,028x_2^2 + 4.16 \\ + 0,003x_3^2 + 0,015x_1x_2 + 0,005x_1x_3 - 0,015x_2x_3$$

Глина Маэжель

$$R_{\text{сж.}} = 14,31 + 0,451x_1 + 4,8446x_2 - 0,032x_3 - 1,2295x_1^2 + 0,315x_2^2 - 4.17 \\ - 0,434x_3^2 - 0,963x_1x_2 + 0,742x_1x_3 - 0,972x_2x_3$$

$$\rho = 1884,78 - 29,9x_1 - 39,3x_2 - 26,1x_3 - 22,26x_1^2 - 1,259x_2^2 + 3,74x_3^2 - 4.18 \\ - 20,875x_1x_2 + 1,375x_1x_3 - 3,875x_2x_3$$

$$\omega = 11,975 + 1,073x_1 - 1,887x_2 + 0,176x_3 + 1,464x_1^2 - 1,445x_2^2 - 1,0x_3^2 + 4.19 \\ + 0,065x_1x_2 - 0,06x_1x_3 - 0,397x_2x_3$$

$$K_{\text{раз.}} = 0,792 - 0,047x_1 + 0,083x_2 - 0,027x_3 - 0,0067x_1^2 + 0,028x_2^2 + 4.20 \\ + 0,007x_3^2 + 0,003x_1x_2 - 0,008x_1x_3 + 0,02x_2x_3$$

Латерит

$$R_{\text{сж.}} = 15,49 + 1,26x_1 + 4,11x_2 + 0,024x_3 - 1,405x_1^2 + 0,090x_2^2 - 0,615x_3^2 - 4.21 \\ - 0,867x_1x_2 - 0,41x_1x_3 - 0,235x_2x_3$$

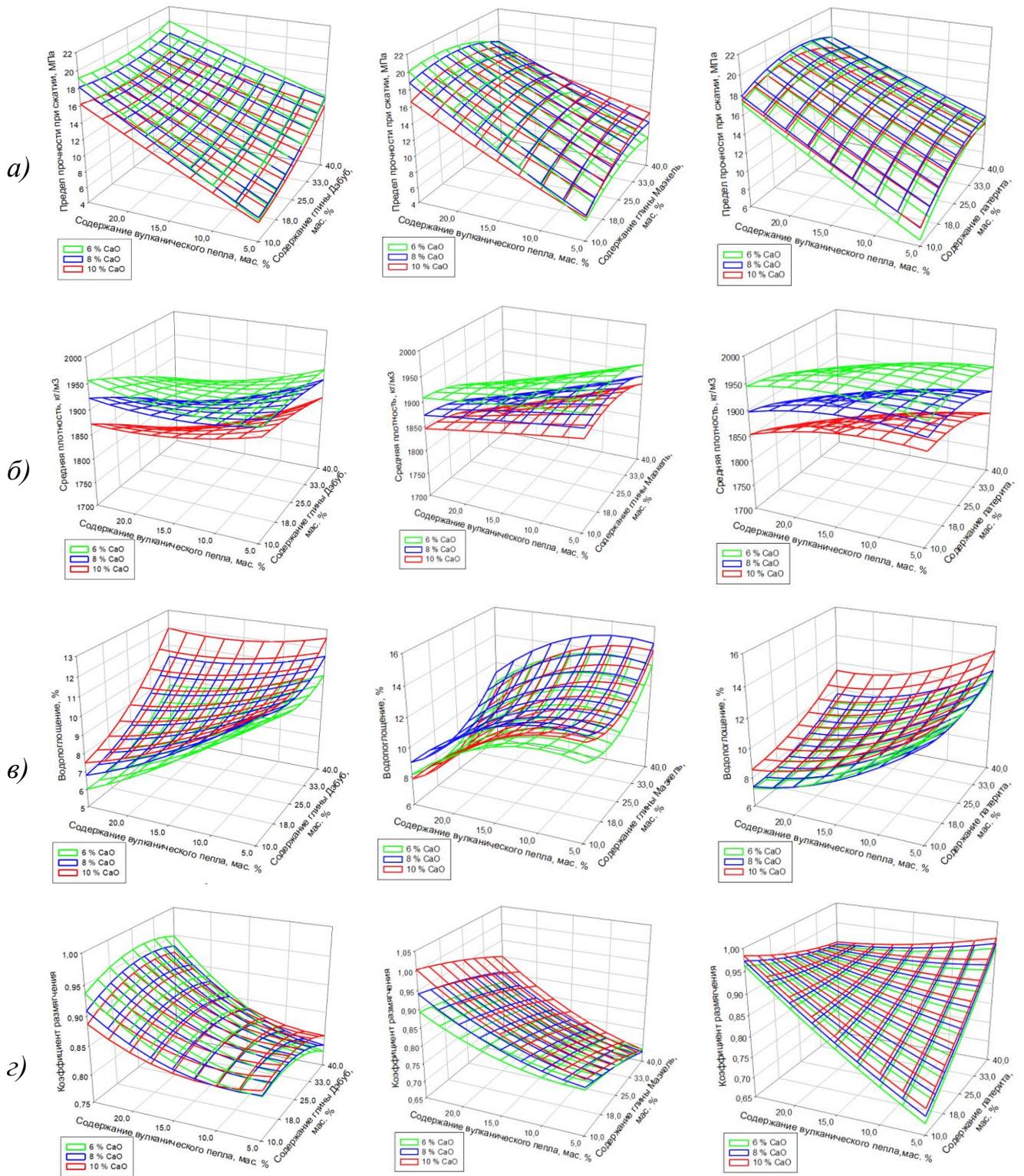
$$\rho = 1900,79 - 36,4x_1 - 25x_2 - 47,2x_3 - 16,998x_1^2 - 16,989x_2^2 - 4.22 \\ - 2,012x_3^2 - 18,25x_1x_2 - 10,75x_1x_3 - 9,5x_2x_3$$

$$\omega = 9,12 + 0,75x_1 - 2,11x_2 + 0,73x_3 + 0,60x_1^2 + 0,69x_2^2 + 0,54x_3^2 + 4.23 \\ + 0,39x_1x_2 + 0,29x_1x_3 + 0,22x_2x_3$$

$$K_{\text{раз.}} = 0,86 + 0,04x_1 - 0,06x_2 + 0,002x_3 + 0,001x_1^2 + 0,001x_2^2 - 4.24 \\ - 0,083x_1x_2 - 0,003x_1x_3 - 0,004x_2x_3$$

По уравнениям регрессии проведены расчеты и построены графики, позволяющие установить значения $R_{\text{сж.}}$, ρ , ω и $K_{\text{раз.}}$ от содержания глинистых пород, вулканического пепла и $\text{CaO}_{\text{акт}}$ (рисунок 4.4).

Характер влияния глины Дэбуб на физико-механические свойства неавтоклавных силикатных образцов (рисунок 4.4) практически не отличается от влияния на образцы, полученные автоклавным способом (рисунок 4.3). Однако для неавтоклавных образцов величины предела прочности при сжатии имеют меньшие значения, чем автоклавных.



Глина Дзэбуб

Глина Маэкель

Латерит

Рисунок 4.4 – Физико-механические характеристики неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры в зависимости от содержания глины и вулканического пепла:

a – предел прочности при сжатии; *б* – средняя плотность; *в* – водопоглощение;

г – коэффициент размягчения

Как автоклавные, так и неавтоклавные образцы обладают минимальным пределом прочности при сжатии с содержанием глины месторождения Дэбуб 10 мас. % и вулканического пепла 5 мас. % (см. рисунок 4.4, а). Величины прочности при содержании СаО_{акт} 6, 8 и 10 % составляют близкие значения, соответственно 6,6, 6,9 и 6,3 МПа. С увеличением содержания глины Дэбуб и вулканического пепла прочность повышается, причем вулканический пепел влияет на повышение прочности большей степени, чем глина. Образцы с содержанием СаО_{акт} 6 % обладают более высокой прочностью, чем с содержанием СаО_{акт} 8 и 10 %. Это связано, вероятно, с образованием более прочной микроструктуры новообразований. Наибольшей прочностью 20 МПа обладают образцы с содержанием глины 40 мас. %, вулканического пепла 25 мас. %, СаО_{акт} 6 %.

Характер изменения средней плотности неавтоклавных образцов (см. рисунок 4.4, б) совпадает с автоклавными образцами (см. рисунок 4.3, б). Увеличение содержания вулканического пепла и глины Дэбуб приводит к снижению средней плотности образцов. Средняя плотность для образцов с содержанием СаО_{акт} 6 и 8 % выше, чем у образцов с содержанием СаО_{акт} 10 % (см. рисунок 4.4, б). Максимальная средняя плотность 1955 кг/м³ достигается при содержании глины 10 мас. %, вулканического пепла 25 мас. %, СаО_{акт} 6 %, минимальная 1796 кг/м³ при содержании глины 40 мас. %, вулканического пепла 25 мас. % и СаО_{акт} 10 %.

Характер изменения водопоглощения и коэффициента размягчения для неавтоклавных (см. рисунок 4.4, в и г) и автоклавных образцов (см. рисунок 4.3, в и г) практически не отличается. Максимальное водопоглощение 12,54 % достигается при содержании глины Дэбуб 40 мас. %, вулканического пепла 10 мас. %, СаО_{акт} 10 %, минимальная 6 % при содержании глины 10 мас. %, вулканического пепла 25 мас. % и СаО_{акт} 6 % (см. рисунок 4.4, в). Максимальный коэффициент размягчения 0,96 % достигается при содержании глины 25 мас. %, вулканического пепла 25 мас. %, СаО_{акт} 6 %, минимальный 0,77 % при содержании глины 40 мас. %, вулканического пепла 5 мас. % и СаО_{акт} 6 % (см. рисунок 4.4, г). Неавтоклавные образцы на основе глины Дэбуб практически всех составов являются водостойкими.

Глинистая порода месторождения Маэкель оказывает такое же влияние на изменение предела прочности при сжатии неавтоклавных образцов (см. рисунок 4.4, *а*), что и глина месторождения Дэбуб. С увеличением содержания глины Маэкель и вулканического пепла прочность повышается, причем увеличение содержания вулканического пепла повышает прочность больше, чем глина. Минимальная прочность 6,5, 6,9, 7,14 МПа наблюдается для образцов с содержанием глины 10 мас. %, вулканического пепла 10 мас. % при содержании соответственно СаО_{акт} 6, 10, и 8 %. Максимальной прочностью 20,04 МПа обладают образцы с содержанием глины 25 мас. %, вулканического пепла 25 мас. % при содержании соответственно СаО_{акт} 6 %.

Изменение средней плотности неавтоклавных образцов на основе глины Маэкель (см. рисунок 4.4, *б*) имеет такой же характер, что и для глины Дебуб. Максимальная средняя плотность 1950 кг/м³ достигается при содержании глины Маэкель 25 мас. %, вулканического пепла 5 мас. %, СаО_{акт} 6 %, минимальная 1800 кг/м³ при содержании глины 40 мас. %, вулканического пепла 25 мас. % и СаО_{акт} 10 %.

Водопоглощение неавтоклавных образцов с увеличением содержания глины Маэкель повышается, а с увеличением содержания вулканического пепла уменьшается (см. рисунок 4.4, *в*). Максимальное водопоглощение при содержании глины Маэкель 40 мас. %, вулканического пепла 5 мас. %, СаО_{акт} 8 % составляет 14,89 %, минимальное (7,8 %) соответствует содержанию глины Маэкель 10 мас. %, вулканического пепла 40 мас. %, СаО_{акт} 10 %.

Коэффициент размягчения (см. рисунок 4.4, *г*) незначительно уменьшается с увеличением содержания глины Маэкель и существенно возрастает при повышении содержания вулканического пепла. Из рисунков 4.4, *в* и *г* следует, что чем меньше водопоглощение, тем выше коэффициент размягчения. Минимальный коэффициент размягчения 0,68 соответствует содержанию глины 40 мас. %, вулканического пепла 5 мас. % при содержании СаО_{акт} 6–10 %. Максимальный коэффициент размягчения соответствует содержанию глины 10 мас. %, вулканического пепла 25 мас. %. При содержании СаО_{акт} 6, 8 и 10 % величины составляют со-

ответственно 0,89, 0,94 и 0,99. Водостойкими являются образцы на основе глины Маэкель с содержанием вулканического пепла выше 15 мас. %.

Латерит оказывает такое же влияние на изменение предела прочности при сжатии неавтоклавных образцов, как и глины месторождения Дэбуб и Маэкель (см. рисунок 4.4, а). С увеличением содержания латерита и вулканического пепла прочность повышается, причем увеличение содержания вулканического пепла повышает прочность больше, чем латерит. Прочность образцов практически не зависит от содержания извести (см. рисунок 4.4, а). Максимальной прочностью обладают образцы с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6, 8 и 10 % соответственно 19,4, 19,7 и 18,9 МПа при содержании латерита и вулканического пепла по 25 мас. %. Минимальная прочность у образцов с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6, 8 и 10 % соответственно 6,5, 7,9, 8,0 МПа.

Подобное влияние, как и глины месторождения Дэбуб и Маэкель, латерит оказывает на среднюю плотность неавтоклавных образцов (см. рисунок 4.4, б). С увеличением содержания извести средняя плотность уменьшается. Максимальная средняя плотность 1959 кг/м^3 достигается при содержании латерита 10 мас. %, вулканического пепла 15 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6 %, минимальная 1720 кг/м^3 при содержании глины 40 мас. %, вулканического пепла 25 мас. % и $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %.

Водопоглощение неавтоклавных образцов с увеличением содержания латерита незначительно повышается, а увеличение содержания вулканического пепла приводит к существенному уменьшению водопоглощения (см. рисунок 4.4, в). Минимальное водопоглощение соответствует содержанию латерита 10 мас. % и вулканического пепла 25 мас. %. При содержании $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6, 8 и 10 % водопоглощение принимает значения соответственно 7,25, 7,35, 8,54 %. Максимальное водопоглощение соответственно составляет 12,8, 13 и 14,4 % при содержании латерита 40 мас. % и вулканического пепла 5 мас. %.

Коэффициент размягчения (см. рисунок 4.4, г) повышается с увеличением содержания латерита и вулканического пепла. Минимальным коэффициентом размягчения обладают образцы с содержанием латерита 10 мас. %, вулканического пепла 5 мас. %. Значения этого показателя составляют 0,67, 0,69, 0,71 % соответ-

ственно содержанию $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6, 8 и 10 %. Максимальный коэффициент размягчения соответствует содержанию латерита 10 мас. %, вулканического пепла 25 мас. %. При содержании $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 6, 8 и 10 % величины составляют соответственно 0,90, 0,97 и 0,98. Водостойкими являются образцы н с содержанием вулканического пепла выше 15 мас. % и латерита выше 25 мас. %.

Таким образом, с использованием метода математического планирования эксперимента получены математические модели влияние состава сырья на свойства силикатных материалов. С использованием в качестве сырья глины месторождения Дэбуб, месторождения Маэкель, латерита и вулканического пепла можно получать неавтоклавные силикатные материалы плотной структуры при гидротермальной обработке без давления. Прочностные показатели таких материалов ниже, чем материалов автоклавного твердения. Однако на основе изучаемого сырья можно получать водостойким неавтоклавный кирпич с пределом прочности при сжатии 16–20 МПа.

4.4 Рациональные составы силикатных материалов плотной структуры на основе алюмосиликатного сырья Государства Эритрея

Разработаны предельные составы автоклавных и неавтоклавных прессованных силикатных материалов на основе алюмосиликатного сырья Государства Этерия, позволяющие получать силикатные кирпичи и камни с прочностью на сжатие 16–20 МПа и 18–25 МПа соответственно, соответствующие классам средней плотности 2, маркам по прочности до М250, маркам по морозостойкости до 50, водопоглощению не ниже 6 % (таблица 4.1).

Для образцов рациональных составов были проведены испытания на воздухоустойкость, заключающиеся в действии попеременного увлажнения и высушивания. Считается допустимым после 100 циклов попеременного увлажнения-высушивания потеря прочности в сравнении с первоначальной прочностью до 20–25 %.

Таблица 4.4 – Рациональные составы силикатных материалов плотной структуры

№ сос- тава	Состав сырьевой смеси, мас. %				$R_{сж}$, МПа	ρ , кг/м ³	ω , %	$K_{раз}$	Воздухо- стойкость, % потери прочности	Соответствие ГОСТ 379–2015		
	Вяжущее		Заполнитель							Класс сред- ней плотно- сти	Марка по прочности	Марка по морозо- стойкости
	СаО _{акт}	Глинистая порода	ВП	Песок								
Автоклавные												
<i>Месторождение Дэбуб</i>												
1	6	10	25	59	22,80	1970	6,31	0,91	13,8	2,0	200	35
2	8	10	25	57	18,20	1835	11,23	0,92	12,4	2,0	150	35
3	10	10	25	55	19,70	1765	11,53	0,91	11,3	1,8	150	50
<i>Месторождение Маээль</i>												
4	6	10	25	59	22,70	1890	7,27	0,81	15,4	2,0	200	35
5	8	10	25	57	23,70	1875	8,39	0,81	14,2	2,0	200	35
6	10	10	25	55	22,00	1830	11,24	0,81	12,1	2,0	200	50
<i>Лаперит</i>												
7	6	10	25	59	21,50	1940	7,93	0,96	13,1	2,0	200	35
8	8	10	25	57	25,15	1940	8,11	0,90	12,7	2,0	250	50
9	10	10	25	55	24,30	1900	9,81	0,97	10,9	2,0	200	50
Неавтоклавные												
<i>Месторождение Дэбуб</i>												
10	6	40	25	71	20,15	1850	8,60	0,95	21,3	2,0	200	1
11	8	40	25	27	18,60	1795	10,50	0,93	20,3	1,8	150	25
12	10	10	25	55	16,15	1870	7,50	0,89	17,5	2,0	150	25
<i>Месторождение Маээль</i>												
13	6	10	25	59	20,10	1910	8,15	0,89	19,3	2,0	200	15
14	10	10	25	55	16,55	1845	7,80	0,99	17,1	2,0	150	25
15	8	25	25	42	19,50	1845	8,65	0,90	19,1	2,0	150	25
<i>Лаперит</i>												
16	6	25	25	44	19,30	1915	7,50	0,92	21,1	2,0	150	15
17	8	25	25	42	19,70	1860	7,90	0,92	19,6	2,0	150	25
18	10	25	25	40	18,85	1805	9,40	0,93	17,8	2,0	150	25

Коэффициент размягчения превышает величину 0,8, что свидетельствует о высокой водостойкости полученных материалов. Водопоглощение находится в пределах 6–10,3 %, что соответствует нормативным показателям. Автоклавные материалы после 100 циклов испытания на попеременное увлажнение-высушивание теряют от 10,9 до 21,3 % прочности, что является хорошим показателем по воздухостойкости.

Наибольший предел прочности при сжатии автоклавных образцов обеспечивают сырьевые смеси на основе латерита. Прочность составляет 20–25 МПа при средней плотности 1900–1940 кг/см³. Для этих материалов также отмечаются самые высокие значения коэффициента размягчения – 0,9–0,97.

Прочность образцов на основе глины Маэкель составляет 22,0–23,70 МПа, что несколько ниже, чем на основе латерита. Соответственно эти материалы обладают меньшей средней плотностью 1830–1890 кг/см³.

Еще меньшей прочностью обладают образцы на основе глины Дэбуб – 18,20–22,80 МПа. Средняя плотность для этих материалов изменяется в широких пределах – 1765–1970 кг/см³.

Полученные данные показывают, что наибольшими прочностными показателями обладают автоклавные материалы на основе латеритной глины. Необходимо отметить, что в случае использования в составе вяжущего только глинистой породы без вулканического пепла, наибольшую прочность обеспечивает глина Дэбуб (см. рисунок 4.1), наименьшую – латерит. Следовательно, использование дополнительно вулканического пепла в составе известково-глинистого вяжущего оказывает положительное влияние на повышение прочности даже при использовании вяжущего на основе извести и глин, которые оказывают отрицательное влияние на прочностные свойства автоклавных силикатных материалов.

Для неавтоклавных материалов предел прочности при сжатии составляет 16,55–20,15 МПа, что ниже прочности автоклавных.

Влияние глины Дебуб, Маэкель и латерита на прочностные показатели неавтоклавных материалов практически не отличаются. Средняя плотность, в зависимости от состава сырьевой смеси, составляет 1795–1915 кг/см³. Коэффициент

размягчения составляет 0,89–0,99, что свидетельствует о высокой водостойкости полученных материалов. Водопоглощение находится в пределах 7,5–10,5 %, что соответствует нормативным показателям. Потеря прочности неавтоклавных материалов после 100 циклов испытания на попеременное увлажнение-высушивание больше, чем у автоклавных материалов. Потери составляет от 17,1 до 21,3 %, что, однако, не выходит за пределы допустимых значений.

Проведены эксперименты с использованием песка месторождения Дэбуб. Песок отобран на территории администрации города Декемхаре в районе деревни Кейх-Кор. Модуль крупности песка составляет 2,6 (см. главу 3.5). Вяжущее готовили на основе латерита и вулканического пепла. Были выбраны рациональные составы сырьевой смеси, полученные на полифракционном песке. Параметры гидротермальной обработки соответствовали условиям, которые использовались при получении силикатных материалов на основе полифракционного песка. Составы сырьевых смесей и результаты экспериментов приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Рациональные составы автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры с использованием песка месторождения Дэбуб

№ состава	Состав сырьевой смеси, мас. %			$R_{сж}$, МПа	ρ , кг/м ³	ω , %	$K_{раз}$	Воздухостойкость, % потери прочности
	СаО _{акт}	Латерит	Вулканический пепел					
<i>Автоклавные материалы</i>								
1	6	10	25	22,70	1960	8,93	0,93	14,2
2	10	10	25	26,05	1935	9,32	0,95	11,8
3	6	25	15	20,10	1965	8,17	0,92	16,3
4	8	25	15	23,00	1955	9,26	0,89	13,9
<i>Неавтоклавные материалы</i>								
5	6	25	25	22,20	1935	7,85	0,94	21,7
6	8	25	25	23,10	1880	8,23	0,93	20,5
7	10	25	25	20,75	1835	9,20	0,91	18,9
8	6	10	25	19,90	1975	8,75	0,95	19,7

Результаты физико-механических испытаний силикатных материалов плотной структуры на основе песка Дэбуб подтверждают данные, полученные с использованием полифракционного песка. Предел прочности при сжатии автоклавных и неавтоклавных материалов составляет, соответственно, в пределах 20–26 и

20–23 МПа (см. таблицу 4.5), средняя плотность 1935–1965 и 1835–1975 кг/м³, водопоглощение 8,17–9,32 и 7,85–9,2 %. Значения коэффициента размягчения превышает 0,9, что свидетельствует о высокой водостойкости полученного материала. Все образцы прошли испытания на воздухостойкость. Следовательно, песок месторождения Дэбуб Государства Эритрея пригоден для получения силикатных материалов.

За счет природной окраски глинистых пород можно получать окрашенные силикатные материалы, в частности желтого, коричневого и красного цвета.

При производстве неавтоклавных силикатных материалов за счет снижения энергозатрат на гидротермальную обработку себестоимость производства снижается на 20 %.

Таким образом, предложены рациональные составы сырьевых смесей на основе глин месторождения Дэбуб, месторождения Маэкель, латерита и вулканического пепла, предназначенных для получения автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры. Использование вулканического пепла в составе известково-глинистого вяжущего оказывает положительное влияние на повышение прочности даже при использовании глин, которые оказывают отрицательное влияние на прочностные свойства автоклавных силикатных материалов. Предел прочности при сжатии автоклавных силикатных материалов составляет 18–25 МПа при средней плотности 1765–1970 кг/см³. Для неавтоклавных силикатных материалов прочность составляет 16–20 МПа при средней плотности 1795–1955 кг/см³. Водопоглощение автоклавных и неавтоклавных материалов находится в пределах 6–10,5 %, что соответствует нормативным показателям. Все полученные автоклавные и неавтоклавные силикатные материалы обладают высокой водостойкостью ($K_{\text{раз}} = 0,81–0,99$) и воздухостойкостью (потери прочности после 100 циклов попеременного увлажнения-высушивания не превышают 22,2 %).

4.5 Радиационно-защитные свойства силикатных материалов плотной структуры на основе латерита и вулканического пепла

Латерит отличается от других исследуемых глинистых пород высоким содержанием оксида железа (III), количество которого составляет 48,4 мас. % (см. таблицу 3.1). Силикатные материалы плотной структуры на основе латерита могут обладать повышенными радиационно-защитными свойствами. Исследования проводили по методике, приведенной в главе 2.2.6.

Для испытаний использовали силикатные материалы на основе латерита и вулканического пепла, полученные при автоклавной обработке и при пропаривании (неавтоклавные). В качестве контрольных образцов использовали образцы на основе традиционной известково-песчаной смеси. Источником излучения служил ^{60}Co , который помещался на дно полого свинцового цилиндра. Измерения проводили дозиметром-радиометром ДКС-96.

После проведения измерений для исследуемых образцов рассчитывали линейный μ , см^{-1} и массовый μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$ коэффициенты ослабления. Результаты измерения и расчетов для исследуемых материалов представлены в таблице 4.6 и на рисунке 4.5.

Таблица 4.6 – Радиационно-защитные свойства силикатных материалов Плотной структуры на основе латерита и вулканического пепла

Содержание латерита мас. %	Содержание вулканического пепла, мас. %	Содержание $\text{CaO}_{\text{акт}}$, %	m , г	ρ , $\text{г}/\text{см}^3$	d , см	I_0 , $\text{мкЗв}/\text{ч}$	I_i , $\text{мкЗв}/\text{ч}$	μ	
								μ , см^{-1}	μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$
<i>Автоклавные</i>									
0	0	8	5,443	1,770	0,61	10,9	9,71	0,1912	0,1080
40	25	10	4,843	1,750	0,56		9,59	0,2286	0,1306
25	15	8	5,304	1,900	0,56		9,58	0,2305	0,1213
<i>Неавтоклавные</i>									
40	25	10	5,065	1,755	0,55	10,9	9,60	0,2310	0,1316
25	15	8	5,427	1,910	0,57		9,52	0,2375	0,1243

Линейный коэффициент ослабления излучения для автоклавных материалов на основе известково-песчаного сырья составляет $0,1912 \text{ см}^{-1}$. Для автоклавных материалов на основе латерита и вулканического пепла коэффициенты ослабле-

ния, в зависимости от состава сырья, составляют $0,2286$ и $0,2305 \text{ см}^{-1}$, что выше на 19,6 и 20,5 %. Массовый коэффициент ослабления излучения также выше на 20,9 и 12,3 %.

Для неавтоклавных материалов также наблюдается увеличение линейного коэффициента ослабления излучения приблизительно в тех же пределах, что и для автоклавных материалов. Значения линейного коэффициента ослабления излучения составляет $0,2310$ и $0,2375 \text{ см}^{-1}$, что выше известково-песчаных материалов на 20,8 и 24,1 %. Массовый коэффициент ослабления излучения также выше на 21,9 и 15,1 %.

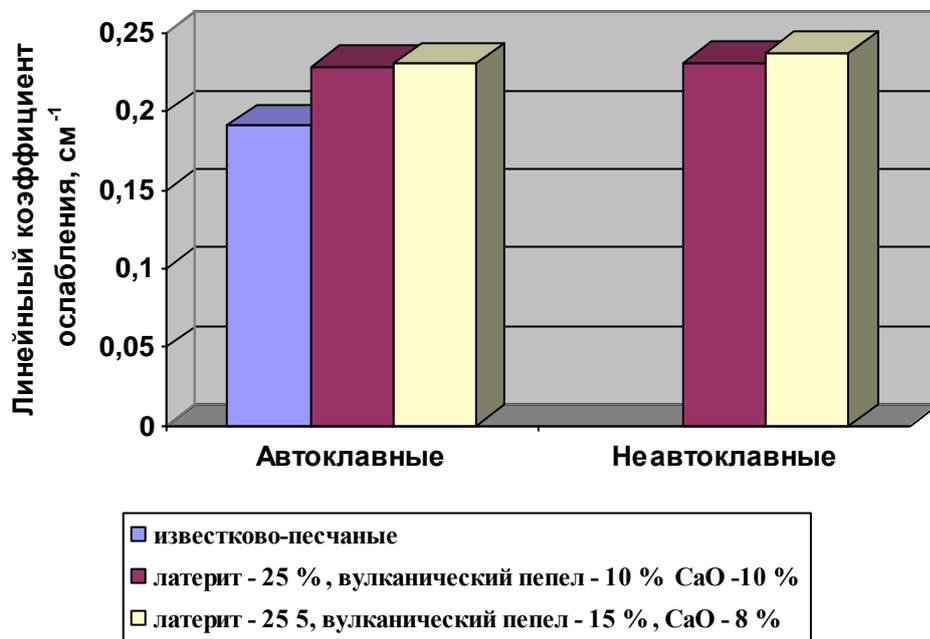


Рисунок 4.5 – Линейный коэффициент ослабления силикатных материалов на основе латерита и вулканического пепла

Таким образом, латерит и вулканический пепел в качестве сырья для получения автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры с высокими физико-механическими характеристиками и повышенными радиационно-защитными свойствами. Такие материалы можно использовать для строительства помещений с повышенной биологической защитой от ионизирующего излучения.

4.6 Фазообразование в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ на основе алюмосиликатных пород Государства Эритрея

4.6.1 Фазообразование в силикатных материалах плотной структуры на основе глины месторождения Дэбуб и вулканического пепла

Физико-механические свойства силикатных материалов определяются фазовым составом синтезируемых новообразований и структурой сформированного цементирующего вещества. Повышение прочностных показателей (см. главу 4) указывает на положительное влияние вяжущего на основе глинистых пород и вулканического пепла на синтез новообразований и микроструктуру цементирующего вещества. Для изучения фазового состава новообразований образцов на основе глины Дэбуб использовали рентгенофазовый анализ (рисунок 4.6–4.9).

Для исследований использовали образцы с содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 мас. %. Данные рентгенофазового анализа как автоклавных, так и неавтоклавных материалов плотной структуры показывают наличие кварца (4,258; 3,346; 1,819 Å) и полевого шпата (3,246; 3,202 Å), которые входят в состав исходного сырья. На рентгенограммах автоклавных силикатных материалах присутствуют рефлекс 11,422 Å, причем в образцах с содержанием глины Дэбуб 40 мас. % и вулканического пепла 25 мас. % рефлекс более интенсивный, чем в образцах с содержанием глины Дэбуб 10 мас. % и вулканического пепла 5 мас. % (см. рисунок 4.6 и 4.7). Это, вероятно, свидетельствует о синтезе в автоклавных условиях тоберморита $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$. В данной системе возможно образование низкоосновных гидросиликатов кальция CSH(B) (рефлекс 3,038 Å). Вместе с тем данный рефлекс совпадает с отражением карбоната кальция, который образуется при карбонизации гидроксида кальция, который зафиксирован на рентгенограммах (рефлекс 2,625 Å).

На рисунке 4.7 интенсивность рефлекса Ca(OH)_2 меньше, чем на рисунке 4.6, что связано с более высоким содержанием в сырьевой смеси глины Дэбуб и вулканического пепла, которые более полно связывают известь. Соответственно, синтезируется более высокое количество гидросиликатов CSH(B) , так как рефлекс 3,038 Å больше, чем в образцах с содержанием глины 10 мас. % и вулканического

держании 10 мас. % глины и 5 мас. %, что свидетельствует о синтезе гидросиликатов кальция (см. рисунок 4.8 и 4.9). Возможно также образование гидрогранатов (рефлекс 2,758 Å).

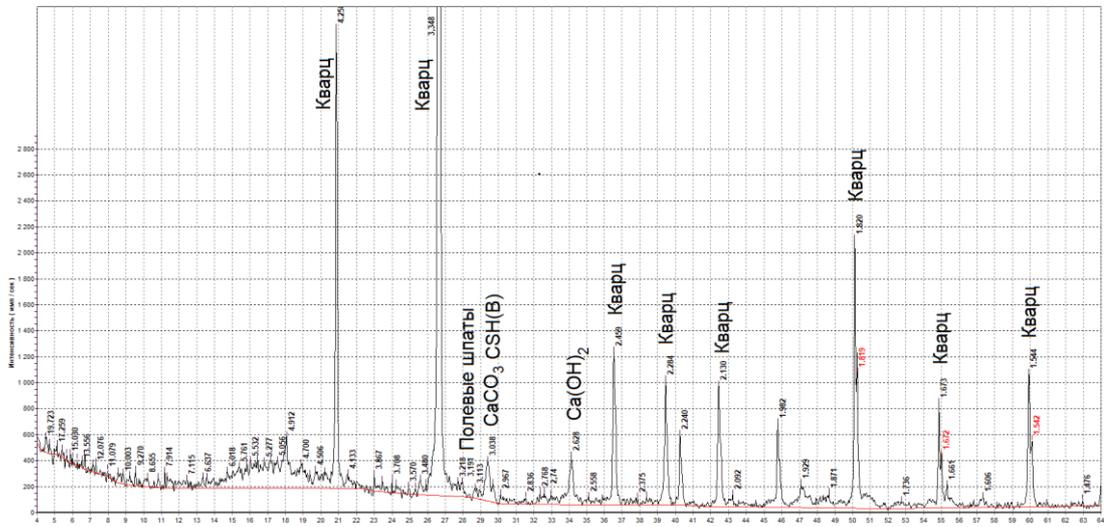


Рисунок 4.8 – Рентгенограмма неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры с содержанием глины Дэбуб 10 мас.%, вулканического пепла 5 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %

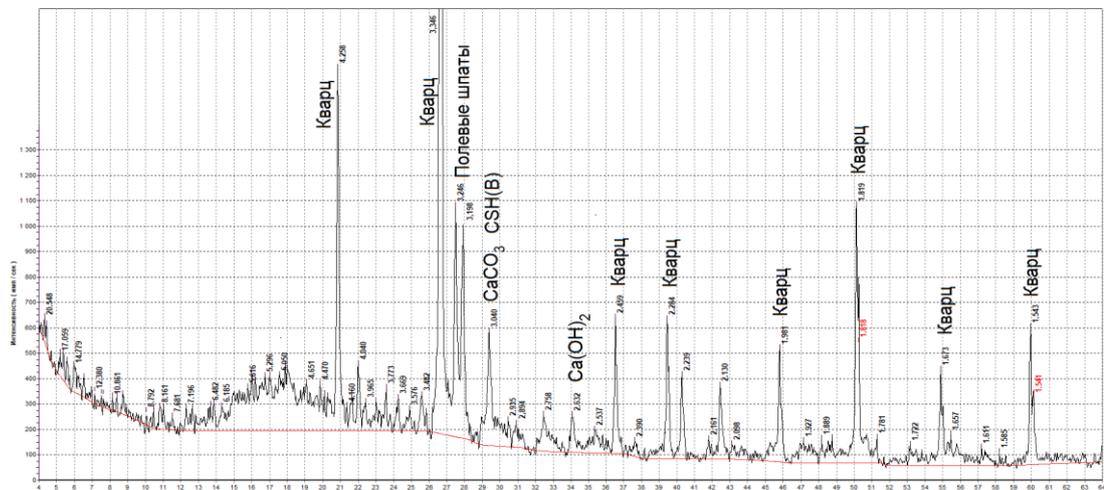


Рисунок 4.9 – Рентгенограмма неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры с содержанием глины Дэбуб 40 мас.%, вулканического пепла 25 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %

Микроструктуру автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе глины Дэбуб и вулканического пепла изучали на растровом электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU в режиме фиксации вторичных электронов (SE), что хорошо отображает морфологию и топографию поверхности образцов (рисунок 4.10 и 4.11).

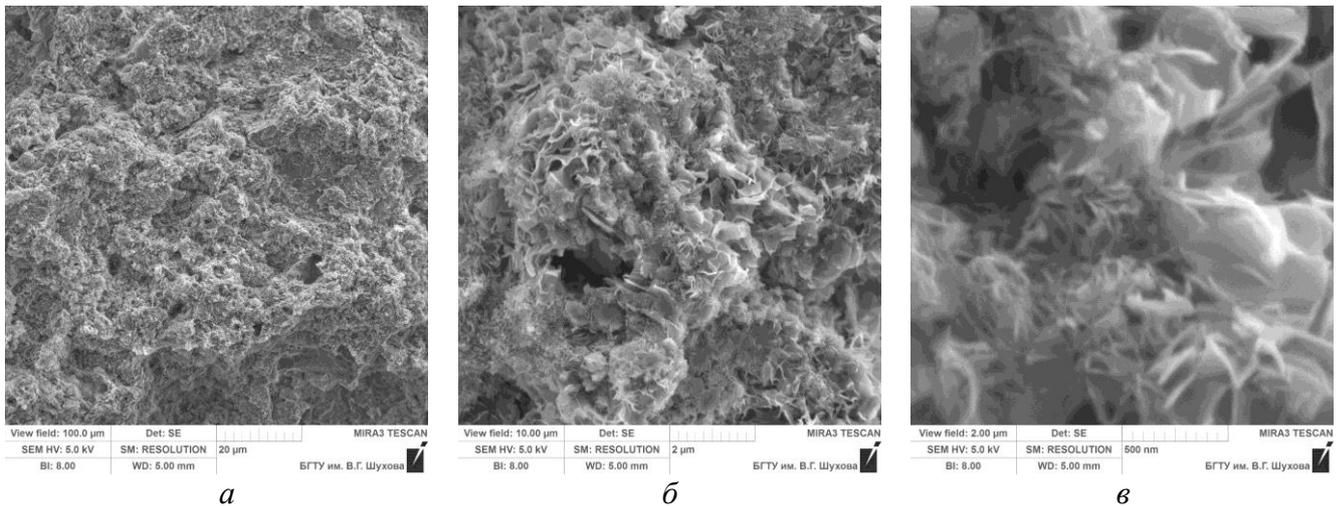


Рисунок 4.10 – Микроструктура автоклавных силикатных материалов плотной структуры с содержанием глины Дэбуб 40 мас. %, вулканического пепла 25 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %, ПЕМ (SE):

$a - \times 1000$; $b - \times 10000$; $c - \times 50000$

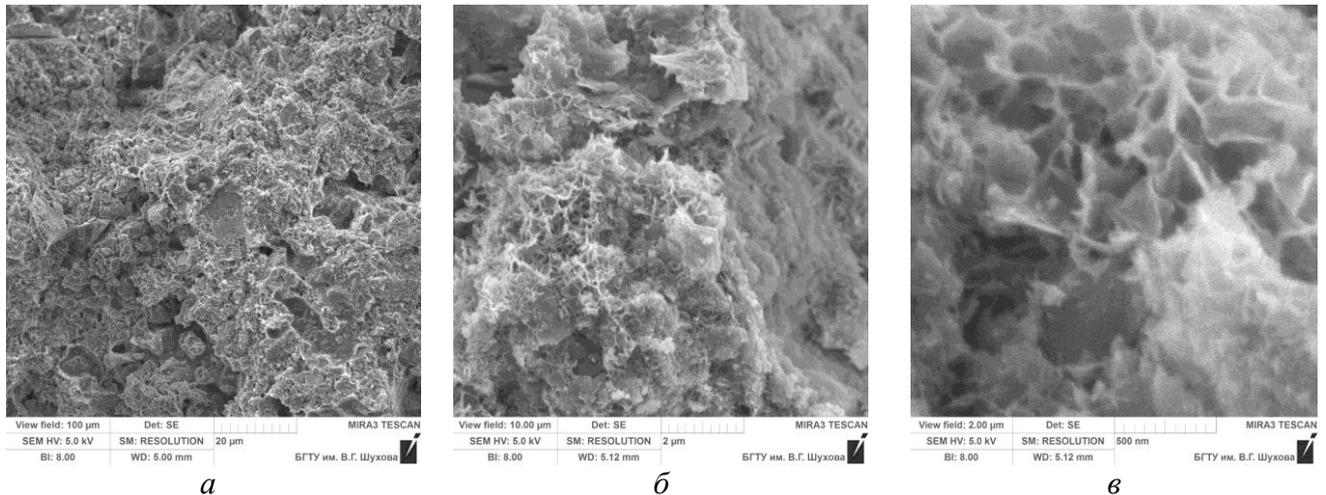


Рисунок 4.11 – Микроструктура неавтоклавных силикатных плотной структуры материалов с содержанием глины Дэбуб 40 мас.%, вулканического пепла 25 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %, ПЕМ, (SE):

$a - \times 1000$; $b - \times 10000$; $c - \times 50000$

Силикатные материалы автоклавного и неавтоклавного твердения характеризуются наличием плотных агрегатов размером 10–20 мкм, между которыми преимущественно находится связующее вещество. Таковую микроструктуру можно отнести к матричной (см. рисунок 4.10, *a* и 4.11, *a*).

Цементирующее вещество, как в автоклавных, так и безавтоклавных материалах представляет собой пластинки, часть которых изогнуты, переплетенные и контактирующие между собой (см. рисунок 4.10, *b*, *c* и 4.11, *b*, *c*). В автоклавных материалах эти пластинки хорошо окристаллизованы, имеют четкие грани в отли-

чие от новообразований в неавтоклавных материалах, где образуется сплошная непрерывная пространственная сетка. Эти сетки связывают между собой частицы песка и агрегаты, которые, очевидно, также представляют собой продукты взаимодействия между компонентами сырьевой смеси, имеющие более плотную микроструктуру. Новообразования в виде пластинок являются низкоосновными гидросиликатами кальция, в частности тоберморитом $C_5S_6H_5$. Размеры платин новообразований составляют 100–500 нм, толщина – 10–20 нм (см. рисунок 4.10, в и 4.11, в). Необходимо отметить, что пластины кристаллов тоберморита, сформированные в автоклавных условиях более крупные, чем образовавшиеся в условиях пропарки. Так как в качестве сырья используются алюмосиликатные породы, следовательно, наиболее вероятно образование алюминийсодержащего тоберморита. Синтез тоберморита в неавтоклавных материалах свидетельствует о высокой реакционной способности компонентов сырья на основе глины и вулканического пепла. Однако новообразования в неавтоклавных материалах менее окристаллизованы и частично имеют гелеобразную форму.

Вулканический пепел содержит преимущественно рентгеноаморфную фазу и полевой шпат, представленный микроклином $K[AlSi_3O_8]$ и анортитом $Ca[Al_2Si_2O_8]$ (см. главу 3.4). Кварц в породе практически отсутствует. Кремнезем, присутствующий в породе в количестве 68,82 мас. % (см. таблицу 3.4), входит в состав полевых шпатов и рентгеноаморфной фазы, а также слюды и роговой обманки. Вулканический пепел увеличивает в составе вяжущего содержание кремнезема и уменьшает соотношение Al_2O_3/SiO_2 (см. главу 3.6), что обуславливает пригодность породы для производства силикатных материалов.

Очевидно, минеральный состав вулканического пепла определяет его высокую активность в составе известково-глинистого вяжущего как при автоклавной обработке, так и в условиях пропарки. При этом ускоряются процессы фазообразования, обеспечивается синтез тоберморита и формируется микроструктура цементирующего вещества, обеспечивающая высокие физико-механические показатели силикатных материалов.

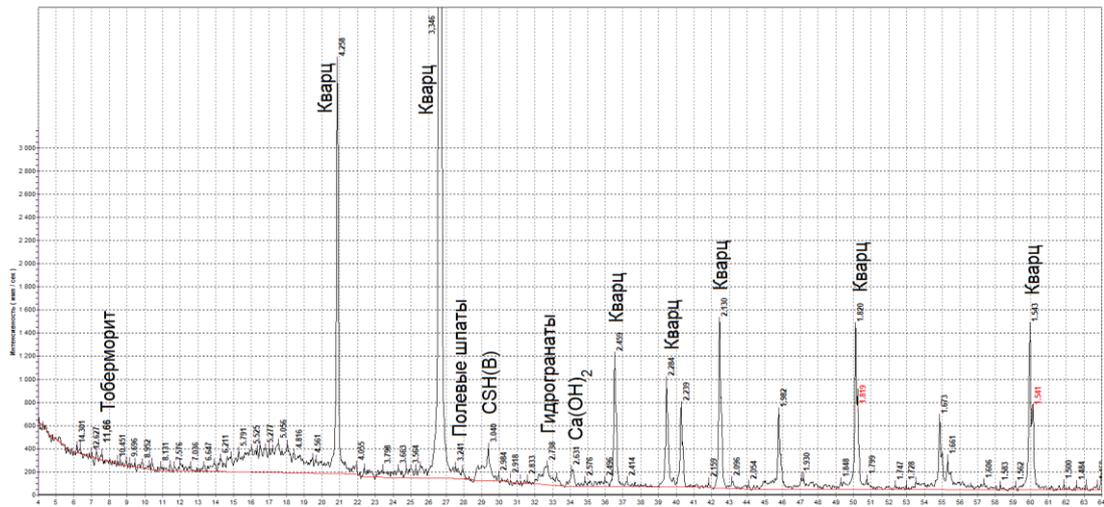
Таким образом, глина месторождения Дэбуб и вулканический пепел обеспечивают высокую реакционную способность сырьевой смеси, как в условиях автоклавной обработки, так и в условиях пропарки при 95 °С. В результате взаимодействия полиминерального сырья с известью образуются гидросиликаты кальция, алюминийсодержащий тоберморит и гидрогранаты. При этом формируется микроструктура цементирующего вещества, обеспечивающая высокие физико-механические показатели как автоклавных, так и безавтоклавных силикатных материалов плотной структуры.

4.6.2 Фазообразование в силикатных материалах плотной структуры на основе глины месторождения Маэкель и вулканического пепла

Для изучения фазового состава новообразований образцов на основе глины Маэкель использовали рентгенофазовый анализ и дифференциально-термический анализ (рисунок 4.12–4.18).

По данным рентгенофазового анализа образцы всех материалов содержат кварц (4,258; 3,346; 1,819 Å) и полевой шпат (3,241; 3,216, 3,200 Å) (см. рисунок 4.12–4.15), которые входят в состав исходного сырья. На рентгенограмме автоклавных силикатных материалов с содержанием глины Маэкель 40 мас. % и вулканического пепла 25 мас. % присутствует рефлекс 11,191 Å, который, вероятно, относится к тобермориту (см. рисунок 4.13). В образцах с содержанием глины 10 мас. % и вулканического пепла 5 мас. % этот рефлекс выражен слабо (см. рисунок 4.12).

В неавтоклавных образцах с содержанием глины Маэкель 40 мас. % и вулканического пепла 25 мас. % отмечается рефлекс 11,451 Å (см. рисунок 4.15), который также, вероятно, относится к тобермориту (см. рисунок 4.15). В образцах с содержанием глины Маэкель 10 мас. % и вулканического пепла 5 мас. % отмечается незначительный рефлекс 11,392 (см. рисунок 4.14). Как и в случае с глиной Дэбуб, с глиной Маэкель наиболее вероятно образование алюминийсодержащего тоберморита.



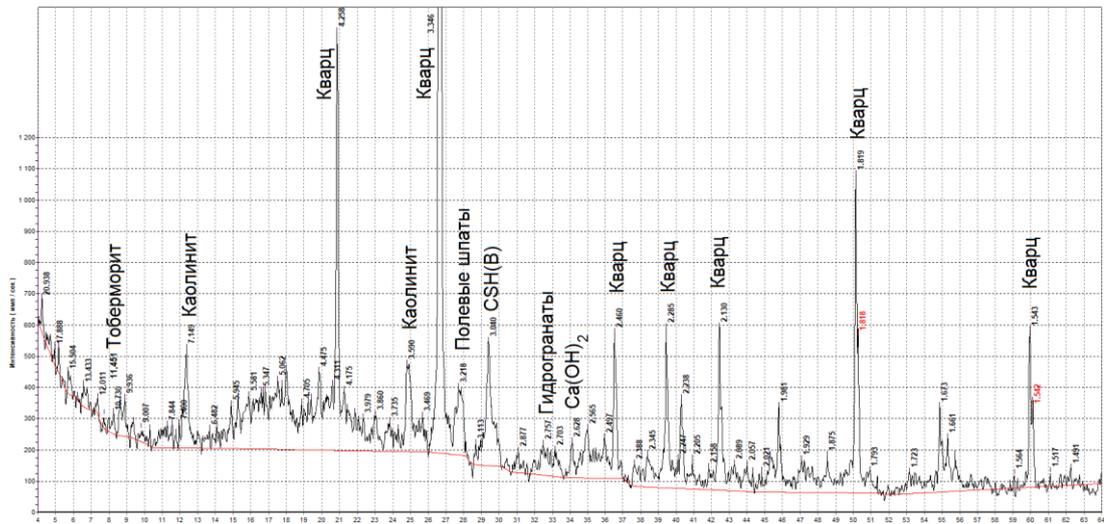


Рисунок 4.15 – Рентгенограмма неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры с содержанием глины Дзубуб 40 мас. %, вулканического пепла 25 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %

Возможно образование низкоосновных гидросиликатов кальция CSH(B) 3,038–3,042 Å. Вместе с тем, данные отражения, как отмечено выше, совпадают с рефлексом карбонатом кальция, который образуется при карбонизации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 2,62–2,63 Å.

Сравнивая интенсивности рефлексов для $\text{Ca}(\text{OH})_2$ установлено, что в неавтоклавных силикатных материалах с содержанием глины Маэфель 40 мас. % и вулканического пепла 25 мас. % количество несвязанного гидроксида кальция меньше, чем в образцах с содержанием глины Маэфель 10 мас. % и вулканического пепла 5 мас. %. В тоже время интенсивность рефлексов CSH(B) 3,038–3,040 Å, наоборот, выше (см. рисунок 4.14 и 4.15). Это свидетельствует о высокой реакционной способности сырьевой смеси на основе глины Маэфель и вулканического пепла в условиях пропарки. В данной системе, как в автоклавных условиях, так и в условиях пропарки также вероятно образование гидрогранатов (рефлекс 2,757–2,765 Å).

Для проведения термического анализа использовали дериватограф, сочетающий дифференциально-термический анализ (ДТА) с термогравиметрией (ТГ).

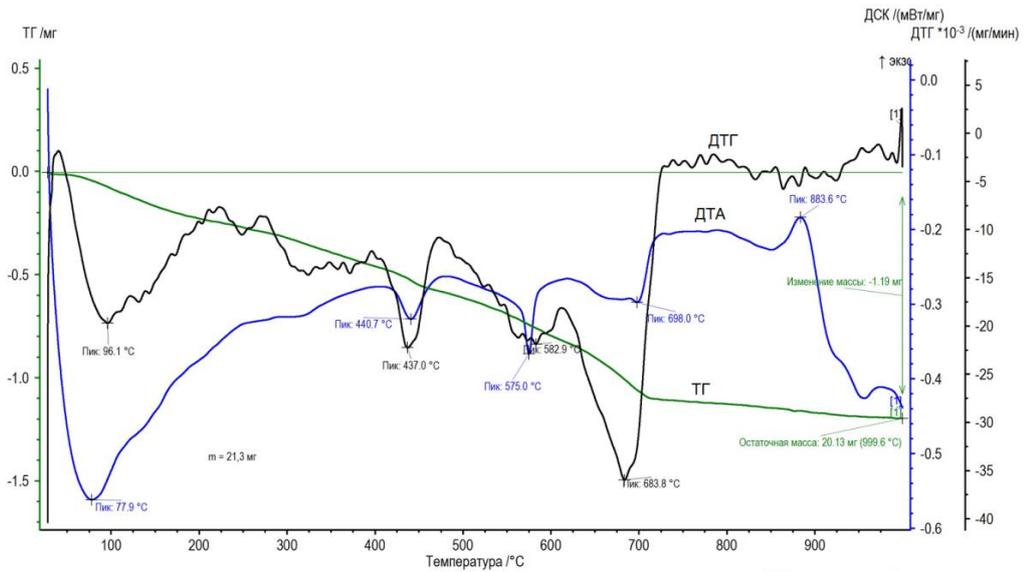


Рисунок 4.16 – Дериватограмма автоклавных силикатных материалов плотной структуры с содержанием глины Маэкель 10 мас.%, вулканического пепла 5 мас. %, СаО_{акт} 10 %

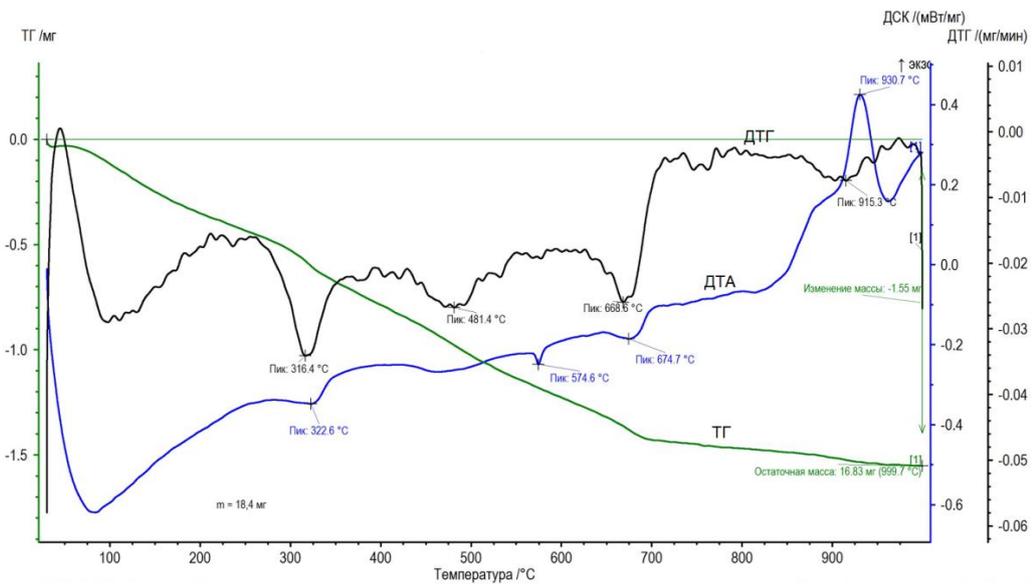


Рисунок 4.17 – Дериватограмма автоклавных силикатных материалов плотной структуры с содержанием глины Маэкель 40 мас.%, вулканического пепла 25 мас. %, СаО_{акт} 10 %

На кривой ДТА образцов наблюдается эндотермический эффект при 78–85 °С (см. рисунок 4.16–4.18), что сопровождается потерей массы образцов за счет удаления сорбционной воды (кривые ТГ и ДТГ). Эндотермический эффект при 322 °С и потеря массы при этом относится, вероятно, к присутствию гидрогранатов. Эндотермический эффект при 575 °С соответствует полиморфному превращению кварца.

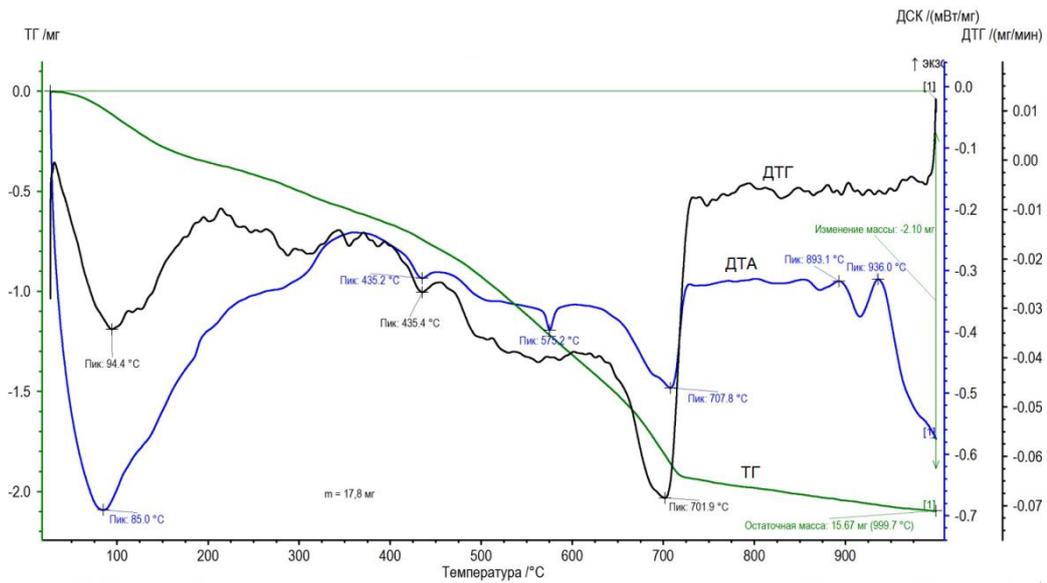


Рисунок 4.18 – Дериватограмма неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры с содержанием глины Маэжель 40 мас.%, вулканического пепла 25 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %

На кривой ДТА автоклавных материалов с содержанием глины Маэжель 10 мас. % и вулканического пепла 5 мас. % отмечается эндотермический эффект дегидратации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при 437 °C (см. рисунок 4.16), который отсутствует у автоклавных материалов с содержанием глины Маэжель 40 мас. % и вулканического пепла 25 мас. % (см. рисунок 4.17). В неавтоклавных материалах с содержанием глины Маэжель 40 мас. % и вулканического пепла 25 мас. % (см. рисунок 4.18) остается небольшое количество несвязанной извести (эндоэффект при 435 °C). Следовательно, фазообразование в сырьевой смеси проходит за счет взаимодействия извести с глиной и вулканическим пеплом, причем этот процесс протекает интенсивно и в условиях пропарки, что свидетельствует о высокой реакционной способности сырьевой смеси.

Интенсивный эндотермический эффект при 674–707 °C на кривых ДТА, сопровождающийся потерей массы (см. кривые ТГ и ДТГ) наблюдается в автоклавных образцах с содержанием глины Маэжель 10 мас. % и вулканического пепла 5 мас. % и неавтоклавных образцах с содержанием глины Маэжель 40 мас. % и вулканического пепла 25 мас. %, который, вероятно, относится к наличию комплексного соединения слабоокристаллизованных гидросиликатов кальция и карбоната кальция (карбосиликату кальция). В автоклавных образцах с содержанием глины Маэжель 40 мас. % и вулканического пепла 25 мас. % этот эффект выражен слабо, так как в

условиях автоклавной обработки при условии достаточного количества глины и вулканического пепла формируются хорошо окристаллизованные гидросиликаты кальция, в частности, тоберморит. Экзотермические эффекты при 930 и 936 °С свидетельствуют о наличии в образцах каолинита.

Таким образом, глина месторождения Маэкель и вулканический пепел обеспечивают высокую реакционную способность сырьевой смеси, как в условиях автоклавной обработки, так и в условиях пропарки при 95 °С. Состав новообразований, представленный низкоосновными гидросиликатами кальция, карбосиликатом кальция, алюминийсодержащим тоберморитом и гидрогранатами формирует прочную микроструктуру цементирующего вещества.

4.6.3 Фазообразование в силикатных материалах плотной структуры на основе латерита и вулканического пепла

Для изучения фазового состава новообразований использовали рентгенофазовый и дифференциально-термический анализ (рисунок 4.19–4.24).

Данные рентгенофазового анализа показывают наличие кварца (4,258; 3,346; 1,819 Å), а также минералов исходного сырья, в частности каолинита (7,172; 3,579 Å), гидрослюды (9,98 Å) и лимонита (2,684 Å), которые четко фиксируются в автоклавных и неавтоклавных образцах с содержанием латерита 40 мас. % (см. рисунок 4.20 и 4.22). Наличие каолинита подтверждают данные дифференциально-термического анализа, на которых фиксируется экзотермический эффект при 930–944 °С (см. рисунок 4.23 и 4.24).

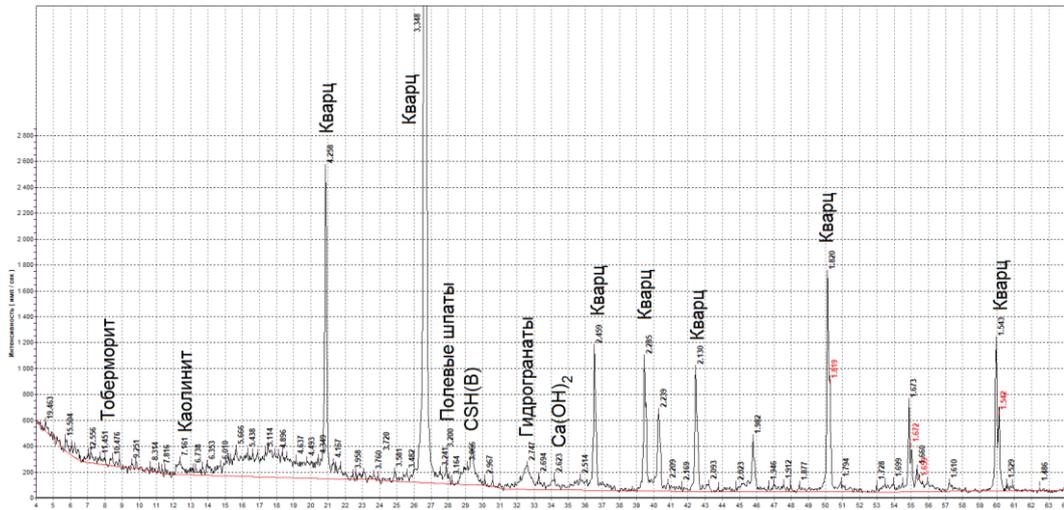


Рисунок 4.19 – Рентгенограмма автоклавных силикатных материалов плотной структуры с содержанием латерита 10 мас. %, вулканического пепла 5 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %

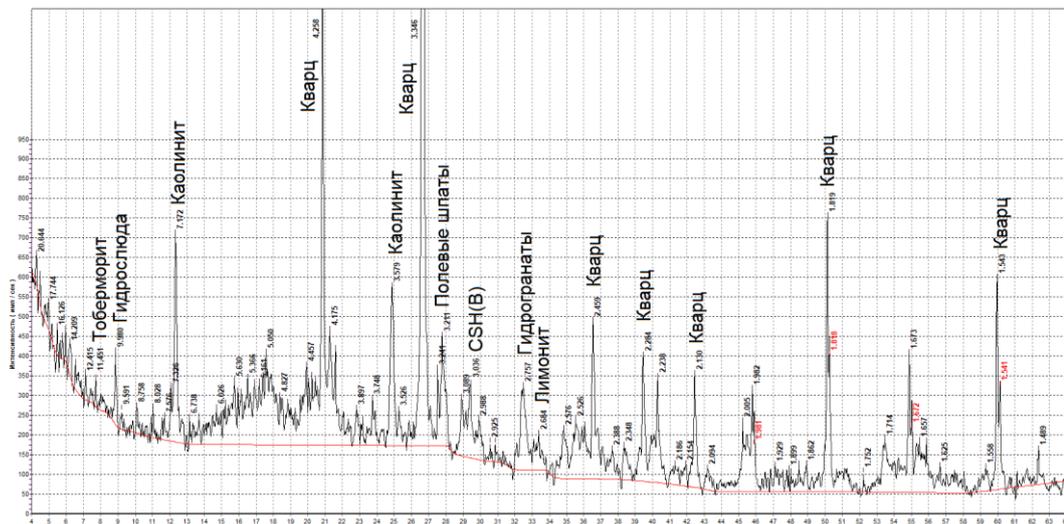


Рисунок 4.20 – Рентгенограмма автоклавных силикатных материалов плотной структуры с содержанием латерита 40 мас. %, вулканического пепла 25 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %

В образцах автоклавного твердения с содержанием латерита 10 мас. % и вулканического пепла 5 мас. % присутствует небольшой рефлекс 2,62 Å, характерный для несвязанного гидроксида кальция (см. рисунок 4.19). В образцах с содержанием латерита 40 мас. % и вулканического пепла 25 мас. % несвязанный гидроксид кальция не фиксируется (см. рисунок 4.20).

Для неавтоклавных образцов рефлекс 2,62 Å выражен более четко, причем наиболее сильно в образцах с 10 мас. % латерита, что свидетельствует о неполном связывании гидроксида кальция (см. рисунок 4.21 и 4.22).

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (см. рисунок 4.24). В автоклавных образцах с содержанием латерита 40 мас. % и вулканического пепла 25 мас. % несвязанная известь не фиксируется (см. рисунок 4.23). Отсутствие несвязанной извести или ее небольшое количество в случае неавтоклавных образцов с высоким содержанием латерита и вулканического пепла, свидетельствует о высокой реакционной способности минералов используемого сырья.

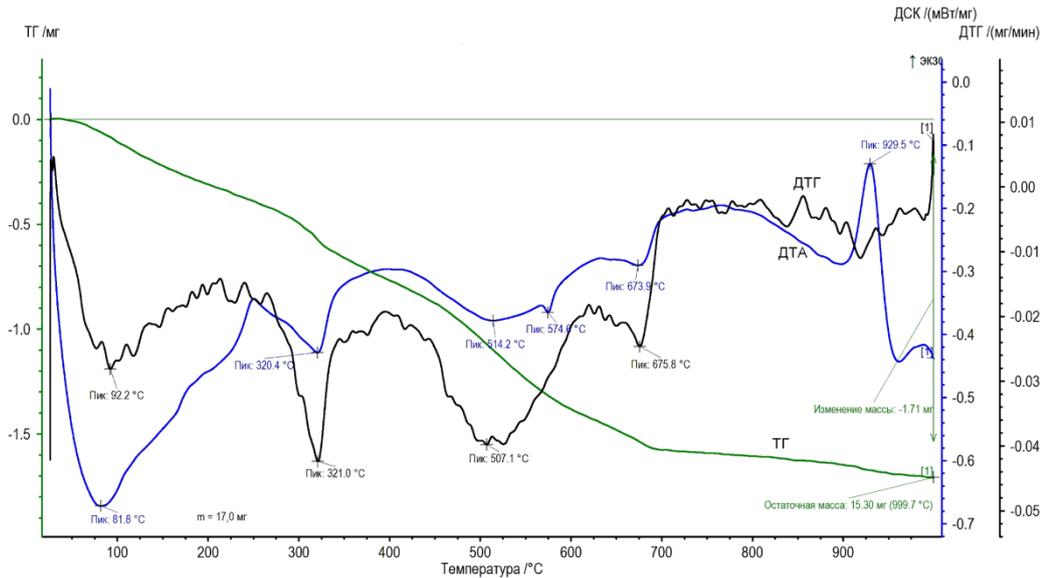


Рисунок 4.23 – Дериватограмма автоклавных силикатных материалов плотной структуры с содержанием латерита 40 мас.%, вулканического пепла 25 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %

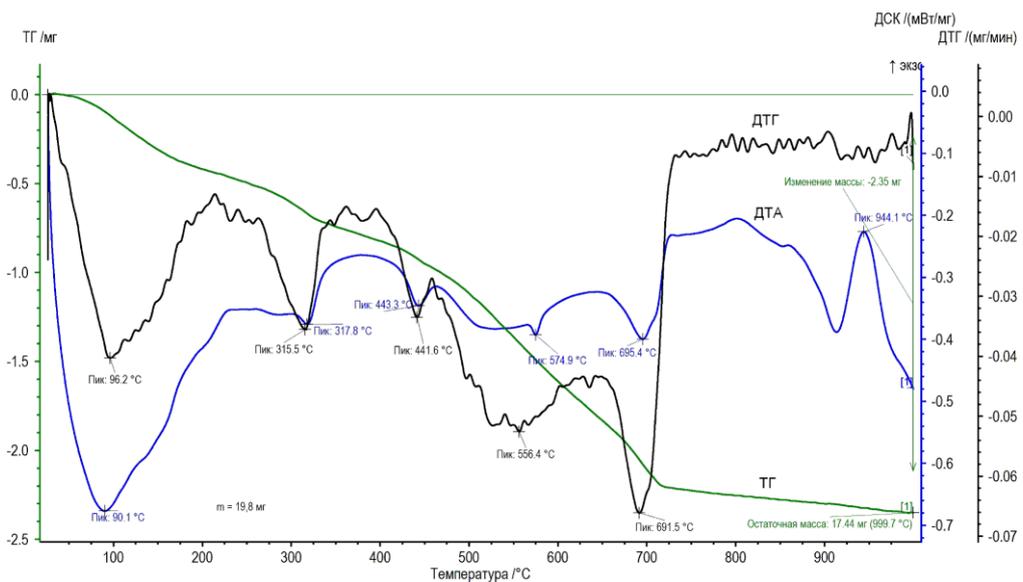


Рисунок 4.24 – Дериватограмма неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры с содержанием латерита 10 мас.%, вулканического пепла 5 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %

Интенсивный эндотермический эффект при 675–691 °С на кривых ДТА, сопровождающийся потерей массы наблюдается в неавтоклавных образцах с содержанием латерита 10 мас. % и вулканического пепла 5 мас. % (см. рисунок 4.24), который как и в случае сырья на основе глины Маэгель относится к наличию комплексного соединения слабокристаллизованных гидросиликатов кальция и карбоната кальция. Для автоклавных образцов с содержанием латерита 40 мас. % и вулканического пепла 25 мас. % этот эффект выражен слабее (см. рисунок 4.23).

Микроструктуру автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе латерита и вулканического пепла изучали на растворах электронном микроскопе в режиме фиксации вторичных электронов (SE) (рисунок 4.25 и 4.26).

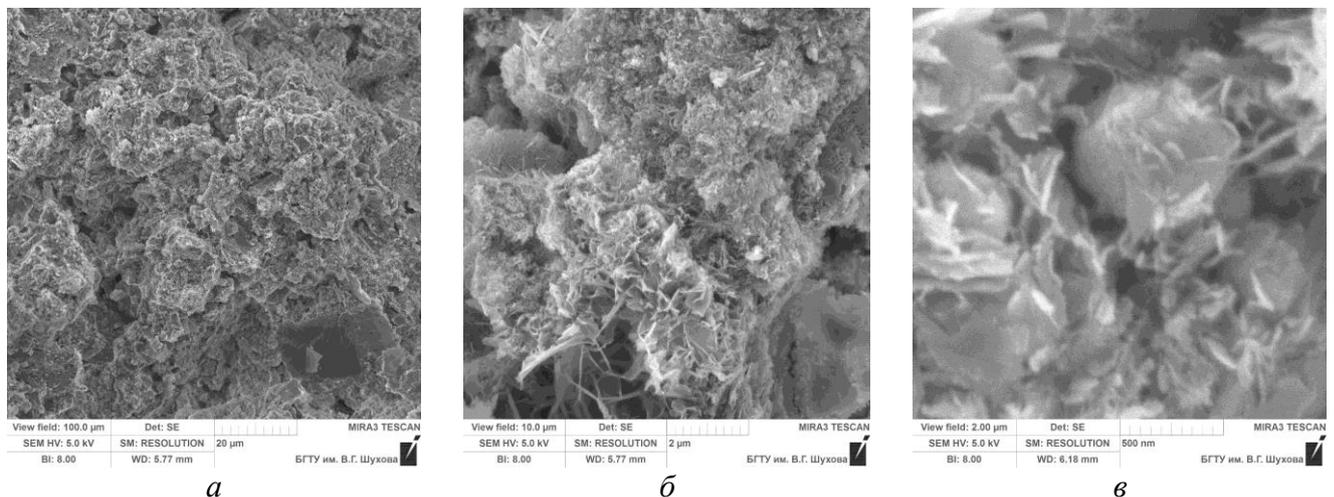


Рисунок 4.25 – Микроструктура автоклавных силикатных материалов плотной структуры с содержанием латерита 40 мас. %, вулканического пепла 25 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %, ПЕМ: $a - \times 1000$; $б - \times 10000$; $в - \times 50000$

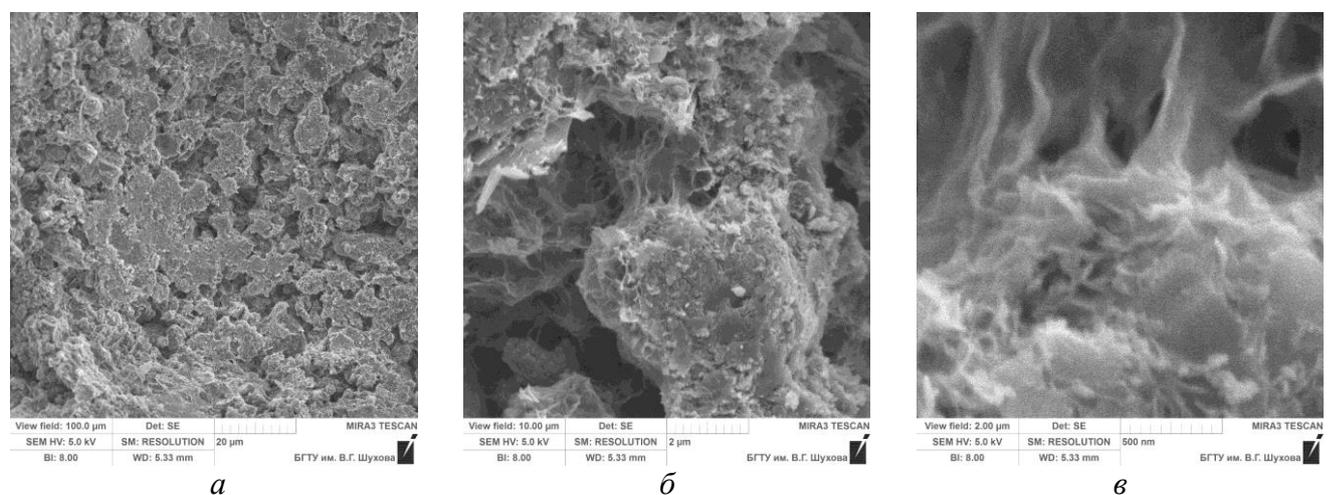


Рисунок 4.26 – Микроструктура неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры с содержанием латерита 40 мас.%, вулканического пепла 25 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %, ПЕМ: $a - \times 1000$; $б - \times 10000$; $в - \times 50000$

Структура материалов автоклавного и неавтоклавного твердения характеризуется как матричная (см. рисунок 4.25 и 4.26, *a*). Между плотными агрегатами, размеры которых достигают 10–20 мкм, находится связующее вещество.

Цементирующее вещество в автоклавных материалах представлено крупными и мелкими хорошо окристаллизованными пластинками изогнутой формы, контактирующие связанные между собой и местами образующие пространственную сетку (см. рисунок 4.25, *б* и *в*). Эти сетки связывают между собой частицы песка и агрегаты, представляющие собой продукты взаимодействия между компонентами сырьевой смеси и имеющие более плотную микроструктуру. Синтезированные новообразования являются низкоосновными гидросиликатами кальция, в частности алюминийсодержащим тоберморитом $C_5S_6H_5$. Наблюдаются сетки из мелкодисперсных образований размером менее 100 нм и более крупных платин размером 100–500 нм и толщиной 10–20 нм (см. рисунок 4.25, *б* и *в*).

В неавтоклавных материалах наблюдается сплошная пространственная сетка из новообразований, представляющая собой тоберморит (см. рисунок 4.26, *б* и *в*). Однако в отличие от автоклавных материалов эти новообразования менее окристаллизованы и местами имеют гелеобразную форму. Образование тоберморита в неавтоклавных условиях свидетельствует о высокой реакционной способности сырья на основе латерита и вулканического пепла.

Для проведения элементного анализа автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов использовался метод ЭДС (рисунки 4.27–4.30). Основными элементами, входящими в состав цементирующего вещества, являются O, Si, Al и Ca.

На снимках, полученных в режим фиксации обратно рассеянных электронов (BSE) наблюдаются шарообразные образования (глобулы) (см. рисунок 4.27 и 4.29, области 1, 2, *б*, 8), имеющие высокую плотность. Данные объекты по результатам ЭДС анализа (см. рисунок 4.28 и 4.30) содержат преимущественно O, Si, Al и Ca. Очевидно, глобулы представляют собой смесь аморфных силикатов и алюминатов кальция и являются промежуточными соединениями, из которых формируются новообразования.

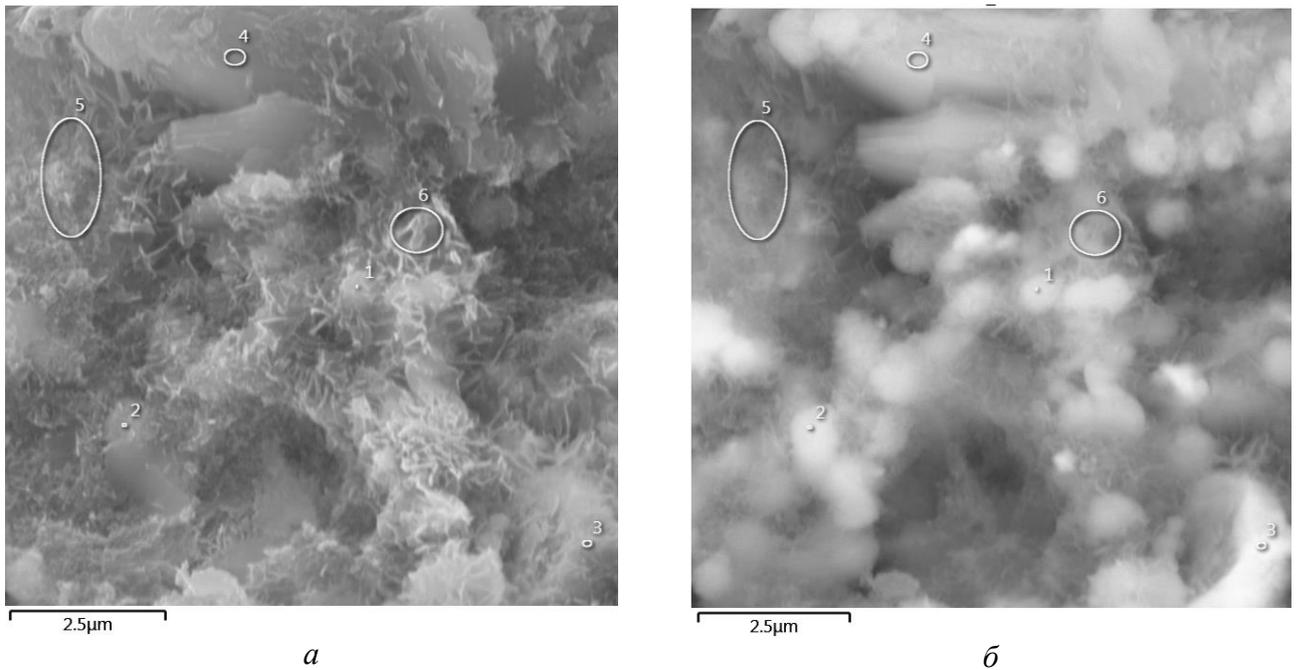


Рисунок 4.27 – Изображение SE (а) и BSE (б) автоклавных силикатных материалов с содержанием латерита 40 мас.%, вулканического пепла 25 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %, РЕМ: $\times 10000$

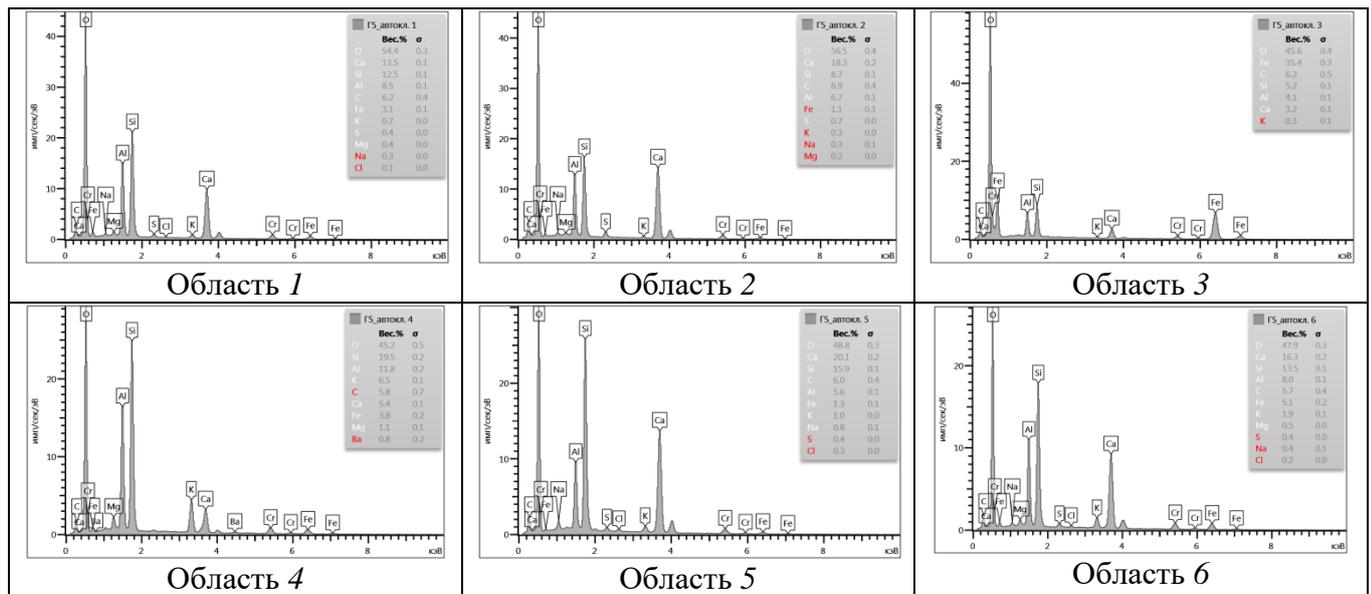


Рисунок 4.28 – Спектры ЭДС автоклавных силикатных материалов плотной структуры с содержанием латерита 40 мас.%, вулканического пепла 25 мас. %, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %,

Область с пространственной сеткой новообразований (см. рисунок 4.27 и 4.29, область 5, 6, 9, 10) по данным ЭДС также содержат O, Si, Al и Ca. Это подтверждает ранее полученные данные, что образуется алюминийсодержащий тоберморит. Возможно также образование гидрогранатов $\text{C}_3\text{AS}_x\text{H}_{(6-2x)}$ (см. рисунок 4.19–4.22, рефлексy 2,74–2,75 Å), что подтверждает данные ДТА (см. рисунок

4.23 и 4.24). По результатам расчета с использованием рентгенограмм содержание кремнезема в гидротермальных силикатах составляет 1,2–1,4 моль.

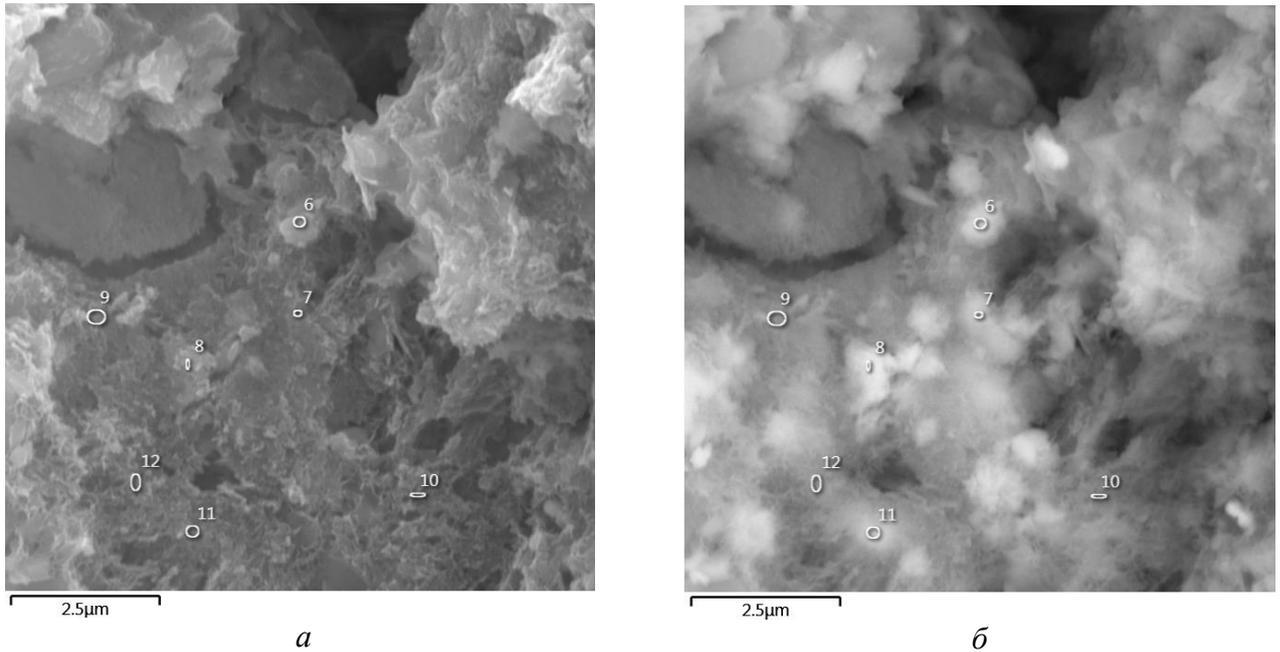


Рисунок 4.29 – Изображение SE (а) и BSE (б) неавтоклавных силикатных материалов с содержанием латерита 40 мас.%, вулканического пепла 25 мас.%, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %, РЕМ:×10000

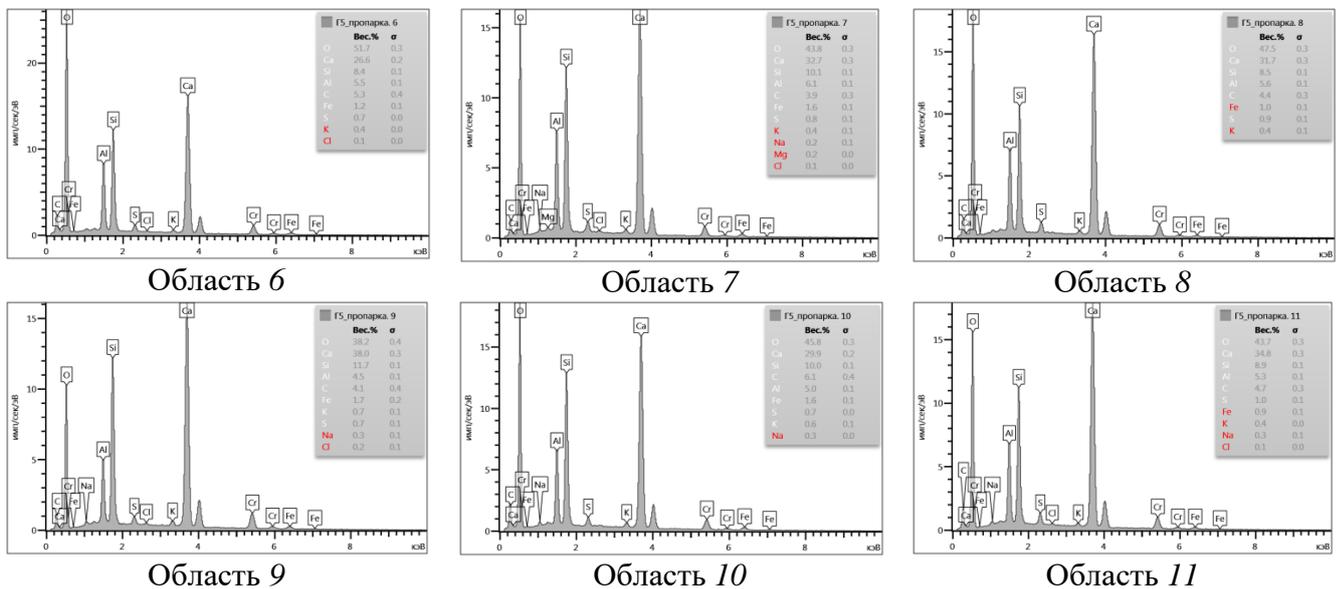


Рисунок 4.30 – Спектры ЭДС безавтоклавных силикатных материалов плотной структуры с содержанием латерита 40 мас.%, вулканического пепла 25 мас.%, $\text{CaO}_{\text{акт}}$ 10 %, РЕМ:×10000

В глобулах, наблюдаемых у автоклавных материалов (см. рисунок 4.27, б, область 1, 2 и 3) и в области новообразований (область 5 и б) наблюдается наличие железа (см. рисунок 4.28). У неавтоклавных материалов в глобулах (см. ри-

сунок 4.29, б, области 6, 7, 8 и 11) и в области новообразований (область 9 и 10) также присутствует железо (см. рисунок 4.30).

Вероятно, железо участвует в процессах фазообразования и формировании цементирующих соединений, входя в их состав. Одной из вероятных фаз является образование гидрогранатов состава $C_3A_{1-x}F_xS_zH_{6-2x}$, где $0 \leq x \leq 1$ и $0 \leq z \leq 3$. Железистые гидрогранаты обладают высокой дисперсностью и способствуют повышению механической прочности [122].

Вулканический пепел, являясь продуктом, образовавшимся при извержении вулкана, обладает высокой активностью, как за счет содержания рентгеноаморфного, стекловидного материала, так и за счет несовершенной кристаллической решетки полевых шпатов. За счет этого вулканический пепел в составе известково-глинистого вяжущего обеспечивает высокую активность сырьевой смеси к извести как при автоклавной обработке, так и, что особенно важно, в условиях пропарки. При этом ускоряются процессы фазообразования в сырьевой смеси на основе вяжущего из латерита и вулканического пепла. Кроме этого повышается содержание кремнезема в вяжущем и снижается соотношения Al_2O_3/SiO_2 менее 0,2 (см. главу 3.6), что обуславливает пригодность латерита для производства силикатных материалов.

Использование вулканического пепла в составе известково-глинистого вяжущего эффективно при использовании глинистых пород, которые не оказывают положительного влияния на прочность силикатных материалов гидротермального твердения. Например, использование вяжущего на основе глины месторождения Маэкель и латерита прочность силикатных материалов снижается (см. рисунок 4.1). При использовании в вяжущем дополнительно вулканического пепла прочность повышается в 1,5–2 раза (см. рисунок 4.2). Следовательно, вулканический пепел повышает эффективность использования известково-глинистого вяжущего для производства силикатных материалов плотной структуры гидротермального твердения. При этом существенно расширяется сырьевая база Государства Эритрея для производства силикатных материалов, так как появляется возможность использовать не пригодное для этих целей глинистое сырье.

Таким образом, латерит и вулканический пепел обеспечивают высокую реакционную способность сырьевой смеси при гидротермальной обработке. За счет породообразующих минералов вулканический пепел в составе известково-глинистого вяжущего обеспечивает высокую активность сырьевой смеси к извести как при автоклавной обработке, так и, что особенно важно, в условиях пропарки. При этом ускоряются процессы фазообразования в сырьевой смеси на основе вяжущего из латерита и вулканического пепла. В результате взаимодействия полиминерального сырья с известью образуются гидросиликаты кальция, алюминийсодержащий тоберморит и гидрогранаты. При этом формируется микроструктура цементирующего вещества, обеспечивающая высокие физико-механические показатели как автоклавных, так и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры.

4.7 Выводы

1. Изучена возможность использования глинистых пород месторождения Дэбуб, Маэкель, латерита и вулканического пепла в качестве сырья для получения автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры. Установлено положительное влияние на прочностные свойства автоклавных силикатных материалов известково-глинистого вяжущего на основе глины месторождения Дэбуб, соотношение Al_2O_3/SiO_2 для которого составляет 0,17. Глинистая порода месторождения Маэкель и латерит обладают повышенным значением соотношения Al_2O_3/SiO_2 , соответственно 0,319 и 0,320. Эти породы снижают прочность автоклавных силикатных материалов.

2. Показано, что повысить эффективность известково-глинистого вяжущего можно за счет дополнительного использования в его составе вулканического пепла. Такое комбинированное вяжущее оказывает положительное влияние на повышение прочности автоклавных и неавтоклавных материалов. Это связано с наличием активных породообразующих минералов вулканического пепла и повышением содержания кремнезема в вяжущем и, соответственно, снижением соотношения Al_2O_3/SiO_2 менее 0,2.

3. Получены математические модели влияния содержания глинистых пород месторождения Дэбуб, Маэкель, латерита, вулканического пепла и активной СаО на физико-механические характеристики автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры. Предложены рациональные составы на основе изученных глинистых пород для получения водостойких и атмосферостойких автоклавных и неавтоклавных материалов с пределом прочности при сжатии соответственно 18–25 МПа и 16–20 МПа. Рациональное содержание глины составляет 10–40 мас. %, вулканического пепла 25 мас. %, СаО_{акт} 6–10 %. За счет природной окраски глинистых пород можно получать окрашенные силикатные материалы.

4. Установлено, что использование латерита в составе сырьевой смеси обуславливает повышение радиационно-защитных свойств полученных силикатных материалов. Линейный коэффициент ослабления излучения для автоклавных материалов в зависимости от состава сырья на основе латерита и вулканического пепла повышаются на 19,6 и 20,5 % в сравнении с известково-песчаными материалами. Массовый коэффициент ослабления излучения также выше на 20,9 и 12,3 %. Для неавтоклавных материалов линейный коэффициент ослабления излучения повышается на 20,8 и 24,1 %. Массовый коэффициент ослабления излучения также выше на 21,9 и 15,1 %.

5. Изучено фазообразование в системе СаО–SiO₂–Al₂O₃–Fe₂O₃–H₂O на примере глинистых пород и вулканического пепла. Показано, что вулканический пепел, являясь породой, образовавшейся при извержении вулкана, обладает высокой активностью к извести в гидротермальных условиях, как за счет содержания рентгеноаморфной и стекловидной фазы, так и за счет несовершенной кристаллической решетки полевых шпатов. При этом образуются гидросиликаты кальция, в том числе алюминийсодержащий тоберморит и гидрогранаты. Синтез тоберморита в неавтоклавных материалах свидетельствует о высокой реакционной способности компонентов сырья на основе глины и вулканического пепла. При этом формируется микроструктура цементирующего вещества, обеспечивающая высокие физико-механические показатели как автоклавных, так и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры.

5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПЛОТНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ПОРОД ГОСУДАРСТВА ЭРИТРЕЯ

В Государстве Эритрея существует потребность в модернизации методов строительства с целью снижения стоимости жилья за счет совершенствования производственных технологий, использования экологически чистых материалов на основе местного сырья и диверсификации ассортимента продукции в соответствии с экономической и экологической политикой правительства.

Существующие традиционные жилые здания, особенно в субтропических регионах Эритреи, требуют регулярного обслуживания из-за воздействия влаги, а их строительство требует много труда и материалов. Хотя каждое из традиционных архитектурных сооружений имеет свою уникальную эстетическую привлекательность, они нуждаются в модернизации в соответствии с требованиями экологической безопасности и социально-экономическими потребностями современного общества. Решение этой проблемы возможно за счет производства строительных материалов на основе местного сырья, использование которого позволит получать дешевые силикатные материалы гидротермального твердения, что является хорошо зарекомендовавшей себя технологией в странах с развитой строительной отраслью.

5.1. Техничко-экономическая целесообразность применения алюмосиликатного сырья Государства Эритрея

Сырье для силикатных материалов определяет не только свойства конечной продукции, но и технико-экономическую эффективность их производства. Повышение эффективности производства в значительной мере зависит от использования местного сырья, что существенно сокращает затраты на транспорт.

Доступным источником сырья для силикатных материалов на территории Государства Эритрея являются широко распространенные алюмосиликатные по-

роды, в частности глинистые породы различного состава, песок и вулканический пепел. Наличие таких пород, пригодных по своему составу и строению в качестве сырья для силикатных материалов, позволит решить проблему производства качественных строительных материалов, которые можно использовать как для гражданского, так и промышленного строительства.

Использование вяжущего на основе глинистого сырья и вулканического пепла позволит получать автоклавные и неавтоклавные силикатные материалы плотной структуры с прочностью при сжатии соответственно 25 и 20 МПа. Количество глинистого компонента и вулканического пепла в сырьевой смеси, в зависимости от заданных свойств материала, составляет, соответственно, 10–40 и 5–25 мас. %. За счет природной окраски глин можно получать объемно окрашенные материалы.

Высокая дисперсность исходного сырья определяет возможность сокращения времени и, соответственно, энергозатрат при помоле вяжущего, при этом расход электроэнергии снижается на 8–10 %. Для производства неавтоклавных материалов расход пара за счет пропарки при атмосферном давлении сокращается на 15–20 % в сравнении с автоклавной обработкой. Кроме этого для неавтоклавных материалов снижаются затраты на обслуживание оборудования для гидротермальной обработки, так как в производственном процессе используются не автоклавы, работающие при высоком давлении, а пропарочные камеры.

Общие энергетические затраты при производстве неавтоклавных материалов, в сравнении с автоклавными, снижаются на 20–25 %.

5.2. Характеристика получаемых силикатных материалов

Силикатный кирпич (камень) – искусственный каменный строительный материал на основе кварцевого песка и вяжущего, полученного совместным помолом глинистой породы, вулканического пепла и негашеной извести.

Силикатный камень должен удовлетворять требованиям ГОСТ 379–2015 [123]. Силикатный камень размером 250×120×138 мм, силикатный кирпич размером 250×120×65 мм, средней плотностью 1765–1970 кг/м³. Водопоглощение кам-

ней и кирпича должно быть не менее 6 %. Изделия должны обладать плоскими гранями и прямолинейными, ребрами. Допустимые отклонения от указанных размеров изделий не должны превышать ± 2 мм по длине, толщине и ширине и +2 мм по параллельности граней [123]. Возможно получение высокопустотных изделий (до 14 пустот). Силикатные кирпичи и камни можно применять для кладки как несущих, так и ненесущих стен. Эксплуатационные свойства разработанных составов позволяют использовать кирпичи и камни для кладки наружных и внутренних стен. Изделия относят к группе негорючих строительных материалов по ГОСТ 30244–94 [124].

5.3 Технология производства силикатного кирпича с использованием алюмосиликатного сырья

Технология производства силикатного кирпича материалов на основе извести, глины, вулканического пепла и песка разрабатывалась на основе существующих производств силикатного кирпича. Сырьевая смесь должна готовиться таким образом, чтобы глинистая порода, вулканический пепел, негашеная известь и песок равномерно распределялись по всему объему смеси. Особенно тщательно должны быть перемешаны породообразующие минералы глин и вулканического пепла с известью для обеспечения максимального контакта между частицами.

Наиболее эффективно осуществлять совместный помол глины, вулканического пепла с негашеной известью в шаровых мельницах. При этом под действием шаров глина, вулканический пепел и известь размалываются в дисперсный порошок и хорошо перемешаются.

Основные положения технологической схемы производства автоклавных и неавтоклавных материалов (рис. 5.1) заключаются в следующем:

1. Глинистая порода, вулканический пепел и песок поступают из места добычи и помещаются в отдельные склады, оборудованные навесом. Известь также поступает в отдельный крытый склад.
2. При необходимости глинистая порода дробится в валковой дробилке.
3. Глинистая порода при высокой влажности предварительно высушивается в сушильном барабане.

4. Приготовление вяжущего производится путем совместного помола глинистой породы, вулканического пепла и негашеной извести в шаровой мельнице. Количественный состав компонентов вяжущего и состав сырьевой смеси рассчитываются исходя из заданных свойств получаемых силикатных материалов.

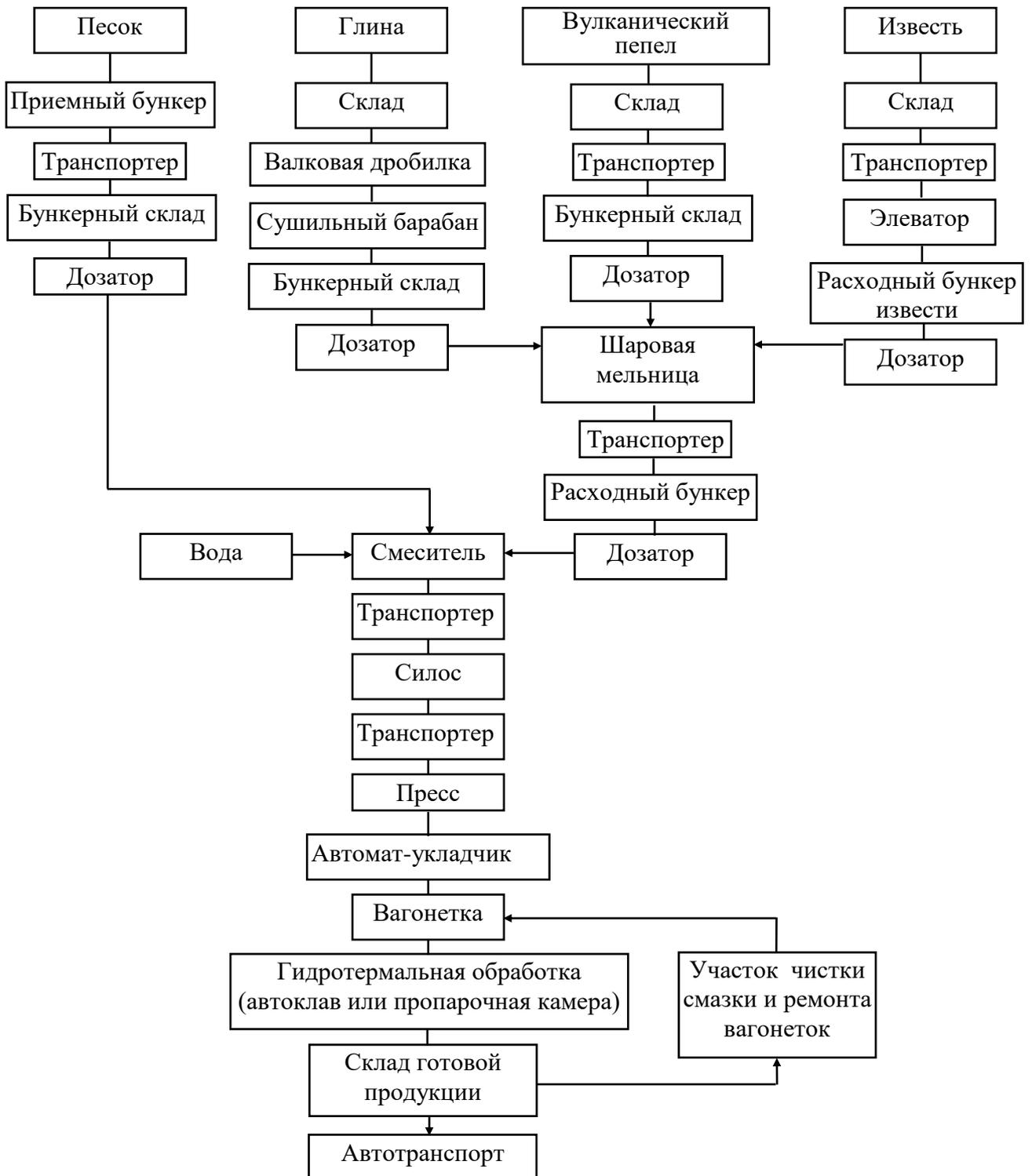


Рисунок 5.1 – Технологическая схема производства силикатных материалов плотной структуры

5. Полученная сырьевая смесь увлажняется необходимым количеством воды, перемешивается и направляется для гашения в силос. В силосах масса вылеживается в течение 3–4 час до полного окончания гашения извести.

6. После гашения из сырьевой смеси формуются сырцовые кирпичи под давлением 15–20 МПа.

7. Сформованные кирпичи помещаются на вагонетки, которые помещаются либо в автоклав, либо в пропарочную камеру.

8. Гидротермальная обработка автоклавных материалов проводится в автоклаве при давлении насыщенного пара 1 МПа по режиму 1,5+6+1,5 ч.

9. Пропарка неавтоклавных материалов проводится в пропарочной камере в среде насыщенного пара при температуре 95 °С режиму 1,5+9+1,5 ч.

10. После гидротермальной обработки изделия отправляются на склад готовой продукции и далее отгружаются потребителю. Весь цикл производства кирпича с момента добычи сырья до момента выпуска готовой продукции занимает менее суток.

Для внедрения результатов исследований разработаны следующие нормативные документы (приложение А–В):

– рекомендации по использованию алюмосиликатных пород Республики Эритрея в качестве сырья для производства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов;

– технологический регламент на организацию производства автоклавного силикатного кирпича с использованием вяжущего на основе глинистых пород и вулканического пепла Государства Эритрея;

– технологический регламент на организацию производства неавтоклавного силикатного кирпича с использованием вяжущего на основе глинистых пород и вулканического пепла Государства Эритрея.

Теоретические положения и результаты экспериментальных исследований, будут использованы при проведении геолого-разведочных работ по поиску и разведке месторождений алюмосиликатных пород для производства силикатных материалов и при подготовке технико-экономического обоснования на строитель-

ство завода по производству силикатного кирпича в Государстве Эритрея (приложение Г и Д).

Теоретические и экспериментальные результаты исследований используются в учебном процессе при подготовке: бакалавров и магистров по направлениям 18.03.01 «Химическая технология», 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», магистров по направлению 28.04.03 «Наноматериалы» в БГТУ им В.Г. Шухова (Российская Федерация), а также при подготовке инженеров по специальности «Гражданские инженеры» в Государстве Эритрея (приложение Е и Ж).

5.4 Расчет материальных затрат при производстве силикатного кирпича на основе алюмосиликатного сырья

Экономическую эффективность проводили путем сопоставления материальных затрат на выпуск традиционных известково-песчаных материалов с затратами на производство силикатных материалов на основе извести, глины, вулканического пепла и песка, что позволило оценить преимущества предлагаемых составов для производства силикатных материалов в Государстве Эритрея.

Экономическая эффективность организации производства силикатных материалов на основе алюмосиликатного сырья месторождений Государства определяется, главным образом, снижением зависимости от импорта сырья, используемого в строительстве и расширением внутреннего рынка строительных материалов, что является ключевым фактором для устойчивого роста строительной отрасли страны, а также снижением энергетических затрат на производство.

В государстве Эритрея в настоящее время силикатные материалы гидротермального твердения не производятся, поэтому оценку и сравнительную стоимость материальных затрат на производство известково-песчаных силикатных материалов и на основе алюмосиликатного сырья проводили с использованием данных Российской Федерации. Состав сырьевой смеси и стоимость сырьевых материалов была взята из открытых источников, в частности интернет-ресурсов. Расчеты

материальных затрат проводили на выпуск 1 тыс. шт. условного кирпича (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Материальные затраты при производстве силикатного кирпича

Наименование статей	Ед. изм.	Цена за ед., руб.	Затраты на 1 тыс. усл. кирпича						
			вяжущее на основе извести и песка		вяжущее на основе извести, глины и вулканического пепла				
			Кол-во	Сумма, руб.	автоклавные		неавтоклавные		
Кол-во	Сумма, руб.	Кол-во			Сумма, руб.				
Сырье и материалы									
а) песок	м ³	800	2,70	2160	1,485	1188	1,485	1188	
б) глинистый компонент	м ³	100	0	0	0,81	81	0,81	81	
в) вулканический пепел	м ³	100	0	0	0,27	27	0,27	27	
г) известь комовая	т	9000	0,455	4095	0,455	4095	0,455	4095	
д) вода	м ³	1000	0,30	300	0,30	300	0,30	300	
Теплоэнергия (пар) на технологические цели	м ³	1200	1,16	1392	1,16	1200	0,87	1044	
Электроэнергия на технологические цели	кВт·ч	6	40,00	240	36,00	216	36,00	216	
Σ				8187		7107		6951	

Для сырьевой смеси на основе алюмосиликатного сырья расчеты проводили с учетом замены песка глиной и вулканическим пеплом в количестве, соответственно, 30 и 10 мас. %. Снижение затрат на электроэнергию составляют 10 %. При производстве неавтоклавного кирпича, полученного путем пропарки при атмосферном давлении, приняли экономию теплоэнергии 25 %.

Полученные данные показывают, что материальные затраты на производство известково-песчаного кирпича в пересчете на 1 тыс. шт. условного кирпича составляют 8187 руб. Для автоклавного кирпича на основе алюмосиликатного сырья затраты составляют 7107 руб., что меньше на 13 %. Для неавтоклавного кирпича затраты составляют 6951 руб. При этом экономия составляет 15 %.

5.5 Выводы

1. Предложена технология производства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе алюмосиликатного сырья Государства Эритрея, включающая приготовление вяжущего на основе извести, глины и вулканического, смешение вяжущего с песком и водой, гашение смеси,

формование и автоклавную обработку или пропарку при 95 °С.

2. Экономическая эффективность организации производства силикатных материалов на основе алюмосиликатного сырья месторождений Государства Эритрея определяется, главным образом, снижением зависимости от импорта сырья, используемого в строительстве и расширением внутреннего рынка строительных материалов, что является ключевым фактором для устойчивого роста строительной отрасли страны, а также снижением энергетических затрат на производство. Снижение затрат на электроэнергию на помол вяжущего составляют 10 %. При производстве неавтоклавного кирпича, полученного путем пропарки при атмосферном давлении, экономия теплоэнергии составляет 25 %. Общие энергетические затраты при производстве неавтоклавных материалов сокращаются на 20 %. Общие материальные затраты сокращаются на 13 % и 15 % соответственно для автоклавного и неавтоклавного кирпича.

3. Для внедрения результатов исследований разработаны рекомендации по использованию алюмосиликатных пород Республики Эритрея в качестве сырья для производства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры, технологические регламенты на организацию производства автоклавного и неавтоклавного силикатного кирпича с использованием вяжущего на основе глинистых пород и вулканического пепла Государства Эритрея.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дополнены теоретические представления о гидротермальных процессах фазо- и структурообразования в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$, протекающих в условиях твердения силикатных материалов плотной структуры. Установлено, что алюмосиликатное сырье, представленное глинистыми породами и вулканическим пеплом, активно реагирует с известью в гидротермальных условиях, за счет чего формируются связующие вещества, обеспечивающие высокие эксплуатационные свойства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры. Полученные результаты исследований можно использовать для расширения поиска сырья на территории Государства Эритрея, пригодного для получения силикатных материалов.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение получения автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов гидротермального твердения плотной структуры на основе алюмосиликатных пород Государства Эритрея, заключающееся во введении в состав вяжущего на основе извести, глины и вулканического пепла (ВП). Установлено, что эффективность применения ВП повышается при использовании глинистых пород с низким содержанием SiO_2 , что связано с наличием активной аморфной фазы кремнезема в составе ВП, и, соответственно, снижением соотношения $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ менее 0,2. Такое композиционное вяжущее обеспечивает получение силикатных материалов плотной структуры с марками до М 200 (неавтоклавный) и до М 250 (автоклавный).

Выявлены особенности процессов структурообразования известково-глино-песчаной смеси с содержанием ВП в условиях пропарки и при автоклавировании, заключающиеся в том, что рентгеноаморфные фазы и минералы с дефектной кристаллической структурой, входящие в состав ВП, при взаимодействии с известью образуются гидросиликаты кальция, в том числе алюминийсодержащий тоберморит и гидрогранаты, что способствует формированию плотной микроструктуры цементирующего вещества и обеспечивает высокие физико-механические показатели силикатных материалов.

Установлены закономерности влияния содержания активного СаО, глинистых пород и вулканического пепла на предел прочности при сжатии, среднюю плотность, водопоглощение и коэффициент размягчения автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры, что позволяет определить рациональные составы сырья для получения силикатных материалов с заданными физико-механическими показателями с учетом минимизации материальных и энергетических затрат.

Разработаны предельные составы прессованных силикатных материалов гидротермального твердения на основе алюмосиликатного сырья Государства Эритрея, позволяющие получать пропаренные и автоклавные силикатные кирпичи и камни с прочностью на сжатие соответственно 16–20 МПа и 18–25 МПа, соответствующие классам средней плотности 2, маркам по прочности до М250, маркам по морозостойкости до 50, водопоглощению не ниже 6 %.

Предложена технологическая схема производства автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов плотной структуры на основе алюмосиликатного сырья Государства Эритрея, включающая подготовку вяжущего совместным помоллом извести, глины и вулканического пепла, смешение с песком, гашение сырьевой смеси, получение изделий методом полусухого прессования, автоклавную обработку или пропарку. Общие энергетические затраты при производстве неавтоклавных материалов сокращаются на 20 %. Общие материальные затраты сокращаются на 13 % и 15 % соответственно для автоклавного и неавтоклавного кирпича.

За счет природной окраски глинистых пород можно получать окрашенные силикатные материалы плотной структуры. Получены силикатные материалы на основе латерита и вулканического пепла, обладающие повышенными радиационно-защитными свойствами.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть *рекомендованы* при строительстве предприятий по производству автоклавных и неавтоклавных силикатных материалов на территории Государства Эритрея, а также для использования в учебном процессе при подготовке бакалав-

ров по направлению 18.03.01 «Химическая технология», 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» и магистров по направлению 28.04.03 «Нanomатериалы» в Российской Федерации и при подготовке инженеров по специальности «Гражданские инженеры» в Государстве Эритрея.

Перспективы дальнейших исследований целесообразно рассматривать в направлении расширения спектра природного сырья Государства Эритрея, пригодного для производства силикатных материалов гидротермального твердения, а также изучения влияния параметров гидротермальной обработки на свойства силикатных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Akadiri, P. O. Design of A Sustainable Building: A Conceptual Framework for Implementing Sustainability in the Building Sector / P. O. Akadiri, E. A. Chinyio, P. O. Olomolaiye // Buildings. – 2012. – Vol. 2. – №. 2. – P. 126-152.
2. Dang, G. Infrastructure Investments in Developing Economies / G. Dang, L. S. Pheng // Springer Science+Business Media Singapore. – 2015. – 247 p.
3. Tafesse, S. Analysis of the socio-economic and environmental impacts of construction waste and management practices / S. Tafesse, Y. E. Girma, E. Dessalegn // Heliyon. – 2022. – Vol. 8. – Issue 3. – P. 1-8.
4. Ding, G. K. C. Sustainable construction – The role of environmental assessment tools / G. K. C. Ding // Journal of Environmental Management. – 2008. – Vol. 86. – Issue 3. – P. 451-464.
5. Boadi, K. Urbanisation Without Development: Environmental and Health Implications in African Cities / K. Boadi, M. Kuitunen, K. Raheem, K. Hanninen // Environment, Development and Sustainability. – 2005. – Vol. 7. – P. 465-500.
6. Schroeder, H. Sustainable Building with Earth / H. Schroeder. – Switzerland : Springer, 2016. – P. 224/
7. Song, Y. Research on sustainability of building materials / Y. Song, H. Zhang. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Vol. 452. – Issue 2. – P. 1-5.
8. Gayevskaya, Z. Modern Building Materials and the Concept of «Sustainability Project» / Z. Gayevskaya, X. Rakova // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 941-944. – P. 825-830.
9. Kylili, A. Policy trends for the sustainability assessment of construction materials: A review / A. Kylili, P. A. Fokaides // Sustainable Cities and Society. – 2017. – Vol. 35. – P. 280-288.
10. Saka, N. Relationship between the economy, construction sector and imports in Nigeria / N. Saka, A. O. Olanipekun // International Journal of Construction Management. – 2023. – Vol. 23. – Issue 2. – P. 297-306.

11. Mendes, A. P. F. Industrialization in Sub-Saharan Africa and import substitution policy / A. P. F. Mendes, M. A. Bertella, R. F. Teixeira // *Brazilian Journal of Political Economy*. – 2014. – Vol. 34. – P. 120-138.

12. Suphian, R. Determination of Level of Imports in the Construction Industry in Tanzania / R. Suphian et al. // *Business Management Review*. – 2009. – Vol. 13. – №. 1. – P. 76-109.

13. Ugochukwu, S. An Appraisal of the Sources, Quantities and Prices of Imported Building Materials in Nigeria / C. U. Stanley, G. O. Ogbuagu, F. E. Okechukwu // *International Journal*. – 2014. – Vol. 2. – Issue 9. – P. 871-889.

14. Windapo, A. Examining The Trends in Building Material Prices: Built Environment Stakeholders' Perspectives / A. Windapo, K. Cattell // *Manage Construct Res Pract*. – 2012. – Vol. 1. – P. 187-201.

15. Oyelami, C. A. A review of the use of lateritic soils in the construction/development of sustainable housing in Africa: A geological perspective / C. A. Oyelami, J. L. Van Rooy // *Journal of African Earth Sciences*. – 2016. – Vol. 119. – P. 226-237.

16. Dosumu, O. S. An investigation of the barriers to the uptake of local materials in Africa: A literature review approach / O. S. Dosumu, C. Aigbavboa // *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*. – 2020. – Vol. 12. – Issue 4. – P. 365-371.

17. Schmidt, W. Innovation potentials for construction materials with specific focus on the challenges in Africa / W. Schmidt, M. Otieno, K.A. Olonade et al. // *RILEM Technical Letters*. – 2020. – Vol. 5. – P. 63-74.

18. Simeon, D. R. Barriers and improvement Strategies for the Use of Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Blocks in Building Projects / D. R. Simeon, O. J. Oladiran. – 2023. – Vol. 7. – № 1. – P. 61-73.

19. Rena, R. Challenges for Research Development in Eritrea-Some Observations / R. Rena // *Indian Journal of Millennium Development Studies*. – 2006. – Vol. 1. – №. 2. – P. 253-259.

20. Zazzaro, C. Towards a Chronology of the Eritrean Red Sea Port of Adulis (1st – Early 7th Century AD) / C. Zazzaro, E. Cocca, A. Manzo // *Journal of African Archaeology*. – 2014. – Vol. 12. – № 1. – P. 43-73.
21. Schmidt, P. Urban precursors in the Horn: Early 1st-millennium BC communities in Eritrea / P. Schmidt, M. Curtis // *Antiquity*. – 2015. – Vol. 75. – №. 290. – P. 849-859.
22. Salih, M. M. Critical review of recent development in fiber reinforced adobe bricks for sustainable construction / M. M. Salih, A. I. Osofero, M. S. Imbabi // *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2020. Vol. 14. – № 4. P. 839-854.
23. Oyelami, C. A. A review of the use of lateritic soils in the construction/development of sustainable housing in Africa: A geological perspective / C. A. Oyelami, J. L. Van Rooy // *Journal of African Earth Sciences*. 2016. Vol. 119. P. 226-237.
24. Madanat, S. Housing and Urban Development in Eritrea / S. Madanat et al. // *Ministry of Public Work*. – 2005. – P. 24-120.
25. Gurtner, M. Land Management in the Central Highlands of Eritrea: A Participatory Appraisal of Conservation Measures and Soils in Afdeyu and its Vicinity / M. Gurtner, C. Zewenghel, H. Eyassy, T. Zerai et al. – 2006. – 205 p.
26. Kordonouri, T. Asmara's architectural heritage as a bricolage: The case of St. Mary's Orthodox Cathedral / T. Kordonouri., B. Teame, E. Denison // *Curator: The Museum Journal*. – 2022. – Vol. 65. – Issue 3. – C. 643-661.
27. Tewolde, W. Amadir. Livelihood and Resource Management in an Eritrean Highland Community. A development baseline (Eritrea SLM Series 5)/ W. Tewolde, B. Dessalegn, R. Burtscher; B. Woldemichael / Bern, Switzerland: Geographica Bernensia. – 2005.
28. Volodchenko A. A., Vorontsov V. M., Cherepanova I. Effective Non-Autoclave Silicate Blocks of Casting Molding Process Based on Unconventional Aluminosilicate Raw Materials // *Materials Science Forum*. – Trans Tech Publications Ltd, 2020. – Vol. 974. – C. 55-60.

29. Ang, Z. J. U-Shaped Concrete Drain Containing Rice Husk Ash as Partial Cement Replacement by Using Non-Autoclaved Aerated Technique / Z. J. Ang, H. Mohd Noh // *Research in Management of Technology and Business*. – 2022. – Vol. 3. – №. 1. – P. 387-405.
30. Wittman, F.H. *Advances in Autoclaved Aerated Concrete* / F.H. Wittman // *Proceedings of the 3rd RILEM international symposium, Zürich*. – 1992. 374 p..
31. Jain, S. K. Review of Autoclaved Aerated Concrete: –Advantages and Disadvantages // *Proc. Natl. Conf. Adv. Struct. Mater. Methodol. Civ. Eng.(ASMMCE–2018)*. – 2018. – P. 35-39.
32. Lemougna, P. N. Laterite Based Stabilized Products for Sustainable Building Applications in Tropical Countries: Review and Prospects for the Case of Cameroon / P. N. Lemougna, F. Uphie, C. Melo, E. Kamseu, A.B. Tchamba // *Sustainability*. – 2011. – Vol. 3. – №. 1. – P. 293-305.
33. Elias, M. Nickel laterite deposits-geological overview, resources and exploitation / M. Elias // *Giant ore deposits: Characteristics, genesis and exploration. CODES Special Publication*. – 2002. – T. 4. – C. 205-220.
34. Dondeyne, S. Factors of soil formation: Climate / S. Dondeyne., S. Mantel, S. Deckers // *Encyclopedia of soils in the environment*. – Elsevier, 2022. – P. 1-10.
35. Eujine, G.N. Accelerated Subgrade Stabilization Using Enzymatic Lime Technique / G. N. Eujine, S. Chandrakaran, N. Sankar // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017. – Vol. 29. – № 9. – P. 1-5.
36. Ghosh, S. Laterites of the Bengal Basin: Characterization, Geochronology and Evolution / S. Ghosh, S. K. Guchhait. – Switzerland : Springer, 2020. – P. 129.
37. Gidigas, M. D. *Laterite Soil Engineering: Pedogenesis and Engineering Principles* / M. D. Gidigas. – Elsevier, 2012. – P. 554.
38. Da Costa, P. Y. D. Old landscapes, pre-weathered materials, and pedogenesis in tropical Africa: How can the time factor of soil formation be assessed in these regions? / P. Y. D. Da Costa, N. J. Pierre, M. Mvoubou, K. A. Togbe // *Quaternary International*. – 2015. – T. 376. – C. 47-74.

39. Ghosh, G. K. Red and Lateritic Soils and Agri-Productivity: issues and strategies / G. K. Ghosh // *Journal of the Indian Society of Soil Science*. – 2021. – T. 67. – P. 104-121.
40. Chandar, K. R. Utilization of Mine Waste / K. R. Chandar. – CRC Press, 2022. – P. 5-25.
41. Ranaweera, K. H. Construction and demolition waste repurposed for heavy metal ion removal from wastewater: a review of current approaches / K. H. Ranaweera M. Grainger, A. D. French, M. R. Mucalo // *International Journal of Environmental Science and Technology*. – 2023. – Vol. 20. – №. 8. – P. 9393-9422.
42. Adekunle, A. Analysis of Thermal and Electrical Properties of Laterite, Clay and Sand Samples and Their Effects on Inhabited Buildings in Ota, Ogun State, Nigeria / A. Adekunle, E. S. Ekanlem, K. E. Ibe, G. N. Ananso // *Journal of Sustainable Development Studies*. – 2014. – Vol. 6. – №. 2. – P. 391-412.
43. Xu, Y. Comparative study on thermal properties of undisturbed and compacted lateritic soils subjected to drying and wetting / Y. Xu, Y. Xu, Z. Zeng, D. Sun, Y. Lv // *Engineering Geology*. – 2020. – T. 277. – P. 105800.
44. Jackson, M. Mid-Pleistocene pozzolanic volcanic ash in ancient Roman concretes / M. Jackson, D. M. Deocampo, F. Marra, B. Scheetz // *Geoarchaeology: An International Journal*. – 2010. – Vol. 25. – №. 1. – P. 36-74.
45. Marra, F. Petro-chemical features and source areas of volcanic aggregates used in ancient Roman maritime concretes / F. Marra, M. Anzidei, A. Benini, E. D'Ambrosio // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2016. – Vol. 328. – P. 59-69.
46. Kirca, Ö. Ancient binding materials, mortars and concrete technology: history and durability aspects / Ö. Kirca // *Structural Analysis of Historical Constructions; Modena, C., Lourenço, PB, Roca, P., Eds.* – 2018. – P. 87-95.
47. Onoue, K. Shock-absorbing capability of lightweight concrete utilizing volcanic pumice aggregate / K. Onoue, H. Tamai, H. Suseno // *Construction and Building Materials*. – 2015. – Vol. 83. – P. 261-274.

48. Bahrami A., Nematzadeh M. Effect of rock wool waste on compressive behavior of pumice lightweight aggregate concrete after elevated temperature exposure / A. Bahrami, M. Nematzadeh // *Fire Technology*. – 2021. – Vol. 57. – № 12. – P. 1425-1456.
49. Sultan, M. A. Review of the flexural strength of lightweight concrete beam using pumice stone as of substitution partial coarse aggregate / M. A. Sultan, A. Gaus, R. Nakim, Imran // *International Journal of GEOMATE*. – 2021. – Vol. 21. – №. 85. – P. 154-159.
50. Lemougna, P. N. Review on the use of volcanic ashes for engineering applications / P. N. Lemougna, K-T. Wang, Q. Tang, A. N. Nzeukou et al. // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2018. – T. 137. – P. 177-190.
51. Amato, G. The use of pumice lightweight concrete for masonry applications / G. Amato, G. Campione, L. Cavaleri, G. Minafo // *Materials and structures*. – 2012. – Vol. 45. – № 5. – P. 679-693.
52. Straub, C. Volcanic tuff ash as quartz replacement in autoclaved aerated concrete: microstructure modification and performance enhancement / C. Straub, Bo Yuan, H. J. H. Brouwers, W. Chen // *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. – 2024. – Vol. 14. – № 2. – P. 1-10.
53. Cai, G. Volcano-related materials in concretes: a comprehensive review / G. Cai, T. Noguchi, H. Degee, J. Zhao // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2016. – Vol. 23. – № 8. – P. 7220-7243.
54. Djobo, N. Volcanic ash-based geopolymers/concretes: the current state of the art and perspectives / N. Djobo, A. Elimbi, H. T. Kouamo, S. Kumar // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2017. – Vol. 24. – № 5. – P. 4433-4446.
55. Brown, R. J. A review of volcanic ash aggregation / R. J. Brown, C. Bonadonna, A. J. Durant // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. – 2012. – Vol. 45-46. – P. 65-78.
56. Vogel, A. Reference data set of volcanic ash physicochemical and optical properties / A. Vogel, S. Diplas, F. J. Durant, A. S. Azar et al. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2017. – Vol. 122. – №. 17. – P. 9485-9514.

57. Aluas, A. Properties and occurrence of clay resources for use as supplementary cementitious materials: a paper of RILEM TC 282-CCL / A. Aluas, R. S. A. Reyes, Hanain, Irassar E.F. // *Materials and Structures*. – 2022. – Vol. 55. – №. 5. – P. 1-22.

58. Galán, E. Genesis of Clay Minerals / E. Galán, R. Ferrell // *Developments in Clay Science*. – Elsevier, 2013. – Vol. 5. – P. 83-126.

59. Tan, X. Evaluation of the particle sizes of four clay minerals / X. Tan, F. Liu, L. Hu, A. H. Reed, Y. Furukawa, G. Zhang // *Applied Clay Science*. – 2017. – Vol. 135. – P. 313-324.

60. Nelubova V. Effect of an Aluminosilicate Disperse Additive on Behaviors of Autoclave Silicate Materials / V. Nelubova, V. V. Strokova, R. Fediuk, M. Amran, N. Vatin, Y. Vasilev // *Buildings*. – 2021. – Vol. 11. – №. 6. – P. 1-24.

61. Payá, J. Application of alkali-activated industrial waste / J. Payá, Agrela F., J. R. Garcia // *New Trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete*. – Woodhead Publishing, 2019. – P. 357-424.

62. Zafar, M. S. Sustainable incorporation of waste granite dust as partial replacement of sand in autoclave aerated concrete / M. S. Zafar, U. Javed, R. A. Khushnood, A. Nawaz // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 250. – № 1. – P. 1-12.

63. Cai, L. The slurry and physical-mechanical performance of autoclaved aerated concrete with high content solid wastes: Effect of grinding process / L. Cai, X. Li, W. Liu, B. Ma // *Constr. Build. Mater.* 2019, – Vol. 218, – № 5. – P. 28–39

64. Лесовик. В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении. / В.С. Лесовик. – Белгород, 2016. – 288 с/

65. Володченко, А.Н. Силикатные материалы автоклавного твердения на основе алюмосиликатного сырья как фактор оптимизации системы «человек-материал-среда обитания» / А. Н. Володченко, В. С. Лесовик // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2014. № 3. С. 27-33.

66. Volodchenko, A. A. Energy saving raw materials for the production of new generation silicate materials / A. A. Volodchenko, V.S. Lesovik, A. N. Volodchenko, E.

S. Glagolev, G. G. Bogusevich // International Journal of Pharmacy and Technology. – 2016. – Vol. 8. – № 4. – P. 22673-22686.

67. Volodchenko, A. A. The Control of Building Composite Structure Formation Through the Use of Multifunctional Modifiers / A. A. Volodchenko, V. S. Lesovik, L. N. Zagorodnjuk, A. N. Volodchenko, A. A. Kuprina // Research Journal of Applied Sciences. – 2016. – Vol. 10. – № 12. – P. 931-936.

68. Володченко, А. Н. Силикатный бетон на нетрадиционном сырье / А. Н. Володченко, Р. В. Жуков, Ю. В. Фоменко, С. И. Алфимов // Бетон и железобетон. – 2006. – № 6. – С. 16–18.

69. Володченко, А. Н. Перспективы расширения номенклатуры силикатных материалов автоклавного твердения / А. Н. Володченко. Н., В. С. Лесовик // Строительные материалы. – 2016. – № 9. – С. 34-37.

70. Володченко, А. Н. Особенности технологии получения конструкционно-теплоизоляционных ячеистых бетонов на основе нетрадиционного сырья / А. Н. Володченко, В. В. Строкова // Вестник БГТУ им. ВГ Шухова. – 2017. – № 1. – С.138-143.

71. Володченко, А. Н. Разработка состава теплоизоляционных материалов автоклавного твердения на основе глинистого сырья / А. Н. Володченко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 2. – С. 162–167.

72. Володченко, А. Н. Разработка научных основ производства силикатных автоклавных материалов с использованием глинистого сырья / А. Н. Володченко, В. В. Строкова // Строительные материалы. – 2018. – № 9. – С. 25-31.

73. Лесовик, В.С. Повышение эффективности производства строительных материалов с учетом генезиса горных пород / В. С. Лесовик. – М.: Изд-во АСВ, 2006. – 526 с.

74. Федин, А. А. Научно-технические основы производства и применения силикатного ячеистого бетона / А. А. Федин. М.: ГАСИС. 2002. 264 с.

75. Hust'avova, J. Monitoring the effect of quartz-sand replacement by amorphous-silica raw material on the microstructure of calcium silicate composites / J.

Hust'avova, V. Cenry, R. Drochytka // *Materials in technologies.* – 2020. – Vol. 54. – № 1. – P. 129-134.

76. Shams, T. Production of autoclaved aerated concrete with silica raw materials of a higher solubility than quartz part I: Influence of calcined diatomaceous earth / T. Shams, S. Seifert, G. Schober, D. Heinz // *Construction and Building Materials.* – 2020. – Vol. 272. – № 1. – P. 1-8.

77. Pachideh, G. Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and water absorption of autoclaved aerated concrete / G. Pachideh, M. Gholhaki // *Journal of Building Engineering.* – 2019. – Vol. 26. – P. 1-7.

78. Walczak, P. Autoclaved aerated concrete based on fly ash in density 350 kg/m³ as an environmentally friendly material for energy-efficient constructions / P. Walczak, P. Szymański, A. Różycka // *Procedia Engineering.* – 2015. – Vol. 122. – P. 39-46.

79. Song, Y. Effect of the Ca-to-Si ratio on the properties of autoclaved aerated concrete containing coal fly ash from circulating fluidized bed combustion boiler / Y. Song, C. Guo, J. Qian, T. Ding // *Construction and Building Materials.* – 2015. – Vol. 83. – P. 136-142.

80. Walczak, P. et al. Utilization of Waste Glass in Autoclaved Aerated Concrete / P. Walczak, J. Malolepszy, M. Reben, P. Szymanski // *Procedia Engineering.* – 2015. – Vol. 122. – P. 302-309.

81. Adedeji, I. Nigerian Urbanization and the Significance of Affordable Housing / I. Adedeji // *Journal of Service Science and Management.* – 2023. – Vol. 16. – P. 351-368.

82. Akinsulire, A. A. Sustainable development in affordable housing: Policy innovations and challenges / A. A. Akinsulire, C. Idemudia, A. Okwandu, O. Iwuanwu // *Magna Scientia Advanced Research and Reviews.* – 2024. – Vol. 11. – №. 2. – P. 90-104.

83. Singh, V. S. Sustainable Housing: Balancing Environment with Urban Growth in India / V. S. Singh. S., D. N. Pandey // *RSPCB Occasional paper.* – 2012. – №. 6. – P. 21-22.

84. Baqutayan, S. M. S. Describing the Need for Affordable Livable Sustainable Housing Based on Maslow's Theory of Need / S. M. S. Baqutayan, A. S. Ariffin, F. Raji // *Mediterranean Journal of Social Sciences*. – 2015. – Vol. 6. – №. 3. – P. 353 – 357.
85. Mehdipanah, R. Without Affordable, Accessible, and Adequate Housing, Health Has No Foundation // *Milbank Quarterly*. – 2023. – Vol. 101. – № 1. – P. 419-443.
86. Zeremariam, T. K. An evaluation of environmental impact assessment in Eritrea / T. K. Zeremariam, N. Quinn // *Impact Assessment and Project Appraisal*. – 2007. – Vol. 25. – №. 1. – C. 53-63.
87. Habtetsion, S. Energy sector reform in Eritrea: initiatives and implications / S. Habtetsion, Z. Tsighe // *Journal of Cleaner Production*. – 2007. – Vol. 15. – №. 2. – C. 178-189.
88. Yhdego, M. Environmental Impact Assessment Systems in Eritrea: A Critical Review / M. Yhdego. – 2024. – P. 1-19.
89. Madanat, S. Housing and Urban Development in Eritrea / S. Madanat et al. // *Ministry of Public Work*. – 2005. – P. 24-120.
90. Abbate, E. Geology and Geomorphological Landscapes of Eritrea E. Abbate, P. Billi // *Landscapes and Landforms of the Horn of Africa: Eritrea, Djibouti, Somalia*. – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 41-79.
91. Schwarz, T. Weathering Surfaces, Laterite-Derived Sediments and Associated Mineral Deposits in North-East Africa / T. Schwarz, K. Germann // *Palaeoweathering, Palaeosurfaces and Related Continental Deposits*. – 2009. – P. 367-390.
92. Asmara Heritage Project (February 2017). Asmara: An African Modernist City (Eritrea), ICOMOS, 2016.
93. Denison, E. Asmara: Africa's Modernist City (UNESCO World Heritage Nomination) / E. Denison, M. Teklemariam, D. Abraha // *The Journal of Architecture*. – 2017. – Vol. 22. – № 1. – P. 11-53.
94. Vaziri B. S. Properties of Compressed Stabilized Earth Blocks (CSEB) For Low-Cost Housing Construction: A Preliminary Investigation / B. S. Vaziri, Z. A.

Lawan, M. Mala // International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 4. – № 2. – P. 39-46.

95. Ямб Эммануэль. Строительные материалы на основе латеритных пород Камеруна и цемента / Ямб Эммануэль, Чему Жилберт, В.С. Лесовик, А.Н. Володченко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2010. – № 1. – С. 27-33.

96. Володченко, А.Н. К проблеме использования попутно добываемого сырья угольных месторождений для производства автоклавных силикатных материалов / А.Н. Володченко, Е.И. Ходыкин, В.В. Строкова // Технологии бетонов. – Москва: ООО «Композит XXI век», 2013. – № 6(83). – С. 40–41.

97. ГОСТ 9179–2018. Известь строительная. Технические условия. – Введ. 01.05.2019. – М. : Стандартиформ, 2019. – 12 с.

98. ГОСТ 512320–98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. – Введ. 17.12.98. – М. : Стандартиформ, 2008. –18 с.

99. ГОСТ 6139-2003. Песок для испытаний цемента. Технические условия. Введ. 01.09.2004. – М.: Госстрой России ФГУП ЦПП. 2004. – 17 с.

100. ГОСТ 22688-2018. Известь строительная. Методы испытаний. – Введ. 01.05.2019. – М.: Стандартиформ, 2018. – 16 с.

101. ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Введ. 01.04.2016. – М.: Стандартиформ, 2016. – 19 с.

102. Михеев, В.И. Рентгенографический определитель минералов / В.И. Михеев. – М.: Госгеолтехиздат, 1957. – 868 с.

103. Горшков, В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В. С. Горшков, В. В. Тимашев, В. Г. Савельев. – М., 1981. – 334 с.

104. ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Введ. 01.07.2013. – М. : Стандартиформ, 2013. – 36 с.

105. ГОСТ 7025-91. Кирпич и камни керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости. – Введ. 01.07.91. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 17 с.

106. Гхебремедхин, К.В. Алюмосиликатное сырье государства Эритрея для производства силикатных материалов / К.В. Гхебремедхин, А.Н. Володченко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 8–23.

107. Rena, R. Challenges for Research Development in Eritrea-Some Observations / R. Rena // *Indian Journal of Millennium Development Studies*. – 2006. – Т. 1. – №. 2. – С. 253-259.
108. Haldal, T. Building-stone resources in Eritrea: results from introductory work in the NGU-EGS co-operation programme / T. Haldal, E. Yohannes. – 2000. – P. 183-188.
109. Ahmed, A. H. Mineral Deposits and Occurrences in the Arabian–Nubian Shield / A. H. Ahmed. – Springer Nature, 2022. – 520 P.
110. Drury, S. A. Hydrogeological potential of major fractures in Eritrea / S. A. Drury, R. J. Peart, M. E. A. Deller // *Journal of African Earth Sciences*. – 2001. – Vol. 32. – №. 2. – P. 163-177.
111. Mekonnen, G. I. The Mineral Potential and Mining activities of Eritrea, and Fe-oxide and Sericite alteration mapping using the remote sensing and GIS techniques / G. I. Mekonnen // *An Internship Program at the Japan Space Systems*. – 2021. – P. 1-25.
112. Perelló, J. A minimum Thanetian (Paleocene) age for the African Surface in the Eritrean highlands, Northeast Africa / J. Perelló, B. Humberto, G. Alfredo. // *Journal of African Earth Sciences*. – 2020. – Vol. 164. – P. 103782.
113. Andrews Deller, M. E. Facies discrimination in laterites using Landsat Thematic Mapper, ASTER and ALI data—examples from Eritrea and Arabia / M. E. Andrews Deller // *International Journal of Remote Sensing*. – 2006. – Vol. 27. – №. 12. – P. 2389-2409.
114. Ekosse, G. I. E. Kaolin deposits and occurrences in Africa: Geology, mineralogy and utilization / G. I. E. Ekosse // *Applied Clay Science*. – 2010. – Vol. 50. – №. 2. – P. 212-236.
115. Arshad, M. A. Physical tests for monitoring soil quality / M. A. Arshad, B. Lowery, B. Grossman // *Methods for assessing soil quality*. – 1997. – Vol. 49. – P. 123-141.
116. Августиник, А. И. Керамика / А. И. Августиник. – Л.: Стройиздат, 1975. – 592 с.
117. Володченко, А. Н. Научно-технологические основы использования

глинистого сырья для производства силикатных автоклавных материалов [Текст]: дис... д-р техн. наук: 05.16.09: защищена 21.05.18: утв. 13.12.18 / Володченко Анатолий Николаевич. – Белгород, 2018. – 417 с.

118. Володченко, А.Н. Повышение эффективности производства автоклавных материалов / А.Н. Володченко, В.С. Лесовик // Известия вузов. Строительство. – 2008. – № 9. – С. 10-16.

119. Володченко, А.Н. Силикатные автоклавные материалы с использованием нанодисперсного сырья / А.Н. Володченко, В.С. Лесовик // Строительные материалы. – 2008. – № 11. – С. 42-43.

120. Гхебремедхин, К.В. Влияние алюмосиликатного сырья на повышение качества автоклавных силикатных материалов / К.В. Гхебремедхин, А.Н. Володченко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 6. С. 8–18.

121. Володченко, А.А. Неавтоклавные силикатные материалы на основе алюмосиликатного сырья Государства Эритрея / А.А. Володченко, В.С. Лесовик, К.В. Гхебремедхин // Известия вузов. Строительство. 2025. № 9. С. 28–41.

122. Торопов, Н.А. Химия цементов / Н.А. Торопов. – М.: Промстройиздат, 1956. – 271 с.

123. ГОСТ 379–2015. Кирпич, камни, блоки и плиты перегородочные силикатные. Общие технические условия. Введ. 01.10.2015. – М.: Изд-во «СТАНДАРТИНФОРМ», 2015. – 19 с.

124. ГОСТ 30244–94. Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть. – Введ. 1996–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 19 с.

Титульный лист рекомендации по использованию алюмосиликатных пород
Республики Эритрея для производства автоклавных и пропаренных
силикатных материалов

УТВЕРЖДАЮ

проректор по научной и инновационной
деятельности Белгородского государственного
технологического университета им. В.Г. Шухова

Т. М. Давыденко



« 29 » 12 20 25 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ

по использованию алюмосиликатных пород Государства Эритрея
для производства автоклавных и пропаренных силикатных материалов

РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель разработки,
д-р техн. наук, доцент

А.Н. Володченко

« 29 » 12 20 25 г.

Ответственный исполнитель:

аспирант

К. В. Гхебремедхин

« 29 » 12 20 25 г.

Титульный лист технологического регламента на организацию производства автоклавного силикатного кирпича с использованием вяжущего на основе глинистых пород и вулканического пепла Государства Эритрея

УТВЕРЖДАЮ

проректор по научной и инновационной
деятельности Белгородского государственного
технологического университета им. В.Г. Шухова



Т.М. Давыденко

12 20 25 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ

на организацию производства автоклавного силикатного кирпича
с использованием вяжущего на основе глинистых пород
и вулканического пепла Государства Эритрея

РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель разработки,
д-р техн. наук, доцент

_____ А.Н. Володченко

« 29 » 12 20 25 г.

Ответственный исполнитель:

аспирант

_____ К. В. Гхебремедхин

« 29 » 12 20 25 г.

Титульный лист технологического регламента на организацию производства пропаренного силикатного кирпича с использованием вяжущего на основе глинистых пород и вулканического пепла Государства Эритрея

УТВЕРЖДАЮ

проректор по научной и инновационной

деятельности Белгородского государственного
технологического университета им. В.Г. Шухова



Т.М. Давыденко

« 29 » 12 20 25 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ

на организацию производства пропаренного силикатного кирпича
с использованием вяжущего на основе глинистых пород
и вулканического пепла Государство Эритрея

РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель разработки,

д-р техн. наук, доцент

 А.Н. Володченко
« 29 » 12 20 25 г.

Ответственный исполнитель:

аспирант

 К. В. Гхебремедхин
« 29 » 12 20 25 г.

Справка о проведении геолого-разведочных работ по поиску и разведке месторождений алюмосиликатных пород для производства силикатных материалов

دولة اريتريا
 وزارة الاراضي و المياه و البيئة
 دولة اريتريا
 وزارة الاراضي و المياه و البيئة
 THE STATE OF ERITREA
 Ministry of Land, Water & Environment
 12/10/2008
 التاريخ
 12/10/2008
 رقم السجل
 123291
 Ref. No.

REFERENCE

The possibility of using clay rocks and volcanic ash to produce silicate materials, as established in the dissertation work completed by graduate student Ghebremedhin Kidane Welday for the degree of Candidate of Technical Sciences, entitled "Silicate Materials Based on Natural Raw Materials of the State of Eritrea," is of great importance for the development of the building materials industry in the State of Eritrea. The theoretical principles and experimental results obtained during the dissertation will be used in geological exploration to find and explore aluminosilicate rock deposits for the production of silicate materials.



126712
 123291
 125887
 P.O. Box 976
 Asmara - Eritrea

دولة اريتريا
 وزارة الاراضي و المياه و البيئة
 دولة اريتريا
 وزارة الاراضي و المياه و البيئة
 THE STATE OF ERITREA
 Ministry of Land, Water & Environment
 12/10/2008
 التاريخ
 12/10/2008
 رقم السجل
 123291
 Ref. No.

СПРАВКА

Установленная в рамках выполненной диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук аспирантом Гхемемедхином Кидане Велдаем на тему «Силикатные материалы на основе природного сырья Государства Эритрея» возможность использования глинистых пород и вулканического пепла для получения силикатных материалов имеет большое значение для развития промышленности строительных материалов Государства Эритрея. Теоретические положения и результаты экспериментальных исследований, выполненных при подготовке диссертационной работы, будут использованы при проведении геолого-разведочных работ по поиску и разведке месторождений алюмосиликатных пород для производства силикатных материалов.



126712
 123291
 125887
 P.O. Box 976
 Asmara - Eritrea

Протокол о намерениях использования результатов исследований при подготовке технико-экономического обоснования на строительство завода по производству силикатного кирпича в Государстве Эритрея



 دولة إرتريا
 وزارة الأشغال العامة
 أسمرا

ሃገሩ ኢርትራ
 ሚኒስቴር ሀገሩ
 አሰሪዎች

THE STATE OF ERITREA
 Ministry of Public Works
 Asmara

ስጦታ:-
 Date: 03 October 2025
 ቁጥር:-
 RefNo. MO/015/76/25

PROTOCOL OF INTENT

In connection with the implementation of the national program for the modernization and development of the construction materials production in the State of Eritrea, the search for effective solutions to improve the quality of construction materials through the use of local raw materials is a pressing issue.

As part of his dissertation for the degree of Candidate of Engineering Sciences, graduate student Ghebremedhin Kidane Welday completed his thesis on "Silicate Materials Based on Natural Raw materials of the State of Eritrea" supervised by Doctor of Engineering Sciences A.N. Volodchenko, it was established that clay rocks and volcanic ash from deposits in the state of Eritrea are suitable as raw materials for the production of silicate materials. A technology for producing silicate materials using autoclave technology and steaming has been developed.

The theoretical principles and results of experimental studies conducted in preparation for this dissertation are recommended for use in preparing a feasibility study for the construction of sand-lime brick production plant in the State of Eritrea.



ላዊት ክብራሽ !!
 ለጠቅላይ ሚኒስትር
 ለምክርቤት ሚኒስቴር
 ለምክርቤት ሚኒስቴር
 ABRABA ASPANA

Tel:291-1- 123477 P.O. Box 841 Fax: 291-1-120661



 دولة إرتريا
 وزارة الأشغال العامة
 أسمرا

ሃገሩ ኢርትራ
 ሚኒስቴር ሀገሩ
 አሰሪዎች

THE STATE OF ERITREA
 Ministry of Public Works
 Asmara

ስጦታ:-
 Date: 03 October 2025
 ቁጥር:-
 RefNo. MO/015/77/25

ПРОТОКОЛ О НАМЕРЕНИЯХ

В связи с реализацией национальной программы модернизации и развития производства строительных материалов в Государстве Эритрея, актуальной является задача поиска эффективных решений с целью повышения качества строительных материалов за счет использования местного сырья.

В рамках выполненной диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук аспирантом Гхэбремедхиным Кидане Велдаем на тему «Силикатные материалы на основе природного сырья Государства Эритрея», научный руководитель д-р техн. наук Володченко А.Н. установлено, что глинистые породы и вулканический пепел месторождений Государства Эритрея пригодны в качестве сырья для получения силикатных материалов. Разработана технология получения силикатных материалов с использованием автоклавной технологии ипропарки.

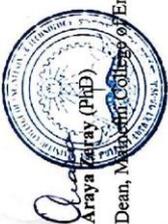
Теоретические положения и результаты экспериментальных исследований, выполненных при подготовке диссертационной работы, рекомендуется использовать при подготовке технико-экономического обоснования на строительство завода по производству силикатного кирпича в Государстве Эритрея.

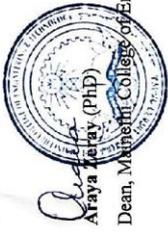


ላዊት ክብራሽ !!
 ለጠቅላይ ሚኒስትር
 ለምክርቤት ሚኒስቴር
 ለምክርቤት ሚኒስቴር
 ABRABA ASPANA
 Minister

Tel:291-1- 123477 P.O. Box 841 Fax: 291-1-120661

Справка о внедрении результатов научно-исследовательской работы
в учебный процесс инженерно-технологического колледжа Мейнфхи

<p>ሃዲ ሊርጉራ ኮሌጅ ምህንድስና ቴክኖሎጂ ማድ ነፍክ</p>	<p>STATE OF ERITREA COLLEGE OF ENGINEERING & TECHNOLOGY MAI NEFHI</p>
	
<p>Ref. No. <u>PE/EE/Arch. 864/05</u></p>	<p>Date <u>20/10/2005</u></p>
<p>CERTIFICATE</p>	
<p>On the implementation of research results in to the educational process of Mainefhi College of Engineering and Technology</p>	
<p>Theoretical provisions and results of experimental studies obtained during the dissertation work for the degree of Candidate of Technical Sciences by postgraduate student Ghebremedhin Kidane Welday on the topic "Silicate materials based on natural raw materials of the State of Eritrea," scientific supervisor Dr. of Technical Sciences Volodchenko A.N., are used in the educational process for training engineers in the specialty "civil engineering." The volume of classes conducted during the academic year is 16 hours of lectures and laboratory sessions.</p>	
 <p>Araya Welday (PhD) Dean, Mainefhi College of Engineering and Technology</p>	

<p>ሃዲ ሊርጉራ ኮሌጅ ምህንድስና ቴክኖሎጂ ማድ ነፍክ</p>	<p>STATE OF ERITREA COLLEGE OF ENGINEERING & TECHNOLOGY MAI NEFHI</p>
	
<p>Ref. No. <u>PE/EE/Arch. 865/05</u></p>	<p>Date <u>20/10/2005</u></p>
<p>СПРАВКА</p>	
<p>о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс Инженерно-технологического колледжа Мейнфхи</p>	
<p>Теоретические положения, и результаты экспериментальных исследований, полученные при выполнении диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук аспирантом Гhebremedhin Kidane Welday на тему «Силикатные материалы на основе природного сырья Государства Эритрея», научный руководитель д-р техн. наук Володченко А.Н. используются в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности «гражданские инженеры». Объем проводимых занятий в учебном году составляет 16 час лекционных и лабораторных занятий.</p>	
 <p>Araya Welday (PhD) Dean, Mainefhi College of Engineering and Technology</p>	